

УДК 663.033

## ЗАЛЕЖНІСТЬ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ВИТРАТ ВІД ТИПУ ВИКОРИСТАНОЇ МЕХАНІЧНОЇ МІШАЛКИ У БІОГАЗОВОМУ РЕАКТОРІ

СПОДОБА М.О.

аспірант, кафедри електротехніки, електромеханіки і електротехнологій, ННІ енергетики, автоматики і енергозбереження, Національного університету біоресурсів і природокористування України, Київ, Україна, e-mail: spmisha@ukr.net;

ЗАБЛОДСЬКИЙ М.М.

д-р техн. наук, професор кафедри електротехніки, електромеханіки і електротехнологій, ННІ енергетики, автоматики і енергозбереження, Національного університету біоресурсів і природокористування України, Київ, Україна, e-mail: zablodskiyinn@gmail.com;

**Мета роботи.** Дослідження залежності енергетичних витрат механічних мішалок та визначення енерго-ефективного типу перемішуючого пристрою для підвищення енергетичної ефективності процесу утворення біогазу та рентабельності подальшої переробки у теплову та електричну енергію.

**Методи дослідження.** Визначення та аналіз енергетичних витрат для механічних мішалок, порівняння та визначення їх енергоспоживання у процесі утворення біогазу, узагальнення отриманих результатів.

**Отримані результати.** У формуванні сучасної енергетичної системи важливу роль відіграють біогазові технології. Рентабельність яких безпосередньо залежить від енергоефективності процесів інтенсифікації анаеробного зброджування. Процес анаеробного зброджування відходів є довготривалим, тому одним з основних методів інтенсифікації біогазового виробництва є перемішування відходів у процесі анаеробного бродіння. Не зважаючи на велику кількість різноманітних типів перемішуючих пристроїв та систем, основне завдання перемішування полягає у створенні однорідної речовини з однаковою температурою, кислотністю та іншими фізико-хімічними складовими у будь-якій точці об'єму речовини. Існує необхідність підвищення енергоефективності процесів інтенсифікації анаеробного зброджування та рентабельності подальшої переробки біогазу у теплову та електричну енергію. Шляхи підвищення енергоефективності полягають у визначенні залежності енергетичних витрат механічних мішалок, виборі енергоефективного типу мішалки, визначенні критеріїв, що суттєво впливають на споживання електричної енергії на перемішування, дослідженні векторів розповсюдження потоків, що створюються мішалкою. Реалізація цих дій дозволить встановити оптимальні геометричні розміри мішалки та суттєво підвищити енергетичну ефективність біогазових установок та подальшу переробку утвореного біогазу у теплову та електричну енергію.

**Наукова новизна.** Проведено аналіз причин різних значень критерію Ейлера для механічних мішалок за однакового режиму руху речовини її рівня і об'єму у резервуарі та інших однакових параметрах. Проведено порівняльний аналіз енергетичних витрат для найбільш розповсюджених у біогазових реакторах типів механічних мішалок. Встановлено, що використання двоярусної лопатевої мішалки, у якій по дві лопати на ярус необхідно найменша кількість енергії на перемішування відходів у біогазовому реакторі об'ємом  $V_{reak} = 5 \text{ м}^3$ .

**Практична цінність.** Приведені у роботі дані можуть бути використані при проектуванні, будівництві та модернізації біогазових установок. Визначено напрям необхідних подальших наукових досліджень, реалізація яких підвищить енергетичну ефективність біогазового виробництва та рентабельність подальшої переробки біогазу у теплову та електричну енергію.

**Ключові слова:** енергоефективність; критерій Рейнольдса; критерій Ейлера; перемішування; потужність електродвигуна; енергоспоживання.

### I. ВСТУП

Біогазові технології відіграють важливу роль у формуванні сучасної енергетичної системи, тому увага до її ефективності підвищена.

Збільшення фермерських та сільськогосподарських угідь, разом зі зростанням 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 е

джерелами небезпечних викидів метану та окисів азоту [1]. Така ситуація призводить до забруднення повітря та посилення кліматичних змін та парникового ефекту. Найбільшого розповсюдження для утилізації побутових та промислових відходів, каналізаційних стічних вод отримала аеробна та анаеробна обробка у спеціальних резервуарах – біогазових реакторах [2].

На сьогоднішній день зброджування органічних відходів у біогазових установках є одним з найпрогресивніших, екологічно та економічно вигідних рі-

шень 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. Провести його очищення та отримати біометан, який може замінити природний газ для використання як у власних потребах так і вироблення теплової та електричної енергії у когенераційних установках.

Органічні відходи у біогазовому реакторі у 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.

Процес анаеробного зброджування відходів є довготривалим, тому одним з основних методів інтенсифікації біогазового виробництва є перемішування органічних відходів у процесі анаеробного бродіння [3], [4].

Метою перемішування органічних відходів є забезпечення рівномірного розподілу фаз по об'єму реактора, руйнування плаваючої кірки, підтримка твердої фракції у зваженому стані, рівномірне розподілення температурних полів по об'єму відходів. 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.

Рентабельність використання біогазових установок безпосередньо залежить від енергоефективності процесів інтенсифікації анаеробного зброджування, тому при виборі типу перемішувального пристрою особливу увагу приділяють енергетичним витратам, які залежать від багатьох умов. Через, що у світі відбувається безліч наукових досліджень у напрямку створення енергоефективного типу перемішування органічних відходів у біогазових реакторах.

## II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

На сьогоднішній день відомо велику кількість типів перемішування, серед яких пневматичне, гідравлічне [3], [5], за допомогою заглиблених електричних двигунів [6], [7], електромеханічних перетворювачів [8], однак з точки зору енергозбереження, найбільш перспективним обладнанням для інтенсифікації процесу зброджування органічних відходів є біогазові реактори із механічними мішалками [3], [9]-[13]. Про це свідчить велика кількість досліджень впливу механічних мішалок на речовину, що знаходиться у замкнених резервуарах, векторів розповсюдження потоків, енергетичних характеристик перемішувального при-

строю під час перемішування, процеси інтенсифікації масообміну та теплообміну у резервуарах.

У [14] наведено специфіку потоків при масообміні у резервуарах циліндричної форми при використанні механічних перемішувальних пристроїв. Під час роботи перемішувальних пристроїв з обертальним рухом виникає складний рух речовини – тангенціальний, радіальний та осьовий [14]. При цьому, доведено що процес перемішування рідкої фази органічних відходів відбувається за рахунок створення вихорів, котрі виникають на кромках лопатей механічних мішалок [15].

Оскільки, енергетична ефективність біогазового виробництва залежить від величини енергетичних витрат на перемішування, а згідно з [4], [12], [16], [17] на енергетичні витрати перемішувального пристрою мають суттєвий вплив його геометричні розміри та враховуючи завдання перемішування органічних відходів [3], [8], тому з метою створення системи перемішування органічних відходів необхідно використовувати механічну мішалку з найбільшим раціональним поєднанням площі проекції на речовину, що перемішується та споживаної енергії на процес перемішування.

Опираючись на інформацію наведену у [3], [4], [9]-[12], [14], [16], [18]-[21] найбільш часто у реакторах використовують механічні мішалки, а саме: якорні, рамні та лопатеві різних модифікацій.

Велика кількість вітчизняних та зарубіжних науковців займається питанням підвищення енергоефективності процесів анаеробного зброджування органічних відходів у біогазових реакторах. Проводять дослідження перемішувальних пристроїв з метою зниження енергетичного споживання на процес перемішування, встановлення розповсюдження векторів потоків для різних типів мішалок. У [17] наведено дослідження впливу типів мішалок на турбулентні потоки створені у реакторах. У [17], [22] наведено результати досліджень у яких сказано, що перемішування у середині воронки турбулентного потоку відсутнє. Таким чином, створення турбулентних потоків у замкнених резервуарах з погляду ефективності перемішування речовини у замкнених резервуарах є недоцільним.

Незважаючи на існуючі результати проведених досліджень питання визначення енергоефективного типу перемішувального пристрою з метою підвищення енергетичної ефективності процесу утворення біогазу є не повністю вирішеним та наразі залишається актуальним.

## III. МЕТА РОБОТИ

Дослідження залежності енергетичних витрат механічних мішалок та визначення енергоефективного типу перемішувального пристрою для підвищення енергетичної ефективності процесу утворення біогазу та рентабельності подальшої переробки у теплову та електричну енергію.

#### IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ТА АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

З метою дослідження залежності енергетичних витрат та визначення енергоефективного типу перемішуючого пристрою, проведено порівняльний аналіз енергетичних витрат для тихохідних механічних мішалок, при заданих наступних початкових умовах: фізико-хімічні параметри органічної біомаси завантаженої у біогазовий реактор  $\rho = 1024 \text{ кг/м}^3$ ,  $\mu = 0.048 \text{ Па} \cdot \text{с}$  [23]. Біогазові реактори циліндричної форми з наступними геометричними параметрами: об'єм реактора  $V_{\text{reak}} = 5 \text{ м}^3$ , висота органічної біомаси у реакторі  $H = 2 \text{ м}$ , діаметр реактора  $D = 1.8 \text{ м}$ . Висота від дна реактора до нижньої частини лопаті механічної мішалки  $s = 0.3 \text{ м}$ ; діаметр мішалки  $d_m = 1.5 \text{ м}$ ; висота лопатей  $h = 0.2 \text{ м}$ ; коефіцієнт запасу потужності електричного двигуна  $K_{\text{зан}} = 1.3$ ; коефіцієнт корисної дії передачі  $\eta_n = 0.8$ ; коефіцієнт корисної дії електричного двигуна  $\eta_{\text{дв}} = 0.8$ .

На споживану потужність механічного перемішуючого пристрою суттєвий вплив має режим руху речовини, що перемішується у замкненому резервуарі. Оцінка режиму руху речовини, що перемішується виконується на основі безрозмірної комплексної величини – відцентрового критерію Рейнольдса, для перемішування, який розраховується за рівнянням [3], [24], [25]:

$$Re_m = \frac{\rho \cdot n_c \cdot d_m^2}{\mu}; \quad (1)$$

де  $Re_m$  – модифікований критерій Рейнольдса для перемішування;  $\rho$  – густина біомаси,  $\text{кг/м}^3$ ;  $n_c$  – частота обертів мішалки,  $\text{об/с}$ ;  $\mu$  – динамічна в'язкість біомаси,  $\text{Па} \cdot \text{с}$ .

У [11], [17], [21] наведено результати досліджень, які вказують на ефективність обережного перемішування органічних відходів у біогазовому реакторі. Таким чином, обережне перемішування з використанням механічних мішалок забезпечує збереження цілісності колоній бактерій, тому у розрахунках число обертів механічних мішалок приймаємо  $n = 60 \text{ об/хв}$ .

Критерій Рейнольдса використовується для знаходження критерію гідродинамічної подоби Ейлера для механічних мішалок:

$$Eu_m = A / Re_m^m; \quad (2)$$

де  $A$  та  $m$  – встановлені експериментальним шляхом константи для різних типів мішалок.

У літературі [25] наведено експериментальні дані залежності критерію Ейлера від критерію Рейнольдса у вигляді кривих  $Eu_m = f(Re_m)$ , або у вигляді констант  $A$  та  $m$  для різноманітних конструкцій механічних мішалок. Константи для знаходження числа Ейлера для мішалок: шестилопатевої, лопаті під кутом  $90^\circ$   $A = 12.5$ ;  $m = 0.25$ ; якірної та рамної  $A = 6.2$ ;  $m = 0.25$ ; лопатевої двоярусної, по дві лопаті на ярус, під кутом  $90^\circ$   $A = 13.6$ ;  $m = 0.2$ .

У випадку коли спроектована мішалка відрізняється геометричними співвідношеннями від модельної мішалки, для якої встановлено значення констант  $A$  та  $m$ , тоді розрахований за формулою (2) критерій Ейлера повинен включати поправочні коефіцієнти  $f_i$ . Поправочні коефіцієнти для кожного типу мішалки розраховуються за рівняннями [24]:

$$f_1 = \left( \frac{D}{\alpha \cdot d_m} \right)^a; \quad f_2 = \left( \frac{H}{D} \right)^c; \quad f_3 = \left( \frac{h}{\beta \cdot d_m} \right)^e;$$

$$f_4 = \left( \frac{s}{d_m} \right)^r; \quad f_5 = 1.2 \dots 1.5;$$

де  $\alpha$  – відношення  $D/d_m$  для модельної мішалки;  $\beta$  – відношення  $h/d_m$  для модельної мішалки;  $D$  – діаметр резервуару,  $m$ ;  $H$  – висота шару речовини у резервуарі,  $m$ ;  $h$  – висота лопаті,  $m$ ;  $s$  – відстань від нижньої частини лопаті до дна резервуару,  $m$ ;  $a, c, e, r$  – постійні величини;  $f_1$  – поправочний коефіцієнт діаметру резервуару до діаметру мішалки;  $f_2$  – поправочний коефіцієнт висоти шару речовини у резервуарі;  $f_3$  – поправочний коефіцієнт відношення висоти лопаті до її діаметру мішалки;  $f_4$  – поправочний коефіцієнт, який враховує зміну відстані розташування спроектованої мішалки від дна резервуару від модельної;  $f_5$  – коефіцієнт шорсткості поверхонь лопаті та стінок резервуару. Постійні величини для лопатевої, якірної та рамної мішалок [24]:  $a = 1.1$ ;  $c = 0.6$ ;  $e = 0.3$ ;  $r = 0$ .

Критерій Ейлера з врахуванням поправочних коефіцієнтів для кожного типу тихохідної механічної мішалки розраховується за рівнянням:

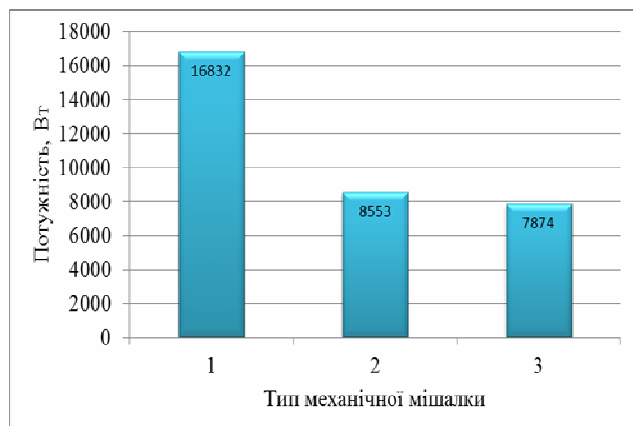
$$Eu'_m = Eu_m \cdot \sum(f_i); \quad (4)$$

Потужність електродвигуна вибирається за робочою потужністю мішалки ( $N_p$ ), при врахуванні коефіцієнту корисної дії передачі ( $\eta_n$ ) та коефіцієнту запасу потужності ( $k = 1.2 \dots 1.5$ ):

$$N_{\text{дв}} = k \frac{N_p}{\eta_n}; \quad (5)$$

$$N_p = Eu'_m \cdot n^3 \cdot d_m^5 \cdot \rho; \quad (6)$$

Результати проведеного порівняльного аналізу представлено у вигляді графічних залежностей на яких зображено необхідна витрата потужності для електричного приводу механічних мішалок, рис. 1.



**Рисунок 1.** Витрата потужності для електричного приводу механічної мішалки: 1 – Шестилопатева, лопаті під кутом  $90^{\circ}$ ; 2 – Якірна та рамна; 3 – Лопатева двоярусна, по дві лопаті на ярус під кутом  $90^{\circ}$

У ході проведення порівняльного аналізу, проведено розрахунок критерію Ейлера з врахуванням поправочних коефіцієнтів та отримано наступні результати для мішалок: шестилопатевої, лопаті під кутом  $90^{\circ}$   $Eu'_m = 1.24$ , якірної та рамної;  $Eu'_m = 0.63$ , лопатевої двоярусної, по дві лопаті на ярус під кутом  $90^{\circ}$   $Eu'_m = 0.58$ .

Отримані результати критерію Ейлера для механічних мішалок різної конструкції при однаковому об'ємі резервуару, режиму руху і рівня речовини у резервуарі та інших однакових параметрів – є різними. Це пояснюється тим, що форма механічної мішалки має суттєвий вплив на зміну картини потоків речовини у замкненому резервуарі, відповідно це призводить до збільшення гідравлічного опору обертання перемішуючого пристрою, і як наслідок, підвищенню енергетичних витрат на процес перемішування речовини, що у свою чергу знижує енергетичну ефективність процесу утворення біогазу і рентабельність подальшої його переробки у теплову та електричну енергію.

Проаналізувавши графічні залежності наведені на рис.1 та беручи до уваги розрахункові значення критерію Ейлера для розглянутих у роботі типів мішалок, встановлено, що серед розглянутих типів, використання двоярусної лопатевої мішалки у якій по дві лопаті на ярус, що встановлені під кутом  $90^{\circ}$  потребує найменшої кількості електричної енергії на перемішування органічної біомаси згідно з заданими початковими умовами.

## V. ВИСНОВКИ

Проведено порівняльний аналіз енергетичних витрат для найбільш розповсюджених у біогазових реакторах типів механічних мішалок. У результаті аналізу отримано графічні залежності необхідної витрати потужності для електричного приводу механічних мішалок та значення критерію Ейлера для розглянутих типів мішалок.

Встановлено, що збільшення значення критерію Ейлера призводить до підвищення енергетичних витрат на процес перемішування, що у свою чергу знижує енергетичну ефективність процесу утворення біогазу та рентабельність подальшої його переробки у теплову та електричну енергію.

Встановлено, що використання двоярусної лопатевої мішалки, у якій по дві лопаті на ярус, що встановлені під кутом  $90^{\circ}$  необхідно найменша кількість енергії на перемішування біомаси у біогазовому реакторі об'ємом  $V_{peak} = 5 \text{ м}^3$ , та геометричними розмірами згідно з початковими умовами.

Приведені дані можуть бути використані при будівництві та модернізації існуючих біогазових установок.

Враховуючи отримані результати, вважається доцільним провести теоретичні та експериментальні дослідження двоярусної лопатевої мішалки у якій по дві лопаті на ярус, для різних кутів нахилу лопаток. Дослідити вектори потоків, що створюються мішалкою для різних кутів нахилу лопатей. Це дозволить встановити оптимальні геометричні розміри мішалки та максимально підвищити енергетичну ефективність процесу утворення біогазу та рентабельності подальшої його переробки у теплову та електричну енергію.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Национальный кадастр антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов в Украине за 1990–2007 гг. [Электронный ресурс]/ М.В. Березницкая, О.В. Бутрим, Г.Г. Панченко. – К.: Министерство охраны окружающей природной среды Украины, 2008. – 319 с. Режим доступа: [http://climategroup.org.ua/upl/Nac\\_zvit\\_p\\_parn\\_gazy\\_90\\_07.pdf](http://climategroup.org.ua/upl/Nac_zvit_p_parn_gazy_90_07.pdf).
- [2] Нездойминов, В.И. Математическое описание основных факторов, влияющих на формирование взвешенного слоя осадка в илоотделителе [Текст]/ В.И. Нездойминов, В.И. Зятина, В.С. Рожков// Сучасне промислове та цивільне будівництво, 2016. – №2. – 51-58 с.
- [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.

- (2008). Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. *Bioresour. Technol.* 99, 7928-7940.
- [5] Трахунова, И.А. Эффективность гидравлического перемешивания при различных способах загрузки органического субстрата в реактор БГУ [Текст]/ И.А. Трахунова, Ю.В. Караева// Молодой ученый, 2012. – №4. – 45-50 с.
- [6] Marks, S., Dach, J., Fernandez Morales, F.J., Mazurkiewicz, J., Pochwatka, P., Gierz, Ł. (2020). New Trends in Substrates and Biogas Systems in Poland. *Journal of Ecological Engineering*, 21, 4, 19-25. DOI: /10.12911/22998993/119528.
- [7] Marks, S., Jeżowska, A., Kozłowski, K., Dach, J., Wilk, B., Fudala-Książek, S. (2017). Review of mixing systems of fermentation liquid used in biogas plants. *Technika Rolnicza Ogrodnicza Leśna*, 6, 24-26.
- [8] 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», – К.: НУБіП, 2019.
- [9] Ратушняк, Г.С., Лялюк, О.Г., Кошечев, І.А. Біогазові установки з відновлюваними джерелами енергії термостабілізації процесу ферментації біомаси [Текст]/ Г.С. Ратушняк, О.Г. Лялюк, І.А. Кошечев: монографія. – Вінниця, ВНТУ, 2017. – 88 с.
- [10] Куріс, Ю.В. Біоенергетичні установки. Обладнання та технології переробки органомісних енергоресурсів [Текст]/ Ю.В. Куріс: монографія. – Запоріжжя: ЗДІА, 2012. – 348 с.
- [11] Веденев, А.Г., Веденева, Т.А. Руководство по биогазовым технологиям [Текст]. «ДЭМИ», 2011. – 84 с.
- [12] Ameer, H. (2016). Mixing of complex fluids with flat and pitched bladed impellers: effect of blade attack angle and shear-thinning behavior. *Food Bioprod. Process.* 99, 71-77.
- [13] Ameer, H. (2018). Modifications in the Rushton turbine for mixing viscoplastic fluids. *J. Food Eng.* 223, 117-125.
- [14] Закоморний, Д.М., Поводзинський, В.М., Шибельський, В.Ю. Класифікація та аналіз роботи ферментерів з механічними перемішувачами пристроями в аеробних процесах біотехнології. *ScienceRise*, 2015. – 5, №2, 24-32.
- [15] Барабаш, В.М. Проблемы и тенденции развития теории и практики перемешивания жидких сред [Текст]/ В.М. Барабаш, В.И. Бегичев, М.А. Бе-  
левицкая, Н.Н. Смирнов // Теоретические основы хим. технологии. – 2007. – 41, №2, 140-147 с.
- [16] Червоний, І.Ф., Куріс, Ю.В. Дослідження пристроїв та удосконалення процесів перемішування в біогазових установках. – Х.: Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит, 2012. – №2, 96.
- [17] Foukrach, M., Bouzit, M., Ameer, H. (2020). Effect of Agitator's Types on the Hydrodynamic Flow in an Agitated Tank. *Chin. J. Mech. Eng.* 33, 37. DOI: 10.1186/s10033-020-00454-2.
- [18] Стренк, Ф. Перемешивание и аппараты с мешалками [Текст]: Пер. с польск./Под ред. И.А. Щупляка. – Л.: Химия, 1975. – 384 с.
- [19] Луныяк, К.В., Вус, Д.Н., Русанов, С.А., Клюев, О.И. Розчинення твердої речовини при перемішуванні мешалками в посудинах з вертикальними перегородками. «Теорія і практика сучасного природознавства». Збірник наукових праць. – Херсон: 2009. – 36-39 с.
- [20] Баранов, Д.А., Кутепов, А.М. Процессы и аппараты. Учебник для студ. учреждений сред. проф. образования [Текст]. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 304 с.
- [21] Луныяк, К.В., Вус, Д.Н., Клюев, О.И., Николаенко, И.В. Получение зависимости для расчета времени растворения твердого вещества механической мешалкой// Вісник СумДУ. Серія Технічні науки. – 2009. – №3. – 191-195 с.
- [22] Луныяк, К., Вус, Д., Чумаков, Г. Дослідження масопередачі при перемішуванні турбінною мешалкою в посудинах з відбивними перегородками// Вісник Тернопільського державного технічного університету, 2008. – 13, №1. – 171-176 с.
- [23] Юркова, В.В., Шкляр, В.И., Дубровская, В.В. Анализ энергоэффективности работы когенерационных установок на биотопливе. – К.: Научный журнал Киевского политехнического университета им. Игоря Сикорского «Энергетика, экономика, технологии, экология». – 2014. – №3. – 29-32 с.
- [24] Карпушкин, С.В. Расчет и выбор механических перемешивающих устройств вертикальных емкостных аппаратов [Текст]/ С.В. Карпушкин, М.Н. Краснянский, А.Б. Борисенко. – Тамбов, Издательство ТГТУ, 2009. – 168 с.
- [25] Черевко, О.І., Поперечний, А.М. Процеси і апарати харчових виробництв [Текст]/ О.І. Черевко, А.М. Поперечний: підручник — 2-е видання, доп. та випр. – Х.: Світ Книг, 2014. – 495 с.

Стаття надійшла до редакції 20.01.2021

## ЗАВИСИМОСТЬ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЗАТРАТ ОТ ТИПА ИСПОЛЬЗОВАННОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ МЕШАЛКИ В БИОГАЗОВОМ РЕАКТОРЕ

СПОДОБА М.А.

аспирант, кафедры электротехники, электромеханики и электротехнологий, УНИ энергетике, автоматики и энергосбережения, Национального университета биоресурсов и природопользования Украины, Киев, Украина, e-mail: spmisha@ukr.net;

ЗАБЛОДСКИЙ Н.Н.

д-р техн. наук, профессор кафедры электротехники, электромеханики и электротехнологий, УНИ энергетике, автоматики и энергосбережения, Национального университета биоресурсов и природопользования Украины, Киев, Украина, e-mail: zablodskiyann@gmail.com;

**Цель работы.** Исследование зависимости энергетических затрат механических мешалок и определения энергоэффективного типа перемешивающего устройства для повышения энергетической эффективности процесса образования биогаза и рентабельности дальнейшей переработки в тепловую и электрическую энергии.

**Методы исследования.** Определение и анализ энергетических затрат для механических мешалок, сравнения и определения их энергопотребления в процессе образования биогаза, обобщение полученных результатов.

**Полученные результаты.** В формировании современной энергетической системы важную роль играют биогазовые технологии. Рентабельность которых напрямую зависит от энергоэффективности процессов интенсификации анаэробного сбраживания. Процесс анаэробного сбраживания отходов является долговременным, поэтому одним из основных методов интенсификации биогазового производства является перемешивание отходов в процессе анаэробного брожения. Несмотря на большое количество различных типов перемешивающих устройств и систем, основная задача перемешивания заключается в создании однородного вещества с одинаковой температурой, кислотностью и другими физико-химическими составляющими в любой точке объема вещества. Существует необходимость повышения энергоэффективности процессов интенсификации анаэробного сбраживания и рентабельности дальнейшей переработки биогаза в тепловую и электрическую энергию. Пути повышения энергоэффективности заключаются в определенных зависимостях энергетических затрат механических мешалок, выборе энергоэффективного типа мешалки, определенных критериев, которые существенно влияют на потребление электрической энергии на перемешивание, исследовании векторов распространения потоков, создаваемых мешалкой. Реализация этих действий позволит установить оптимальные геометрические размеры мешалки и существенно повысить энергетическую эффективность биогазовых установок и дальнейшую переработку образовавшегося биогаза в тепловую и электрическую энергию.

**Научная новизна.** Проведен анализ причин различных значений критерия Эйлера для механических мешалок при одинаковом режиме движения вещества ее уровня и объема в резервуаре и прочих равных параметрах. Проведен сравнительный анализ энергетических затрат для наиболее распространенных в биогазовых реакторах типов механических мешалок. Установлено, что использование двухъярусной лопастной мешалки, в которой по две лопасти на ярус необходимо наименьшее количество энергии на перемешивание отходов в биогазовых реакторе объемом  $V_{\text{реак}} = 5 \text{ м}^3$ .

**Практическая ценность.** Приведенные в работе данные могут быть использованы при проектировании, строительстве и модернизации биогазовых установок. Определено направление необходимых дальнейших научных исследований, реализация которых повысит энергетическую эффективность биогазового производства и рентабельность дальнейшей переработки биогаза в тепловую и электрическую энергию.

**Ключевые слова:** энергоэффективность; критерий Рейнольдса; критерий Эйлера; перемешивание; мощность электродвигателя; энергопотребление.

## DEPENDENCE OF ENERGY CONSUMPTIONS ON THE TYPE OF MECHANICAL MIXER USED IN THE BIOGAS REACTOR

SPODOBA M.O.

Post-graduate, Department of Electrical Engineering, Electromechanics and Electrotechnology, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine. e-mail: spmisha@ukr.net;

ZABLODSKIY N.N. Doctor of Engineering, Professor, Department of Electrical Engineering, Electromechanics and Electrotechnology, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine. e-mail: zablodskiyinn@gmail.com;

**Purpose.** Investigation of the dependence of the energy consumption of mechanical mixers and determination of an energy-efficient type of mixing device to increase the energy efficiency of the biogas formation process and the profitability of further processing into thermal and electrical energy.

**Methodology.** Determination and analysis of energy costs for mechanical mixers, comparison and determination of their energy consumption in the process of biogas formation, generalization of the results.

**Findings.** Biogas technologies play an important role in the formation of a modern energy system. The profitability of which directly depends on the energy efficiency of the processes of intensification of anaerobic fermentation. The process of anaerobic fermentation of waste is long, so one of the main methods of intensification of biogas production is the mixing of waste during anaerobic fermentation. Despite the large number of different types of mixing devices and systems, the main task of mixing is to create a homogeneous substance with the same temperature, acidity and other physicochemical components at any point in the volume of the substance. There is a need to increase the energy efficiency of the processes of intensification of anaerobic fermentation and the profitability of further processing of biogas into heat and electricity. Ways to improve energy efficiency are in certain dependences of the energy consumption of mechanical mixers, the choice of an energy-efficient type of mixer, certain criteria that significantly affect the consumption of electrical energy for mixing, the study of the vectors of propagation of flows created by the mixer. The implementation of these actions will allow you to establish the optimal geometric dimensions of the mixer and significantly increase the energy efficiency of biogas plants and further processing of the resulting biogas into thermal and electrical energy.

**Originality.** The analysis of the reasons for different values of the Euler criterion for mechanical mixers is carried out with the same mode of the substance motion, its level and volume in the tank and other equal parameters. A comparative analysis of energy costs for the most common types of mechanical mixers in biogas reactors is carried out. It has been established that the use of a two-tier paddle mixer, which has two blades per tier, requires the least amount of energy to mix waste in a biogas reactor with a volume  $V_r = 5 \text{ m}^3$ .

**Practical value.** The data presented in this paper can be used in the design, construction and modernization of biogas plants. The direction of necessary further scientific researches is determined, the realization of which will increase the energy efficiency of biogas production and the profitability of further processing of biogas into thermal and electric energy.

**Keywords:** energy efficiency; Reynolds criterion; Euler's criterion; mixing; electric motor power; energy consumption.

## REFERENCE

- [1] Bereznitskaya, M.V., Butrim, O.V., Panchenko, G.G. (2008) Natsionalnyy kadastr antropogennykh vybrosov iz istochnikov i absorbtzii poglotitelyami parnikovykh gazov v Ukraine za 1990–2007 gg. [Elektronnyy resurs]. – K.: Ministerstvo okhrany okruzhayushchey prirodnoy sredy Ukrainy, 319. Rezhim dostupa: [http://climategroup.org.ua/upl/Nac\\_zvit\\_p\\_parn\\_gazy\\_90\\_07.pdf](http://climategroup.org.ua/upl/Nac_zvit_p_parn_gazy_90_07.pdf). (in Ukrainian)
- [2] Nezdoyminov, V.I., Zyatina, V.I., Rozhkov, V.S. (2016) Matematicheskoye opisaniye osnovnykh faktorov. vliyayushchikh na formirovaniye vzvshennogo sloya osadka v ilootdelitele. Suchasne promislove ta tsivilne budivnitstvo, 2, 51-58. (in Ukrainian)
- [3] Ratushnyak, G.S., Anokhina, K.V., Dzhedzhula, V.V. (2010) Doslidzhennya parametriv protsesu peremishuvannya organichnoi masi v biogazoviy ustanovtsi z vertikalnim propelernim peremishuvachem. Vinnitsya: VNTU, 170. (in Ukrainian)
- [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] Trakhunova, I.A., Karayeva, Yu.V. (2012) Effektivnost gidravlicheskogo peremeshivaniya pri razlichnykh sposobakh zagruzki organicheskogo substrata v reaktor BGU. Molodoy uchenyy, 4, 45-50. (in Russian)
- [6] Marks, S., Dach, J., Fernandez Morales, F.J., Mazurkiewicz, J., Pochwatka, P., Gierz, Ł. (2020). New Trends in Substrates and Biogas Systems in Poland. Journal of Ecological Engineering, 21, 4, 19-25. DOI: /10.12911/22998993/119528.
- [7] Marks S., Jeżowska A., Kozłowski K., Dach J., Wilk B., Fudala-Książek S. (2017). Review of mixing systems of fermentation liquid used in biogas plants. Technika Rolnicza Ogrodnicza Leśna, 6, 24-26.
- [8] Spodoba, M.O., Zablodskiy, N.N., Radko, I.P. (2019) Osnovni skladovi metodologii pobudovi zaglibnogo elektromekhanichnogo peretvoryuvacha

- dlya biogazovikh kompleksiv. V Mizhnarodna naukovopraktichna konferentsiya prisvyachena pam'yati profesora Viktora Mikhaylovicha Sinkova «Problemi ta perspektivi rozvitku energetiki. elektrotekhnologiy ta avtomatiki v APK». K.: NUBiP. (in Ukrainian)
- [9] Ratushnyak, G.S., Lyalyuk, O.G., Koshcheev, I.A. (2017) Biogazovi ustanovki z vidnovlyuvanimi dzherelami energii termostabilizatsii protsesu fermentatsii biomasi. Vinnitsya: VNTU, 88. (in Ukrainian)
- [10] Kuris, Yu.V. Bioenergetichni ustanovki. Obladnannya ta tekhnologii pererobki organovmisnikh energoresursiv. Zaporizhzhya: ZDIA, 348. (in Ukrainian)
- [11] Vedenev, A.G., Vedeneva, T.A. (2011) Rukovodstvo po biogazovym tekhnologiyam. «DEMI», 84.
- [12] Ameer, H. (2016). Mixing of complex fluids with flat and pitched bladed impellers: effect of blade attack angle and shear-thinning behavior. *Food Bioprod. Process.* 99, 71-77.
- [13] Ameer, H. (2018). Modifications in the Rushton turbine for mixing viscoplastic fluids. *J. Food Eng.* 223, 117-125.
- [14] Zakomorniy, D.M., Povodzinskiy, V.M., Shibetskiy, V.Yu. (2015) Klasifikatsiya ta analiz roboti fermenteriv z mekhanichnimi peremishuyuchimi pristroyami v ayerobnikh protsesakh biotekhnologii. *ScienceRise*, 5 (2), 24-32. (in Ukrainian)
- [15] Barabash, V.M., Begichev, V.I., Belevitskaya, M.A., Smirnov, N.N. (2007) Problemy i tendentsii rozvitiya teorii i praktiki peremeshivaniya zhidkikh sred. *Teoreticheskiye osnovy khim. tekhnologii.* 41, (2), 140-147. (in Ukrainian)
- [16] Chervoniy, I.F., Kuris, Yu.V. (2012) Doslidzhennya pristroyiv ta udoskonalennya protsesiv peremishuvannya v biogazovikh ustanovkakh. *Kh.: Energoberezhniye. Energetika. Energoaudit.* 2, 96. (in Ukrainian)
- [17] Foukrach, M., Bouzit, M., Ameer, H. (2020). Effect of Agitator's Types on the Hydrodynamic Flow in an Agitated Tank. *Chin. J. Mech. Eng.* 33, 37. DOI: 10.1186/s10033-020-00454-2.
- [18] Strenk, F. (1975) *Peremeshivaniye i apparaty s mishalkami.* L.: Khimiya, 384. (in Russian)
- [19] Lunyaka, K.V., Vus, D.N., Rusanov, S.A., Klyuyev, O.I. (2009) *Rozchinennya tverdoi rechovini pri peremishuvanni mishalkami v posudinakh z vertikalnimi peregorodkami.* Kherson, 36-39. (in Ukrainian)
- [20] Baranov, D.A., Kutepov, A.M. (2004) *Protsessy i apparaty.* Uchebnik dlya stud. uchrezhdeniy sred. prof. Obrazovaniya. M.: Izdatelskiy tsentr «Akademiya», 304. (in Ukrainian)
- [21] Lunyaka, K.V., Vus, D.N., Klyuyev, O.I., Nikolayenko, I.V. (2009) *Polucheniye zavisimosti dlya rascheta vremeni rastvoreniya tverdogo veshchestva mekhanicheskoy meshalkoy.* Sumy: Visnik SumDU. Seriya Tekhnichni nauki, 3, 191-195. (in Ukrainian)
- [22] Lunyaka, K., Vus, D., Chumakov, G. (2008) *Doslidzhennya masopredachi pri peremishuvanni turbinnoyu mishalkoyu v posudinakh z vidbivnimi peregorodkami.* Ternopil: Visnik Ternopil'skogo derzhavnogo tekhnichnogo universitetu, 13, 1, 171-176. (in Ukrainian)
- [23] Yurkova, V.V., Shklyar, V.I., Dubrovskaya, V.V. (2014) *Analiz energoeffektivnosti raboty kogeneratsionnykh ustanovok na biotoplive.* K.: Nauchnyy zhurnal Kiyevskogo politekhnicheskogo universiteta im. Igorya Sikorskogo «Energetika. ekonomika. tekhnologii. ekologiya», 3, 29-32. (in Ukrainian)
- [24] Karpushkin, S.V., Krasnyanskiy, M.N., Borisenko, A.B. (2009) *Raschet i vybor mekhanicheskikh peremeshivayushchikh ustroystv vertikalnikh emkostnykh apparatov.* Tambov: Izdatelstvo TGTU, 168. (in Russian)
- [25] Cherevko, O.I., Poperechniy, A.M. (2014) *Protsesi i aparaty kharchovikh virobnitstv: pidruchnik 2-vidannya. dop. ta vipr.* Kh.: Svit Knig, 495. (in Ukrainian)