

УДК 663.033

ОБҐРУНТУВАННЯ СТВОРЕННЯ ЕЛЕКТРОТЕПЛОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ПЕРЕМІШУВАННЯ ТА ПІДГРІВУ БІОМАСИ

М. О. Сподоба, аспірант

М. М. Заблодський, доктор технічних наук, професор

Національний університет біоресурсів і природокористування України

E-mail: spmisha@ukr.net

Анотація. Нині зброджування біомаси у біогазових установках є одним з найпрогресивніших, екологічно та економічно вигідних рішень для отримання енергії із відходів. Однак, процес анаеробного зброджування відходів є довготривалим, тому одними з основних способів інтенсифікації біогазового виробництва є перемішування та підігрів біомаси у процесі бродіння. Стаття присвячена питанню обґрунтування створення електротепломеханічної системи для перемішування та підігріву біомаси у біогазовому реакторі. Поєднання двох процесів інтенсифікації у комбіновану систему викликає особливу увагу до енергоефективності такої системи, тому створення системи потребує поглибленого дослідження зміни теплового потоку від частоти обертання та наявності забруднюючого шару на поверхні нагрівача та визначення оптимальної частоти обертання мішалки. Дослідження проводилися для біогазового реактора циліндричної форми. Приймали, що забруднюючий шар рівномірно розподілений по поверхні лопатей та валу у які вмонтовано електричні нагрівачі. При визначенні оптимальної частоти перемішування біомаси за критерій оптимальності приймали найменше значення розбіжності між тепловим потоком забрудненої та не забрудненої поверхні нагрівача. У ході дослідження встановлено, що при частоті обертання $n=120$ об/хв, розбіжність між величиною теплового потоку забрудненої поверхні та не забрудненої становить 40 %. При частоті обертання $n=20$ об/хв, розбіжність між значеннями становить 26 %. За обраним критерієм оптимальності оптимальна частота обертання електротепломеханічної системи з урахуванням забруднюючого шару знаходиться в діапазоні $n=20..40$ об/хв. Виявлено, що збільшення частоти обертання призводить до зростання теплопередачі від електротепломеханічної системи до біомаси, а збільшення забруднюючого шару має суттєвий вплив на розповсюдження теплового потоку. Зростання теплового потоку від частоти перемішування має нелінійний характер як для нагрівача із забрудненням, так і без забруднення.

Ключові слова: енергоефективність, частота обертання, комбінована система, забруднення, критерій Рейнольдса

Актуальність. Через швидку урбанізацію, індустріалізацію та стрімкий ріст кількості населення на планеті одним з найважливіших питань усього суспільства є розвиток харчової промисловості, тваринницьких комплексів та фермерських угідь. Однак, внаслідок зростання фермерських та сільськогосподарських угідь, зростання поголів'я тварин призводить до накопичення рослинних та тваринних відходів – біомаси. Це підштовхує населення на пошуки альтернативних методів утилізації та переробки отриманих відходів, оскільки системи збереження є джерелами небезпечних викидів метану та окисів азоту, що призводить до забруднення повітря, посилення кліматичних змін та парникового ефекту [1]. Найбільшого розповсюдження для утилізації побутових та промислових відходів, каналізаційних стічних вод отримала аеробна та анаеробна обробка у спеціальних резервуарах – біогазових реакторах [2, 3].

Нині зброджування органічних відходів у біогазових установках є одним з найпрогресивніших, екологічно та економічно вигідних рішень для отримання енергії з відходів у вигляді біогазу. Поряд з цим, побічним ефектом зброджування органічних відходів є отримання цінних екологічно чистих добрив. Використовуючи анаеробну обробку з органічних відходів, можна отримати біогаз і після його очищення використовувати біометан для власних потреб або вироблення теплової та електричної енергії у когенераційних установках. Органічні відходи у біогазовому реакторі в процесі анаеробного бродіння мають властивість розділятися на фракції. На дні реактора відбувається скупчення важких частин у вигляді осаду, легкі частини сировини за допомогою бульбашок газу піднімаються на поверхню сировини, утворюючи шар кірки. Середина між кіркою та осадом заповнена рідкою частиною відходів. Це має суттєвий вплив на інтенсивність вироблення біогазу.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Процес анаеробного зброджування відходів є довготривалим, тому одними з основних методів інтенсифікації біогазового виробництва є перемішування та підігрівання органічних відходів у процесі бродіння [3–10].

Метою перемішування органічних відходів є забезпечення рівномірного розподілу фаз та температурних полів по об'єму реактора, руйнування плаваючої

кірки, підтримка твердої фракції у зваженому стані [3, 6]. Таким чином, на підставі вище зазначеного можна виділити основне завдання перемішування, що полягає у створенні однорідної речовини з однаковою температурою, кислотністю та іншими фізико-хімічними складовими у будь-якій точці об'єму.

Метою підігрівання є забезпечення підтримання постійної температури анаеробного зброджування біомаси, уникнення критичного зниження та стрімких перепадів температури у реакторі [3, 6, 11]. Таким чином, головним завданням підігрівання біомаси є створення та підтримання комфортних температурних умов для розвитку колоній бактерій та протікання біологічних процесів анаеробного зброджування.

У процесі зброджування біомаси, на поверхні підігрівального пристрою відбувається відкладення часточок біомаси, які негативно впливають на інтенсифікацію та рівномірність процесу теплопередачі, знижуючи продуктивність установки [10–12]. Наслідком цього є збільшення енергетичного споживання на процес підігрівання. Важливо відмітити, що відсутність перемішування призводить до швидшого налипання часточок [13], тоді як після перемішування величина відкладень на мішалці зменшується [14], тому з погляду енергетичної ефективності актуально розглядати систему нагрівання біомаси поєднану разом з системою її перемішування [5, 15]. Використання комбінованої системи направлене на зменшення споживання енергії на процеси перемішування та підігрівання біомаси під час анаеробного зброджування. Це досягається шляхом забезпечення раціонального вибору геометричних розмірів перемішуючого пристрою, потужності і місця розташування пристрою підігрівання та поєднанні із системою автоматичного керування електротепломеханічною системою (рис.1).

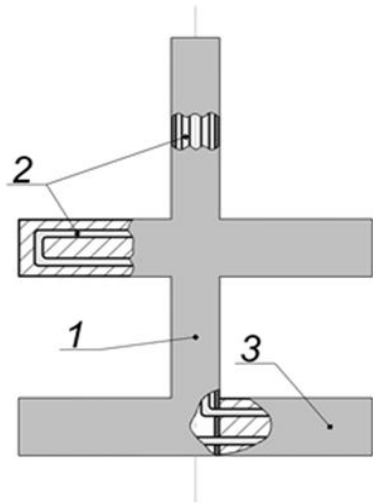


Рис. 1. Електротепломеханічна система [5, 15]:

1 – порожнистий вал;

2 – електричний нагрівальний елемент;

3 – лопать

Враховуючи вище сказане, поєднання двох процесів інтенсифікації з точки зору енергоефективності потребує поглибленого дослідження теплових потоків та визначення оптимальної швидкості перемішування.

Мета дослідження – обґрунтування створення електротепломеханічної системи перемішування та підігріву біомаси для зниження енергоспоживання на процеси інтенсифікації анаеробного зброджування біомаси та підвищення продуктивності біогазової установки.

Матеріали та методи дослідження.

Для конструкції електротепломеханічної системи перемішування та електричного підігрівання біомаси (рис.1) теплопередача від електричного нагрівального елемента, вмонтованого у мішалку, до зброджуваної біомаси відбувається за такою схемою: процес передачі теплоти від нагрівального елемента у товщині стінки мішалки; теплопровідність у товщині шару налипання на лопаті та вал мішалки; тепловіддача від електротепломеханічної системи до біомаси. Тепловий потік для кожного з етапів матиме такий вигляд:

- процес передачі теплоти від нагрівального елемента у товщині стінки мішалки:

$$q_{нагр1} = \alpha_1 \cdot F_1 \cdot \tau \cdot (t_{нагр} - t_m); \quad (1)$$

$$\alpha_1 = \frac{\delta_1}{\lambda_1}; \quad (2)$$

- теплопровідність у товщині шару налипання на лопаті та вал мішалки:

$$q_{нагр2} = r_{заб} \cdot F_2 \cdot \tau \cdot (t_m - t_{брод}); \quad (3)$$

- тепловіддача від зовнішньої поверхні електротепломеханічної системи до біомаси:

$$q_{нагрз} = k \cdot F \cdot \tau \cdot (t_m - t_{брод}), \quad (4)$$

де α_1 – коефіцієнт теплопередачі у товщині стінки мішалки, $Вт/(м^2 \cdot ^\circ C)$; λ_1 – коефіцієнт теплопровідності матеріалу лопаті та валу мішалки, $Вт/(м \cdot ^\circ C)$; δ_1 – товщина стінки лопаті та валу, м; τ – час, год; F – площа нагрівальної поверхні, $м^2$; F_1 – площа поверхні електричного нагрівача, $м^2$; F_2 – площа забруднюючого шару, $м^2$; $t_{нагр}$ – температура електричного нагрівача, $^\circ C$; t_m – температура на зовнішній стінці лопатей та валу електротепломеханічної системи перемішування та підігріву, $^\circ C$; $t_{брод}$ – температура зброджування біомаси, $^\circ C$; k – коефіцієнт теплопередачі, який враховує середню швидкість теплопередачі по всій поверхні теплообміну, $Вт/(м^2 \cdot ^\circ C)$; $r_{заб}$ – опір теплопередачі, створений шаром забруднення, $(м^2 \cdot ^\circ C) / Вт$.

Коефіцієнт теплопередачі k залежить від великої кількості факторів, тому, в залежності від наявності або відсутності забруднюючого шару на поверхні електротепломеханічної системи перемішування та підігрівання, його рекомендовано знаходити за такими рівняннями [16]:

- без забруднюючого шару:

$$k = \frac{1}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{1}{\alpha_2}}; \quad (5)$$

- з наявністю забруднюючого шару:

$$k = \frac{1}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + r_{заб} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (6)$$

де α_2 – коефіцієнт теплопередачі від мішалки, у якій вмонтовано електричний підігрівач, до об'єму зброджуваної біомаси, $Вт/(м^2 \cdot ^\circ C)$.

Для визначення α_2 – необхідно визначити режим руху рідини, оцінка якого виконується на основі безрозмірної комплексної величини відцентрового критерію Рейнольдса (Re_m) [2, 3, 6, 13, 14, 17]:

$$Re_m = \frac{\rho \cdot n \cdot d_m^2}{\mu}, \quad (7)$$

де ρ – густина субстрату, $кг/м^3$; n – частота обертів мішалки, $об/с$; d_m – діаметр мішалки, $м$; μ – динамічна в'язкість субстрату.

Критеріальне рівняння конвективного теплообміну між нагрітою поверхнею та об'ємом збродженої біомаси має такий вигляд [18]:

$$\alpha_2 = 1,01 \cdot \frac{\lambda}{d_{вн}} \cdot (Re_m)^{0,62} \cdot (Pr)^{0,36} \cdot \left(\frac{Pr_p}{Pr_{ст}} \right)^{0,25}, \quad (8)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності біомаси, $Вт/(м \cdot ^\circ C)$; $d_{вн}$ – внутрішній діаметр резервуара, $м$; Pr_p – критерій подібності Прандтля у середині резервуара при температурі бродіння; $Pr_{ст}$ – критерій подібності Прандтля біля стінки резервуара; Pr – критерій подібності Прандтля [18].

$$Pr = \frac{c \cdot \mu}{\lambda}, \quad (9)$$

де c – питома теплоємність біомаси, $Дж/(кг \cdot ^\circ C)$.

Для дослідження зміни теплового потоку від частоти обертання та наявності і відсутності забруднюючого шару на поверхні електротепломеханічної системи прийнято такі початкові умови: $t_{брод} = 35^\circ C$, допустиме відхилення температури $t_{дон} = \pm 1^\circ C$ за годину. Конструкція електротепломеханічної системи за рис. 1, лопаті та вал якої виконано із нержавіючої сталі, з такими параметрами: коефіцієнт теплопровідності $\lambda_1 = 52 \text{ Вт/(м} \cdot ^\circ C)$, товщина стінки лопаті $\delta_1 = 0,005 \text{ м}$. Частота обертання мішалки $n = 20 \dots 120 \text{ об/хв}$, діаметр мішалки $d_m = 0,31 \text{ м}$. Біогазовий реактор циліндричної форми з такими геометричними параметрами: об'єм реактора $V_{реак} = 50 \text{ л}$, висота реактора $H = 0,6 \text{ м}$, радіус реактора $R = 0,18 \text{ м}$, внутрішній діаметр реактора $d_{вн} = 0,35 \text{ м}$. Фізико-хімічні параметри органічної біомаси, завантаженої у біогазовий реактор: вологість біомаси рівна 90% ,

$c = 4200 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$, $\lambda = 0,62 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$, $\mu = 0,048 \text{ Па} \cdot \text{с}$, $\rho = 1024 \text{ кг}/\text{м}^3$ [3, 6, 9, 10, 13, 14].

З метою визначення оптимальної частоти перемішування органічної біомаси у ході анаеробного зброджування з забрудненим нагрівальним пристроєм проведено теоретичний аналіз за умовами: опір забруднюючого шару є незмінним і становить $r_{заб} = 6,6 \cdot 10^{-4} (\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$ [7, 14]; температура електричного нагрівача рівна температурі лопатей та валу перемішуючого пристрою $t_{нагр} = t_m = 60 ^\circ\text{C}$; приймаємо рівномірний розподіл забруднюючого шару по поверхні лопатей та валу у які вмонтовано електричні нагрівачі. Критерієм оптимальності є найменше значення розбіжності між тепловим потоком забрудненого та не забрудненого підігрівача.

Результати досліджень та їх обговорення. Отримано графік теплового потоку від електротепломеханічної системи до біомаси залежно від частоти перемішування та наявності забруднень (рис.2).

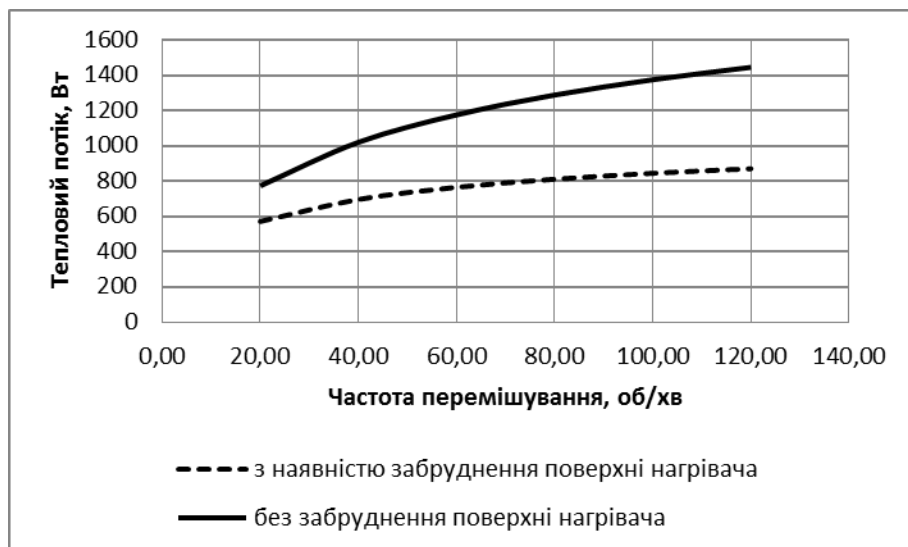


Рис. 2. Залежність теплового потоку від частоти перемішування та наявності забруднень на поверхні електротепломеханічної системи

У результаті аналізу отриманої залежності теплового потоку (рис. 2) можна зробити висновок, що збільшення частоти обертання призводить до пришвидшення теплопередачі від електротепломеханічної системи до біомаси, а збільшення

забруднюючого шару має суттєвий вплив на розповсюдження теплового потоку, що призводить до зниження інтенсивності теплорозподілу та продуктивності біогазової установки. Встановлено, що зростання теплового потоку має нелінійний характер як для нагрівача із забрудненням, так і без нього.

Порівнюючи між собою дві криві (рис. 2) при частоті обертання $n = 120 \text{ об/хв}$, величина теплового потоку для незабрудненого нагрівача складає $q_{\text{нагрз}} = 1446 \text{ Вт}$, а для забрудненого – $q_{\text{нагрз}} = 870 \text{ Вт}$, розбіжність між значеннями становить 40 %. За частоти обертання $n = 20 \text{ об/хв}$ величина теплового потоку для незабрудненого нагрівача складає $q_{\text{нагрз}} = 773 \text{ Вт}$, а для забрудненого – $q_{\text{нагрз}} = 571 \text{ Вт}$, розбіжність між значеннями становить 26 %. Проведене дослідження зміни теплового потоку від частоти перемішування та наявності осаду на поверхні нагрівача свідчить про те, що оптимальна частота перемішування електротепломеханічної системи з врахуванням забруднюючого шару на її поверхні знаходиться в діапазоні $n = 20 \dots 40 \text{ об/хв}$, тоді величина теплового потоку від нагрівального пристрою знаходиться в діапазоні $q_{\text{нагрз}} = 571 \dots 1120 \text{ Вт}$.

Висновки і перспективи.

1. Проведено дослідження зміни теплового потоку від частоти обертання та наявності і відсутності забруднюючого шару на поверхні електротепломеханічної системи у результаті якого встановлено, що збільшення частоти обертання призводить до пришвидшення теплопередачі від електротепломеханічної системи до біомаси, а збільшення забруднюючого шару має суттєвий вплив на розповсюдження теплового потоку.

2. Зростання теплового потоку від частоти обертання має нелінійний характер як для нагрівача із забрудненням, так і без забруднення.

3. Проведене дослідження зміни теплового потоку від частоти перемішування та наявності забруднення свідчить про те, що при частоті обертання $n = 120 \text{ об/хв}$ розбіжність між величиною теплового потоку забрудненої поверхні та не забрудненої становить 40 %. При частоті обертання $n = 20 \text{ об/хв}$ розбіжність між

значеннями становить 26 %. Встановлено, що з точки зору енергетичної ефективності процесів інтенсифікації біогазового виробництва оптимальна частота перемішування електротепломеханічної системи з урахуванням забруднюючого шару знаходиться в діапазоні $n = 20...40$ об/хв.

Список використаних джерел

1. Березницкая М. В., Бутрим О. В., Панченко Г. Г. Національний кадастр антропогенних викидів із джерел та абсорбції поглиначами парникових газів в Україні за 1990-2007 рр. Україна, Київ: Міністерство охорони навколишнього середовища України, 2008. 319 с.
2. Нездойминов В. И., Зятина В. И., Рожков В. С. Математическое описание основных факторов, влияющих на формирование взвешенного слоя осадка в илоотделителе. Современное промышленное и гражданское строительство. 2016. Т 12, № 2. С. 51–58.
3. Ратушняк Г. С., Анохіна К. В., Джеджула В. В. Дослідження параметрів процесу перемішування органічної маси в біогазовій установці з вертикальним пропелерним перемішувачем. Вінниця: ВНТУ, 2010. 170 с.
4. Ward A. J., Hobbs P. J., Holliman P. J., Jones D. L. Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. Bioresour. Technol. 2008. 99, 7928–7940.
5. Сподоба М. О., Заблодський М. М., Радько І. П. Основні складові методології побудови заглибного електромеханічного перетворювача для біогазових комплексів. V Міжнародна науково-практична конференція присвячена пам'яті професора Віктора Михайловича Синькова «Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК», НУБіП Україна, Київ, 2019. 67 с.
6. Deublein D., Steinhauser A. Biogas from Waste and Renewable Resources. An Introduction. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co, 2008, 450 p.
7. Teleszewski T. J., Zukowski M. Analysis of Heat Loss of a Biogas Anaerobic Digester in Weather Conditions in Poland. Journal of Ecological Engineering, 2018, 19(4), pp. 242–250.
8. Zablodskiy M. M., Spodoba M. O. Improvement of the method for determining energy consumption in a biogas reactor. XII International Conference "Electronic Processes in Organic and Inorganic Materials" ICEPOM-12, (June 01-05, 2020), p. 311.
9. Друзянова В. П., Кобякова Е. Н. Исследование выхода биогаза при различных температурах мезофильного режима в биогазовых установках малого объема. Вестник Восточно-Сибирского государственного университета технологии и управления. 2016. 3 (60), С. 5–13.
10. Ковалев А. А. Повышение энергетической эффективности биогазовых установок: дис. канд. техн. наук: 05.20.01 / Ковалев Андрей Александрович. – Москва. 114 с.
11. Садчиков А. В., Кокарев Н. Ф. Оптимизация теплового режима в биогазовых установках. Фундаментальные исследования. 2016. 2(1). С. 90–93.
12. Баадер Б., Брендерфер М. Биогаз: Теория и практика. Москва: Колос, 1982. 148 с.

13. Чеботарева О. В., Сербин В. А., Колосова Н. В. Особенности теплообмена в метантенке при сбраживании неперемешиваемой биомассы. Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. 2012. Вип. 2012–2(94) Інженерні системи та техногенна безпека. С. 42–48.
14. Колосова Н. В., Монах С. И. Математическая модель тепломассообмена при получении биогаза в метантенке. Энергетические системы: сб. труды II Междунар. научно-технической конф. БГТУ им. Шухов В.Г. (Белгород, 23-24 ноября 2017 г.). Белгород: БГТУ, 2017. С. 50-53.
15. Заблудський М. М., Сподоба М. О. Методика проведення експериментальних досліджень біогазового реактора з заглибною комбінованою системою перемішування та електричного підігріву. Матеріали IX Міжнародної науково-технічної конференції м. Київ, 19-22 травня 2020, «Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування (теорія, практика, історія, освіта)». НУБіП Україна, Київ, 2020. С. 99-100.
16. Гільчук В. В., Халатов А. А. (2017). Теорія теплопровідності. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського. Україна, Київ. – 86 с.
17. Юркова, В. В., Шкляр В. И., Дубровская В. В. Анализ энергоэффективности работы когенерационных установок на биотопливе. Научный журнал Киевского политехнического университета им. Игоря Сикорского «Энергетика, экономика, технологии, экология». 2014. №3. С. 29-32 с.
18. Хуснутдинов И. Ш., Заббаров Р. Р., Ханова, А. Г., Николаев В. Ф., Скворцова Г. Ш. Технологии переработки высокоустойчивых водо-углеводородных эмульсий: монография. Казань: Изд-во КНИТУ, 2012. 180 с.

References

1. Bereznitskaya, M. V., Butrim, O. V., Panchenko, G. G. (2008). Natsionalnyi kadastr antropohennykh vykydiv iz dzherel ta absorbtsii pohlynachamy parnykovykh haziv v Ukraini za 1990-2007 rr. [National inventory of anthropogenic emissions from sources and removals by sinks of greenhouse gases in Ukraine for 1990–2007]. Kyiv, Ukraine: Ministry of Environmental Protection of Ukraine, 319.
2. Nezdoyminov, V. I., Zyatina, V. I., Rozhkov, V. S. (2016). Matematicheskoye opisanie osnovnykh faktorov, vliyayushchikh na formirovaniye vzveshennogo sloya osadka v ilootdelitele [Mathematical description of the main factors influencing the formation of a suspended sediment layer in a desilter]. In Modern Industrial and Civil Construction, 12(2), 51–58.
3. Ratushnyak, G. S., Dzhezdzhula, V. V., Anokhin, K. V. (2010). Doslidzhennia parametriv protsesu peremishuvannia orhanichnoi masy v biohazovii ustanovtsi z vertykalnym propelernym peremishuvache [Energy-saving renewable heat sources]. Vinnitsa: VNTU, 170.
4. Ward, A. J., Hobbs, P. J., Holliman, P. J., Jones, D. L. (2008). Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. Bioresour. Technol. 99, 7928–7940.

5. Spodoba, M. O., Zablodskiy, M. M., Radko, I. P. (2019). Doslidzhennia parametriv protsesu peremishuvannia orhanichnoi masy v biohazovii ustanovtsi z vertykalnym propelernym peremishuvache [Main components of methodology of construction of submersible electromechanical converter for biogas complexes]. V International Scientific and Practical Conference dedicated to the memory of Professor Viktor Mikhailovich Sinkov "Problems and prospects for the development of energy, electrical technology and automation in agriculture", Kyiv, NULES, 67.
6. Deublein, D., Steinhauser, A. (2008). Biogas from Waste and Renewable Resources. An Introduction. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co, 450.
7. Teleszewski, T. J., Zukowski, M. (2018). Analysis of Heat Loss of a Biogas Anaerobic Digester in Weather Conditions in Poland. Journal of Ecological Engineering, 19(4), 242–250.
8. Zablodskiy, M.M., Spodoba, M.O. (2020). Improvement of the method for determining energy consumption in a biogas reactor. XII International Conference "Electronic Processes in Organic and Inorganic Materials" ICEPOM-12, (June 01-05, 2020), Kamianets-Podilskyi, 311.
9. Druzyanova, V. P., Kobyakova, E. N. (2016). Issledovaniye vykhoda biogaza pri razlichnykh temperaturakh mezofil'nogo rezhima v biogazovykh ustanovkakh malogo ob'yema [Investigation of biogas output at different mesophilic regime temperatures in small volume biogas plants]. Bulletin of the East Siberian State University of Technology and Management Ulan-Ude, 3 (60), 5–13.
10. Kovalev, A. A. (2014). Povysheniye energeticheskoy effektivnosti biogazovykh ustanovok [Increasing the energy efficiency of biogas plants]. Moscow. 114.
11. Sadchikov, A. V., Kokarev, N. F. (2016). Optimizatsiya teplovogo rezhima v biogazovykh ustanovkakh [Optimization of the thermal regime in biogas plants.] Fundamental research, 2 (1), 90–93.
12. Baader, V., Donet, E., Brennderfer M. (1982). Biogas. Theory and practice. Moskow: Kolos, 148.
13. Chebotareva, O. V., Serbin, V. A., Kolosova, N. V. (2012). Osobennosti teploobmena v metantenke pri sbrazhivaniy neperemeshivayemoy biomassy [Features of heat transfer in the digester during the fermentation of nonstirred biomass]. 42–48.
14. Kolosova, N. V., Monakh, S. I. (2017). Matematicheskaya model' teplomassoobmena pri poluchenii biogaza v metantenke. [Influence of the thickness of deposits on the coil of the digester on the intensity of heat transfer to the fermented biomass]. Energy Systems: coll. proceedings II Intern. scientific and technical conf. BSTU them. V. G. Shukhov (Belgorod, November 23-24, 2017), 50-53.
15. Zablodsky, M. M., Spodoba, M. O. (2020). Metodyka provedennia eksperymentalnykh doslidzhen biohazovoho reaktora z zahlybnoiu kombinovanoiu systemoiu peremishuvannia ta elektrychnoho pidihrivu [Methods of conducting experimental studies of a biogas reactor with combined mixing and electric heating system]. Proceedings of the IX International Scientific and Technical Conference, (Kyiv, May 19-22, 2020), "Problems of modern energy and automation in the system of nature management (theory, practice, history, education)", Kyiv, NULES, 99-100.

16. Gilchuk, V. V., Khalatov A. A. (2017). Teoriia teploprovodnosti. [The theory of thermal conductivity]. Natsionalnyi tekhnichniy universytet Ukrainy «Kyivskiy politekhnichniy instytut im. Ihoria Sikorskoho. Kyiv, 86.
17. Yurkova, V. V., Shklyar, V. I., Dubrovskaya V. V. (2014). Analiz energoeffektivnosti raboty kogeneratsionnykh ustanovok na biotoplive [Analysis of energy efficiency of cogeneration plants using biofuels]. Scientific journal of the Kyiv Polytechnic University. Igor Sikorsky "Energy, Economics, Technologies, Ecology", (3), 29–32.
18. Khusnutdinov, I. Sh., Zabbarov, R. R., Khanova, A. G., Nikolaev, V. F., Skvortsova, G. Sh. (2012). Tekhnologii pererabotki vysokoustoychivyykh vodo-uglevodorodnykh emul'siy [Technologies for processing highly stable water-hydrocarbon emulsions]: monograph. azan': Izd-vo KNITU, 180.

ОБОСНОВАНИЕ СОЗДАНИЯ ЭЛЕКТРОТЕПЛОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ И ПОДОГРЕВА БИОМАССЫ

М. А. Сподоба, Н. Н. Заблодский

Аннотация. На сегодняшний день сбраживание биомассы в биогазовых установках является одним из самых экологически и экономически выгодных решений для получения энергии из отходов. Однако процесс анаэробного сбраживания отходов является долговременным, поэтому одними из основных способов интенсификации биогазового производства являются перемешивание и подогрев биомассы в процессе брожения. Статья посвящена вопросу обоснования создания электротепломеханической системы для перемешивания и подогрева биомассы в биогазовых реакторах. Сочетание двух процессов интенсификации в комбинированную систему вызывает особое внимание к энергоэффективности такой системы, поэтому создание системы требует углубленного исследования изменения теплового потока от частоты вращения и наличия загрязняющего слоя на поверхности нагревателя и определения оптимальной частоты вращения мешалки. Исследования проводились для биогазового реактора цилиндрической формы. Принимали, что загрязняющий слой равномерно распределен по поверхности лопастей и вала, в которые вмонтированы электрические нагреватели. При определении оптимальной частоты перемешивания биомассы в качестве критерия оптимальности принимали наименьшее значение расхождения между тепловым потоком загрязненной и не загрязненной поверхности нагревателя. В ходе исследования установлено, что при частоте вращения $n = 120$ об/мин расхождение между величиной теплового потока загрязненной поверхности и не загрязненной составляет 40 %. При частоте вращения $n = 20$ об/мин расхождение между значениями составляет 26 %. Согласно выбранному критерию оптимальности оптимальная частота вращения электротепломеханической системы с учетом загрязняющего слоя находится в диапазоне $n = 20...40$ об/мин. Выявлено, что увеличение частоты вращения приводит к ускорению теплопередачи от электротепломеханической системы к биомассе, а увеличение загрязняющего слоя оказывает существенное влияние на

распространение теплового потока. Рост теплового потока от частоты перемешивания имеет нелинейный характер как для нагревателя с загрязнением, так и без загрязнения.

Ключевые слова: *энергоэффективность, частота вращения, комбинированная система, загрязнения, критерий Рейнольдса*

SUBSTANTIATION OF CREATION OF ELECTROTHERMOMECHANICAL SYSTEM FOR MIXING AND HEATING OF BIOMASS

M. Spodoba, M. Zablodskiy

Abstract. *To date, biomass fermentation in biogas plants is one of the most advanced, environmentally and economically viable solutions for energy production from waste. However, the process of anaerobic fermentation of waste is long, so one of the main ways to intensify biogas production is mixing and heating of biomass during fermentation. The article is devoted to the question of substantiation of creation of electrothermomechanical system for mixing and heating of biomass in a biogas reactor. The combination of two intensification processes in a combined system pays special attention to the energy efficiency of such a system, so the creation of the system requires in-depth study of heat fluctuations from speed and the presence of a contaminant layer on the heater surface and determine the optimal stirrer speed. The studies were performed for a cylindrical biogas reactor, assuming that the contaminant layer is evenly distributed on the surface of the blades and the shaft in which the electric heaters are installed. When determining the optimal frequency of biomass mixing, the criterion of optimality was taken to be the smallest value of the difference between the heat flux of the contaminated and uncontaminated surface of the heater. During the study it was found that at speed $n=120$ rpm, the difference between the heat flux of the contaminated surface and uncontaminated is 40 %. At speed $n=20$ rpm, the difference between the values is 26%. According to the selected optimality criterion, the optimal speed of the electrothermomechanical system taking into account the contaminant layer is in the range $n=20..40$ rpm. The increase in heat flux from the stirring frequency is non-linear for both contaminated and non-contaminated heaters.*

Key words: *energy efficiency, speed, combined system, contaminated, Reynolds criterion*