DOI: 10.32782/2078-0877-2024-24-2-3
УДК 662.767.2

О. Г. Скляр[1], канд. техн. наук ORCID: 0000-0002-0456-2479
Р. В. Скляр[1], канд. техн. наук ORCID: 0000-0002-1547-5100
В. Д. Акулов[1], аспірант
[1] *Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного*
e-mail: radmila.skliar@tsatu.edu.ua, тел.: +38067-916-85-80

ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ БІОГАЗОВОЇ УСТАНОВКИ

Анотація. В статті представлені технологічні схеми та конструктивні рішення способів підвищення виходу товарного біогазу при анаеробній переробці органічних відходів сільського господарства. При цьому проаналізовані наступні методи підвищення енергоефективності систем генерації енергії на основі анаеробної обробки відходів тваринництва, як: добавка до оброблюваних відходів високоенергетичних субстратів (зерно, силос, конюшинна суміш тощо); пряма рекуперація теплової енергії (субстрат/ефлюент); рекуперація теплової енергії із використанням термотрансформаторів; добавка до оброблених відходів високоенергетичних субстратів; попереднє аеробне нагрівання субстрату. Використання засобів підвищення енергетичної ефективності біогазових установок дозволить значно розширити сферу їх застосування в АПК при обробці органічних відходів різного складу, проте рішення про використання того чи іншого методу має прийматись виходячи з конкретних умов сільськогосподарського підприємства.

Ключові слова: біогаз, субстрат, установка, добрива, тепловий насос, пряма рекуперація, ефлюент, інфлюент, енергія.

Постановка проблеми. Альтернативні джерела енергії стають все більш затребуваними у повсякденному житті. До таких джерел енергії відноситься біогаз, який одержують у спеціальних біогазових установках [1]. Виробництво біогазу є ефективною та інвестиційно-привабливою технологією, що обумовлено наявністю значного сировинного потенціалу, сприятливими природно-кліматичними умовами та низьким рівнем собівартості цього виду енергії.

Перевагою біогазової установки є простота конструкції та обслуговування [2]. Наприклад, стаціонарні модульні установки дають можливість нарощування, зменшення виробничих потужностей завдяки модульності, на відміну інших альтернативних джерел енергії, можуть працювати за будь-яких погодних умов.

© Скляр О. Г., Скляр Р. В., Акулов В. Д., 2024

Використання БГУ має позитивний агротехнічний результат. Завдяки використанню біодобрив, як результату переробки цих установок, відновлюється родючість ґрунтів, що в майбутньому позитивно впливатиме на врожайність. Однак, незважаючи на позитивні ефекти анаеробної обробки гною в біогазових реакторах, серйозним гальмом їх використання в сільському господарстві є їх відносно низька енергетична ефективність при виробництві біогазу (до 60% біогазу, що виділився, використовується установкою для власних потреб) [3]. Водночас теплота, що міститься в ефлюенте, є додатковим резервом енергії, який слід по можливості використовувати для підігріву завантажуваного субстрату і компенсації тепловтрат в реакторі [4].

Аналіз останніх досліджень. Питаннями виробництва біогазу в Україні займалися такі науковці, зокрема: Кучерук П. П., Ратушняк А. А., Гелетуха Г. Г., Калетнік Г. М., Матвєєв Ю. Б., Токарчук Д. М., Скорук О. П., Пришляк Н. В. та ін. [1, 5-7] Існуючі системи підігріву субстрату недостатньо ефективні та мають низький коефіцієнт корисної дії [6,8]. Тому необхідно розробити технологічну лінію підігріву субстрату, здатну забезпечити ефективне перебіг процесів анаеробного зброджування за мінімальних витрат енергії.

Якщо відбувається переробка субстрату вологістю 90-95%, то анаеробне зброджування в цьому випадку енергоємний процес. При цьому витрачається значна кількість енергії біогазу. Проведені аналізи витрат енергії на підтримку процесу показують, що її основна частина витрачається на нагрівання субстрату до температури зброджування [6, 9].

Формулювання мети статті. Аналіз шляхів підвищення енергетичної ефективності біогазової установки.

Основна частина. Методи підвищення енергоефективності систем генерації енергії на основі анаеробної обробки відходів тваринництва [6, 9, 10]:

– добавка до оброблюваних відходів високоенергетичних субстратів (зерно, силос, конюшинна суміш тощо);

– пряма рекуперація теплової енергії (субстрат/ефлюент);

– рекуперація теплової енергії із використанням термо-трансформаторів;

– добавка до оброблених відходів високоенергетичних субстратів;

– попереднє аеробне нагрівання субстрату.

Насамперед, слід зазначити, що суттєвим аспектом виробництва біогазу є використання відновлюваних джерел енергії, що часто одночасно є відходами [11, 12]. Використання органічних відходів або аграрної сировини створюють середовище для утворення екологічних ефектів при їх транспортуванні, зберіганні та використанні.

Істотний екологічний вплив має сировина тваринного походження. Так зараз, в Україні стоїть гостре питання – утилізація та безпечне перероблення продуктів життєдіяльності птахофабрик, свинокомплексів та ферм ВРХ. З іншого боку, анаеробна переробка відходів тваринництва (окремо або у поєднанні з іншими косубстратами) може розглядатися як найкраща з наявних технологій, адже переробка відходів на біогазових заводах дозволяє частково зменшити екологічні проблеми та має суттєві економічні переваги у вигляді децентралізованого виробництва відновлюваної енергії [7, 9]. Активного обміну речовин та високої швидкості біохімічних обмінних процесів можна досягти, якщо оновлювати та підтримувати максимально можливе значення граничних поверхонь між рідкою та твердою фракціями. Тому, тверді матеріали рослинного походження, повинні бути підготовлені – подрібнені на розривних, ріжучих або плющильних пристроях. Від ефективного механічного впливу можливо отримати частки меншого розміру [13].

Ефективне змішування твердих часток у суміші, а також їх рівномірний розподіл значною мірою залежать від технологічних та технічних методів, які використовуються для ретельного перемішування, гідравлічного переміщення матеріалу та видалення газу [14, 15]. Використання сучасної техніки дозволяє переробляти субстрати із вмістом твердих речовин до 15%, якщо довжина частинок твердих компонентів не перевищує 32 мм. Подрібнення зеленої маси призводить до додаткових витрат енергії.

Тверді речовини, щільність яких суттєво відрізняється від щільності рідини, зумовлюють утворення осаду (седиментацію) або кірки, чому сприяє флотація. Проблеми механіко-гідравлічного характеру, пов'язані з цим, а також зменшення продуктивності процесу утворення газу, можуть призвести до необхідності великих витрат технічних засобів і енергії для їх вирішення.

Пряма рекуперація теплової енергії. Теплота, що міститься в ефлюенте, є додатковим резервом енергії, який можна використовувати для підігріву завантажуваного субстрату і компенсації тепловтрат в реакторі [15].

Найпростішим рішенням є встановлення на лінії вивантаження ефлюенту з біореактора рекуперативного теплообмінника типу «інфлюент-ефлюент» [16]. Ця схема забезпечує використання теплоти зброджeного субстрату для часткового підігріву інфлюенту. Її застосування скорочує витрати енергії на метанове зброджування вихідного субстрату. Найбільш оптимальною стратегією може бути використання схеми в термофільному режимі біореактора для досягнення максимальної ефективності [17, 18].

Як теплообмінні апарати зазвичай застосовують спіральні теплообмінники типу «інфлюент-ефлюент». Однак схеми, в яких

інфлюент проходить через накопичувач ефлюента, мають простіше конструктивне рішення, але в цих випадках вдруге використовується порівняно невелика частина енергії внаслідок втрат у накопичувачі шламу. Приклад такої схеми наведено на рисунку 1.

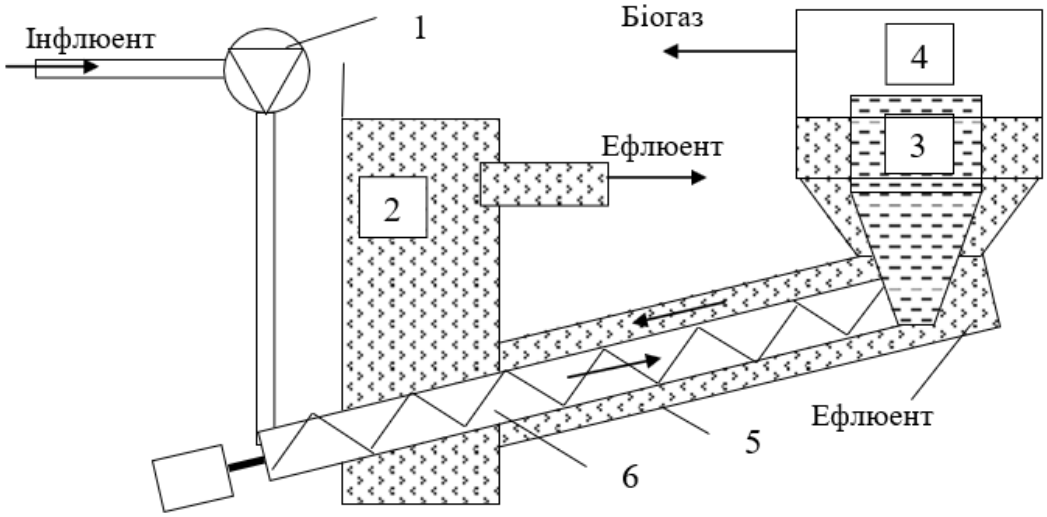

Рис. 1. Прямий підігрів інфлюенту за рахунок відкидної теплоти ефлюенту: 1 − насос; 2 − накопичувач ефлюенту; 3 – реактор; 4 – газовий простір; 5 – теплоізоляція; 6 – шнек.

Недоліками даної технології є те, що тваринницькі (птахівничі) органічні відходи, як правило, мають значну липкість, в'язкість та дуже різноманітні за дисперсним складом. Тому швидкість руху субстрату має бути не менше 3-5 м/с, через що теплота ефлюента не встигає передатися субстрату, що завантажується в метантенк. А також: складність у впровадженні, потенційні витрати на обслуговування; обмеження щодо температурних режимів, ризик замерзання або перегріву, потреба у додатковому обладнанні, ризик забруднення або корозії. Для ефективного впровадження прямої рекуперації може знадобитися додаткове обладнання, таке як теплообмінники, насоси або контрольні системи, що збільшить витрати.

Рекуперація теплової енергії з використанням термо-трансформаторів. Рекуперація теплової енергії з використанням термотрансформаторів є важливим процесом у сфері енергоефективності. Термотрансформатори (або теплові насоси) використовуються для перетворення тепла з одного джерела на тепло вищої температури для використання в промислових процесах або для опалення [6,11]. Вони працюють на принципі циклу теплового насоса, де низькотемпературне тепло піднімається до вищої температури за допомогою відповідної робочої речовини і компресора.

Рекуперація теплової енергії за допомогою термотрансформаторів використовується у багатьох галузях, таких як промисловість, сільське господарство, будівництво та інші. Вона допомагає зменшити споживання енергії та викиди CO_2, що сприяє покращенню екологічної стійкості процесів та зменшенню витрат на опалення та виробництво.

Субстрат, який пройшов анаеробний біореактор, подається до резервуара ефлюенту і в неперервному режимі проходить через теплообмінник-випарник теплового насоса. Теплова енергія з ефлюенту, через використання легкокиплячого теплоносія, підвищується у компресорі і передається через теплообмінник-конденсатор назад до вихідного субстрату, який циркулює в системі «біореактор – насос – теплообмінник-конденсатор – біореактор» [14]. Таким чином, теплова енергія, яка виходить із біореактора, ефективно використовується для підігріву вихідного субстрату. За умови коефіцієнта перетворення теплового насоса від 4 до 5, на кожні 3…4 кВт теплової енергії, яка відводиться з біореактора, може бути отримано 4…5 кВт теплової енергії, яка передається до вихідного субстрату. При цьому необхідно приблизно 1 кВт механічної потужності для приводу компресора.

Основним недоліком даного технічного рішення є утворення відкладень на теплообмінних поверхнях з боку гною, що призводить до суттєвих втрат теплової потужності або до необхідності суттєвого збільшення дорогих поверхонь теплообміну. Іншим недоліком є низька інтенсивність основних процесів, які визначають продуктивність технологічної лінії «приймальна ємність – біореактор – відстійник ефекту».

Схема використання відкидної теплоти ефекту за допомогою теплового насоса наведена на рисунку 2.

Через відсутність попередньої мікробіологічної обробки вихідного гною з метою підвищення ступеня розчинення органічної речовини та отримання вихідного субстрату з підвищеним вмістом компонентів, що сприяють інтенсивному метаногенезу, знижується питома продуктивність лінії з біогазу та субстрату [17, 19, 20]. У відстійнику ефлюента через залишкове газовиділення значно знижується інтенсивність процесу розподілу обробленого субстрату на тверду і рідку фракції, що у результаті призводить до збільшення масогабаритних показників відстійника ефлюента.

Попереднє аеробне нагрівання субстрату. Під час аеробного розкладання органічних речовин утворюється значна кількість теплоти, яка, за певних умов, може підняти температуру субстрату до 70°С (рис. 3). Оскільки ця теплова енергія виникає внаслідок тих же речовин, які видаляють біогаз, двоетапний процес бродіння, який

складається з аеробної фази для виробництва тепла та анаеробної фази для виробництва газу, завжди пов'язаний з меншою кількістю газу. Крім того, аеробне бродіння (або компостування) [21, 22] можливе без додаткових витрат енергії (окрім підготовки) лише у разі наявності твердого та вологого органічного матеріалу з пористою структурою, яка сприяє газообміну [23]. Навпаки, рідкі субстрати потребують великих витрат енергії для надання повітря з одночасним інтенсивним перемішуванням, а це, в свою чергу, негативно впливає на загальний енергетичний баланс. Додаткові витрати, як на енергію, так і на кошти, також значно зростають в цьому випадку [24].

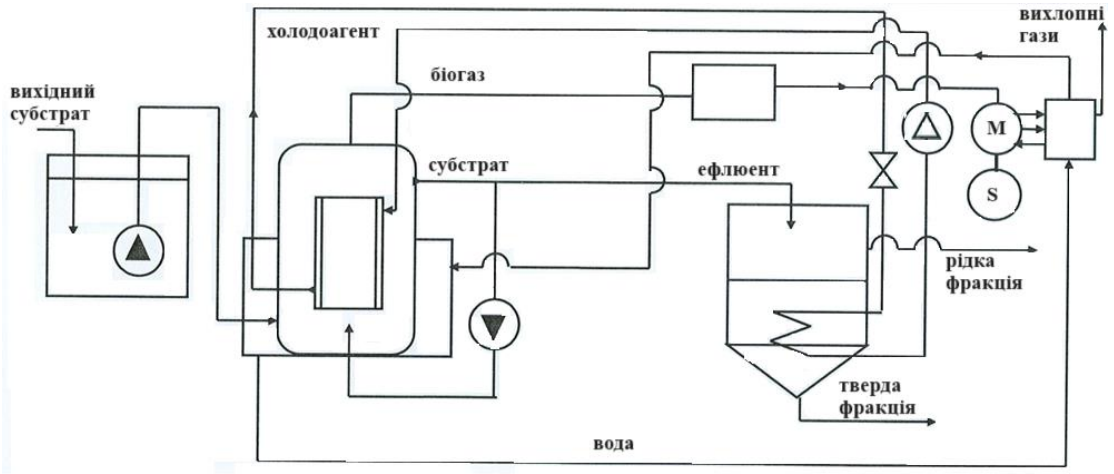

Рис. 2. Використання теплоти ефлюента за допомогою теплового насосу.

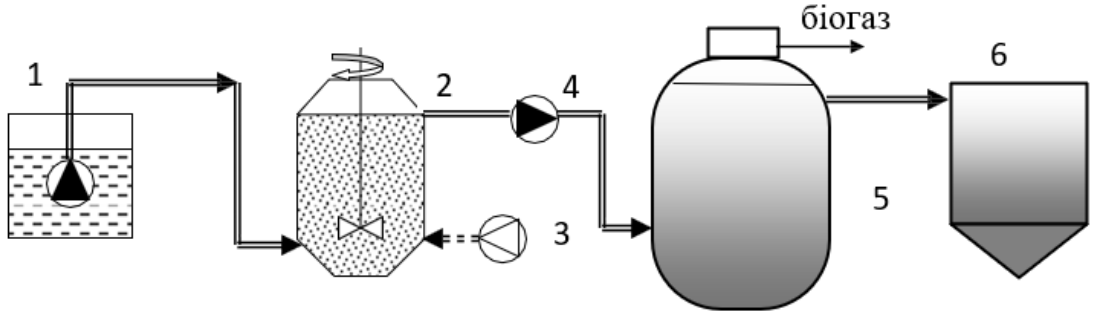

Рис. 3. Попереднє аеробне нагрівання субстрату:
1 – приймальна ємність із насосом; 2 – аеробний реактор; 3 – повітродувка; 4 – насос; 5 – анаеробний реактор; 6 – відстійник ефекту

Зважаючи на оптимізацію процесів виробництва біогазу, можна зосередитися на декількох ключових аспектах [17, 18, 20, 25, 26]:

1) розвиток нових технологій та методів для оптимізації всього процесу виробництва біогазу – вдосконалення конструкції біореакторів, оптимізацію процесів ферментації, удосконалення

систем контролю та автоматизації, а також впровадження інтелектуальних систем моніторингу та управління.

2) ефективне управління тепловими та масовими потоками всередині біореактора для забезпечення оптимальних умов ферментації – впровадження продуманих систем теплообміну, контроль температури та вологості, а також оптимізацію режимів подачі субстрату та повітря.

3) дослідження та розвиток методів використання різноманітних субстратів для виробництва біогазу – икористання сільськогосподарських відходів, стічних вод, органічного сміття, а також спеціально вирощених енергетичних культур.

4) використання енергоефективного обладнання та технологій для зменшення споживання енергії в процесі виробництва біогазу – використання високоефективних компресорів, насосів та теплообмінників, а також впровадження систем енергозбереження та використання відновлювальних джерел енергії.

5) використання математичного моделювання та оптимізаційних методів для аналізу та покращення процесів виробництва біогазу дозволить прогнозувати ефективність різних стратегій управління та визначати оптимальні параметри роботи системи.

Висновки. Використання засобів підвищення енергетичної ефективності біогазових установок дозволить значно розширити сферу їх застосування в АПК при обробці органічних відходів різного складу, проте рішення про використання того чи іншого методу має прийматись виходячи з конкретних умов сільськогосподарського підприємства.

Список використаних джерел.

1. Гелетуха Г., Кучерук П., Матвєєв Ю. *Перспективи виробництва біометану в Україні:* аналітична записка UABIO. 2022. № 29. С. 58. URL: https://uabio.org/wp-content/uploads/2022/09/UA-Position-paper-UABIO-29.pdf (дата звернення 22.02.2024).

2. Emmanuel Kweinor Tetteh, Sudesh Rathilal. Kinetics and Nanoparticle Catalytic Enhancement of Biogas Production from Wastewater Using a Magnetized Biochemical Methane Potential (MBMP) System. URL: https://www.mdpi.com/2073-4344/10/10/1200 (дата звернення 12.02.2024).).

3. Енерго- та ресурсозбереження в тваринництві: підручник / Б. В. Болтянський [та ін.]. Київ: Видавничий дім «Кондор», 2020. 410 с.

4. Norazwina Zaino. Kinetics of Biogas Production from Banana Stem Waste. *Biogas* / Dr. Sunil Kumar (Ed.). 2012. P. 395-408.

5. Гелетуха Г. Г., Кучерук П. П., Матвєєв Ю. Б. Перспективи виробництва та використання біометану в Україні. *Аналітична записка Біоергетичної асоціації України.* 2014. № 11. 42 с.

6. Ратушняк Г. С., Лялюк О. Г., Кощеєв І. А. Біогазові установки з відновлюваними джерелами енергії термостабілізації процесу ферментації біомаси. Вінниця: ВНТУ, 2017. 110 с.

7. Ткаченко С. Й., Степанов Д. В. Теплообмінні та гідродинамічні процеси в елементах енергозабезпечення біогазової установки: монографія. Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. 132 с.

8. Milbrandt A., Bush B., Melaina M. Biogas and Hydrogen Systems Market Assessment. 25 p. URL: https://www.nrel.gov/docs/fy16osti/63596.pdf (дата звернення 17.02.2024).

9. Skliar A., Skliar R. Justification of conditions for research on a laboratory biogas plan. *MOTROL: Motoryzacja I Energetyka Rolnictwa*. 2014. Vol.16(2). P. 183–188.

10. Muradin M., Joachimiak-Lechman K., Foltynowich Z. Evaluation of Eco-Efficiency of Two Alternative Agricultural Biogas Plants. URL: https://www.mdpi.com/2076-3417/8/11/2083 (дата звернення 02.02.2024).

11. Акулов В. Д. Щодо питання енергозбереження в біогазових установках. *Технічний прогрес у тваринництві та кормовиробництві*: XI Міжнар. наук.-техн. конференція. Глеваха-Київ, 2023. С. 181-183.

12. Komar A. Definition of priority tasks for agricultural development. *Abstracts of XIV International Scientific and Practical Conference. «Multidisciplinary research».* Bilbao, Spain 2020. P. 431- 433.

13. Войтов В. А. Аналіз технологій утилізації відходів птахівництва за кордоном. *Праці ТДАТУ*. 2019. Вип. 19, т. 4. С. 100-109. https://doi.org/10.31388/2078-0877-19-4-100-109.

14. Гураль І. В., Дивак М. П. Біохімічний аналіз процесів в біогазових установках та його застосування в задачі макромоделювання процесів виробництва біогазу. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах.* 2014. № 5. С. 152-158.

15. Skliar O. Directions of increasing the efficiency of energy use in livestock. *Current issues of science and education:* Abstracts of XIV International Scientific and Practical Conference. Rome, 2021. P. 171-176.

16. Акулов В. Д. Аналіз та напрями удосконалення теплообмінників біогазових установок. *Молодь і технічний прогрес в АПВ:* матеріали Міжнар. наук.-прак. конференції. Харків, 2023. С. 95-97.

17. Скляр О. Г., Скляр Р. В., Комар А. С. Огляд методів дослідження та оптимізації машинних технологій утилізації відходів

тваринництва. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2023. Вип. 13, т. 2. С. 9-13. https://doi.org/10.31388/2220-8674-2023-2-9.

18. Скляр О. Г., Комар А. С. Теоретичні аспекти моделювання машинної технології утилізації органічних відходів. *Праці ТДАТУ:* 2023. Вип. 23, т. 1. С. 104 – 114. https://doi.org/10.31388/2078-0877-2023-23-1-104-115.

19. Komar A. S. Methodological approaches to the optimization of machine technologies of animal waste disposal. *Scientific research in the modern world:* Proceedings of the 8th International scientific and practical conference. Toronto, 2023. P. 194-198.

20. Скляр О. Г. Теоретичні дослідження режимів і параметрів метантенку біогазової установки. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2020. Вип. 10, т. 1. С. 1-14. https://doi.org/10.31388/2220-8674-2020-1-14.

21. Скляр О. Г., Скляр Р. В. Біоконверсні технології прискореної переробки відходів тваринництва в екологічно безпечні добрива. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2021. Вип. 11, т. 2. № 3. https://doi.org/ 10.31388/2220-8674-2021-2-3.

22. Григоренко С. М. Аналіз технології пасивного компостування органічних відходів у буртах. *Сучасні проблеми землеробської механіки:* збірник тез доп. XXIV Міжнар.наук. конференції. Київ, 2023. С. 122-125.

23. Майстренко О. Ю., Куріс Ю. В., Калінцева Ю. С. Розробка математичної моделі процесів розвитку мікроорганізмів в рамках біоенергетики біомаси. *Новини Енергетики*. 2010. № 2. С. 32–39.

24. Григоренко С. М. Удосконалення технології метаногенерації пташиного посліду. *Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі:* Мат. II Міжнар. наук.-практ. конф. Мелітополь: ТДАТУ, 2020. С. 94-99.

25. Скляр Р. В. Основні принципи побудови та аналіз математичних моделей технологічних процесів. *Молодь і технічний прогрес в АПК:* матеріали Міжнар. наук.-практ. конференції. Харків: ХНТУСГ, 2021. С. 263-266.

26. Скляр Р. В. Доцільність використання економіко-математичних моделей в сільському господарстві. *Інноваційні технології в АПК*: матеріали VII Всеукр. наук.-практ. конференції. Луцьк: Луцький НТУ, 2021.С. 122-124.

Стаття надійшла до редакції 13.03.2024 р.

O. Skliar[1], R. Skliar[1], V. Akulov[1]
[1] Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

WAYS TO INCREASE THE ENERGY EFFICIENCY OF A BIOGAS INSTALLATION

Summary

The work presents technological schemes and constructive solutions for ways to increase the yield of marketable biogas during anaerobic processing of organic agricultural waste. At the same time, the following methods of increasing the energy efficiency of energy generation systems based on the anaerobic treatment of animal husbandry waste were analyzed, such as: addition to processed waste of high-energy substrates (grain, silage, clover mixture, etc.); direct heat energy recovery (substrate/effluent); thermal energy recovery using thermotransformers; additive to processed waste of high-energy substrates; preliminary aerobic heating of the substrate. Solid substances, the density of which is significantly different from the density of the liquid, lead to the formation of sediment (sedimentation) or crust, which is facilitated by flotation. Mechanical-hydraulic problems associated with this, as well as a decrease in the productivity of the gas generation process, may lead to the need for large expenditures of technical means and energy to solve them. The main disadvantage of heat energy recovery using thermotransformers is the formation of deposits on heat exchange surfaces from manure, which leads to significant losses of thermal power or the need for a significant increase in expensive heat exchange surfaces. Another disadvantage is the low intensity of the main processes that determine the productivity of the technological line "receiving tank - bioreactor - settling tank". The disadvantage of preliminary aerobic heating of the substrate is that liquid substrates require a lot of energy to provide air with simultaneous intensive mixing, and this, in turn, negatively affects the overall energy balance. Additional costs, both for energy and funds, also increase significantly in this case. The use of means of increasing the energy efficiency of biogas plants will allow to significantly expand the scope of their application in the agricultural sector in the treatment of organic waste of various composition, but the decision to use one or another method should be taken based on the specific conditions of the agricultural enterprise.

Keywords: biogas, substrate, installation, fertilizers, heat pump, direct recovery, effluent, influent, energy.