УДК 663.033

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ВИТРАТ НА МЕХАНІЧНЕ ЗМІШУВАННЯ СИРОВИНИ У БІОГАЗОВОМУ РЕАКТОРІ

СПОДОБА М.О. доктор філософії (Ph.D) асистент кафедри електротехніки, електромеханіки і електротехнологій, ННІ енергетики, автоматики і енергозбереження, Національного університету біоресурсів і природокористування України, Київ, Україна, e-mail: spmisha@ukr.net, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6179-0825;

СПОДОБА О.О. доктор філософії (Ph.D) старший викладач кафедри конструювання машин і обладнання, факультет конструювання та дизайн, Національного університету біоресурсів і природокористування України, Київ, Україна, e-mail: sp1309@ukr.net, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8217-866X;

Мета роботи. *Дослідження витрат енергії механічними мішалками та обрання енергетично ефективного пристрою для перемішування із забезпеченням зменшення витрат енергії на процес вироблення біогазу та зростання зацікавленості у подальшій його переробці в інші види енергії.*

Методи дослідження. *Порівняльний аналіз та використання методів математичного моделювання для визначення кількості витраченої енергії на перемішування, узагальнення отриманих результатів.*

Отримані результати. *Формування енергетичної системи полягає у включенні в неї відновлювальних систем альтернативної енергетики, серед яких – біогазові технології. Енергетична ефективність яких залежить від кількості енергії спожитої на процеси інтенсифікації зброджування сировини. Одним із основних засобів інтенсифікації є обережне та часте перемішування сировини у ході зброджування. Наявність різноманітних типів пристроїв для перемішування речовин у реакторах підтверджує актуальність питання розробки енергетично ефективних засобів для пришвидшення зброджування та підвищення рентабельності подальших дій з біогазом та його переробкою. Найбільш раціональними шляхами для підвищення енергоефективності перемішування є встановлення залежностей витрати енергії механічними змішуючими пристроями, виборі раціонального виду мішалки, що включає пошук раціональних масо-габаритних характеристик, які забезпечують рівномірні потоки сировини у біогазовому реакторі та при цьому витрачають найменшу кількість енергії для перемішування. Виконання вищезазначених дій, забезпечує визначення раціональних масогабаритних характеристик мішалки, що значно знижує споживання енергії на перемішування та підвищує рентабельність впровадження біогазових технологій у енергетичну систему.*

Наукова новизна. *Проаналізовано типи електричних машин, що використовуються у якості електричних приводів перемішуючих пристроїв. Враховуючи системи керування електричними приводами та циклограми їх роботи, а також особливості перемішування речовини, зміну критерію гідродинамічної подоби Ейлера для різних типів механічних змішувачів при однакових геометричних параметрах біогазових реакторів, рівні органічної сировини та однакового швидкісного режиму руху робочого органу мішалки встановлено споживану потужність на технологічний процес – перемішування. Проведено порівняльний аналіз впливу типу та геометричних розмірів механічних мішалок на витрату енергії для перемішування об'єму речовини у замкненому резервуарі при використанні однофазного асинхронного двигуна у якості приводу мішалки. Використовуючи поліноміальну залежність, отримано рівняння, що описує зміну потужності електричного приводу від зміни частоти обертання робочого органу двоярусної мішалки у якої лопаті встановлені під кутом* 90^0.

Практична цінність. *Наведені у роботі результати можна використовувати для підвищення енергетичної ефективності біогазових установок. Встановлено напрямок проведення подальших досліджень, щодо споживання реактивної потужності електричними двигунами за час технологічного циклу роботи мішалки, що дозволить визначити картину зміни споживання реактивної потужності та окреслити напрямки руху до її зменшення.*

Ключові слова: критерій Рейнольдса; порівняльний аналіз; енергоефективність; критерій Ейлера; механічне перемішування; потужність електродвигуна; енергоспоживання.

I. ВСТУП

Фермерська та сільськогосподарська діяльність пов'язана із накопиченням відходів тваринництва та рослинництва. Питання утилізації, яких стоїть дуже гостро, оскільки зберігання відходів є джерелами викидів шкідливих речовин у ґрунт та навколишнє

© Сподоба М.О., Сподоба О.О., 2025
Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License **(CC-BY-CA 4.0)**
DOI: https://doi.org/10.15588/1607-6761-2025-2-2

середовище [1], [2].

За останні роки значного розповсюдження для переробки накопичених органічних відходів отримали біогазові установки [3], [4]. Саме використання біогазових установок, що являються спеціальними резервуарами, які називаються біогазовими реакторами є найбільш економічно та екологічно вигідним рішенням для отримання енергії та екологічно чистих добрив з органічних відходів тваринництва та рослинництва [5].

На сьогоднішній день, біогазові технології посідають одну із головних ролей у формуванні енергетичної системи у різних країнах та кліматичних умовах [6], [7]. Про це свідчать різні державні системи підтримки направлені на зацікавлення до використання біогазових технологій та інших джерел альтернативної енергетики [6], [7]. Тому, розповсюдження біогазових технологій є важливим та актуальним завданням світового рівня.

Використання біогазових реакторів для переробки органічних відходів пов'язано з необхідністю встановлення та підтримки параметрів температурних режимів зброджування у заданих межах [8], [9]. Після проведення очистки біогазу можна отримати біометан та у подальшому використовувати, як замінник природного газу у власних або виробничих цілях.

При зброджуванні органічних відходів у біогазових реакторах циліндричної форми спостерігається розподіл речовини на фракції. У нижній частині біогазового реактора спостерігається скупчення твердих частин та осаду, тоді як легка фракція, рідина та легкі частини сировини розміщуються у верхній частині речовини і утворюють кірку, яка перешкоджає вивільненню газу. Середина між осадом та верхнім шаром органічної сировини заповнена рідиною з найменшою кількістю поживних речовин для метано- та кислоутворюючих бактерій [10], [11]. Це все має негативний вплив на інтенсивність утворення біогазу та призводить до зниження рентабельності використання біогазових реакторів.

Ще одним суттєвим фактором є те, що процес зброджування речовини у анаеробному середовищі є довготривалим, тому використовують різноманітні системи для його інтенсифікації. Серед таких методів є перемішування [12], [13] та підігрів [14], [15].

Перемішування сировини яка зброджується дозволяє забезпечити рівномірний розподіл фракцій по об'єму сировини, зруйнувати кірку та забезпечити рівномірне розповсюдження температурних полів по об'єму сировини. Таким чином, основне завдання перемішування полягає у створенні однорідної речовини з рівномірною температурою та зваженістю легкої і твердої фракції по всьому об'єму реактора [16].

Зважаючи, що на перемішування сировини у біогазовому реакторі необхідно витрачати електричну енергію, це впливає на формування кінцевої вартості утвореного біогазу. Рентабельність використання біогазових установок безпосередньо залежить від енергетичної ефективності методів пришвидшення зброджування органічної сировини, тому, підчас вибору типу перемішуючого пристрою важливим є енергетичні витрати, які залежать від багатьох факторів. Через це, у світі проводиться безліч наукових досліджень у напрямку створення енергоефективного типу перемішування органічних відходів у біогазових реакторах.

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Типи перемішування речовин у резервуарах поділяють на: гідравлічне, пневматичне [16], використовуючи електромеханічні перетворювачі [17], заглибні двигуни [18], а також механічне перемішування [19], [20]. Найперспективнішим обладнанням для перемішування відходів тваринництва та рослинництва є механічні змішувачі [21], [22].

Розглянувши специфіку розповсюдження потоків у реакторах циліндричної форми при використанні механічних змішувачів виявлено, що виникає тангенціальний, осьовий та радіальний рухи речовини, що позитивно впливає на розповсюдження колоній бактерій [19], [23]. У першу чергу, енергоефективність виробництва біогазу з використанням біогазових реакторів залежить від енергетичних витрат на перемішування органічної речовини. У роботах [12], [21] вказано, що суттєвий вплив на енергоспоживання перемішуючим пристроєм відіграють його геометричні параметри, а також фізико-хімічні властивості речовини яка перемішується. Враховуючи вищезазначене, з метою створення енергоефективної системи для перемішування органічних відходів потрібно дослідити та визначити найбільш раціональне поєднання площі проекції на речовину, що перемішується та споживаної енергії на перемішування.

Враховуючи інформацію з [19], [24] найбільш часто у реакторах використовують механічні мішалки різних конструкцій та модифікацій.

У якості приводів мішалок найбільшого розповсюдження мають трифазні та однофазні асинхронні електричні двигуни у поєднанні з редукторами для зниження обертів робочого органу мішалки та підвищення моменту. Також, в залежності від особливостей режиму роботи мішалки, можливе регулювання швидкості обертання валу за допомогою перетворювачів частоти [25], [26] або за використання прямого пуску. Електрична схема прямого пуску однофазного асинхронного електричного двигуна при керуванні від мікроконтролера наведена на рис. 1. До складу електричної принципової схеми (рис. 1) входять наступні елементи: М – електродвигун; КМ1

– електромагнітний пускач; QF – автоматичний вимикач; КК – струмове електротеплове реле; KL1 – проміжне реле; DA1 – електро-обчислювальний мікроконтролер.

Керування частотою обертання валу двигуна з використанням частотних перетворювачів буває: векторне та скалярне [26]. У електричних приводів з векторним керуванням закладається математична модель двигуна, використання якої дозволяє визначати момент на валу двигуна і швидкість обертання його валу з використанням зворотного сигналу із датчика струму [25].

Перемішування речовини у біогазових реакторах відбувається повторно-короткочасно. Один цикл перемішування складає 20 хвилин, з подальшою паузою, яка необхідна для перетравлювання колоніями бактерій поживних речовин. Тому, при побудові систем перемішування сировини у біогазових реакторах найбільшого розповсюдження набули електричні машини з режимами роботи: короткочасним (S2) та повторно-короткочасним (S3).

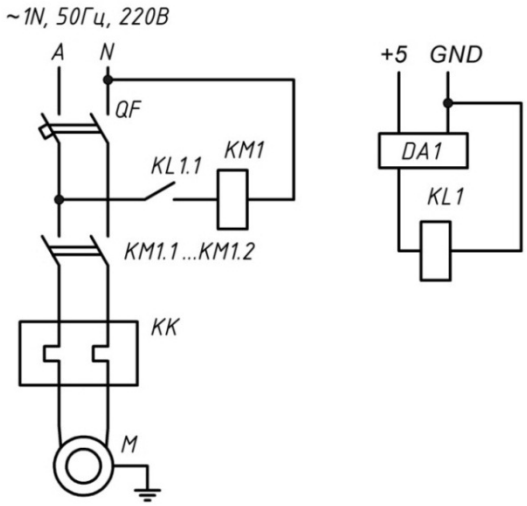

Рисунок 1. Електрична принципова схема прямого пуску однофазного асинхронного електричного двигуна.

Вітчизняними та зарубіжними науковцями все більше приділяється уваги до енергетичної ефективності процесів інтенсифікації біогазового виробництва. Проводяться дослідження різноманітних перемішуючих пристроїв з метою зниження енергоспоживання на перемішування, формування векторів потоків різноманітними мішалками. У роботі [11] наведено результати досліджень впливу мішалок на створення потоків у біогазових реакторах. У [11], [20] досліджено процес створення воронки при турбулентному режимі перемішування, що дало змогу встановити, що перемішування у середині воронки відсутнє.

Таким чином, турбулентні потоки з погляду ефективності перемішування органічної речовини у резервуарах є недоцільним. Отримані наукові результати підтверджують необхідність проведення подальших досліджень направлених на зниження енергетичних витрат на виробництво біогазу.

III. МЕТА РОБОТИ

Дослідження витрат енергії механічними мішалками та обрання енергетично ефективного пристрою для перемішування із забезпеченням зменшення витрат енергії на процес вироблення біогазу та зростання зацікавленості у подальшій його переробці в інші види енергії.

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ТА АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

У роботі [27] вказано, що при використанні механічних лопатевих мішалок, тільки окремі лопаті при запуску мішалки стикаються з осадом, а решта лопатей контактують з рідкою фракцію та плаваючою кіркою, тому не виникає затяжних піків моментів зрушення. Тому, при дослідженнях, час встановлення номінального режиму роботи механічних мішалок приймався рівним 2 секунди, у подальшому навантаження мішалки залишається постійним, аж до моменту припинення подачі живлення на електричний привод мішалки.

Для встановлення залежності витрат енергії, а також обрання енергетично ефективної конструкції перемішуючого пристрою, згідно з метою роботи проведено порівняльний аналіз витрати енергії для механічних мішалок. Для досліджень використовувалися наступні початкові умови: густина органічної речовини, що зброджується $\rho = 1024\ кг/м^3$, а динамічна в'язкість становить $\mu = 0.048\ Па \cdot с$ [28]. Геометричні розміри біогазового реактора наступні: реактор виконаний із сталі, форма реактора – циліндрична; загальний об'єм становить $V_{реак} = 5\ м^3$, рівень органічної сировини, що знаходиться у біогазовому реакторі $H = 2\ м$, діаметр $D = 1.8\ м$. Відстань від нижньої частини лопаті до дна біогазового реактора становить $s = 0.3\ м$; діаметр механічної мішалки $d_м = 1.5\ м$; висота однієї лопаті $h = 0.2\ м$; коефіцієнт запасу по потужності електродвигуна $K_{зап} = 1.3$; коефіцієнт корисної дії (ККД) електричного двигуна становить $\eta_{дв} = 0.8$; коефіцієнт корисної дії (ККД) передачі моменту від валу двигуна до валу перемішуючого пристрою становить $\eta_п = 0.8$ [28].

У роботі [11] приведено результати, що стверджують про позитивний вплив обережного перемішування відходів у замкнених резервуарах – біогазових реакторах. Оскільки, обережне перемішування створює рівномірне розповсюдження

колоній бактерій по об'єму реактора, тому при проведені досліджень частоту обертання механічної мішалки прийнято $n = 40$ *об / хв* .

Режим руху речовини у замкнених резервуарах має значний вплив на споживання електричної потужності електричним приводом робочого органу мішалки. Оцінка режиму руху виконується за допомогою відцентрового критерію Рейнольдса, що є безрозмірною величиною [28], [29]:

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

де $Re_м$ – модифікований критерій Рейнольдса; ρ – густина органічної сировини, *кг/м*^{3}; n_c – частота обертів робочого органу мішалки, *об/с*; μ – динамічна в'язкість органічної сировини, *Па с*.

Після визначення критерію Рейнольдса, проводиться розрахунок критерію гідродинамічної подоби Ейлера, що залежить від констант, які встановлені експериментальним шляхом і залежать від типу та конструкції мішалки. Критерій подоби Ейлера розраховується за формулою [28]:

$$Eu_м = A / Re_м^m; \quad (2)$$

де A, m – константи, отримані експериментальним шляхом для різних форм механічних мішалок.

У роботі [29] представлено результати експериментальних досліджень впливу критерію Рейнольдса на зміну критерію гідродинамічної подоби Ейлера. Константи A та m для знаходження числа Ейлера для механічних мішалок: дволопатевої листової, лопаті під кутом 90^0 $A = 14.35$; $m = 0.31$; рамної $A = 6.2$; $m = 0.25$; дволопатевої двоярусної, лопаті встановлені під кутом 90^0 $A = 13.6$; $m = 0.2$.

Мішалки, що спроектовані окремо під певний технологічний процес або геометричну форму реактора і їх геометричні форми не співпадають із типовими мішалками, потребують врахування поправочних коефіцієнтів. Поправочні коефіцієнти для кожного типу мішалки розраховуються за рівняннями [28]:

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

$$f_4 = \left(\frac{s}{d_м}\right)^r; \; f_5 = 1.2...1.5;$$

де α – відношення $D/d_м$; β – відношення $h/d_м$; D – діаметр, *м*; h – висота лопаті, *м*; H – висота речовини у реакторі, *м*; s – відстань від дна реактора до нижньої частини лопаті, *м*; a, c, e, r – постійні величини; f_1 – поправочний коефіцієнт діаметру реактора до діаметру мішалки; f_2 – поправочний коефіцієнт висоти речовини у реакторі; f_3 – поправочний коефіцієнт відношення висоти лопаті до діаметру мішалки; f_4 – коефіцієнт, що враховує зміну відстані розташування спроектованої мішалки від дна реактора, в залежності від модельної мішалки; f_5 – коефіцієнт шорсткості поверхонь лопаті та стінок реактора. Постійні величини для лопатевих та рамних мішалок: $a = 1.1$; $c = 0.6$; $e = 0.3$; $r = 0$.

Критерій Ейлера з врахуванням поправочних коефіцієнтів розраховується за рівнянням [28]:

$$Eu'_м = Eu_м \cdot \sum(f_i); \quad (4)$$

Потужність електричного двигуна розраховується за робочою потужністю мішалки (P_p), при врахуванні ККД передачі (η_n) та коефіцієнту запасу по потужності, який знаходиться у межах $(k = 1.2...1.5)$, для проведення досліджень коефіцієнт запасу по потужності електродвигуна прийнятий $K_{зап} = 1.3$:

$$P_{дв} = k \frac{P_p}{\eta_n}; \quad (5)$$

$$P_p = Eu'_м \cdot n^3 \cdot d_м^5 \cdot \rho; \quad (6)$$

Результати порівняльного аналізу наведено у вигляді гістограми, на якій зображена витрата електричним приводом мішалки потужності, в залежності від типу досліджуваної мішалки, рис. 2.

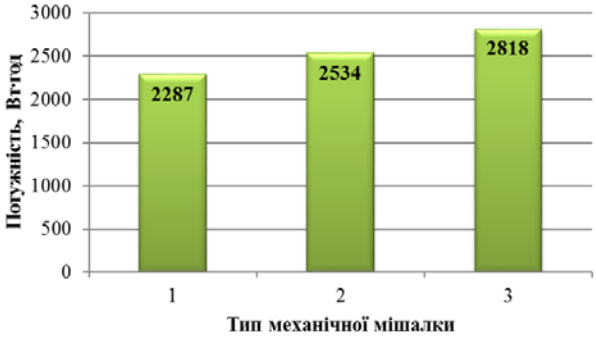

Рисунок 2. Витрата потужності електричним приводом робочого органу мішалки: 1 – дволопатева листова, лопаті під кутом 90^0; 2 – дволопатева двоярусна, лопаті під кутом 90^0; 3 – Рамна.

Розраховані критерії гідродинамічної подоби Ейлера з врахуванням поправочних коефіцієнтів для спроектованих мішалок мають наступний вигляд: для дволопатевої двоярусної де лопаті під кутом 90^0 $Eu'_м = 0.58$, рамної $Eu'_м = 0.63$, дволопатевої

листової, де лопаті під кутом 90^0 $Eu'_м = 0.56$. Для дволопатевої двоярусної мішалки де лопаті встановлені під кутом 90^0 визначено зміну споживаної потужності електричним приводом від швидкості обертання органу змішувача. Результати наведено у вигляді графіку на рис. 3.

Провівши аналіз графічної залежності (рис. 3) встановлено, що зі збільшенням частоти обертання відбувається збільшення споживаної потужності. Використовуючи поліноміальну залежність, виведено рівняння, що описує зміну потужності від зміни частоти обертання робочого органу дволопатевої двоярусної мішалки у якої лопаті встановлені під кутом 90^0:

$$y = -0.0006\cdot(x^4) + 3.6088\cdot(x^3) + 1.9286\cdot(x^2) - \\ -30.908\cdot(x) + 29.441; \quad (7)$$

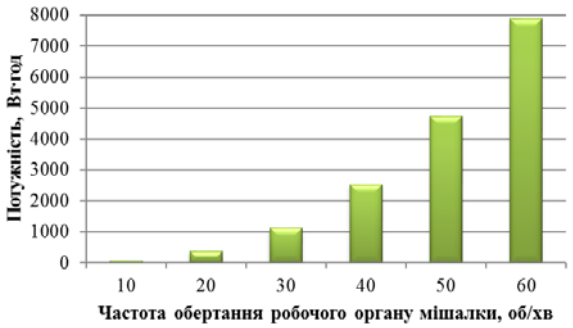

Рисунок 3. Витрата потужності електричним приводом від частоти обертання робочого органу дволопатевої двоярусної мішалки.

Використовуючи рівняння (7) можна визначити кількість споживаної потужності механічної дволопатевої двоярусної мішалки при використанні у біогазовому реакторі з геометричними параметрами у відповідності до початкових умов. При розрахунку потрібно враховувати, що величина (X) у рівнянні (7) має крок 5 об/хв, тобто X=0 об/хв, 2X=5 об/хв і так далі. Для прикладу, проведено розрахунок споживаної потужності при частоті обертання мішалки 40 об/хв, відповідно (9X=40 об/хв).

$$-0.0006\cdot(9^4) + 3.6088\cdot(9^3) + 1.9286\cdot(9^2) - 30.908\cdot(9) + \\ +29.441 = 2534.34 \ \ Вт\cdot год$$

При проведених дослідженнях (рис. 2) потужність споживана дволопатевою двоярусною мішалкою, у якої лопаті встановлені під кутом 90^0 становила 2534 Вт·год, тоді як розрахована величина за рівнянням (7) становить 2534,34 Вт·год, що на 0,01% більше. Це свідчить про адекватність отриманого рівняння.

Різні критерії Ейлера пояснюються тим, що форма механічного змішувача створює значний вплив на картину розповсюдження потоків органічної сировини у реакторі, відповідно це призводить до збільшення гідравлічного опору обертання перемішуючого пристрою, і як наслідок, підвищенню витрат енергії на перемішування, що призводить до зниження енергоефективності вироблення біогазу, а також подальшої його переробки [28].

Проаналізувавши графічні залежності наведені на рис. 2 та рис. 3 зроблено висновок, що двоярусна дволопатева мішалка, з лопатями під кутом 90^0 споживає найменше значення енергії серед розглянутих типів, згідно з заданими початковими умовами.

V. ВИСНОВКИ

Для встановлення залежності витрат енергії, а також обрання енергетично ефективної конструкції перемішуючого пристрою, згідно з метою роботи проведено порівняльний аналіз витрати енергії для механічних мішалок. Проаналізовано типи електричних машин, що використовуються у якості електричних приводів перемішуючих пристроїв. Враховуючи системи керування електричними приводами та циклограми їх роботи, а також особливості перемішування речовини, зміну критерію гідродинамічної подоби Ейлера для різних типів механічних змішувачів при однакових геометричних параметрах біогазових реакторів, рівні органічної сировини та однакового швидкісного режиму руху робочого органу мішалки встановлено споживану потужність на технологічний процес – перемішування. Проведено порівняльний аналіз впливу типу та геометричних розмірів механічних мішалок на витрату енергії для перемішування об’єму речовини у замкненому резервуарі при використанні однофазного асинхронного двигуна у якості приводу мішалки.

Виведено рівняння, що описує зміну потужності електричного приводу від зміни частоти обертання робочого органу дволопатевої двоярусної мішалки у якої лопаті встановлені під кутом 90^0.

Наведені у роботі результати можна використовувати для підвищення енергетичної ефективності біогазових установок. Встановлено напрямок проведення подальших досліджень, щодо споживання реактивної потужності електричними двигунами за час технологічного циклу роботи мішалки, що дозволить визначити картину зміни споживання реактивної потужності та окреслити напрямки руху до її зменшення. Це дозволить підвищити енергоефективність утворення біогазу та рентабельності подальшої його переробки.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

[1] WBA. Global Potential of Biogas; World Biogas Association: London, UK, 2019.
[2] EBA. EBA Statistical Report 2023; European Biogas Association: Brussels, Belgium, 2023.
[3] 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.

[4] Ратушняк, Г.С., Лялюк, О.Г., Кощеєв, І.А. Біогазові установки з відновлюваними джерелами енергії термостабілізації процесу ферментації біомаси/ Г.С. Ратушняк, О.Г. Лялюк, І.А Кощеєв: монографія. Вінниця, ВНТУ, 2017. 88 с.

[5] 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.

[6] Balussou D. McKenna R., Möst D. Fichtner W. A model-based analysis of the future capacity expansion for German biogas plants under different legal frameworks. Renew. Sustain. Energy Rev. 2018, no. 96, pp. 119–131.

[7] Holub S., Shinkaruk N. Principles of legal regulation of bioenergy use in the European Union. Law. Human. Environment, Kyiv, 2021, 12(4), pp. 72-77.

[8] Zablodskiy, M., Spodoba, M., & Spodoba, O. Експериментальне дослідження енергетичних втрат біогазового реактора в навколишнє середовище при мезофільному режимі зброджування. *Енергетика і автоматика*, (2), 18-32.

[9] M. Zablodskiy, M. Spodoba, O. Spodoba. "Experimental investigation of energy consumption for the process of initial heating of a substrate for the use of electric heat-mechanical system." Electrical Engineering and Power Engineering, №1, 2022, pp. 49–59.

[10]Zablodskiy M.M., Spodoba M.O. Rationale for creating an electrothermomechanical system for mixing and heating biomass. Energy and Automation, Kyiv, no. 5, pp. 136-148, 2020. http://dx.doi.org/10.31548/energiya2020.05.136

[11]Foukrach, M., Bouzit, M., Ameur, H. (2020). Effect of Agitator's Types on the Hydrodynamic Flow in an Agitated Tank. Chin. J. Mech. Eng. 33, 37.

[12]Червоний, І.Ф., Курiс, Ю.В. Дослідження пристроїв та удосконалення процесів перемішування в біогазових установках. – Х.: Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит, 2012. – №2, 96.

[13]Курiс, Ю.В. Біоенергетичні установки. Обладнання та технології переробки органовмісних енергоресурсів [Текст]/ Ю.В. Курiс: монографія. – Запоріжжя: ЗДІА, 2012. – 348 с.

[14]M. Spodoba and O. Spodoba, "Mathematical Model of Changes in Energy Costs for Thermostabilization of the Substrate and Objects in a Biogas Reactor," 2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES), Kremenchuk, Ukraine, 2023, pp. 1-6, https://doi.org/10.1109/MEES61502.2023.10402431

[15]D. Deublein and A. Steinhauser, "Biogas from Waste and Renewable Resources. An Introduction" in, Weinheim: KGaA, pp. 450, 2008.

[16]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.

[17]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.

[18]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.

[19]Закоморний, Д.М., Поводзинський, В.М., Шибецький, В.Ю. Класифікація та аналіз роботи ферментерів з механічними перемішуючими пристроями в аеробних процесах біотехнології. *ScienceRise*, 2015. 5, №2, 24-32.

[20]Луняка, К., Вус, Д., Чумаков, Г. Дослідження масопередачі при перемішуванні турбінною мішалкою в посудинах з відбивними перегородками// Вісник Тернопільського державного технічного університету, 2008. – 13, №1. – 171-176 с.

[21]Ameur, 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.

[22]Ameur, H. (2018). Modifications in the Rushton turbine for mixing viscoplastic fluids. *J. Food Eng.* 223, 117-125.

[23]M. Zablodskiy and M. Spodoba, "Determination of energy efficient level of the speed of mixing body of electromechanical system", Kremenchuk: Electromechanical and energy saving systems, vol. 4, no. 52, pp. 17-26, 2020.http://dx.doi.org/10.30929/2072-2052.2020.4.52.17-26

[24]Луняка, К.В., Вус, Д.Н., Русанов, С.А., Клюев, О.І. Розчинення твердої речовини при перемішуванні мішалками в посудинах з вертикальними перегородками. «Теорія і практика сучасного природознавства». Збірник наукових праць. – Херсон: 2009. – 36-39 с.

[25]Квітка С.О., Безменнікова Л.М., Вовк О.Ю., Квітка О.С. Методи управління та апаратна реалізація сучасних перетворювачів частоти. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: наукове фахове видання. Мелітополь: ТДАТУ, 2013. Вип. 3, т. 2. С. 164-171.

[26]Пересада С.М., Ковбаса С.М., Димко С.С., Благодір В.О. Порівняльний аналіз енергетичної ефективності алгоритмів прямого векторного керування моментом асинхронних двигунів з максимізацією співвідношення момент-струм.

Технічна електродинаміка. – 2015. № 4. С. 36-40. http://nbuv.gov.ua/UJRN/TED_2015_4_8.
[27]A. G. Skliar, R. V. Skliar (2019). Analysis of methods and means for mixing the substrate in the methane kit of biogas plants. *Machinery & Energetics*, 10(4), 19-26.
[28]Spodoba M. Zablodskiy M. Dependence of energy costs on the type of mechanical stirrer used in a biogas reactor. *Electrical engineering and power engineering,* 2021, (1), 26-33. https://doi.org/10.15588/1607-6761-2021-1-3
[29]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.

Надійшла (Received) 15.04.2025;
Прийнята (Accepted) 05.05.2025;
Опублікована (Published) 14.06.2025;

RESEARCH OF ENERGY EXPENDITURES FOR MECHANICAL MIXING OF RAW MATERIALS IN A BIOGAS REACTOR

SPODOBA M.O. Doctor of Philosophy (Ph.D), Assistant, Department of Electrical Engineering, Electromechanics and Electrotechnology, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine. e-mail: spmisha@ukr.net, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6179-0825;

SPODOBA O.O. Doctor of Philosophy (Ph.D), Senior lecturer, Department of Design of Machines and Equipment, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine, e-mail: sp1309@ukr.net, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8217-866X;

Purpose. *Study of energy consumption by mechanical mixers and selection of an energy-efficient mixing device to ensure reduction of energy consumption for the biogas production process and increase interest in its further processing into other types of energy.*

Methodology. *Comparative analysis and use of mathematical modeling methods to determine the amount of energy consumed for mixing, generalization of the results obtained.*

Findings. *The formation of the energy system consists in including renewable alternative energy systems, including biogas technologies. The energy efficiency of which depends on the amount of energy consumed for the processes of intensification of the fermentation of raw materials. One of the main means of intensification is careful and frequent mixing of raw materials during fermentation. The presence of various types of devices for mixing substances in reactors confirms the relevance of the issue of developing energy-efficient means to accelerate fermentation and increase the profitability of further actions with biogas and its processing. The most rational ways to increase the energy efficiency of mixing are to establish the dependences of energy consumption by mechanical mixing devices, to choose a rational type of mixer, which includes the search for rational mass-dimensional characteristics that ensure uniform flows of raw materials in the biogas reactor and at the same time spend the least amount of energy for mixing. Performing the above actions ensures the determination of rational mass-dimensional characteristics of the mixer, which significantly reduces energy consumption for mixing and increases the profitability of implementing biogas technologies into the energy system.*

Originality. *The types of electric machines used as electric drives of mixing devices are analyzed. Taking into account the control systems of electric drives and the cycle diagrams of their operation, as well as the features of mixing the substance, the change in the Euler hydrodynamic similarity criterion for different types of mechanical mixers with the same geometric parameters of biogas reactors, the levels of organic raw materials and the same speed mode of movement of the working body of the mixer, the power consumption for the technological process – mixing is established. A comparative analysis of the influence of the type and geometric dimensions of mechanical mixers on the energy consumption for mixing the volume of the substance in a closed tank when using a single-phase asynchronous motor as a mixer drive is carried out. Using a polynomial dependence, an equation was obtained that describes the change in the power of the electric drive from the change in the frequency of rotation of the working body of a two-tier mixer in which the blades are installed at an angle of 900.*

Practical value. *The results presented in the work can be used to increase the energy efficiency of biogas plants. The direction of further research on the consumption of reactive power by electric motors during the technological cycle of the mixer operation has been established, which will allow determining the pattern of changes in reactive power consumption and outlining the directions of movement towards its reduction.*

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

REFERENCE

[1] WBA. Global Potential of Biogas; World Biogas Association: London, UK, 2019.
[2] EBA. EBA Statistical Report 2023; European Biogas Association: Brussels, Belgium, 2023.
[3] 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.

[4] Ratushnyak, G.S., Lyalyuk, O.G., Koshcheev, I.A. (2017) Biogazovi ustanovki z vidnovlyuvanimi dzherelami energiї termostabilizatsiї protsesu fermentatsiї biomasi. Vinnitsya: VNTU, 88.

[5] 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.

[6] Balussou D. McKenna R., Möst D. Fichtner W. A model-based analysis of the future capacity expansion for German biogas plants under different legal frameworks. Renew. Sustain. Energy Rev. 2018, no. 96, pp. 119–131.

[7] Holub S., Shinkaruk N. Principles of legal regulation of bioenergy use in the European Union. Law. Human. Environment, Kyiv, 2021, 12(4), pp. 72-77.

[8] Zablodskiy M., Spodoba M., Spodoba O. (2022). Experimental study of energy losses of a biogas reactor to the environment in the mesophilic mode of fermentation. *Energy and automation*, 2, 18-32. http://dx.doi.org/10.31548/energiya2022.02.018

[9] M. Zablodskiy, M. Spodoba, O. Spodoba. "Experimental investigation of energy consumption for the process of initial heating of a substrate for the use of electric heat-mechanical system." Electrical Engineering and Power Engineering, №1, 2022, pp. 49–59.

[10]Zablodskiy M.M., Spodoba M.O. Rationale for creating an electrothermomechanical system for mixing and heating biomass. Energy and Automation, Kyiv, no. 5, pp. 136-148, 2020. http://dx.doi.org/10.31548/energiya2020.05.136

[11]Foukrach, M., Bouzit, M., Ameur, H. (2020). Effect of Agitator's Types on the Hydrodynamic Flow in an Agitated Tank. *Chin. J. Mech. Eng.* 33, 37.

[12]Chervoniy, I.F., Kuris, Yu.V. (2012) Doslidzhennya pristroїv ta udoskonalennya protsesiv peremishuvannya v biogazovikh ustanovkakh. Kh.: Energosberezheniye. Energetika. Energoaudit. 2, 96.

[13]Kuris, Yu.V. Bioyenergetichni ustanovki. Obladnannya ta tekhnologiї pererobki organovmisnikh energoresursiv. Zaporizhzhya: ZDIA, 348.

[14]M. Spodoba and O. Spodoba, "Mathematical Model of Changes in Energy Costs for Thermostabilization of the Substrate and Objects in a Biogas Reactor," 2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES), Kremenchuk, Ukraine, 2023, pp. 1-6, https://doi.org/10.1109/MEES61502.2023.10402431

[15]D. Deublein and A. Steinhauser, "Biogas from Waste and Renewable Resources. An Introduction" in, Weinheim:KGaA, pp. 450, 2008.

[16]Ratushnyak, G.S., Anokhina, K.V., Dzhedzhula, V.V. (2010) Doslidzhennya parametriv protsesu peremishuvannya organichnoї masi v biogazoviy ustanovtsi z vertikalnim propelernim peremishuvachem. Vinnitsya: VNTU, 170.

[17]Spodoba, M.O., Zablodskiy, N.N., Radko, I.P. (2019) Osnovni skladovi metodologiї pobudovi zaglibnogo elektromekhanichnogo peretvoryuvacha dlya biogazovikh kompleksiv. V Mizhnarodna naukovo-praktichna konferentsiya prisvyachena pam'yati profesora Viktora Mikhaylovicha Sinkova «Problemi ta perspektivi rozvitku energetiki. elektrotekhnologiy ta avtomatiki v APK». K.: NUBiP.

[18]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.

[19]Zakomorniy, D.M., Povodzinskiy, V.M., Shibetskiy, V.Yu. (2015) Klasifikatsiya ta analiz roboti fermenteriv z mekhanichnimi peremishuyuchimi pristroyami v ayerobnikh protsesakh biotekhnologiї. ScienceRise, 5 (2), 24-32.

[20]Lunyaka, K., Vus, D., Chumakov, G. (2008) Doslidzhennya masoperedachi pri peremishuvanni turbinnoyu mishalkoyu v posudinakh z vidbivnimi peregorodkami. Ternopil: Visnik Ternopilskogo derzhavnogo tekhnichnogo universitetu, 13,171-176.

[21]Ameur, 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.

[22]Ameur, H. (2018). Modifications in the Rushton turbine for mixing viscoplastic fluids. *J. Food Eng.* 223, 117-125.

[23]M. Zablodskiy and M. Spodoba, "Determination of energy efficient level of the speed of mixing body of electromechanical system", Kremenchuk: Electromechanical and energy saving systems, vol. 4, no. 52, pp. 17-26, 2020.http://dx.doi.org/10.30929/2072-2052.2020.4.52.17-26

[24]Lunyaka K.V., Vus D.N., Rusanov S.A., Klyuyev O.I. (2009) Rozchinennya tverdoї rechovini pri peremishuvanni mishalkami v posudinakh z vertikalnimi peregorodkami. Kherson, 36-39.

[25]Kvitka S.O., Bezmennikova L.M., Vovk O.Yu., Kvitka O.S. Control methods and hardware implementation of modern frequency converters. Proceedings of the Tavria State Agrotechnological University: scientific professional publication. Melitopol: TGATU, 2013. Issue 3, vol. 2. P. 164-171.

[26]Peresada S.M., Kovbasa, S.M., Dymko, S.S., Blagodir, V.O. Comparative analysis of energy efficiency of algorithms for direct vector torque control of asynchronous motors with maximization of the torque-current ratio. Technical Electrodynamics. 2015. No. 4. P. 36-40. Access mode: http://nbuv.gov.ua/UJRN/TED_2015_4_8.

[27]A. G. Skliar, R. V. Skliar (2019). Analysis of methods and means for mixing the substrate in the methane kit of biogas plants. *Machinery & Energetics*, 10(4), 19-26.

[28]Spodoba M. Zablodskiy M. Dependence of energy costs on the type of mechanical stirrer used in a biogas reactor. *Electrical engineering and power engineering,* 2021, (1), 26-33. https://doi.org/10.15588/1607-6761-2021-1-3

[29]Cherevko, O.I., Poperechniy, A.M. (2014) Protsesi i aparati kharchovikh virobnitstv: pidruchnik 2-e vidannya. dop. ta vipr. Kh.: Svit Knig, 495