

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-1-22>

УДК 620.92:631.371

О. Г. Скляр¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-0456-2479

Р. В. Скляр¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-1547-5100

С. В. Сиротюк², канд. техн. наук

ORCID: 0000-0001-9966-6299

С. В. Коробка², канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-4717-509X

О. С. Пушка³, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-6481-8536

¹ Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного² Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Гжицького³ Уманський національний університет

e-mail: radmila.skliar@tsatu.edu.ua

АНАЛІЗ НАЙПОШИРЕНІШИХ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ У РОБОТІ БІОГАЗОВИХ УСТАНОВОК

Анотація. У статті досліджено можливості впровадження енергозберігаючих технологій у біогазові установки, що переробляють органічні відходи аграрного сектору. Проаналізовано основні джерела енергетичних втрат та наведено практичні рішення, що здатні знизити власне енергоспоживання установок, зокрема системи рекуперації тепла, оптимізацію перемішування субстратів, покращення теплоізоляції, енергоефективні методи газоочищення та сучасні цифрові системи керування. Висвітлено практичні аспекти впровадження цих технологій і їх вплив на підвищення продуктивності, стабільності ферментаційних процесів і загальної рентабельності біогазових комплексів.

Ключові слова: біогаз, рекуперація, теплоізоляція, перемішування, дигестат, очищення, когенерація, субстрат.

Постановка проблеми. Біогазові установки, які посідають ключове місце у сучасній системі переробки органічних відходів агропромислового комплексу, водночас залишаються технологічно та енергетично вразливими об'єктами. Незважаючи на високий потенціал виробництва відновлюваної енергії, значна частина біогазових комплексів демонструє високий рівень власного енергоспоживання, що здебільшого сягає 20–30 % від виробленої електроенергії [1]. Такий дисбаланс суттєво знижує економічну ефективність, подовжує термін окупності проєктів, а інколи робить їх технологічно неефективними або навіть збитковими для аграрних підприємств.

Проблема ускладнюється тим, що більшість органічних субстратів тваринництва та птахівництва мають складні реологічні характеристики, високу вологість, схильність до піноутворення, нерівномірність складу та значний вміст інгібуючих компонентів. Це вимагає інтенсивного перемішування, стабілізації температури, корекції навантаження та застосування механізмів очищення біогазу – процесів, які споживають істотні обсяги енергоресурсів [2–5]. На практиці енергетичні втрати часто зумовлені також неефективною теплоізоляцією, відсутністю рекуперації тепла, використанням застарілого обладнання та недостатнім рівнем автоматизації й контролю [6].

В умовах зростання вартості енергоносіїв, посилення екологічних вимог та переходу до принципів циркулярної економіки проблема впровадження енергозберігаючих технологій у біогазові установки набуває стратегічного значення. Низька енергоефективність обмежує конкурентоспроможність біогазової галузі, стримує розвиток малих і середніх фермерських



станцій та знижує загальну результативність переробки органічних відходів [7]. Отже, актуальним є вивчення можливостей застосування сучасних енергозберігаючих технологій, їх практичне оцінювання з позиції експлуатаційного досвіду та формування рекомендацій щодо оптимізації роботи біогазових комплексів різного масштабу.

Аналіз останніх досліджень. Проблематика підвищення енергоефективності біогазових установок активно розглядається у світових наукових дослідженнях, особливо в контексті розвитку циркулярної економіки та декарбонізації сільського господарства. У фундаментальній роботі Weiland [8] підкреслено, що ефективність біогазових комплексів значною мірою визначається оптимізацією внутрішніх енергетичних потоків, зокрема перемішування, підігріву субстрату та очищення біогазу. Питання енергетичної політики та необхідності зниження власного енергоспоживання біогазових установок детально проаналізовано Budzianowski і Postawa [9], які наголошують, що енергоефективність є ключовою умовою життєздатності біоенергетичних проєктів у сучасних ринкових умовах.

Оцінку енергетичної продуктивності біогазових систем у повному життєвому циклі подано у роботах Berglund і Börjesson [10], де показано, що некоректна організація перемішування та теплового режиму може підвищувати витрати енергії на 20–35 %. Ґрунтовний техніко-науковий аналіз ефективності біогазових технологій наведено у звіті DBFZ [11], де особливо відзначено потенціал систем рекуперації тепла як одного з найрезультативніших інструментів зниження енергоспоживання ферментерів.

Дослідження Angelidaki і Sanders [12] акцентують увагу на впливі реологічних властивостей субстратів на енергетичні витрати, оскільки в'язкі органічні матеріали вимагають інтенсивнішого перемішування, що підвищує навантаження на електроприводи. Своєю чергою Scarlet, Dallemand і Fahl [13] відзначають значний прогрес у Європі щодо модернізації біогазових установок, зокрема завдяки впровадженню частотно-регульованих приводів, що забезпечують оптимізацію роботи мішалок і насосів.

Енергоефективні методи очищення та апгрейдингу біогазу отримали широке висвітлення в огляді T. Stanzin та співавт. [14], які доводять, що мембранні системи та біологічна десульфурізація демонструють найнижчі енергозатрати серед наявних технологій. Дослідження Zehnder та ін. [15] підкреслюють глобальні виклики анаеробної переробки, акцентуючи увагу на необхідності мінімізації енергоспоживання для забезпечення довгострокової стійкості біогазових проєктів.

У новітніх роботах Wageningen University & Research [16] розглянуто цифровізацію процесів ферментації, що відкриває можливість для впровадження адаптивного керування, прогнозування газопродуктивності та зниження енергетичних піків.

Українські наукові дослідження також наголошують на актуальності проблеми [17–21]. В них підкреслено, що низька енергоефективність національних біогазових станцій здебільшого пов'язана з недостатньою модернізацією обладнання, застарілими схемами перемішування та відсутністю сучасних систем контролю. Аналітичний огляд Державного агентства з енергоефективності та енергозбереження України підкреслює наявність значного резерву зменшення енергоспоживання через удосконалення теплоізоляції та впровадження систем рекуперації.

Узагальнення світового та вітчизняного досвіду свідчить, що сучасні енергозберігаючі технології – від рекуперації тепла до цифрового управління – мають високий потенціал для підвищення продуктивності біогазових установок. Проте більшість досліджень виходить з ідеальних або лабораторних умов, тоді як реальний виробничий контекст агропідприємств містить низку технічних та організаційних обмежень. Це зумовлює потребу у подальшому практичному вивченні енергоефективних технологій у реальних експлуатаційних умовах, що й визначає актуальність цієї статті.



Формулювання мети статті. Метою статті є комплексне дослідження можливостей підвищення енергоефективності біогазових установок шляхом упровадження сучасних енергозберігаючих технологій, а також оцінювання їхнього практичного впливу на роботу систем анаеробної переробки органічних відходів. Досягнення цієї мети передбачає аналіз технічних рішень, здатних зменшити власне енергоспоживання біогазових комплексів, підвищити стабільність ферментаційних процесів, оптимізувати баланс теплової та електричної енергії, а також обґрунтувати рекомендації щодо їх ефективного застосування з урахуванням реальних експлуатаційних умов аграрних підприємств.

Основна частина. Рекуперація тепла. Найбільш прямий і відчутний спосіб знизити енерговитрати – повертати тепло, що вже присутнє у системі: від відпрацьованого тепла двигунів когенераторів, від теплового дигестату, конденсату біогазу, теплої води системи охолодження. Типові рішення: пластинчаті або трубчасті теплообмінники для підігріву субстрату/підтримки температури ферментації; рекуперація теплоти генератора на 30–50 % від загальної потреби на підтримку мезофільного режиму. Необхідно насамперед проектувати контур рекуперації під час проектування БУ – «підтягнути» підігрів під наявні джерела тепла (двигун, вихлопні гази, дигестат). Важливо: теплообмінники повинні бути доступні для очищення. Часто помилка – закладати занадто малі гідравлічні запаси, через що рекуператор працює в неповному режимі. Кількісно: реальне економічне зниження витрат на підігрів за рахунок рекуперації – 25–45 % у середніх проектах; термін окупності на рівні 1–3 років у разі правильного розрахунку [20; 22].

Теплоізоляція і мінімізація теплових втрат. Облицювання ферментерів, газгольдерів, трубопроводів та резервуарів; ущільнення вузлів; контроль конвективних витоків – найменш дорогий захід. Часто недооцінюється, але дає швидкий ефект. Необхідно, по-перше, провести енергоаудит теплових втрат; по-друге, застосувати мінімум 200–300 мм якісного утеплювача для ферментера в холодних регіонах; по-третє, утеплити місця перетоку (під'їзди, люки). Кількісно: економія 10–30 % на опаленні реактора; дуже коротка окупність [23].

Енергоефективне перемішування. Перемішування – один із найбільших споживачів електроенергії в установках, особливо за високої в'язкості. Рішення: використання частотних перетворювачів (ЧП), періодичне/імпульсне перемішування замість безперервного, застосування енергоощадних конструкцій, гідравлічне перемішування і газліфт. На практиці найвигідніший шлях – перейти з постійного потоку на кероване перемішування з логікою: короткі потужні цикли + довгі паузи. Газліфт підходить для рідких субстратів, механічні мішалки – для більш густих [4]. Критична помилка – «перемішувати за інерцією»: багато проектів тримають мішалки постійно і витрачають від 0,5 до 1,0 кВт·год/м³ реактора на добу зайвої енергії. Кількісно: економія від 15 % до 40 % залежно від початкової схеми; інвестиція у ЧП окупається за 6–24 місяці.

Частотне (регульоване) електроприводне оснащення. Використання ЧП для мішалок, насосів та транспортувального обладнання дає можливість зменшити споживання та пікові навантаження, а також зменшити механічний знос. Необхідно підключати через ЧП усю «рухому» групу: мішалки, шнеки, насоси подачі. Заощадження енергії залежить від профілю навантаження. Кількісно: економія 10–35 % на електроспоживанні рухомого обладнання.

Попередня обробка та інтенсифікація. Мета – підвищити біодоступність субстрату і скоротити час утримання (HRT) без надмірної витрати енергії. Методи: ферментні препарати (низька енергетика – висока біометрична віддача), кавітаційна обробка, механічне подрібнення, термохімічний гідроліз (енерговитратний), ультразвук (часто енергозатратний). На фермах краще почати з ферментів і механічного подрібнення до оптимальних розмірів часток (5–10 мм). Тепловий гідроліз дає великий приріст газу, але енергетично витратний і доцільний тільки у разі великого масштабу та доступу до дешевого джерела тепла [24]. Кавітація показала себе



як компроміс: дає ефект у разі помірних витрат, але потребує ретельного підбору обладнання. Кількісно: ферментативний підхід дає +10–30 % біогазу; термогідроліз – +20–60 % (але з великими енергозатратами).

Оптимізація органічного навантаження і коферментація. Збалансування C:N, поєднання «важкорозкладних» рослинних решток із високобілковими або жирними відходами підвищує вихід газу і стабілізує процес. Коферментація дозволяє уникнути піків інгібування (аміак, леткі жирні кислоти) і підвищує сукупну енергоефективність системи. Практично корисно мати базову «матрицю» субстратів і адаптивний рецепт подачі, що коригується залежно від аналізів (рН, аміак, леткі кислоти). Це знижує аварійні цикли і енергетичні втрати на «відновлення» реактора. Кількісно: стабілізація процесу дозволяє збільшити корисний час роботи установки і знизити енергетичні втрати на підтримання умов до 10–20 %.

Енергоефективні когенераційні блоки (СНР) і оптимізація електричного навантаження. Сучасні мотор-генераторні блоки з підвищеним ККД електродвигуна та оптимізацією камери згоряння працюють ефективніше і дають на 5–15 % більше корисної енергії. Оптимізація навантаження (уникання великих простоїв, регулювання під навантаження ферми) підвищує сумарну ефективність. Для малих станцій краще вибирати модульні когенерації із гнучким режимом; для великих – інвестувати в двигуни з високим ККД і системи рекуперації тепла [24; 25]. Важливо проводити регулярну сервісну діагностику двигуна та генератора для підтримки паспортних показників. Кількісно: підвищення електричного ККД установки на 5–12 % за правильного технічного обслуговування та оптимізації навантажень.

Газова очистка і модернізація процесів апгрейдингу. Очистка від H_2S , CO_2 , вологи та силосанів перед подачею у двигуни або мережу – критична. Мембранна сепарація та PSA системи енергоефективніші за криогенну, але потребують компресорів (енергія). Біологічна десульфуризація (біофільтри) може працювати з низькими витратами, але потребує контролю факторів (температура, рН, O_2). Практична порада. Для когенерації й використання на місці оптимальний баланс – біофільтр + низькоенергетична мембранна доводка, тоді як для продажу біометану до мережі – багатоступінчасте мембранне/адсорбційне очищення. Важливо закладати енергетичний бюджет компресора і системи очищення під час економічних розрахунків. Кількісно: мембранне апгрейдинг-споживання 0,2–0,6 кВт·год/м³ біометану; біофільтр – значно нижче, але залежить від швидкості газу і потреб у попередньому охолодженні.

Сепарація дигестату і зменшення транспортувальних витрат. Розділення рідкої та твердої фракцій дозволяє зменшити об'єм для транспортування, локально використовувати тверду фракцію як ґрунтоутворюючу або гранульовану, а рідку подавати на поля дрібними дозами. Це знижує енерговитрати на перекачування і транспортування. Впровадження простих декантерних центрифуг та пресувальних систем є дуже ефективним для великих ферм [24; 25]. Рекомендовано поєднувати сепарацію з локальним застосуванням добрив, щоб уникнути зайвих перевезень. Кількісно: скорочення транспортного навантаження до 40–70 % і відповідне зниження енерговитрат.

Цифрові системи управління, моніторинг і аналітика (SCADA, ML). Розумне управління дає змогу автоматично підтримувати оптимальні режими, прогнозувати деградацію обладнання й оптимізувати подачу субстратів. Сучасні системи дозволяють зменшити непланові простої, знизити час реакції на аварії та мінімізувати енергетичні втрати. Навіть базова система зі збором даних (температура, рН, споживання електроенергії по вузлах) уже дозволяє оптимізувати і досягати 5–15 % економії. Важливо навчити персонал інтерпретувати дані, а не просто збирати їх. Кількісно: загальне енергозбереження 5–20 % залежно від початкового рівня автоматизації.



Практичні пріоритети впровадження:

- 1) провести енергоаудит установки (швидкий вигляд: де втрачається тепло/електрика);
- 2) впровадити/покращити теплоізоляцію і герметизацію (низька вартість → швидкий ефект);
- 3) організувати рекуперацію тепла з когенератора/дигестату (великий потенціал економії);
- 4) модернізувати систему перемішування (ЧП + оптимальна логіка) – великий вплив на електроспоживання;
- 5) впровадити ферментативні препарати та оптимізувати рецепти коферментації (зростання виходу газу);
- 6) інтегрувати енергоефективні методи газоочищення (біофільтри + мембрани за необхідності);
- 7) розгорнути систему моніторингу й базову автоматизацію (SCADA) з аналітикою.

Типові помилки та перешкоди при цьому:

- проектування «під майбутню продуктивність» без тестової фази: багато систем переходять у стабільний режим лише після 6–12 місяців експлуатації;
- не регулярно проводити технічне обслуговування рекуператорів та теплообмінників → зниження ефективності через відкладення;
- надмірна інвестиція в енерговитратні передобробки (термогідроліз) без аналізу енергобалансу;
- відсутність плану локального використання тепла → втрата потенціалу рекуперації;
- недостатній контроль якості субстрату → часті «падіння» процесу та додаткові енергетичні витрати на відновлення.

Практичні рекомендації.

1. Найбільш перспективними заходами з точки зору витрат/ефекту є: теплоізоляція, рекуперація тепла, оптимізація перемішування з ЧП і базова автоматизація.
2. Попередня обробка субстратів має плануватись як низькоенергетичний шлях (ферменти, механічне подрібнення); енерговитратні методи (термо/кавітаційні) – тільки після ретельного енергетичного розрахунку.
3. Інвестування в енергоаудит та моніторинг: без точних даних оптимізацію провести неможливо.
4. Поєднання технологій: рекуперація тепла стає максимально ефективною в поєднанні з локальним використанням тепла (теплиці, сушильні установки), а мембранне очищення – з біофільтрами для мінімізації енергетичних витрат.
5. Робота з персоналом: інвестиція в навчання операторів та сервісне обслуговування часто дає кращий економічний ефект, ніж окремі технологічні оновлення.

Висновки. Проведене дослідження підтвердило, що енергоефективність є визначальним чинником продуктивності та економічної доцільності біогазових установок, а основні енергетичні втрати зумовлені нераціональним перемішуванням, низькою якістю теплоізоляції, застарілими системами очищення біогазу та відсутністю автоматизованого контролю. Найрезультативнішими технологіями зниження енергоспоживання є рекуперація тепла, використання частотно-регульованих приводів, оптимізовані режими перемішування, удосконалена теплоізоляція та енергоефективні методи газоочищення. Їх комплексне впровадження дозволяє скоротити власне енергоспоживання біогазових установок на 20–45 % і підвищити виробництво біогазу на 10–30 %. Практичний досвід експлуатації демонструє, що застосування цифрових систем моніторингу й керування забезпечує стабільність ферментації та мінімізує аварійні режими. Підвищення енергоефективності біогазових комплексів є стратегічним напрямом розвитку біоенергетики України та ЄС, оскільки підвищує рентабельність виробництва та зменшує залежність аграр-



ного сектору від традиційних енергоресурсів. Отримані результати можуть бути використані для модернізації діючих біогазових станцій та проектування нових вискоефективних енергетичних систем. Таким чином, енергоефективність слід розглядати не лише як технічний аспект, а як основу сталого розвитку системи переробки органічних відходів.

Список використаних джерел

1. Гелетуха Г. Г., Железна Т. А. Біоенергетика в Україні. *Матеріали для дебатів з питань енергозбереження*. Івано-Франківськ : Агентств. з розв. «Приватн. ініціативи», 2011. С. 18–23.
2. Ратушняк Г. С., Джеджула В. В. Інтенсифікація біоконверсії коливальним перемішуванням субстрату. Вінниця : УНІВЕРСУМ, 2008. 117 с.
3. Скляр Р. В. Аналіз методів визначення часу перебування та навантаження на метантенк. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка*. 2014. Вип. 148. С. 405–412.
4. Скляр Р. В., Скляр О. Г. Обґрунтування способу перемішування субстрату для експериментальної біогазової установки. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2020. Вип. 10, т. 1. URL: http://elar.tsatu.edu.ua/bitstream/123456789/11287/1/06.80_2.pdf
5. Скляр Р. В. Методи інтенсифікації процесів метанового зброджування. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2014. Вип. 4, т. 1. С. 3–9. URL: <http://nauka.tsatu.edu.ua/e-journals-tdatu/pdf4t1/3.pdf>
6. Акулов В. Д. Шляхи підвищення енергетичної ефективності біогазової установки. *Праці ТДАТУ : наукове фахове видання*. Запоріжжя : ТДАТУ, 2024. Вип. 24. Т. 2. С. 27–36. DOI: 10.32782/2078-0877-2024-24-2-3
7. Біотехнологія відходів тваринницьких підприємств : монографія / Захаренко М. О. та інш. Київ, 2015. 380 с.
8. Weiland P. Biogas production: current state and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2010. Vol. 85(4). P. 849–860.
9. Budzianowski W. M., Postawa K. Renewable energy from biogas with reduced carbon footprint: Implications for policy and technology development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 54. P. 1032–1048.
10. Berglund M., Börjesson P. Assessment of energy performance in the life-cycle of biogas production. *Biomass and Bioenergy*. 2006. Vol. 30(3). P. 254–266.
11. Liebetrau J., et al. Biogas Production : Scientific and Technical Review. Leipzig : DBFZ (Deutsches Biomasseforschungszentrum), 2017. 128 p.
12. Angelidaki I., Sanders W. Assessment of the anaerobic biodegradability of macropollutants. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*. 2004. Vol. 3(2). P. 117–129.
13. Scarlat N., Dallemand J.-F., Fahl F. Biogas: Developments and perspectives in Europe. *Renewable Energy*. 2018. Vol. 129. P. 457–472.
14. Stanzin T., et al. Evaluating the scientific contributions of biogas technology on rural development through scientometric analysis. *Environmental Technology & Innovation*. 2021. Vol. 24.
15. Zehnder A. J. B., et al. Modern anaerobic processes: Global needs and challenges. *Biotechnology Advances*. 2006. Vol. 24(3). P. 349–356.
16. Wageningen University & Research. Digitalization in Anaerobic Digestion Systems. Wageningen : WUR, 2020. 64 p.
17. Куріс Ю. В. Біоенергетичні установки. Обладнання та технології переробки органомісних енергоресурсів : підручник для наук., інжен.-техн. прац. та фахівців з альтерн. джерел енергії, навчальний посібник для студ. вищих навч. закл. Запоріжжя : ЗДІА, 2012. 348 с.
18. Вербинський В. В., Земляний М. Г. Регіональна енергетична політика України та шляхи її реалізації. Дніпропетровськ, 2003. 64 с.
19. Скляр О. Г., Комар А. С. Теоретичні аспекти моделювання машинної технології утилізації органічних відходів. *Праці ТДАТУ : наукове фахове видання*. Запоріжжя : ТДАТУ, 2023. Вип. 23, т. 1. С. 104–114. DOI: 10.31388/2078-0877-2023-23-1-104-115
20. Комар А. С. Удосконалення конструкції біогазової установки з рекуперацією теплоти збродженої біомаси. *Праці ТДАТУ : наукове фахове видання*. Запоріжжя : ТДАТУ, 2024. Вип. 24. Т. 3. С. 62–70. DOI: 10.32782/2078-0877-2024-24-3-5



21. Комар А. С., Акулов В. Д. Технологічні аспекти оптимізації біогазових установок. *Науковий вісник ТДАТУ*. Запоріжжя, 2025. Вип. 15. Т. 1. С. 129–135. DOI: <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-25-1-15>
22. Болтянський Б. В. Аспекти вдосконалення технології виробництва біогазу. *Праці ТДАТУ* : наукове фахове видання. Запоріжжя : ТДАТУ, 2024. Вип. 24. Т. 1. С. 89–100. DOI: 10.32782/2078-0877-2024-24-1-6
23. Skliar A., Skliar R. Justification of conditions for research on a laboratory biogas plant. *MOTROL: Motoryzacja I Energetyka Rolnictwa*. Lublin, 2014. Vol.16. No. 2, b. Pp. 183–188.
24. Матеріали Біоенергетичної асоціації України. URL: <https://uabio.org/>
25. Перспективи використання біофільтрів у біогазових установках / О. Г. Скляр., Р. В. Скляр., Б. В. Болтянський., С. В. Сиротюк, С. В. Коробка. *Праці ТДАТУ. Технічні науки*. Запоріжжя : Видавничий дім «Гельветика». 2025. Вип. 25, т. 1. С. 45–53. DOI: 10.32782/2078-0877-2025-25-1-6

Дата першого надходження статті до видання: 28.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 28.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 28.04.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)



O. Skliar¹, R. Skliar¹, S. Syrotyuk², S. Korobka², O. Pushka³

¹ *Dmytro Motorny Tavria State Agrotechnological University*

² *Lviv National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies named after S. Z. Hzhyskyi*

³ *Uman National University*

ANALYSIS OF THE MOST COMMON ENERGY-SAVING TECHNOLOGIES IN THE OPERATION OF BIOGAS PLANTS

Summary

This article examines the potential for implementing energy-saving technologies in biogas plants that process organic waste originating from the agricultural sector. The relevance of the study arises from the high share of internal energy consumption in many biogas facilities, which can reach 20–30 % of the electricity they produce, significantly diminishing their economic efficiency and overall performance. The paper provides an in-depth analysis of the most widely applied technological solutions aimed at reducing energy losses, including heat-recovery systems, advanced thermal insulation strategies, optimized substrate-mixing regimes using variable-frequency drives, low-energy gas purification methods, and digital monitoring and control systems. Special attention is given to practical aspects of their implementation from the perspective of an engineer with twenty years of hands-on experience in the operation and optimization of biogas plants. The study evaluates the contribution of each technology to improving the overall energy balance of anaerobic digestion systems, identifies common operational bottlenecks and challenges, and outlines typical errors that lead to excessive energy use or reduced biogas yield. Recommendations are proposed for optimizing fermentation processes, enhancing substrate preparation, stabilizing temperature regimes, and improving the utilization of recovered heat in agricultural enterprises. The findings indicate that a systematic and properly tailored approach to energy efficiency not only increases the productivity of biogas plants but also enhances process stability, reduces operational costs, and substantially improves the economic viability of organic waste management within a circular bioeconomy framework.

Keywords: biogas, recovery, thermal insulation, mixing, digestate, purification, cogeneration, substrate.