



DOI: 10.32782/2078-0877-2024-24-3-5

УДК 662.767.2

О. Г. Скляр¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-0456-2479

Р. В. Скляр¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-1547-5100

А. С. Комар¹, інженер¹, аспірант¹ *Таврійський державний агротехнологічний університет
імені Дмитра Моторного*

e-mail: radmila.skliar@tsatu.edu.ua, тел.: +38067-916-85-80

УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ БІОГАЗОВОЇ УСТАНОВКИ З РЕКУПЕРАЦІЄЮ ТЕПЛОТИ ЗБРОДЖЕНОЇ БІОМАСИ

Анотація. В статті запропоновано установку та технологію для рекуперації теплоти збродженої біомаси, намічено основні вимоги до процесу тепловідбору та шляхи його інтенсифікації. Проведений аналіз витрат енергії на системи забезпечення процесу метаногенезу дозволив зробити висновок про те, що головну увагу при пошуку шляхів зниження енергоємності метанового зброджування слід приділяти системам рекуперації теплоти збродженого гною і перемішування біомаси в біореакторах. При цьому з огляду на інтенсивний спосіб обробки біомаси в термофільному режимі обрано рекуператор інтенсивної дії. Крім того, апарати, що вибираються, повинні задовольняти вимогам, які ставляться до установок, працюючих з неньютонівським характером рідини, до яких відноситься біомаса. Також наведено схему рекуператора, що працює в режимі зворотно-поступального руху фаз з пульсуючим завантаженням та вивантаженням біомаси.

Ключові слова: рекуператор, теплообмін, гній, метанове зброджування, біомаса, інтенсифікація.

Постановка проблеми. Застосування типових теплообмінників для утилізації теплоти гною, який перероблюється в біогазовій установці має наступні складнощі: складна експлуатація через неньютонівський характер рідин; необхідно автономне обладнання, що перекачує; технологічно обмежений час завантаження метантенка визначає великі об'єми теплообмінних апаратів [1-3]. Останнє призводить до тривалого знаходження гною в цих апаратах і як наслідок – до великих амортизаційних витрат, що суттєво знижує ефективність їх застосування. Для зменшення габаритів рекуператора необхідно максимально інтенсифікувати процес теплообміну – у межах, які допускаються технологічним режимом зброджування. З огляду на вищенаведені специфічні властивості гною (висока в'язкість, схильність до адгезії) теплообмінну поверхню рекуператора в біогазових установках слід виконувати гладкою [4,5].



Необхідною умовою інтенсивного протікання метанового зброджування є також вільний обмін речовин на поверхнях розподілу фаз (шарів), які повинні періодично переміщатися у метантенку в режимі ідеального витіснення за рахунок перепаду тиску біогазу (без перемішування шарів біомаси між собою) [6]. При цьому в метантенку створюються різні зони, для кожної з яких є свого роду адаптована метаногенна асоціація. Ці умови повинні враховуватись при конструктивному виконанні процесу рекуперації теплоти збродженої біомаси [7].

Аналіз останніх досліджень. В Україні питання енергетичної ефективності біогазових установок та теплообмінним процесам в них займалися наступні науковці: Ратушняк А. А., Лялюк О. Г., Коцеев І. А., Гелетуха Г. Г., Желих В. М., Кучерук П. П., Голуб Г. А., Калетнік Г. М., Матвеев Ю. Б., Маляренко В. А., Токарчук Д. М., Скорук О. П., Пришляк Н. В., Коваленко В. Л. та ін. [8-13] Проведені дослідження фізико-механічних властивостей гною показують, що специфічні особливості маси, що обробляється, при вологості 93% зумовлюють неньютоновський характер його течії в поєднанні з великими значеннями в'язкості. Структура гною і таксонометрична залежність між різними видами мікроорганізмів обмежує застосування різних типів рекуператорів і конструкцій біореакторів, а також методів перемішування і підвищених швидкостей руху гною при анаеробному зброджуванні. Автори [5,6,8,14] вважають, що механічне перемішування біомаси, що зброджується, негативно впливає на нормальне культивування метанових бактерій. Аналогічний вплив має наявність кисню у вихідній біомасі, що змішується зі зброджуваною по всьому об'єму реактора, так як при цьому починає проявлятися його інгібуюча дія [14].

Ці особливості процесу слід враховувати при доборі теплообмінників-утилізаторів теплоти переробленої біомаси.

Формулювання мети статті. Підвищення ефективності процесу метанового зброджування рідкого гною тварин в біогазовій установці шляхом інтенсифікації процесу рекуперації теплових відходів.

Основна частина. Можна навести наступні потенційні можливості для інтенсифікації процесу тепловідбору збродженої біомаси та покращення енергоефективності біогазових установок [14-18]:

- 1) використання мікрохвильового опромінення для підвищення тепловіддачі від збродженої біомаси. Деякі дослідження показали, що мікрохвильове оброблення може руйнувати клітинні стінки біомаси та підвищувати її теплопровідність, що призводить до покращення тепловіддачі під час процесу бродіння;



2) використання наноматеріалів, таких як наночастинки оксиду цинку або графен, для поліпшення ефективності теплообміну. Ці матеріали мають високу теплопровідність і можуть бути використані для збільшення теплової поверхні та покращення теплопередачі;

3) використання комп'ютерного моделювання та оптимізації для визначення оптимальних параметрів процесу тепловідбору, таких як температура, тиск, швидкість потоку тощо. Це дозволить зменшити експериментальні витрати та швидше досягти оптимальних результатів.

4) розробка нових теплообмінних конструкцій, таких як мікроканалні теплообмінники або теплові насоси, які забезпечать ефективніший теплообмін та зменшують втрати тепла.

5) використання електрооптичних систем контролю теплового процесу, що дозволить в реальному часі контролювати та регулювати параметри тепловідбору для підвищення ефективності.

Так, проведений аналіз витрат енергії на системи забезпечення процесу метаногенезу [2,8,9,10,15,16] дозволив зробити висновок про те, що головну увагу при пошуку шляхів зниження енергоємності метанового зброджування слід приділяти системам рекуперації теплоти збродженого гною і перемішування біомаси в біореакторах. При цьому з огляду на інтенсивний спосіб обробки біомаси в термофільному режимі доцільно вибирати рекуператори інтенсивної дії. Крім того, апарати, що вибираються, повинні задовольняти вимогам, які ставляться до установок, працюючих з неньютонівським характером рідини, до яких відноситься біомаса [17-19].

З метою усунення недоліків відомих біогазових установок [20-26], запропоновано та розроблено установку та технологію для рекуперації теплоти збродженої біомаси [27], намічено основні вимоги до процесу тепловідбору та шляхи його інтенсифікації [28].

Принципову схему біогазової установки із рекуперацією теплоти збродженої біомаси представлено на рисунку 1. Запропонована установка включає вертикальний циліндричний метантенк 1, з коаксіально розташованими всередині нього камерою змішування 2, що має газову порожнину 5, і теплообмінник 3, розміщений в метантенці 1 з витримувачами 4,17. Внутрішню порожнину останніх суміщено з камерою змішування 2, причому верхню частину одного з витримувачів сполучено з газовою порожниною камери 5 та рекуператором 22. Трубопроводи 23, 18 завантаження вихідної біомаси в метантенк 1 також сполучені з рекуператором 22 [29].

Установка працює наступним чином. Вихідний (холодний) гній через вхідний патрубок 21 подається у трубний простір А рекуператора 22. В останньому відбувається попереднє нагрівання

вихідного гною за рахунок скидної теплоти переробленого гною.

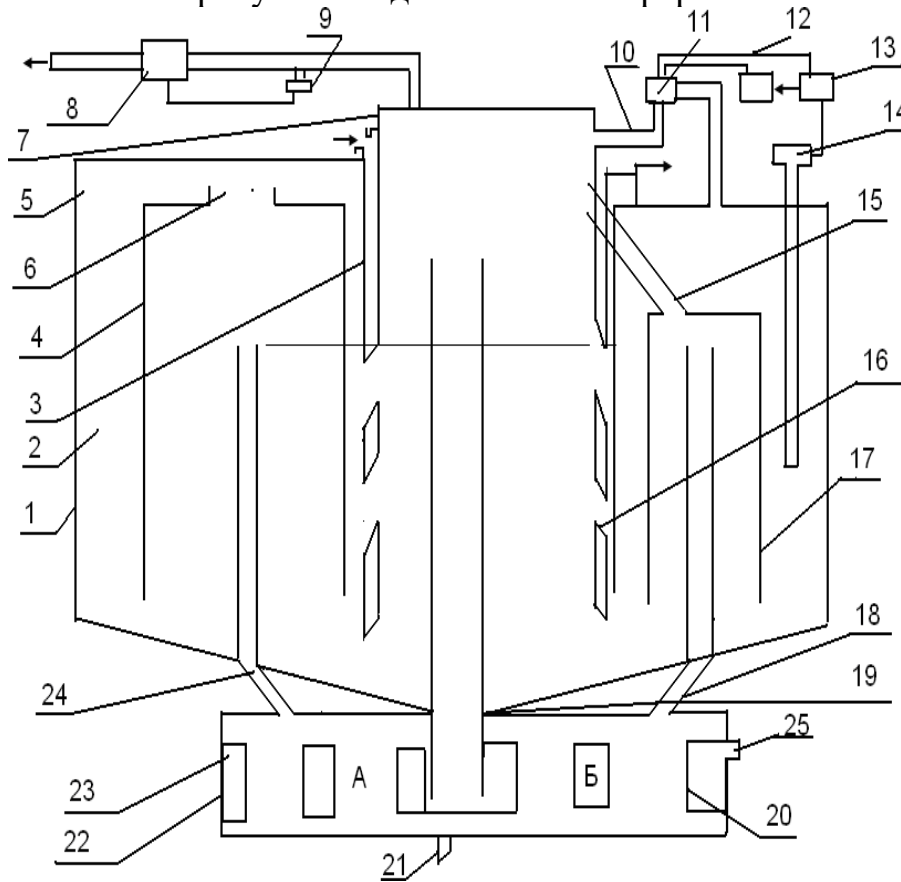


Рис. 1. Принципова схема біогазової установки з рекуператором теплоти переробленого гною: 1 – метантенк; 2 – камера змішування; 3 – теплообмінник; 4, 17-витримувачі; 5 – газова порожнина; 6 – отвір; 7 – труба-роздільвач; 8, 12 – вакуумні насоси; 9 – датчик розрядження; 10, 15 – патрубки; 11 – електромагнітний клапан; 13 – програмний пристрій; 14 – регулятор температури; 16, 20 – теплообмінні трубки; 18, 23 – трубопроводи завантаження; 19 – вивантажувальна труба; 21 – вхідний патрубок; 22 – рекуператор; 24 – вивантажувальний патрубок рекуператора; 25 – вивантажувальна труба для відпрацювання. А і В – трубний та міжтрубний простір рекуператора

За рахунок періодичного підключення рекуператора 22 до вакуум-системи в його трубному (А) і міжтрубному (Б) просторі здійснюється зворотно-поступальний рух біомаси зі змінною амплітудою. Завантаження та вивантаження біомаси здійснюється періодично (порційно). При черговій подачі порції вихідного гною в рекуператор 22 одночасно здійснюється рівне за обсягом завантаження нагрітого зброженого гною через завантажувальні трубопроводи 23 і 18 у верхню частину витримувачів 4, 17, вбудованих в метантенк 1, при цьому у витримувачах 4, 17



відбувається поглинання кисню семіанаеробними мікроорганізмами та перетворення органічних речовин на органічні кислоти. Процес поглинання кислотовмісної маси у вихідному гної і перетворення органічних речовин на органічні кислоти в даному випадку відбувається інтенсивніше, ніж у витримувачах, окремо розташованих від метантенка, так як нижню частину витримувачів 4, 17 суміщено з нижньою частиною камери змішування 2, де у великій кількості накопичуються та розвиваються семіанаеробні мікроорганізми [29]. При завантаженні-вивантаженні гній, що витримується, не змішується зі зброджуваним гноєм по всьому об'єму метантенка 1, а надходить в нижню частину камери змішування 2, що істотно покращує роботу метантенка.

Після подачі вихідного попередньо нагрітого гною у витримувачі 4 і 17 з автоматичним підключенням засобів підтримання температурного режиму бродіння в метантенку 1 починається перемішування, і одночасно з ним здійснюється подача порції витриманого гною знизу в камеру змішування 2, що дорівнює об'єму порції завантаженого вихідного гною. На заданому рівні шару біомаси в метантенку відбувається анаеробний розпад органічних речовин з виділенням метановмісного газу. При цьому в нижній частині камери змішування 2 розвиваються семіанаеробні мікроорганізми, і навіть осідають тверді компоненти. В середній частині розвиваються метаноутворюючі мікроорганізми, а у верхній частині накопичується зброджений гній, який видаляється через труби 19, а разом з ним і тверді компоненти (у міру їх розкладання).

Перероблений гній з метантенку 1 через вивантажувальну трубу 19 надходить у міжтрубний простір рекуператора 22 для рекуперації теплоти. Завантаження вихідного гною в рекуператор 22 і розвантаження переробленого гною з метантенка здійснюється в режимі ідеального витіснення.

Тиск у верхній частині труби 19 і метантенку 1 підтримується нижче атмосферного на рівні 6000 – 7000 Па вакуумним насосом 12, керованим датчиком розрідження 9, причому перепад гідростатичного тиску у вивантажувальній трубі 19 відповідає прийнятій величині розрідження газоподібних продуктів.

Перемішуванням гною, що знаходиться в метантенку 1, керує програмний пристрій 13, заблокований з регулятором температури 14, який розташовано в камері змішування 2. Цей пристрій забезпечує в заданому інтервалі часу відкриття або закриття електромагнітного клапану 11 і включення вакуумного насосу 12. Останній здійснює відбір газоподібних продуктів з верхньої частини труби 7, а також з вивантажувальної труби 19. Біогаз, що відбирається, надійде у верхню частину метантенку 1 і, відповідно, у верхню частину



витримувача 4 через отвори 6. При цьому у верхню частину труби 7 і у вивантажувальну трубу 19, а також витримувач 17 піднімається маса, що нагнітається з верхньої частини метантенку 1 і витримувача 4, з'єданого з міжтрубним простором патрубками 18, 23, а також з нижньою частиною камери змішування 2. Коли рівень зброджуваного гною доходить до верхнього рівня верхнього ряду трубок 16, які розташовано в теплообміннику 3, що розділяє на дві рівні частини метантенк 1, починається часткове обвалення рідинних стовпів гною, що зброджується.

Після заданих малоамплітудних циклів обвалення рідинних стовпів гною програмний пристрій 13 відкриває електромагнітний клапан 11, і відключає вакуумний насос 12. В результаті цього верхня частина труби 7 через патрубок 15 сполучається з верхньою частиною метантенку 1 і відбувається повне обвалення зброджуваного гною в трубі 7 через нижній її торець і тангенціальні трубки 16, а також обвалення вивантажуваного гною у вивантажувальній трубі 19 і у витримувачі 22 (в обох порожнинах окремо) до заданого рівня. При цьому забезпечується підйом осілих твердих компонентів, збільшується ефективність тепловідбору в рекуператорі 22, запобігається налипання гною до стінок теплообмінних трубок 20 і утворення кірки у верхній частині камери змішування 2. Крім того, в останній забезпечується максимальна амплітуда коливань при зворотно-поступовому перемішуванні. Через заданий проміжок часу цикл повторюється, при цьому частота пульсацій зворотно-поступального перемішування гною в метантенку 1 може регулюватися шляхом зміни режиму роботи вакуумного насоса 12.

Перероблений шлам з рекуператору вивантажується через вивантажувальну трубу 19. Одночасне перемішування теплоносіїв в обох порожнинах рекуператора здійснюється в пульсуючому режимі за допомогою вакуумного насоса. Схема роботи трубчастого рекуператора при зворотно-поступальному переміщенні біомаси показано на рис. 2.

В рекуператорі 22 розташовані знімні трубки – теплообмінники 20, причому їх можна замінити незалежно один від одного, не зупиняючи процес зброджування в метантенку.

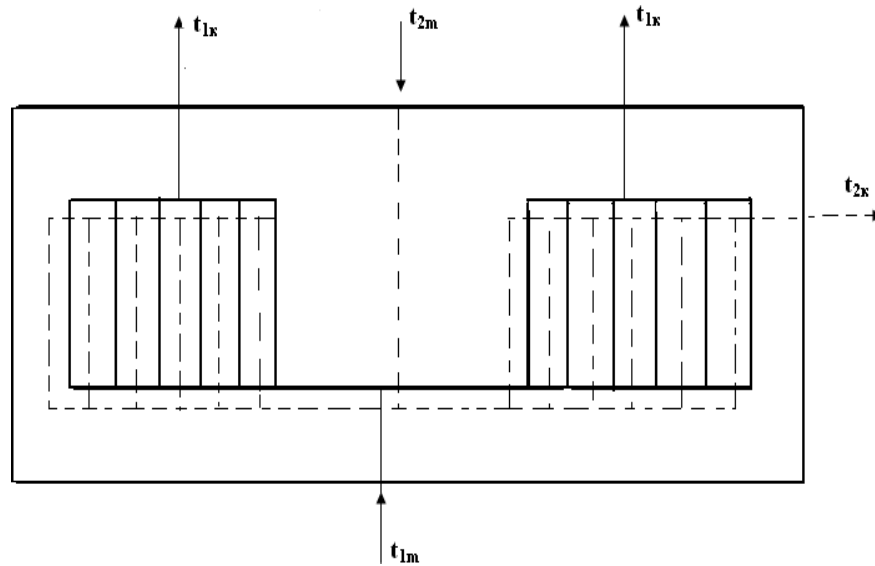


Рис. 2. Схема рекуператора, що працює в режимі зворотно-поступального руху фаз з пульсуючим завантаженням та вивантаженням біомаси

Висновки. З метою усунення недоліків відомих біогазових установок, запропоновано та розроблено установку та технологію для рекуперації теплоти збродженої біомаси, намічено основні вимоги до процесу тепловідбору та шляхи його інтенсифікації.

Список використаних джерел.

1. 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.

2. Скляр О. Г. Аналіз роботи біогазових установок. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2019. Вип. № 10(109). С. 132-138.

3. Курашкін О. С. Анаеробна утилізація сільськогосподарських відходів в біогазових установках. *Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі*: матер. II Міжнар. наук.-практ. конф. Мелітополь: ТДАТУ, 2020. С. 55-59.

4. M. Marchionni, G. Bianchi, A. Karvountzis-Kontakiotis, A. Pesiridis, S.A. Tassou. Dynamic modeling and optimization of an ORC unit equipped with plate heat exchangers and turbomachines. *Energy Proc.* 2017. Vol. 129. P. 224-231.

5. Ратушняк Г. С., Джеджула В. В. Інтенсифікація теплообміну та термостабілізація біореакторів. *Вісник ВПІ*. 2006. № 2. С. 26-32.

6. Ігнатенко Д. Г. Аналіз оптимальних умов ферментації в біогазових установках. *Технічне забезпечення інноваційних технологій*



в агропромисловому комплексі: матер. I Міжнар. наук.-практ. Інтернет-конференції. Мелітополь: ТДАТУ, 2020. С. 196-199.

7. Теплообмінні процеси та обладнання переробних та харчових виробництв / І. П. Паламарчук [та ін.]. Львів: Бескид Біт, 2006. 368 с.

8. Ратушняк Г. С., Кощєєв І. А. Енергоефективність біоконверсії при термостабілізації анаеробного бродіння субстрату в біогазовій установці з тепловим насосом. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2012. № 2. С. 145-152.

9. Когенераційні технології в малій енергетиці: монографія / В. А. Маляренко, О. Л. Шубенко, С. Ю. Андрєєв, М. Ю. Бабак, О. В. Сенецький; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова, Ін-т проблем машинобуд. ім. А. М. Підгорного. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. 454 с.

10. Желих В. М., Дзерин О. І., Сподинюк Н. А., Желих В. М. Енергоефективні системи теплозабезпечення виробничих приміщень. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2012. № 2. С. 152-157.

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

12. Geletukha G., Kucheruk P., Matveev Y. Prospects of biomethane production and use in Ukraine. UABio Position Paper. 2014. № 11. URL: <https://jntes.tu.kielce.pl/wp-content/uploads/2023/02/prospects-of-biomethane-production-in-ukraine.pdf> (дата звернення 01.03.2024).

13. Григоренко С. М. Адаптивні методи утилізації відходів птахівництва. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2021. Вип. 11, т. 1. №18. URL: http://elar.tsatu.edu.ua/bitstream/123456789/14158/1/18_be.pdf (дата звернення 04.03.2024).

14. 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 04.03.2024).

15. Забарний Г. М., Шурчков А. В. Енергетичний потенціал нетрадиційних джерел енергії України. Київ, 2002. 211 с.

16. Скляр О. Г. Аналіз енергетичної ефективності метантенка. *Праці ТДАТУ*. 2015. Вип. 15, т. 2. С. 316-322.

17. Nichols C. E. Overview of anaerobic digestion technologies. *Europe. BioCycle*. 2014. Vol. 45(1). P. 47-53.

18. Cagatay Varis, Selin Ozcira Ozkilog. In a biogas power plant from waste heat power generation system using Organic Rankine Cycle and multi-criteria optimization. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2023. Vol. 44. no 102729. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.102729>.



19. D. Prando, M. Renzi, A. Gasparella, M. Baratieri, Monitoring of the energy performance of a district heating CHP plant based on biomass boiler and ORC generator. *Appl. Therm. Eng.* 2015. Vol. 79. P. 98-107.

20. Y. Cao, H. N. Rad, D. H. Jamali, N. Hashemian, A. Ghasemi, A novel multi-objective spiral optimization algorithm for an innovative solar/biomass-based multigeneration energy system: 3E analyses, and optimization algorithms comparison. *Energy Convers. Manag.* 2020. Vol. 219. no 112961.

21. Skliar O. G., Skliar R. V. Substrate management in biogas plants. *Молодь і технічний прогрес в АПК: Мат. Міжнар. науково-практичної конференції. Харків: ХНТУСГ. 2021. Т. 2. Інноваційні розробки в аграрній сфері. С. 260-262.*

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

23. Скляр О. Г. Біоконверсні технології прискореної переробки відходів тваринництва в екологічно безпечні добрива. *Науковий вісник ТДАТУ. 2021. Вип. 11, т. 2. № 3. URL: <http://elar.tsatu.edu.ua/bitstream/123456789/16047/1/Skliar.pdf> (дата звернення 05.03.2024).*

24. Skliar R. Justification of conditions for research on a laboratory biogas plan. *MOTROL: Motoryzacja I Energetyka Rolnictwa. 2014. Vol.16. No 2b. P. 183-188.*

25. M. Persson, O. Jonsson, A. Wellinger. Biogas upgrading to vehicle fuel standards and grid injection. IEA Bioenergy. Task 37 – Energy from biogas and landfill gas. December 2006.

26. Eder B., Schultz H. Biogas plants. A practical guide edited by IA Reddich, Zorg Biogas, 2011. P. 175.

27. Скляр Р. В., Скляр О. Г. Теоретичні дослідження режимів і параметрів метантенку біогазової установки. *Науковий вісник ТДАТУ 2020. Вип. 10, т. 1. URL: <http://elar.tsatu.edu.ua/bitstream/123456789/11292/1/14.80.pdf> (дата звернення 09.03.2024).*

28. 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> (дата звернення 11.03.2024).*

29. Скляр Р. В. Аналіз методів визначення часу перебування та навантаження на метантенк. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. 2014. Вип. 148. С. 405-412.*

Стаття надійшла до редакції 04.04.2024 р.



O. Skliar¹, R. Skliar¹, A. Komar¹

¹Dmytro Motornyi Tavria State Agrrotechnological University

IMPROVING THE DESIGN OF A BIOGAS PLANT WITH HEAT RECOVERY OF FERMENTED BIOMASS

Summary

The use of typical heat exchangers for heat utilization of manure, which is processed in a biogas plant, has the following difficulties: difficult operation due to the non-Newtonian nature of liquids; autonomous pumping equipment is required; the technologically limited loading time of the methane tank determines large volumes of heat exchangers. The structure of manure and the taxonomic dependence between different types of microorganisms limit the use of different types of recuperators and bioreactor designs, as well as mixing methods and increased manure movement speeds during anaerobic fermentation. mechanical mixing of the fermenting biomass negatively affects the normal cultivation of methane bacteria. The presence of oxygen in the original biomass, which mixes with the fermented biomass throughout the entire volume of the reactor, has a similar effect, as its inhibitory effect begins to manifest in this case. The article proposes an installation and technology for heat recovery of fermented biomass, outlines the main requirements for the heat extraction process and ways of its intensification. The conducted analysis of energy costs for systems supporting the methanogenesis process made it possible to conclude that the main attention when searching for ways to reduce the energy intensity of methane fermentation should be given to systems for recovering the heat of fermented manure and mixing biomass in bioreactors. At the same time, taking into account the intensive method of processing biomass in thermophilic mode, an intensive recuperator was chosen. In addition, the devices selected must meet the requirements for installations working with non-Newtonian fluids, which include biomass. Also given is the scheme of the recuperator operating in the mode of reciprocating phase movement with pulsating loading and unloading of biomass.

Key words: recuperator, heat exchange, manure, methane fermentation, biomass, intensification.