



DOI: 10.32782/2220-8674-2024-24-1-6

УДК 631.147:631.862

О. Г. Скляр¹, к.т.н.,

ORCID: 0000-0001-7884-6792

Р. В. Скляр¹, к.т.н.,

ORCID: 0000-0002-1547-5100

Б. В. Болтянський¹, к.т.н.,

ORCID: 0000-0003-2072-4025

С. В. Сиротюк², к.т.н.,

ORCID: 0000-0001-9966-6299

С. В. Коробка², к.т.н.,

ORCID: 0000-0002-4717-509X

І. Г. Стукалець², к.т.н.

ORCID: 0000-0001-7107-4865

¹Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного²Львівський національний університет природокористуванняe-mail: radmila.skliar@tsatu.edu.ua, тел.: +380679168580

АНАЛІЗ МЕТОДІВ УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ ПЕРЕРОБКИ ОРГАНІЧНИХ ВІДХОДІВ ТВАРИННИЦТВА У МЕТАНТЕНКАХ

Анотація. В статті проаналізовано існуючі методи удосконалення процесу переробки органічних відходів тваринництва у метантенках. Розглянуті основні напрямки наукових досліджень інтенсифікації процесу анаеробної переробки гнойових стоків. А також доза завантаження метантенка та періодичність бродіння органічної сировини. Для проведення аналізу методів вдосконалення процесу анаеробної переробки гною та гнойових стоків у метантенках вони умовно були розділені на види: механічний, біохімічний, мікробіологічний, термічна та електромагнітна обробки. Наведені їх особливості роботи, переваги і недоліки при цьому. Аналіз методів удосконалення процесу переробки органічних відходів тваринництва у метантенках зведено у таблицю, де представлено суть удосконалення та очікуваний ефект.

Ключові слова: біогаз, довкілля, добрива, екологія, метан, температура, теплообмінника, зброджування.

Постановка проблеми. Стійкий розвиток агропромислового виробництва можливий лише за умови одночасного вирішення екологічних, економічних, соціальних та технологічних проблем регіону [1]. Реалізація стратегії сталого розвитку потребує узгодження економічного розвитку всіх господарюючих об'єктів з жорсткими рамками екологічних обмежень видів діяльності, які негативно впливають на екологічну систему та природні ландшафти України [2, 3].

Проте, нині, однією з найважливіших проблем запобігання негативного впливу на довкілля, є проблема переробки свинячого



гною, тому що в умовах промислового свиначства характерне безпідстилькове утримання тварин із застосуванням гідравлічних систем видалення гною вологістю 92-95%, де використання великої кількості води значно збільшує обсяги гнойових стоків і ускладнює їх переробку та застосування [4,5]. Спостереження вчених свідчать про те, що на свиначських підприємствах не знезаражуються і не використовуються обсяги гнойових стоків, що утворюються. Використання відстійників, біологічних ставків і лагун, гноєсховищ та накопичувачів гною може обмежуватися особливостями природно-кліматичних умов. Основна причина незадовільного стану – це наявність застарілих очисних споруд, які потребують ремонту чи заміни на нові чи просто відсутність будь-яких засобів очищення, а також недостатність фінансування природоохоронних заходів у країні.

Звідси випливає, що з найперспективніших напрямів переробки рідкого свиначого гною є анаеробна переробка в метантенках, в результаті якого відбувається різке зниження концентрації органічних забруднень у відходах або у гнойових стоках з одночасним утворенням біогазу, який можна використовувати як енергоносіє для сільськогосподарського виробництва [5,6].

Активне використання метаногенезу [7] при зброджуванні органічних відходів є, за сучасними уявленнями, одним із найперспективніших шляхів спільного вирішення екологічних та енергетичних проблем на сільськогосподарських підприємствах.

Аналіз останніх досліджень. В даний час наукові дослідження інтенсифікації процесу анаеробної переробки гнойових стоків ведуться у таких основних напрямках [1, 8-13]:

- вивчення процесу переробки висококонцентрованих органічних відходів з концентрацією твердих частинок 30-50%;
- багатостадійна переробка органічних відходів, заснована на застосуванні метантенків за модульною технологією;
- вивчення процесу метанового зброджування за участю психрофільних мікроорганізмів за температури 0...20°C;
- рециркуляція зброженого осаду та застосування анаеробних біофільтрів у камері зброджування метантенка.

Удосконалення процесу анаеробного зброджування гнойових стоків – це, передусім зменшення циклу бродіння чи часу перебування органічної біомаси в метантенку. Відомо, що доза завантаження метантенка та періодичність бродіння органічної сировини залежать від наступних параметрів:

- температури технологічного процесу бродіння і вологості сировини, що зброджується;
- концентрації органічних речовин у субстраті, що зброджується;



- концентрації іонів водню (рН) та окислювального і відновлювального потенціалу (ОВП) субстрату, що зброджується в метантенку;

- технології завантаження та перемішування зброджуваного субстрату (безперервна чи періодична).

Формулювання мети статті. Проаналізувати існуючі методи удосконалення процесу переробки органічних відходів тваринництва у метантенках.

Основна частина. Інтерес до метанового зброджування органічних відходів сільськогосподарського виробництва нині значно зріс майже у всіх країнах, у зв'язку з подальшим зростанням світових цін на нафту та інші види палива [14,15]. Звідси випливає, що першочерговими завданнями є створення технологічних ліній, що працюють в інтенсивному режимі з максимальною енергетичною віддачею, та розробка універсального проєкту біогазової станції, яку за незначних змін і доповнень можна було б здійснити в будь-якому регіоні України.

У зв'язку з цим, методи вдосконалення процесу анаеробної переробки гною та гнойових стоків у метантенках можна умовно розділити на такі види (рис. 1):

- механічний вплив на субстрат, що зброджується (подрібнення вихідної маси перед завантаженням в метантенк, перемішування зброджуваної сировини рециркулюючими газами бродіння і рециркуляція осаду) [16-18];

- біохімічні методи впливу на субстрат, що зброджується (лужними агентами, ферментами, порошкоподібне активоване вугілля, поверхнево-активні речовини, термічна обробка, електромагнітна обробка) [19];

- термічна та електромагнітна обробка субстрату, що зброджується [20];

- мікробіологічні методи, тобто, накопичення метаноутворюючих мікроорганізмів на різних носіях, де бактерії фіксуються на спеціальних інертних-бактеріоносіях, в результаті якого досягається підвищена концентрація мікроорганізмів у метантенку [21].

Механічною дією, що впливає на інтенсивність процесу метанового бродіння, є попередня підготовка вихідної сировини до зброджування. Тому тверді матеріали, особливо рослинного походження, повинні бути підготовлені за допомогою ріжучих, розривних або плющильних пристроїв, щоб у результаті ефективного механічного впливу отримати частинки меншого розміру, оскільки подрібнення вихідної маси перед завантаженням або якість підготовки сировини, дозована і регульована подача його в реактор впливають на ступінь розпаду органічної речовини продукту, що зброджується, і на

швидкість газовиділення. В результаті подрібнення, наприклад гною, виходить гомогенна маса, температура якої на виході з подрібнювача на 6 ... 8⁰С вища за температуру вихідної сировини. Далі подрібнену масу вистояють за певної температури і часу, за якої завдяки діяльності мікроорганізмів, видаляється кисень, знижується окислювально-відновний потенціал середовища, утворюються вуглеводи, спирти та леткі жирні кислоти. При зброджуванні підготовленої сировини виділення біогазу починається вже за кілька годин із початку дослідів [16-18].



Рис. 1. Існуючі методи вдосконалення процесу анаеробної переробки гною та гнойових стоків

Далі йде, що метаболічна і репродуктивна здатності метаноутворюючих мікроорганізмів перебувають у функціональній залежності від температури [22]. Таким чином, температура впливає на обсяг біогазу, який можна одержати з певної кількості органічної речовини протягом заданого часу. Якщо зброджуванню піддається маса без попереднього нагрівання, то в камері зброджування доводиться встановлювати теплообмінники та пристрої, що

перемішують. Теплообмінники [17, 19, 23] не забезпечують рівномірного температурного поля, а механічні пристрої, що перемішують, створюють високі швидкості перемішування шарів зброджуваної маси, збільшують втрати тепла в навколишнє середовище. Крім того, в момент завантаження в камеру збродження вихідної маси з температурою, що значно відрізняється від температури обраного робочого режиму в метантенку, відбувається охолодження маси, що переробляється. У численних дослідженнях вчених [8,9,12] прийнято два температурні оптимуми (близько 33°C і 54°C), яким відповідають найвищі значення метаболічної активності метаноутворюючих мікроорганізмів, тобто, від 25°C до 55°C інтенсивність процесу метаноутворення зростає, за подальшого підвищення температури до 60°C процес розпаду органічної речовини уповільнюється, а інтервалі $60...70^{\circ}\text{C}$ відзначається значне уповільнення процесу бродіння. Мікробіологічна активність мікроорганізмів майже припиняється, якщо температура знижується приблизно 15°C . До перепадів температури, особливо до її раптовим зниженням, мікроорганізми дуже чутливі і реагують на це зниженням до відтворення. Виходячи з цього, прийнято оптимальні температурні параметри для мезофільного режиму збродження $32...35^{\circ}\text{C}$, а термофільного $52...55^{\circ}\text{C}$.

Для підтримки необхідного температурного режиму в камері збродження метантенка існує два варіанти: попереднє нагрівання вихідної маси перед завантаженням, де теплообмінні пристрої розташовані поза камерою збродження метантенка і підігрів продукту бродіння безпосередньо всередині ємності. Необхідно відзначити, що розташування теплообмінників у камері збродження метантенка не забезпечує рівномірності розподілу температурного поля по всьому об'єму, якщо відсутній пристрій, що перемішує зброджується маси [18, 19].

Для вирівнювання температури в камері збродження часто встановлюють різні пристрої для перемішування маси. Рекомендацій щодо вибору способів перемішування практично немає, а вплив перемішування на процес метанового збродження гною вивчено поки що недостатньо. Є підстави вважати, що перемішування певною мірою має сприяти збільшенню площі контакту між мікроорганізмами і субстратом, тобто, багаторівневе перемішування та примусова дегазація прискорює процес збродження. При перемішуванні можна домогтися рівномірного розподілу гною, що завантажуються, і мікроорганізмів в реакторі, а за допомогою примусової дегазації перешкодити накопиченню проміжних і кінцевих продуктів метаболізму.

На сьогодні відомі такі способи перемішування гною в метантенку [9, 18, 19]: безперервне перемішування; перемішування



тільки у певний час, безпосередньо після завантаження вихідного гною; періодичне перемішування, наприклад, по 10 хвилин щогодини, тобто, немає однозначної думки щодо застосування методів перемішування при метановому зброджуванні гною. На думку фахівців можна виділити декілька методів: інжекторами, пропелерними мішалками, рециркуляційними насосами та рециркуляцією газу, але оптимального рішення виявити не вдалося. Наприклад, у Франції проведено дослідження з отримання біогазу з рідкого свинячого гною, де застосовувалося безперервне анаеробне зброджування при постійному перемішуванні субстрату або ферментації «вільними клітинами». Експерименти показали, що це спосіб не надійний, тобто ферментація не завжди відбувається чи займає багато часу. Далі, удосконаленням безперервної змішувальної системи є «контактний метод», який полягає в уловлюванні у відстійнику на виході з реактора активної біомаси, щоб назад ввести разом із вихідним гноєм.

Також необхідно зазначити, що на процес утворення метану стимулює додавання ацетату в метантенк і, водночас, це єдиний субстрат метаногенезу, який у них виявляється. Отже, є невідповідність між швидкостями утворення та споживання ацетату. Це може бути пов'язане з нестачею ацетатовикористовуючої мікрофлори і, ймовірно, необхідне досягнення певної концентрації ацетату, щоб вона почала активно розвиватися [19, 20].

Численні дослідження присвячені інтенсифікації процесу бродіння гною біостимуляторами, тобто, біохімічний вплив на зброджуючий субстрат. Для того, щоб підвищити інтенсивність утворення метану та накопичення метанової мікрофлори вченими було проведено дослідження впливу добавок метанолу, ацетату, а також целюлози у вигляді подрібненого фільтрувального паперу. Для прискорення виходу метантенка на робочий режим були використані відселекціоновані асоціації мікроорганізмів шляхом внесення їх у вигляді засівного матеріалу одночасно з підготовленим гноєм, тобто, внесення екзогенних добавок зменшує час виходу метантенка на робочий режим до 3-5 діб, а використання збалансованої синтрофної асоціації мікроорганізмів дозволяє скоротити цей період до 2-3 діб і почати безперервний процес зброджування гною з досить високої добової дози завантаження 30-50%. Однак у першому випадку потрібна додаткова витрата хімічних реактивів, у другому – запровадження проміжних ємностей для вирощування необхідного посівного матеріалу [20, 21].

Однією з шляхів вдосконалення процесу анаеробної переробки гнойових стоків – застосування системи анаеробного біофільтра задля продовження терміну знаходження метаноутворюючих мікроорганізмів у робочій камері метантенка. Біогазова установка з



біофільтром у метантенці дозволяє пристосовуватися до будь-яких типів відходів тваринництва від найбільш насичених, що знаходяться у зваженому стані органічними речовинами (свинячий гній, гній ВРХ, пташиний послід) та менш насиченими - відходи агрохарчової промисловості [25, 26].

Аналіз методів удосконалення процесу переробки органічних відходів тваринництва у метантенках зведено в таблицю 1.

Таблиця 1

Аналіз методів удосконалення процесу переробки органічних відходів тваринництва у метантенках

Метод	Суть удосконалення	Очікуваний ефект
Температурний режим	Впровадження систем автоматичного контролю температури та використання відновлюваних джерел енергії для обігріву (наприклад, частини виробленого біогазу). Підвищення ефективності теплоізоляції реакторів для зменшення теплових втрат.	Підвищення швидкості зброджування, вищий вихід метану
Контроль рН	Автоматичний контроль та регулювання рН субстрату	Оптимальні умови для діяльності метаногенних бактерій, покращення процесу метаногенезу
Концентрація сухих речовин	Підтримка оптимальної концентрації (8-15%) для ефективного анаеробного процесу	Підвищення швидкості зброджування та виходу біогазу
Перемішування субстрату	Використання інтелектуальних систем перемішування на основі даних про параметри субстрату	Запобігання мертвим зонам, рівномірний розподіл субстрату та бактерій
Подача субстрату	Автоматизована система дозованої подачі субстрату	Стабільність процесу зброджування, уникнення пікових навантажень



Продовження таблиці 1

Подрібнення субстрату	Попереднє механічне подрібнення для збільшення площі поверхні	Підвищення швидкості розкладання органічних речовин
Термічна обробка субстрату	Гідротермічна обробка перед анаеробним зброджуванням	Збільшення біодоступності органічної речовини, підвищення швидкості розкладання
Метод	Суть удосконалення	Очікуваний ефект
Співферментація (кодигестія)	Використання математичних моделей для розрахунку оптимального співвідношення різних типів відходів, що дозволяє забезпечити максимальний вихід біогазу. Створення систем автоматичного дозування різних типів субстрату для підтримання стабільного процесу.	Підвищення виходу біогазу, покращення балансу C/N
Усунення інгібіторів	Контроль за амонієм, сульфідами, жирними кислотами	Зменшення токсичного впливу на процес метаногенезу
Додавання мікроорганізмів	Використання спеціалізованих мікробних консорціумів та інокулятів	Підвищення активності мікроорганізмів, стабільність процесу зброджування
Ензиматична стимуляція	Додавання ферментів для поліпшення гідролізу органічних матеріалів	Прискорення розкладання складних органічних речовин
Ефективний відбір біогазу	Використання герметичних систем збору і зберігання біогазу	Запобігання втратам біогазу, підвищення ефективності використання



Продовження таблиці 1

Очищення біогазу	Впровадження технологій хімічного та біологічного очищення для зниження рівня сірководню (H_2S), а також вдосконалення процесів мембранної фільтрації для видалення CO_2 . Використання адсорбційних матеріалів для очищення газу та покращення його якості для використання у когенераційних установках.	Підвищення енергетичної цінності біогазу, зниження шкідливих домішок
------------------	---	--

З наведених в таблиці 1 методів найбільший вплив на продуктивність біогазових установок, вихід метану та підвищення ефективності процесу з мінімальними витратами мають наступні: температурний режим, співферментація та очищення біогазу. Наведені вдосконалення дозволять підвищити загальну продуктивність, знизити експлуатаційні витрати, а також підвищити екологічну ефективність біогазових установок, забезпечуючи стабільне виробництво біогазу та якісних добрив для сільського господарства.

Висновки. Удосконалення процесу переробки органічних відходів тваринництва у метантенках потребує комплексного підходу. Це включає оптимізацію фізико-хімічних умов, покращення підготовки субстрату, впровадження сучасних технологій співферментації, контроль за токсичними речовинами та стимуляцію біологічної активності. Впровадження цих методів може значно підвищити ефективність виробництва біогазу, зменшити витрати та підвищити якість кінцевих продуктів – метану і добрив.

Список використаних джерел

1. Гелетука Г. Г., Железна Т. А. Біоенергетика в Україні. *Матеріали для дебатів з питань енергозбереження*. 2011. С. 18 – 23.
2. Болтянський Б. В. Енерго- та ресурсозбереження в тваринництві: підручник / Б. В. Болтянський та ін. Київ: Видавничий дім «Кондор», 2020. 410 с.
3. Біотехнологія відходів тваринницьких підприємств: монографія / О. М. Захаренко та ін. Київ, 2015. 380 с.
4. 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 28.08.2024).

5. Fischer I. R. Production of methane gas from combination of wheat strow and swine manure. *Trans. ASAE*. 1993. Vol. 26. P. 546 - 548.

6. 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.

7. Marinier M., Clarc K., Wagner-Riddle C. Determining manure management practices for major domestic animals in Canada. *Environment Canada's Greenhouse Gas Inventoru Project*. Environment Canada. Ottawa. ON. 2004.

8. Kettunen R. H., Rintala J. A. The effect of low temperature (5–29 degrees C) and adaptation on the metanogenic activity of biomass. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 1997. Vol. 48, № 4. P. 570–576.

9. Ратушняк Г. С., Джеджула В. В. Інтенсифікація біоконверсії коливальним перемішуванням субстрату. Вінниця: УНІВЕРСУМ, 2008. 117 с.

10. Куріс Ю. В. Біоенергетичні установки. Обладнання та технології переробки органовмісних енергоресурсів: підручник [для наук, інжен. – техн. прац. та фахівців з альтерн. джерел енергії, як навч. посібн. для студ. вищих навч. закл.]. Запоріжжя: ЗДІА, 2012. 348 с.

11. Вербинський В. В., Земляний М. Г. Регіональна енергетична політика України та шляхи її реалізації. Дніпропетровськ, 2003. 64 с.

12. 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>.

13. Skliar A., Skliar R. Justification of conditions for research on a laboratory biogas plan. *MOTROL: Motoryzacja I Energetyka Rolnictwa*. 2014. Vol.16, no 2. P. 183–188.

14. 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. Perfect Publishing. Toronto, Canada. 2023. P. 194–198.

15. 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>.

16. Акулов В. Д. Шляхи підвищення енергетичної ефективності біогазової установки. *Праці ТДАТУ*. 2024. Вип. 24, т. 2. С. 27-36. <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2024-24-2-3>.



17. Комар А. С. Удосконалення конструкції біогазової установки з рекуперацією теплоти збродженої біомаси. *Праці ТДАТУ*. 2024. Вип. 24, т. 3. С. 62-70. <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2024-24-3-5>.
18. 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 (дата звернення 02.09.2024).
19. Скляр Р. В. Методи інтенсифікації процесів метанового зброджування. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2014. Вип. 4, т. 1. С. 3-9.
20. Wu J. H., Liu W. T., Tseng I. Ch., Cheng S.-S. Characterization of microbial consortia in a terephthalate-degrading anaerobic granular sludge system. *Microbiology*. 2001. Vol. 147. P. 373-382.
21. Nichols C. E. Overview of anaerobic digestion technologies. *Europe. BioCycle*. 2014. Vol. 45(1). P. 47-53.
22. Скляр Р. В. Аналіз методів визначення часу перебування та навантаження на метантенк. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка*. 2014. Вип. 148. С. 405-412.
23. Болтянський Б. В. Аспекти вдосконалення технології виробництва біогазу. *Праці ТДАТУ*. 2024. Вип. 24, т. 1. С. 89-100. <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2024-24-1-6>.
24. 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.
25. Відходи виробництва і споживання та їх вплив на ґрунти і природні води: [навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл.] / В. М. Савицький та ін. Київ: ВПЦ «Київський університет», 2007. 152 с.
26. 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.

Стаття надійшла до редакції 05.09.2024 р.

O. Skliar¹, R. Skliar¹, B. Boltianskyi¹, S. Syrotyuk², S. Korobka², I. Stukalets²

¹Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

²Lviv National Environmental University

ANALYSIS OF METHODS OF IMPROVING THE PROCESS OF PROCESSING ORGANIC ANIMAL WASTE IN METHANE TANKS

Summary

The article analyzes the existing methods of improving the process of processing organic livestock waste in methane tanks. The active use of methanogenesis in the fermentation of organic waste is, according to modern ideas, one of the most promising



ways to jointly solve environmental and energy problems at agricultural enterprises. The main directions of scientific research on the intensification of the process of anaerobic processing of sewage are considered. Improving the process of anaerobic fermentation of sewage is, first of all, reducing the fermentation cycle or the residence time of organic biomass in the methane tank. The loading dose of the methane tank and the frequency of fermentation of organic raw materials were analyzed. To analyze the methods of improving the process of anaerobic processing of manure and manure effluents in methane tanks, they were conditionally divided into types: mechanical, biochemical, microbiological, thermal and electromagnetic processing. One of the ways to improve the process of anaerobic processing of manure is the use of an anaerobic biofilter system to extend the life of methane-producing microorganisms in the working chamber of the methane tank. To maintain the required temperature regime in the fermentation chamber of the methane tank, there are two options: preliminary heating of the initial mass before loading, where the heat exchange devices are located outside the fermentation chamber of the methane tank, and heating of the fermentation product directly inside the container. Their work features, advantages and disadvantages are given. The analysis of the methods of improving the process of processing organic livestock waste in methane tanks is summarized in a table, which presents the essence of the improvement and the expected effect.

Key words: biogas, environment, fertilizers, ecology, methane, temperature, heat exchanger, fermentation.