

УДК 663.033

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГОВИТРАТ НА ПЕРЕМІШУВАННЯ СИРОВИНИ У БІОГАЗОВОМУ РЕАКТОРІ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕХАНІЧНИХ МІШАЛОК

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

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

**Мета роботи.** Дослідження енергетичних витрат на підтримку врівноваженого стану сировини у біогазовому реакторі за використання механічних мішалок для встановлення ефективної конструкції механічної мішалки.

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

**Отримані результати.** Формування новітньої та збалансованої енергетичної системи полягає у впровадженні до її складу відновлювальних систем енергетики, серед яких і біогазові технології. Енергоефективність біогазових технологій залежить від величини витраченої енергії на підтримку анаеробного зброджування. Саме цей фактор, є одним із основних при розгляді інвесторами можливостей фінансування проектів щодо будівництва або модернізації біогазових технологій. Одним із основних засобів інтенсифікації анаеробного зброджування є підтримка температури сировини у заданих межах та врівноважений стан сировини у об'ємі біогазового реактора, що досягається шляхом перемішування. Найбільш раціональними шляхами для підвищення енергоефективності перемішування є встановлення залежностей витрати енергії механічними змішувачами 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.** Авторами виведено критеріальні рівняння, що дозволяють математичним шляхом визначити зміну споживаної потужності електричного приводу від частоти обертання валу механічних мішалок. Встановлено аналітичні залежності між споживаною потужністю електропривода та частотою обертання валу механічних мішалок для біогазових реакторів, що враховують реологічні властивості субстрату. Отримано графічні залежності зміни витраченої потужності від частоти обертання робочого органу механічних мішалок для біогазових реакторів циліндричної форми.

**Практична цінність.** Отримані у роботі результати дозволяють розраховувати величину споживаної енергії математичним шляхом, не проводячи додаткових експериментальних досліджень, що суттєво скорочує фінансові витрати та час проектування систем перемішування сировини у біогазових реакторах. 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:** енергетичне споживання, порівняльний аналіз, енергоефективність, поліном, критерій Ейлера, механічне перемішування, потужність електричного двигуна.

### І. ВСТУП

Питання пошуку та впровадження альтернативних джерел енергетики є дуже актуальним у багатьох країнах. Насамперед це пов'язано з підвищенням вартості викопних ресурсів, що у свою чергу призводить до збільшення кінцевої вартості для побутових та ви-

робничих споживачів. Це є негативним чинником, який впливає на економічну та енергетичну незалежність.

На засіданнях світових та європейських біогазових асоціацій [1], [2] загострюється увага на впровадженні біогазових технологій у енергетичну систему країн. Останніми роками європейська спільнота все

© Сподоба М.О., Сподоба О.О., 2026

Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License (CC-BY-SA 4.0)

DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2026-2-6>

більше розглядає біометан, як основу енергетичної безпеки країн [2], [3]. Біометан утворюється у процесі анаеробного зброджування органічної сировини у спеціальних резервуарах – біогазових реакторах [4], [5]. У якості органічної сировини для зброджування, використовуються різноманітні відходи галузей рослинництва, тваринництва, рибиництва та інших харчових промисловостей [6], [7].

Якість утвореного біометану залежить від умов протікання анаеробного зброджування [8], [9] та визначається у відсотковому вмісті у ньому метану та інших хімічних домішок, таких як: вуглекислий газ, водень, сірка та інші.

Враховуючи вищезазначене, актуальним питанням є забезпечення необхідних умов для утворення біометану з високим вмістом метану з мінімальними витратами, щоб знизити його собівартість.

## II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Зброджування органічної сировини у біогазових реакторах є довготривалим, що пов'язано із поступовим розвитком колоній бактерій та розкладанні органічної речовини. Внаслідок чого спостерігається розкладання сировини на тверду та рідку фракції [10]. Щоб цього уникнути, використовують перемішування сировини під час її зброджування [11]-[14].

На сьогоднішній день використовують різноманітні системи для перемішування [15]-[18]. У роботах [19]-[22] стверджується, про ефективність використання механічних мішалок різних типів та модифікацій. Зазначається, що вони потребують найменшої кількості енергії на перемішування у порівнянні з гідравлічним та пневматичним перемішуванням. Проте, відсутня інформація проведеного порівняльного аналізу енергетичних витрат різних модифікацій механічних перемішувальних пристроїв у біогазових реакторах однакового об'єму, з подальшим виведенням критеріальних рівнянь для розрахунку споживаної потужності в залежності від частоти обертання.

На ефективність зброджування, також впливає температурний режим [9], [23] та швидкість переміщення елементарних об'ємів речовини. Дослідження щодо впливу швидкості обертання мішалки на швидкість переміщення елементарних об'ємів речовини у біогазових реакторах циліндричної форми наведено у роботах [24], [25]. Науковцями проведено багато досліджень та встановлено, що при турбулентному режимі перемішування у замкнених резервуарах є неефективним, що пояснюється неоднорідністю сировини після її перемішування.

У роботах [24]-[27] наведено результати досліджень, які вказують на те, що суттєвим впливом на споживання енергії системами перемішування є фізико-хімічні властивості сировини яка зброджується та геометричні розміри самої системи. Для створення енергетично ефективних систем призначених для перемішування сировини необхідно провести дослі-

дження з ціллю встановлення раціонального поєднання проекції площі лопаті на речовину та споживаної енергії на перемішування.

У роботі [27] зазначається, що режим перемішування сировини у біогазових реакторах є повторно-короткочасним. Кожен цикл перемішування в середньому становить 20 хвилин. Через що, проектування систем перемішування потребує врахування номенклатури типових приводів та їх номінальних режимів роботи. Зазвичай, для перетворення електричної енергії в механічну, яка буде прикладена до валу мішалки використовують асинхронні електродвигуни різної потужності. При цьому, особливу увагу приділяють режимам роботи асинхронних двигунів, щоб часті пуски не призвели до перегріву обмоток та виходу електричного двигуна з ладу [28], [29].

Враховуючи, що рекомендована частота обертання валу перемішувального пристрою для біогазових реакторів знаходиться у межах від 20 до 50 об/хв [24], [25], а номінальні оберти асинхронних двигунів значно перевищують рекомендовані показники, тому для зниження обертів використовують векторне або скалярне частотне керування, що описано у роботах [30], [31]. Також використовують прямий пуск електричного двигуна при цьому обов'язковою умовою є поєднання останнього з редуктором. Електрична схема прямого пуску однофазного асинхронного електричного двигуна наведена у роботі [27].

Проведений аналіз праць науковців з різних країн світу, вказує на зацікавленість населення та держави у підвищенні енергетичної ефективності інтенсифікації біогазового виробництва. Враховуючи вищезазначене, актуальним питанням є проведення порівняльного аналізу енергетичних витрат різних модифікацій механічних перемішувальних пристроїв у біогазових реакторах однакового об'єму, з подальшим виведенням критеріальних рівнянь для розрахунку споживаної потужності в залежності від частоти обертання.

Все це, дозволить знизити енергетичні витрати на підтримку необхідного мікроклімату у біогазовому реакторі у процесі зброджування органічної сировини, що забезпечить зниження собівартості 1 м<sup>3</sup> утвореного біогазу.

## III. МЕТА РОБОТИ

Дослідження енергетичних витрат на підтримку зрівноваженого стану сировини у біогазовому реакторі за використання механічних мішалок для встановлення обрання енергетично ефективної конструкції механічної мішалки.

## IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Для проведення дослідження та порівняльного аналізу енергетичних витрат (витрати потужності) різних модифікацій механічних перемішувальних при-

строїв у біогазових реакторах однакового об'єму, з подальшим виведенням критеріальних рівнянь для розрахунку споживаної потужності в залежності від частоти обертання приймалися наступні початкові умови: час встановлення номінальних обертів перемішуючого пристрою 2 с; густина та динамічна в'язкість речовини  $\rho = 1100 \text{ кг/м}^3$ ,  $\mu = 0.048 \text{ Па} \cdot \text{с}$ .

Геометричні розміри циліндричного біогазового реактора використаного у ході досліджень наведені у роботі [27].

Враховуючи, що рекомендована частота обертання валу перемішуючого пристрою для біогазових реакторів знаходиться у межах від 20 до 50 об/хв [24], [25], при проведенні досліджень приймалася частота обертання валу перемішуючого пристрою рівна  $n = 40 \text{ об/хв}$ . У якості приводу механічної мішалки використовується асинхронний електричний двигун поєднаний з редуктором. ККД двигуна та редуктора становлять  $\eta_{\text{дв}} = 0.8$  та  $\eta_n = 0.8$  відповідно. Використовується прямий пуск асинхронного електричного двигуна за схемою наведеною у роботі [27].

Розраховано режим руху речовини що зброджується, оскільки, він має значний вплив на споживання потужності. Оцінка режиму руху органічної сировини, яка знаходиться у замкненому об'ємі виконується за допомогою відцентрового критерію Рейнольдса [26], [27]:

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

де  $Re_m$  – модифікований критерій Рейнольдса;  $d_m$  – діаметр мішалки, м;  $n_c$  – частота обертів механічної мішалки, об/с;  $\rho$  – густина сировини, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu$  – динамічна в'язкість сировини, Па·с.

У подальшому, враховуючи розраховане значення критерію Рейнольдса, проводимо розрахунок критерію Ейлера, безрозмірної величини у гідродинаміці, яка залежить від встановлених експериментальним шляхом констант для різних модифікацій механічних мішалок:

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

де  $A$ ,  $m$  – константи, що отримані експериментальним шляхом для різних геометричних розмірів механічних мішалок.

Критерій Ейлера відіграє одну із головних ролей при виборі перемішуючого пристрою, оскільки він вказує на необхідну потужність на перемішування враховуючи відношення інерційних сил до сил тиску. Даний критерій безпосередньо впливає на вибір конструкції перемішуючого пристрою, його частоти обер-

тання та потужності двигуна, оскільки величина критерію Ейлера вказує на рівень опору середовища і відповідно енергетичні витрати. У роботі [29] наведено результати експериментальних досліджень зміни критерію гідродинамічної подоби Ейлера під впливом критерію Рейнольдса. Для проведення досліджень використовували наступні значення констант: для дволопатевої листової, лопаті під кутом 90°  $A = 14.35$ ;  $m = 0.31$ ; для чотирьох лопатевої одноярусної у якій лопаті встановлені під кутом 90°  $A = 8.52$ ;  $m = 0.2$ ; для лопатевої одноярусної у якій лопаті встановлені під кутом 90°  $A = 6.8$ ;  $m = 0.2$ .

З розвитком технологій та враховуючи потреби для виконання технологічних процесів перемішування з необхідною ефективністю зазвичай виготовляються мішалки з нетиповими геометричними розмірами. Прикладом не типових мішалок є системи де необхідне розміщення нагрівального пристрою у лопатях, для створення комбінованої системи перемішування та підігріву сировини у біогазових реакторах. Для врахування конструктивних змін та відмінностей механічних мішалок від типових конструкцій використовуються поправочні коефіцієнти  $f_i$ , які дозволяють оцінити зміну витрати потужності в залежності від зміни геометричних розмірів механічної мішалки. Математичні залежності для розрахунку поправочних коефіцієнтів та опис їх складових наведено у попередній роботі авторів [27].

Критерій Ейлера з врахуванням поправочних коефіцієнтів розраховується за наступним рівнянням, наведеним у попередній роботі авторів [27]:

$$Eu'_m = Eu_m \cdot \sum(f_i); \quad (3)$$

Оскільки у якості приводу мішалки використовується електричний двигун, проводимо розрахунок споживаної потужності електричним двигуном за формулою:

$$P_{\text{дв}} = k \frac{P_p}{\eta_n}; \quad (4)$$

У залежності (4) враховується робоча потужність мішалки ( $P_p$ ), коефіцієнт корисної дії передачі та коефіцієнт запасу ( $k = 1.3$ ).

З врахуванням поправочних коефіцієнтів, частоти обертання, питомої густини речовини та діаметру мішалки проводимо розрахунок робочої потужності механічної мішалки використовуючи наступну залежність:

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

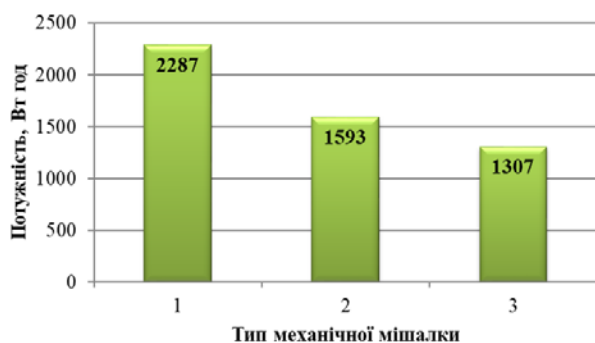
де  $Eu'_m$  – критерій Ейлера з врахуванням поправочних коефіцієнтів;  $n$  – частота обертів механічної

мішалки, об/с;  $d_m$  – діаметр мішалки, м;  $\rho$  – густина сировини, кг/м<sup>3</sup>.

Послідовність отримання рівняння (5) детально описано авторами даної статті у [25].

Для досягнення поставленої у роботі мети, враховуючи вищенаведені початкові умови, геометричні розміри біогазового реактора і механічних мішалок, використовуючи рівняння (1)-(5) та математичні залежності із роботи [27] проведено порівняльний аналіз енергетичних витрат (витрати потужності) електричного приводу механічних мішалок за різної частоти перемішування сировини у біогазових реакторах. Для порівняльного аналізу було використано отримані у ході розрахунків дані споживаної потужності кожним типом мішалки, що розглядалися у роботі для частоти обертання робочого органу мішалки від 10 до 60 об/хв. У подальшому за допомогою Excel було побудовано гістограми (рис 1 – рис. 4)

Результати аналізу наведено у вигляді гістограми (рис. 1), на якій зображено витрату потужності електроприводом мішалки за її номінальної частоти обертання 40 об/хв, при використанні дволопатевої листової мішалки, у якій лопаті під кутом 90°; чотирьох лопатевої одноярусної мішалки з лопатями встановленими під кутом 90°; дволопатевої одноярусної мішалки, з лопатями під кутом 90°.



1 – дволопатевої листової мішалки, у якій лопаті під кутом 90°; 2 – чотирьох лопатевої одноярусної мішалки з лопатями встановленими під кутом 90°; 3 – дволопатевої одноярусної механічної мішалки, у якій лопаті встановлені під кутом 90°.

**Рисунок 1.** Витрата потужності електричним приводом робочого органу мішалки, за номінальної частоти обертання 40 об/хв.

Для досліджуваних у роботі механічних мішалок визначено картину зміни споживаної потужності електричним двигуном від швидкості обертання робочого органу мішалки у межах від 10 до 60 об/хв. Для цього використовувалися вищенаведені початкові умови та рівняння (1-5). Згідно з проведеними розрахунками, отримано графічні залежності витрати потужності для кожного типу мішалки для номінальних частот обертання від 10 до 60 об/хв. Результати наведено на рис. 2 – рис. 4.



**Рисунок 2.** Витрата потужності електричним приводом в залежності від частоти обертання валу дволопатевої одноярусної мішалки у якій лопаті встановлені під кутом 90°.



**Рисунок 3.** Витрата потужності електричним приводом в залежності від частоти обертання валу чотирьох лопатевої одноярусної мішалки з лопатями встановленими під кутом 90°.



**Рисунок 4.** Витрата потужності електричним приводом в залежності від частоти обертання валу дволопатевої листової мішалки, у якій лопаті під кутом 90°.

Провівши аналіз рис. 2 – рис. 4, встановлено, що не залежно від типу мішалки при зростанні частоти обертання споживається більше електричної енергії.

На основі отриманих значень потужності від ча-

стоти обертання робочого органу мішалки (рис. 2 – рис. 4) для математичного визначення зміни споживаної потужності електричного приводу від частоти обертання валу механічної мішалки, для розглянутих у статті типів мішалок авторами було виведено поліноміальні залежності (6), (7) та (8), що характеризуються високою збіжністю. Адже, саме поліноміальна залежність дозволяє описати нелінійні зв'язки зміни параметрів відносно одне одного. Для цього, із графічних залежностей (рис. 2 – рис. 4) отримано для кожного типу мішалки масив даних у вигляді  $(x, y)$ , де  $x$  – частота обертання робочого органу мішалки,  $y$  – величина споживаної потужності. У подальшому коефіцієнти поліноміальних залежностей (6), (7) та (8) визначалися за методикою описаною у роботі [32].

Нижче наведено рівняння отримані авторами статті для визначення зміни потужності від зміни частоти обертання валу мішалки, а саме:

- дволопатевої одноярусної механічної мішалки у якій лопаті встановлені під кутом  $90^0$  (рис. 2):

$$y = -2.6042 \cdot (x^4) + 45.894 \cdot (x^3) - 98.715 \cdot (x^2) + 173.64 \cdot (x) - 89.167; \quad (6)$$

- чотирьох лопатевої одноярусної мішалки з лопатями встановленими під кутом  $90^0$  (рис. 3):

$$y = 14.194 \cdot (x^3) + 69.405 \cdot (x^2) - 125.79 \cdot (x) + 83; \quad (7)$$

- дволопатевої листової мішалки, у якій лопаті під кутом  $90^0$  (рис. 4):

$$y = -6.375 \cdot (x^4) + 100.95 \cdot (x^3) - 267.76 \cdot (x^2) + 503.62 \cdot (x) - 273.33; \quad (8)$$

Рівняння (6-8) дозволяють математичним шляхом визначити кількість споживаної потужності механічних мішалок при використанні їх у біогазових реакторах з геометричними параметрами у відповідності до початкових умов.

При розрахунку необхідно враховувати, що величина  $(X)$  у рівняннях (6-8) має крок 10 об/хв, інакше кажучи для 10 об/хв ( $X = 1$ ), для 20 об/хв ( $X = 2$ ), для 30 об/хв ( $X = 3$ ), для 40 об/хв ( $X = 4$ ), і так далі. Для порівняльного аналізу отриманого рівняння та визначеного значення споживаної потужності при проведенні досліджень (рис. 2) розрахуємо споживану потужність при частоті обертання валу дволопатевої листової, у якій лопаті під кутом  $90^0$  за частоти обертання 40 об/хв, відповідно ( $X = 4$ ).

Підставивши ці значення у рівняння (8) отримаємо наступний розрахунок:

$$y = -6.375 \cdot (4^4) + 100.95 \cdot (4^3) - 267.76 \cdot (4^2) + 503.62 \cdot 4 - 273.33 = 2285.79 \text{ Вт} \cdot \text{год}$$

При проведених дослідженнях (рис. 1) потужність споживана дволопатевою листовою мішалкою, у

якій лопаті під кутом  $90^0$  при частоті обертання 40 об/хв, у середньому становила 2287 Вт·год, тоді як розрахована величина за рівнянням (8) становить 2285,79 Вт·год, що на 0,05% менше. Це свідчить про адекватність отриманого рівняння.

Аналогічні можна розрахувати кількість споживаної потужності дволопатевою одноярусною мішалкою у якій лопаті встановлені під кутом  $90^0$  використовуючи рівняння (6), середня розбіжність становить 0,8% та чотирьох лопатевою одноярусною мішалкою з лопатями встановленими під кутом  $90^0$  використовуючи рівняння (7) середня розбіжність становить 0,36%.

Проаналізувавши споживану потужність (рис. 1 – рис. 4) за використання різних типів мішалок, зроблено висновок, що дволопатева одноярусна мішалка, у якій лопаті під кутом  $90^0$  споживає найменше значення енергії серед розглянутих типів, згідно з початковими умовами.

**Конфлікт інтересів.** Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

## V. ВИСНОВКИ

Проведений аналіз використовуваних електричних приводів у якості рушіїв механічних мішалок, що використовуються у біогазових установках. Встановлено споживану потужність на цикл перемішування сировини при врахуванні наступних показників фізико-хімічного складу сировини, циклограми роботи електричних машин та систем їх керування, вплив критеріїв гідродинамічної подібності Ейлера та Рейнольдса для одноярусних лопатевих механічних мішалок у яких лопаті встановлені під кутом  $90^0$ .

Використовуючи метод найменших квадратів, визначено коефіцієнти поліноміальних залежностей для математичного визначення зміни споживаної потужності електричного приводу від частоти обертання валу механічної мішалки, а саме, дволопатевої одноярусної мішалки у якій лопаті встановлені під кутом  $90^0$ ; чотирьох лопатевої одноярусної мішалки з лопатями встановленими під кутом  $90^0$ ; дволопатевої листової мішалки, у якій лопаті під кутом  $90^0$ . Використання отриманих у роботі результатів дозволить підвищити енергетичну ефективність систем інтенсифікації біогазового виробництва.

Проведено порівняльний аналіз залежності витрати енергії на перемішування об'єму речовини у резервуарі циліндричного типу, при використанні різних конструкцій одноярусних лопатевих механічних мішалок у яких лопаті встановлені під кутом  $90^0$ , рушієм яких є однофазний асинхронний двигун підключений до електричної мережі за схемою прямого пуску.

Встановлено напрямок проведення подальших досліджень, які будуть направлені на дослідження споживання реактивної потужності електричними двигунами за періоди перемішування об'єму сировини.

ни у реакторі. Це дозволить підвищити енергоефективність утворення біогазу та рентабельності подальшої його переробки.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] WBA. Global Potential of Biogas. London : World Biogas Association, 2019.
- [2] EBA. EBA Statistical Report 2023. Brussels : European Biogas Association, 2023.
- [3] New Trends in Substrates and Biogas Systems in Poland / S. Marks et al. *Journal of Ecological Engineering*. 2020. Vol. 21, № 4. P. 19–25. doi: <https://doi.org/10.12911/22998993/119528>
- [4] 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. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 96. P. 119–131. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.041>
- [5] Ward A. J., Hobbs P. J., Holliman P. J., Jones D. L. Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. *Bioresource Technology*. 2008. Vol. 99. P. 7928–7940. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.02.044>
- [6] Ратушняк Г. С., Лялюк О. Г., Кошечев І. А. Біогазові установки з відновлюваними джерелами енергії термостабілізації процесу ферментації біомаси : монографія. Вінниця : ВНТУ, 2017. 84 с.
- [7] Holub S., Shinkaruk N. Principles of legal regulation of bioenergy use in the European Union. *Law. Human. Environment*. 2021. Vol. 12, Issue 4. P. 72–77. doi: <https://doi.org/10.31548/law2021.04.09>
- [8] Заблодський М. М., Сподоба М. О., Сподоба О. О. Експериментальне дослідження енергетичних втрат біогазового реактора в навколишнє середовище при мезофільному режимі зброджування. *Енергетика і автоматика*. 2022. № 2. С. 18–32. doi: <https://doi.org/10.31548/energiya2022.02.018>
- [9] Zablodskiy M., Spodoba M., Spodoba O. 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*. 2022. № 1. P. 49–59. doi: <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2022-1-5>
- [10] Zablodskiy M. M., Spodoba M. O. Rationale for creating an electrothermomechanical system for mixing and heating biomass. *Energy and Automation*. 2020. № 5. P. 136–148. doi: <https://doi.org/10.31548/energiya2020.05.136>
- [11] Foukrach M., Bouzit M., Ameer H. Effect of Agitator's Types on the Hydrodynamic Flow in an Agitated Tank. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2020. Vol. 33, № 37. P. 18. doi: <https://doi.org/10.1186/s10033-020-00454-2>
- [12] Куріс Ю. В. Біоенергетичні установки. Обладнання та технології переробки органічних енергоресурсів : монографія. Запоріжжя : ЗДІА, 2012. 348 с.
- [13] Ратушняк Г. С., Анохіна К. В., Джеджула В. В. Дослідження параметрів процесу перемішування органічної маси в біогазовій установці з вертикальним пропелерним перемішувачем. *Збірник наукових праць ВНАУ. Серія “Технічні науки”*. 2010. № 5. С. 139–144.
- [14] Червоний І. Ф., Куріс Ю. В. Дослідження пристроїв та удосконалення процесів перемішування в біогазових установках. *Енергосбереження. Енергетика. Енергоаудит*. 2012. № 2. С. 96.
- [15] 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”. Київ : НУБіП, 2019.
- [16] Deublein D., Steinhauser A. *Biogas from Waste and Renewable Resources. An Introduction*. Weinheim : KGaA, 2008. 450 p.
- [17] Review of mixing systems of fermentation liquid used in biogas plants / S. Marks et al. *Technika Rolnicza Ogrodnicza Leśna*. 2017. Vol. 6. P. 24–26.
- [18] Луняка К., Вус Д., Чумаков Г. Дослідження масопередачі при перемішуванні турбінною мішалкою в посудинах з відбивними перегородками. *Вісник Тернопільського державного технічного університету*. 2008. № 1. С. 171–176.
- [19] Закоморний Д. М., Поводзинський В. М., Шибецький В. Ю. Класифікація та аналіз роботи ферментерів з механічними перемішувачами в аеробних процесах біотехнології. *ScienceRise*. 2015. Вип. 5, № 2. С. 24–32. doi: <https://doi.org/10.15587/2313-8416.2015.42614>
- [20] Розчинення твердої речовини при перемішуванні мішалками в посудинах з вертикальними перегородками / К. В. Луняка та ін. *Теорія і практика сучасного природознавства : збірник наукових праць*. 2009. С. 36–39.
- [21] Ameer H. Mixing of complex fluids with flat and pitched bladed impellers: effect of blade attack angle and shear-thinning behavior. *Food and Bioproducts Processing*. 2016. Vol. 99. P. 71–77.
- [22] Ameer H. Modifications in the Rushton turbine for mixing viscoplastic fluids. *Journal of Food Engineering*. 2018. P. 117–125. doi: <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2018.04.005>
- [23] Spodoba M., Spodoba O. 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. P. 1–6. doi: <https://doi.org/10.1109/MEES61502.2023.10402431>
- [24] Zablodskiy M., Spodoba M. Determination of energy efficient level of the speed of mixing body of electromechanical system. *Electromechanical and Energy Saving Systems*. 2020. Vol. 4, № 52. P. 17–26. doi: <https://doi.org/10.30929/2072-2052.2020.4.52.17-26>
- [25] □ Spodoba M. O., Spodoba O. O., Kovalchuk S. I., Oliinik Yu. O. Determination of the Energy Efficient Speed of the Working Body of the Agitator for Small Biogas Reactors. *Problemele energeticii regionale*. 2025. № 3. P. 141–152. doi: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2025.3-67.12>
- [26] 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. P. 26–33. doi: <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2021-1-3>
- [27] Сподоба М., Сподоба О. Дослідження енергетичних витрат на механічне змішування сировини в біогазовому реакторі. *Електротехніка та енергетика*. 2025. № 2. С. 18–25. doi: <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2025-2-2>
- [28] Skliar A. G., Skliar R. V. Analysis of methods and means for mixing the substrate in the methane kit of biogas plants. *Machinery & Energetics*. 2019. Vol. 10, № 4. P. 19–26. doi: <https://doi.org/10.31548/machenergy.2019.04.019-026>
- [29] Черевко О. І., Поперечний А. М. Процеси і апарати харчових виробництв : підручник. 2-ге вид., доп. та випр. Світ Книг, 2014. 495 с.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] Дегтярьов А. В., Кокодій М. Г., Маслов В. О., Тіманюк В. О. Постановка експерименту та обробка результатів : навчальний посібник для студентів фізичних спеціальностей вищих навчальних закладів. Харків : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2017. 176 с.

Надійшла (Received) 09.02.2026;

Прийнята (Accepted) 27.03.2026;

Опублікована (Published) 29.05.2026;

## RESEARCH ON ENERGY CONSUMPTION FOR RAW MATERIAL MIXING IN A BIOGAS REACTOR USING MECHANICAL MIXERS

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

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

**Purpose.** Research of energy costs for maintaining the balanced state of raw materials in a biogas reactor using mechanical mixers with the aim of choosing an energy-efficient design of a mechanical mixer.

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

**Findings.** The formation of a modern and balanced energy system consists in introducing renewable energy systems into its composition, including biogas technologies. The energy efficiency of biogas technologies depends on the amount of energy spent on supporting anaerobic digestion. This factor is one of the main ones when investors consider financing opportunities for projects related to the construction or modernization of biogas technologies. One of the main means of intensification of anaerobic digestion is maintaining the temperature of the raw material within the specified limits and a balanced state of the raw material in the volume of the biogas reactor, which is achieved by mixing. The most rational ways to increase the energy efficiency of mixing are to establish the dependence 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 material in the biogas reactor and at the same time spend the least amount of energy for mixing. The above actions ensure the determination of rational mass-dimensional characteristics of the mixer, which significantly reduces energy consumption for mixing and increases the profitability of introducing biogas technologies into the energy system.

**Originality.** The authors have derived criterion equations that allow mathematically determining the change in the

power consumption of the electric drive from the frequency of rotation of the shaft of mechanical mixers. Analytical dependencies between the power consumption of the electric drive and the frequency of rotation of the shaft of mechanical mixers for biogas reactors have been established, which take into account the rheological properties of the substrate. Graphical dependencies of the change in the power consumption from the frequency of rotation of the working body of mechanical mixers for biogas reactors of cylindrical shape have been obtained.

**Practical value.** The results obtained in the work allow calculating the amount of energy consumed mathematically, without conducting additional experimental studies, which significantly reduces financial costs and time for designing raw material mixing systems in biogas reactors. The direction of further research has been established regarding the consumption of reactive power by electric motors during the technological cycle of the mixer, which will allow determining the pattern of changes in reactive power consumption and outlining the directions of movement towards its reduction.

**Keywords:** energy consumption, comparative analysis, energy efficiency, polynomial, Euler criterion, mechanical mixing, electric motor power.

## REFERENCES

- [1] WBA. (2019). Global Potential of Biogas; World Biogas Association: London, UK.
- [2] EBA. (2023). EBA Statistical Report 2023; European Biogas Association: Brussels, Belgium.
- [3] 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
- [4] Balussou D. McKenna R., Möst D. Fichtner W. (2018). A model-based analysis of the future capacity expansion for German biogas plants under different legal frameworks. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 96, 119–131. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.041>
- [5] 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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.02.044>
- [6] Ratushnyak, G.S., Lyalyuk, O.G., Koshcheev, I.A. (2017) Biogazovi ustanovki z vidnovlyuvanimi dzherelami energii termostabilizatsii protsesu fermentatsii biomasi. [Biogas plants with renewable energy sources for thermal stabilization of the biomass fermentation process] Vinnitsya: VNTU, 84.
- [7] Holub S., Shinkaruk N. (2021). Principles of legal regulation of bioenergy use in the European Union. *Law. Human. Environment, Kyiv*, 12(4), 72-77. DOI: <https://doi.org/10.31548/law2021.04.09>
- [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. DOI: <https://doi.org/10.31548/energiya2022.02.018>
- [9] M. Zablodskiy, M. Spodoba, O. Spodoba. (2022). 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, 49–59. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2022-1-5>
- [10] Zablodskiy M.M., Spodoba M.O. (2020). Rationale for creating an electrothermomechanical system for mixing and heating biomass. *Energy and Automation, Kyiv*, 5, 136-148. DOI: <https://doi.org/10.31548/energiya2020.05.136>
- [11] 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: <https://doi.org/10.1186/s10033-020-00454-2>
- [12] Kuris, Yu.V. Bioenergetichni ustanovki. Oblasnannya ta tekhnologii pererobki organovmisnikh energoresursiv. [Bioenergy plants. Equipment and technologies for processing organic energy resources]. Zaporizhzhya: ZDIA, 348.
- [13] Ratushnyak, G.S., Anokhina, K.V., Dzhedzhula, V.V. (2010) Doslidzhennya parametriv protsesu peremishuvannya organichnoi masi v biogazoviy ustanovtsi z vertikalnim propelernim peremishuvachem. [Research of parameters of the process of mixing organic mass in a biogas plant with a vertical propeller mixer]. Vinnitsya: VNTU, 170.
- [14] Chervoniy, I.F., Kuris, Yu.V. (2012) Doslidzhennya pristroiv ta udoskonalennya protsesiv peremishuvannya v biogazovikh ustanovkakh. [Research on devices and improvement of mixing processes in biogas plants]. Kh.: Energoberezhniye. Energetika. Energoaudit. 2, 96.
- [15] Spodoba, M.O., Zablodskiy, N.N., Radko, I.P. (2019) Osnovni skladovi metodologii pobudovi zaglibnogo elektromekhanichnogo peretvoryuvacha dlya biogazovikh kompleksiv [Main components of the methodology for constructing a submerged electromechanical converter for biogas complexes]. V International scientific and practical conference dedicated to the memory of Professor Viktor Mykhailovych Synkov "Problems and prospects for the development of energy, electrical technologies and automation in the agricultural complex». K.: NUBiP.
- [16] D. Deublein and A. Steinhäuser, "Biogas from Waste and Renewable Resources. An Introduction" in, Weinheim: KGaA, pp. 450, 2008.
- [17] 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.
- [18] Lunyaka, K., Vus, D., Chumakov, G. (2008)

- Doslidzhennya masoperedachi pri peremishuvanni turbinnouy mishalkouy v posudinakh z vidbivnimi peregorodkami. [Mass transfer studies during mixing with a turbine mixer in vessels with reflecting baffles]. Ternopil: Visnik Ternopilskogo derzhavnogo tekhnichnogo universitetu, 13,171-176.
- [19] Zakomorniy, D.M., Povodzinskiy, V.M. (2015) Klasifikatsiya ta analiz roboti fermenteriv z mekhanichnimi peremishuyuchimi pristroyami v ayerobnikh protsesakh biotekhnologii. [Classification and analysis of the operation of fermenters with mechanical stirring devices in aerobic biotechnology processes]. ScienceRise, 5 (2), 24-32.
- [20] Lunyaka K.V., Vus D.N., Rusanov S.A., Klyuyev O.I. (2009) Rozchinennya tvrdoї rechovini pri peremishuvanni mishalkami v posudinakh z vertikalnimi peregorodkami. [Dissolution of a solid substance by stirring with stirrers in vessels with vertical partitions]. Kherson, 36-39.
- [21] 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.
- [22] Ameer H. (2018). Modifications in the Rushton turbine for mixing viscoplastic fluids. J. Food Eng. 223, 117-125. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.04.005>
- [23] M. Spodoba and O. Spodoba (2023). 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, 1-6, doi: <https://doi.org/10.1109/MEES61502.2023.10402431>
- [24] M. Zablodskiy and M. Spodoba (2020). Determination of energy efficient level of the speed of mixing body of electromechanical system, Kremenchuk: Electromechanical and energy saving systems, 4, 52, 17-26. DOI: <https://doi.org/10.30929/2072-2052.2020.4.52.17-26>
- [25] Spodoba M.O., Spodoba O.O., Kovalchuk S.I., Oliinik Yu.O. (2025). Determination of the Energy Efficient Speed of the Working Body of the Agitator for Small Biogas Reactors. Problemele energeticii regionale, 3, 141-152. DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2025.3-67.12>
- [26] Spodoba M. Zablodskiy M. (2021). Dependence of energy costs on the type of mechanical stirrer used in a biogas reactor. Electrical engineering and power engineering, 1, 26-33. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2021-1-3>
- [27] Spodoba, M., Spodoba, O. (2025). Research of energy expenditures for mechanical mixing of raw materials in a biogas reactor. Electrical Engineering and Power Engineering, 2, 18–25. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2025-2-2>
- [28] 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. DOI: [10.31548/machenergy.2019.04.019-026](https://doi.org/10.31548/machenergy.2019.04.019-026)
- [29] Cherevko, O.I., Poperechniy, A.M. (2014) Protsey i aparati kharchovikh virobnitstv [Food production processes and equipment]: pidruchnik 2-e vidannya. dop. ta vipr. Kh.: Svit Knig, 495
- [30] Peresada S.M., Kovbasa, S.M., Dymko, S.S., Blagodir, V.O. (2015). Porivnialnyi analiz enerhetychnoi efektyvnosti alhorytmiv priamoho vektornoho keruvannia momen-tom asynkronnykh dvyhunyv z maksymizatsiieiu spivvidnoshennia moment-strum. [Comparative analysis of energy efficiency of algorithms for direct vector torque control of asynchronous motors with maximization of the torque-current ratio]. Technical Electrodynamics. 4. 36-40.
- [31] Kvitka S.O., Bezmennikova L.M., Vovk O.Yu., Kvitka O.S. Metody upravlinnia ta aparatna realizatsiia su-chasnykh peretvorivachiv chastoty [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.
- [32] A. V. Degtyarev, M. G. Kokodiy, V. O. Maslov, V. O. Timanyuk. Postanovka eksperymentu ta obrobka rezultativ: navchalnyi posibnyk dlia studentiv fizychnykh spetsialnostei vyshchykh navchalnykh zakladiv. [Experiment setup and results processing: a textbook for students of physics majors of higher educational institutions]. KhNU named after V. N. Karazin, 2017. 176 p.