

ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНО ЕФЕКТИВНОГО РІВНЯ ШВИДКОСТІ ПЕРЕМІШУВАЛЬНОГО ОРГАНУ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ**М. М. Заблодський, М. О. Сподоба**Національний університет біоресурсів і природокористування України
вул. Героїв Оборони, 12, м. Київ, 03041, Україна. E-mail: spmisha@ukr.net

На сьогоднішній день зброджування біомаси у біогазових установках є одним з найпрогресивніших, екологічно та економічно вигідних рішень для отримання енергії із відходів. Однак, процес анаеробного зброджування відходів є довготривалим, тому одним з головних чинників інтенсифікації процесу є перемішування. Аналіз відомих досліджень вітчизняних та закордонних науковців вказує на актуальність питання зниження енерговитрат на процес перемішування. Метою дослідження є визначення енергетично ефективного рівня швидкості лопатевої двоярусної мішалки з лопатями, встановленими під кутом 45° для малих біогазових реакторів. При вирішенні поставлених завдань застосовуються загальні методи фізики, тривимірне моделювання, обробка і візуалізація отриманих результатів у програмах SolidWorks Flow Simulation та Wolfram Mathematica. З використанням 3D моделювання досліджено вплив частоти обертання мішалки на картину розподілу векторів швидкості потоків субстрату у біогазовому реакторі. Отримано та проаналізовано графіки споживаної потужності на початку перемішування для різної частоти обертання мішалки, а також виконано порівняння між собою рівнів енергії, що витрачається відповідно на перемішування біомаси за період пуску та весь період перемішування. Запропоновано методику визначення енергоефективної частоти обертання перемішувального органу електромеханічної системи біогазових реакторів.

Результати можуть бути використані при будівництві та модернізації існуючих біогазових установок для зменшення енергоспоживання процесу перемішування субстрату. На основі проведених досліджень зроблено висновок, що для лопатевої двоярусної мішалки з лопатями, встановленими під кутом 45° , енергетично ефективний рівень швидкості мішалки становить 40 об/хв. При такій частоті обертання спостерігається обережне та інтенсивне перемішування біомаси по всьому об'єму резервуару, а середня швидкість векторів потоків переміщення біомаси у об'ємі складає 0,273 м/с. Енергія на один цикл перемішування біомаси складає 2471,3 Дж, при цьому, відсоткове значення витраченої енергії за період пуску становить 0,62 % від енергії, що витрачена за весь період перемішування.

Ключові слова: енергоефективність, частота обертання, витрата енергії, 3D моделювання, SolidWorks.**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИ ЭФФЕКТИВНОГО УРОВНЯ СКОРОСТИ ПЕРЕМЕШИВАЮЩЕГО ОРГАНА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ****Н. Н. Заблодский, М. А. Сподоба**Національний університет біоресурсів і природопользования Украины
ул. Героев Оборони, 12, г. Киев, 03041, Украина. E-mail: spmisha@ukr.net

На сегодняшний день сбраживание биомассы в биогазовых установках является одним из самых экологически и экономически выгодных решений для получения энергии из отходов. Однако процесс анаэробного сбраживания отходов является долговременным, поэтому одним из главных факторов интенсификации процесса является перемешивание. Анализ известных исследований отечественных и зарубежных ученых указывает на актуальность вопроса снижения энергозатрат на процесс перемешивания. Целью исследования является определение энергетически эффективного уровня скорости лопастной двухъярусной мешалки с лопастями, установленными под углом 45° для малых биогазовых реакторов. При решении поставленных задач применяются общие методы физики, трехмерное моделирование, обработка и визуализация полученных результатов в программах SolidWorks Flow Simulation и Wolfram Mathematica. С использованием 3D моделирования исследовано влияние частоты вращения мешалки на картину распределения векторов скорости потоков субстрата в биогазовом реакторе. Получены и проанализированы графики потребляемой мощности в начале перемешивания для различной частоты вращения мешалки, а также выполнено сравнение между собой уровней энергии, расходуемой соответственно на перемешивание биомассы за период пуска и весь период перемешивания. Предложена методика определения энергоэффективной частоты вращения перемешивающего органа электромеханической системы биогазовых реакторов.

Результаты могут быть использованы при строительстве и модернизации биогазовых установок для уменьшения энергопотребления процесса перемешивания субстрата. На основе проведенных исследований сделан вывод, что для лопастной двухъярусной мешалки с лопастями, установленными под углом 45° , энергетически эффективный уровень скорости мешалки составляет 40 об/мин. При такой частоте вращения наблюдается осторожное и интенсивное перемешивание биомассы по всему объему резервуара, а средняя скорость векторов потоков перемещения биомассы в объеме составляет 0,273 м/с. Энергия на один цикл перемешивания биомассы составляет 2471,3 Дж, при этом, процентное значение затраченной энергии за период пуска составляет 0,62 % от энергии, израсходованной за весь период перемешивания.

Ключевые слова: энергоэффективность, частота вращения, расход энергии, 3D моделирование, SolidWorks.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Біогазові технології відіграють важливу роль у формуванні сучасної енергетичної системи України та інших країн світу, тому увага до її ефективності підвищена. З кожним роком кількість накопичених рослинних та тваринних відходів збільшується, при цьому системи для їх збереження є застарілими, а також екологічно шкідливими через постійні викиди метану та оксиду азоту у повітря [1]. Через це, населення планети змушене шукати альтернативні методи збереження та утилізації накопичених органічних відходів. Найбільшого розповсюдження для утилізації накопичених органічних відходів отримала анаеробна обробка, що проводиться у спеціальних резервуарах з постійною підтримкою параметрів мікроклімату – біогазових установках [2, 3].

За останні роки широкого розповсюдження у різних країнах світу (Німеччина, Іспанія, Франція, Бельгія та інші) набувають домашні біогазові установки малого об'єму, у яких відбувається анаеробне зброджування побутових харчових відходів [4]. Одним з перших та наразі відомих виробників малих біогазових установок є Неме Biogas. Використання малих біогазових установок, у яких зброджуються побутові харчові відходи, дозволяє отримувати біогаз, що у подальшому використовується у власних потребах (приготування їжі, підігрів води, опалення приміщень та інше), також ще однією особливістю є те, що використання малих біогазових установок дозволить зекономити час та кошти на вивезення та утилізацію побутових харчових відходів. Перероблені відходи у подальшому можливо використовувати у якості добрив для власних потреб на присадибних ділянках або продажу у фермерські компанії.

Процес анаеробного зброджування органічної біомаси є довготривалим, тому для інтенсифікації утворення біогазу у біогазових реакторах широкого розповсюдження набув процес перемішування та підігріву речовини [5–8]. На сьогоднішній день існує велика кількість методів та технічних засобів для перемішування, зокрема, гідравлічний [9], за допомогою заглибних електричних двигунів [10, 11] та електромеханічних перетворювачів [12]. Однак найбільш перспективним обладнанням для інтенсифікації процесу зброджування біомаси є біогазові реактори із механічними мішалками [6, 7, 13, 14].

В роботах [14, 15] висвітлені результати досліджень щодо ефективності обережного механічного перемішування біомаси, оскільки таке перемішування забезпечує збереження цілісності колоній бактерій. Доведено, що на споживану потужність мішалки мають суттєвий вплив її геометричні параметри та частота її обертання [16]. Механічні мішалки з лопатями встановленими під кутом 90° під час перемішування створюють переважно тангенціальні потоки, що не дозволяє створити рівномірного збурення речовини, яка

перемішується у біогазовому резервуарі. Тому лопаті мішалки потрібно розміщувати під кутом 45° , адже саме при такому нахилі лопатей у замкненому резервуарі виникає складний рух речовини – тангенціальний, радіальний та осьовий [17, 18]. Таке перемішування забезпечує інтенсифікацію утворення біогазу та підвищує рентабельність біогазової установки. Поряд з цим, аналіз досліджень вітчизняних та закордонних науковців вказує на те, що перемішування біомаси є енергетично ємним процесом. Тому, незважаючи на швидкий розвиток біогазових технологій, досі залишається актуальним питання встановлення енергетично ефективного рівня обертання перемішуючого пристрою для зниження енергетичних витрат на процес перемішування та підвищення рентабельності анаеробного зброджування біомаси у біогазових установках.

Метою роботи є визначення енергетично ефективного рівня швидкості перемішувального органу електромеханічної системи у вигляді лопатевої двоярусної мішалки з лопатями, які встановлені під кутом 45° , для малих біогазових реакторів.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Враховуючи вище наведені позитивні фактори від використання малих біогазових установок та актуальність питання зниження енергетичного споживання на процес перемішування, з метою визначення енергетично ефективної частоти обертання перемішуючого пристрою виконано наступні кроки: проведено 3D моделювання для визначення векторів розповсюдження потоків біомаси в залежності від швидкості обертання лопатевої двоярусної мішалки з лопатями, які встановленими під кутом 45° ; досліджено вплив частоти обертання мішалки на картину розповсюдження потоків біомаси у біогазовому реакторі; отримано та досліджено графіки корисної потужності перемішуючого пристрою на початку перемішування за різної швидкості обертання; визначено кількість енергії, яка витрачена на перемішування біомаси за період пуску та весь період перемішування для різної швидкості обертання.

Для створення моделі циліндричного біогазового реактора об'ємом 60 літрів з лопатевою двоярусною мішалкою з лопатями, встановленими під кутом 45° , використовувався програмний комплекс SolidWorks. Моделювання процесу перемішування виконувалось за допомогою додатку SolidWorks Flow Simulation.

Для проведення 3D моделювання у програмі SolidWorks Flow Simulation задавалися такі фізико-хімічні параметри органічної біомаси, що завантажена у біогазовий реактор: густина субстрату $\rho = 1024 \text{ кг/м}^3$; коефіцієнт динамічної в'язкості – $\mu = 0,048 \text{ Па} \cdot \text{с}$ [19].

На рис. 1, а представлена модель біогазового реактора циліндричної форми з розміщеною по

центральної осі реактора лопатевою двоярусною мішалкою з лопатями, які встановлені під кутом 45° , його геометричні розміри (рис. 1, б) та розрахункова сітка біогазового реактора (рис. 1, в), верхній рівень якої співпадає з рівнем субстрату у

реакторі $H = 436$ мм. Швидкість обертання лопатевою двоярусною мішалкою з лопатями встановленими під кутом 45° прийнято у межах $n = 10 \dots 60$ об/хв.

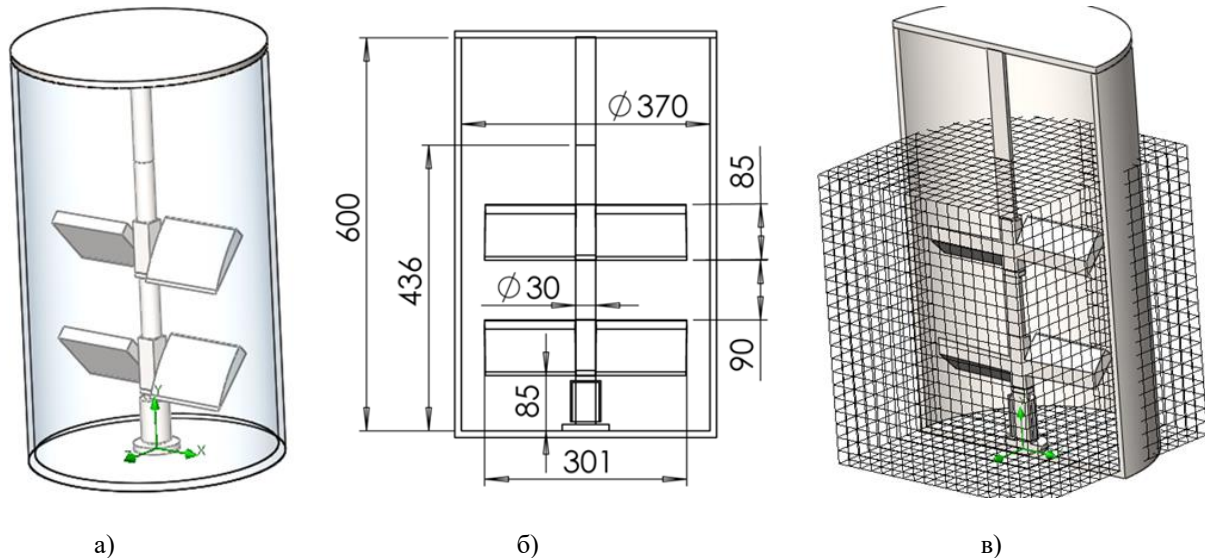


Рисунок 1 – Біогазовий реактор: а) модель біогазового реактора з лопатевою двоярусною мішалкою з лопатями встановленими під кутом 45° ; б) геометричні розміри біогазового реактора та лопатевою двоярусною мішалкою з лопатями встановленими під кутом 45° ; в) розрахункова сітка геометричної моделі біогазового реактора

У результаті проведення 3D моделювання за різної швидкості обертання лопатевою двоярусною мішалкою отримано картини траєкторій переміщення елементарних об'ємів та швидкостей потоків субстрату у трьохвимірному просторі (рис. 2).

З (рис. 2, а та б) видно, що траєкторії переміщення потоків субстрату сконцентровані у центральній частині резервуару з явним вираженням скупчення потоків у верхній його частині. Середня швидкість потоків у об'ємі речовини становить $0,066$ м/с (рис. 2, а) та $0,127$ м/с (рис. 2, б). При цьому, біля стінок та на дні резервуару спостерігаються зони спокою, що вказує на недостатнє перемішування речовини у біогазовому реакторі малого об'єму. При швидкості обертання мішалки 30 об/хв (рис. 2, в) переміщення потоків набувають максимальних швидкостей біля лопатей перемішуючого пристрою, проте у верхніх шарах речовини та між ярусами лопатей швидкість потоків набуває значень від 0 до $0,167$ м/с, що не дозволяє отримати ефективного процесу перемішування. При цьому, середня швидкість переміщення потоків у об'ємі речовини – $0,176$ м/с (рис. 2, в).

На основі аналізу рис. 2, а, б, в зроблено висновок, що для конструкції перемішуючого пристрою, яка наведена на рис. 1, частота обертання, що не перевищує 30 об/хв, не дозволяє отримати ефективного перемішування речовини у біогазовому реакторі малого об'єму.

При швидкості обертання мішалки 40 об/хв (рис. 2, г) переміщення потоків набувають максимальних швидкостей біля країв лопатей

перемішуючого пристрою. При цьому, у верхніх шарах речовини та між ярусами лопатей швидкість потоків у процесі перемішування знаходиться у межах від $0,1$ до $0,417$ м/с.

У нижній частині резервуару спостерігаються ділянки інтенсивного підйому речовини із дна резервуару, котрі виникають внаслідок появи всмоктувального ефекту, який у свою чергу, виникає внаслідок відцентрових сил під час обертання лопатей мішалки. Підйом речовини з дна резервуару забезпечує відсутність ущільнення осаду. Відомо, що ущільнення осаду призводить до зменшення поживних речовин для бактерій і, як наслідок, зниження утворення об'єму біогазу та розкладання органічної речовини. Середня швидкість переміщення потоків у об'ємі речовини становить $0,273$ м/с (рис. 2, г). Така картина розподілу швидкостей забезпечує встановлення майже однакової швидкості потоків у всьому об'ємі речовини. Це призводить до рівномірного перемішування речовини у біогазовому реакторі малого об'єму.

При швидкості обертання мішалки 50 об/хв (рис. 2, д) спостерігається картина переміщення потоків, яка схожа до картини, що наведена на рис. 2, г. Відмінністю є величина швидкості потоків, значення якої складають: у верхній частині резервуару від $0,083$ до $0,5$ м/с; у області між ярусами лопатей від $0,2$ до $0,4$ м/с та у нижній частині резервуару від $0,1$ до $0,25$ м/с, тоді як середня швидкість переміщення потоків у резервуарі – $0,285$ м/с (рис. 2, д).

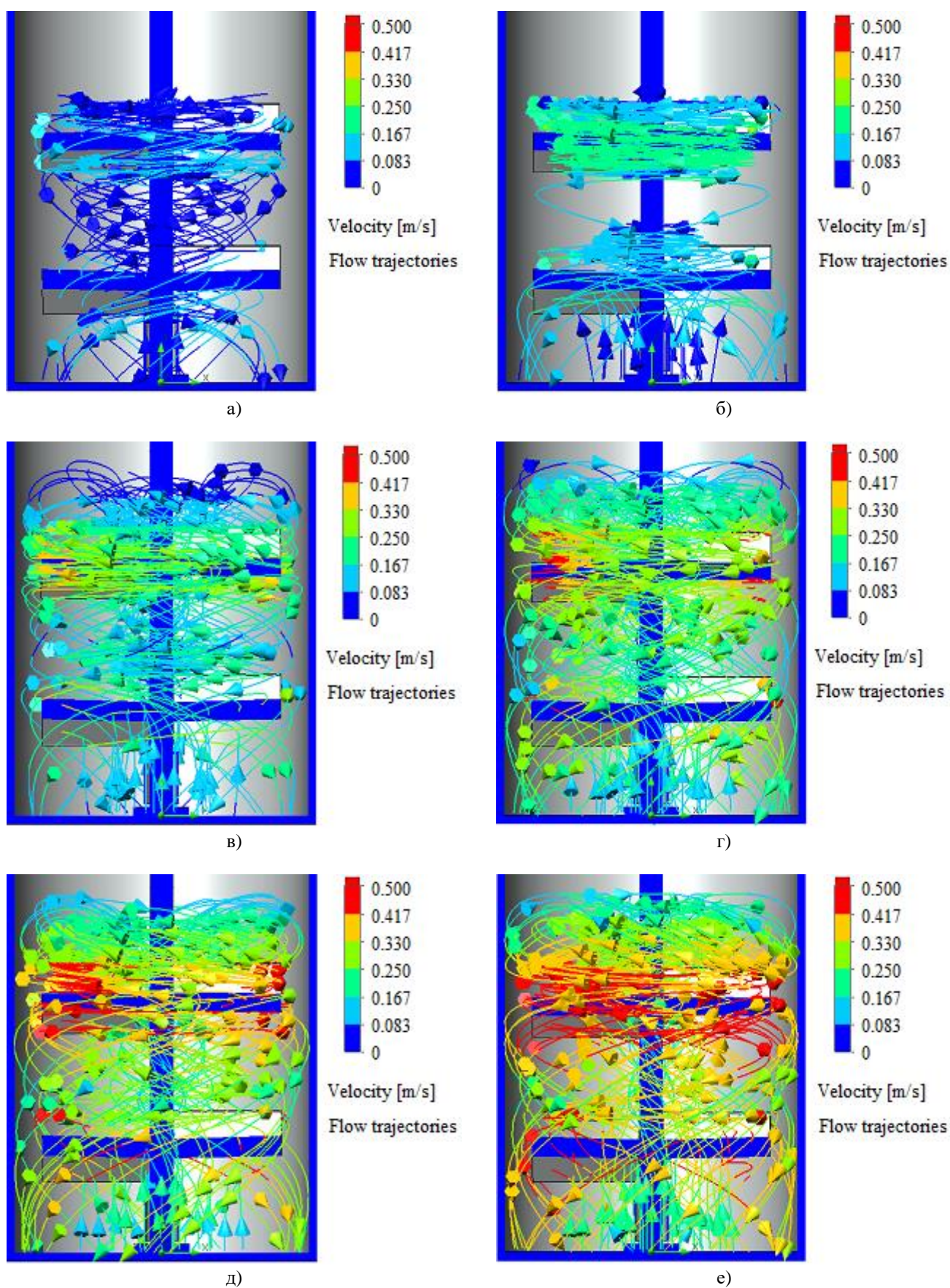
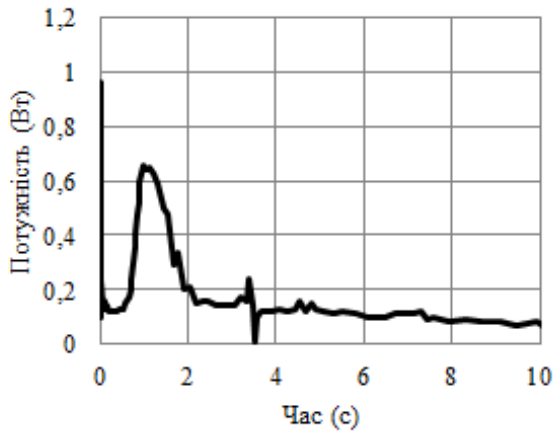


Рисунок 2 – Траєкторії переміщення елементарних об'ємів та швидкостей потоків субстрату за різної швидкості обертання мішалки: а) 10 об/хв; б) 20 об/хв; в) 30 об/хв; г) 40 об/хв; д) 50 об/хв; е) 60 об/хв

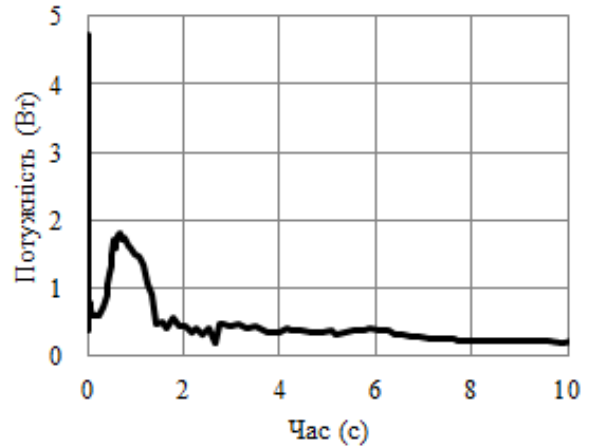
При зростанні швидкості обертання мішалки 60 об/хв (рис. 2, е) спостерігаються зони високих швидкостей у верхніх шарах речовини, максимальна швидкість яких біля лопатей досягає значень більше 0,5 м/с. У області між ярусами лопатей та у нижній частині резервуара картина потоків схожа до картин наведених на рис. 2, г, д, але з більшими значеннями швидкостей. Середня швидкість переміщення

потоків у об'ємі речовини становить 0,335 м/с (рис. 2, е).

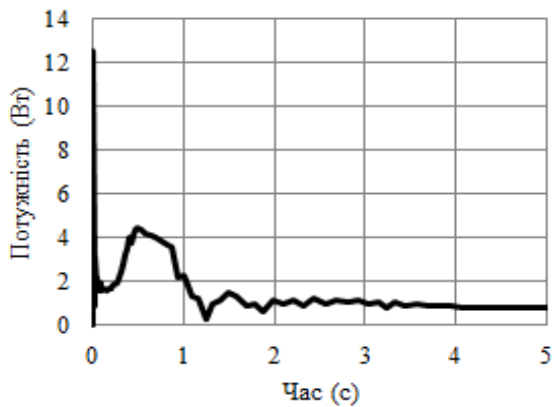
З метою визначення енергоефективної частоти обертання перемішувального органу електро-механічної системи біогазових реакторів проведені дослідження найбільш навантаженого періоду перемішуючого пристрою, а саме, початкового періоду руху.



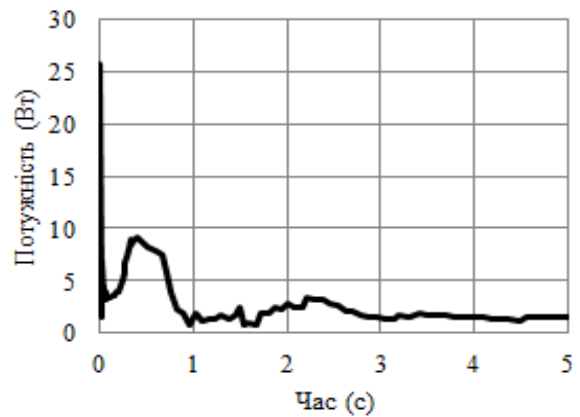
а)



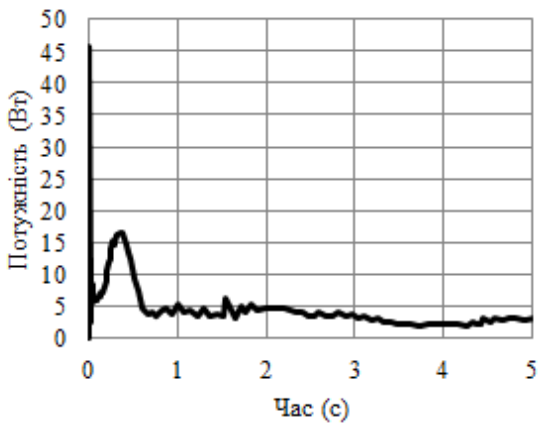
б)



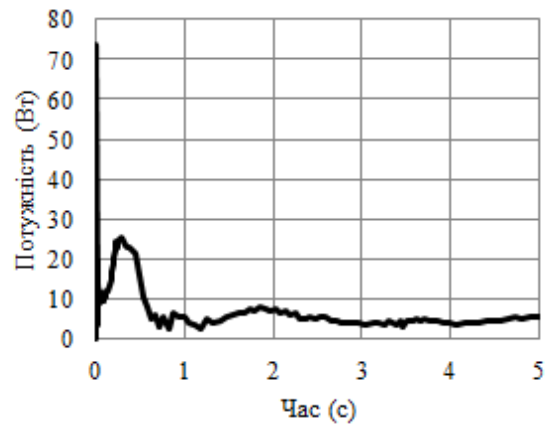
в)



г)



д)



е)

Рисунок 3 – Графіки корисної потужності під час пуску за різної частоти обертання перемішуючого пристрою: а) 10 об/хв; б) 20 об/хв; в) 30 об/хв; г) 40 об/хв; д) 50 об/хв; е) 60 об/хв.

Субстрат має в'язку консистенцію, внаслідок цього процес виходу мішалки на номінальну частоту обертання потребує певного проміжку часу, тривалість якого залежить від фізико-хімічного складу субстрату, номінальної частоти обертання, типу та потужності електричного приводу мішалки.

Під час проведення 3D моделювання приймали допущення, що вихід мішалки на номінальну частоту обертання відбувається за лінійним законом, час виходу складає 0,5 с. Отримано масив даних крутного моменту (M , Нм) на подолання лопатями перемішувального пристрою опору середовища (сил інерції та сил тертя) для різних значень кутової швидкості обертання валу перемішувального пристрою (ω , рад/с). За допомогою програмного пакету Wolfram Mathematica визначено корисну потужність (P_k), необхідну на подолання опору середовища лопатями мішалки у початковий період руху. Результати представлено у вигляді графічних залежностей на рис. 3.

На рис. 3 помітно, що у перші секунди пуску системи перемішування відбуваються значні коливання потужності затухаючого характеру. Поява коливань пояснюється фізико-хімічними властивостями речовини, яка на початку перемішування знаходиться у стані спокою, тому перемішувальній системі необхідно подолати інерційні сили для виведення речовини із стану спокою та встановлення направлених потоків, вектори швидкості яких співпадають з векторами швидкості елементів перемішувальної системи.

Аналіз результатів (рис. 3) показав, що у початковий момент пуску лопатевої мішалки відбувається різке зростання потужності, пікові значення якої складають від 0,96 до 73,6 Вт в залежності від частоти обертання.

Значення робочої потужності складають від 0,1 до 6,3 Вт.

Виявлено закономірність, за якою підвищення частоти обертання зменшує тривалість періоду встановлення усталеного значення робочої потужності. Так, при 10 об/хв тривалість перехідного періоду 10 с (рис. 3, а), а при 60 об/хв – 4 с (рис. 3, е).

Враховуючи виявлену закономірність під час аналізу графічних залежностей і встановлену тривалість перехідного періоду для різної частоти обертання (рис. 3), а також рекомендації за результатами досліджень[14], за якими час одного циклу перемішування субстрату повинен тривати 20 хвилин, визначено енергію, що витрачається на перемішування субстрату за період пуску та один повний цикл перемішування, за формулою:

$$W = \sum(P_k \Delta t), \quad (1)$$

де P_k – середня потужність у проміжку часу, Вт; Δt – одиниця часу, $\Delta t = 0,01$ с.

Результати розрахунків наведено на рис. 4.

Аналізуючи графічні результати (рис. 4) визначено відсоткове значення кількості корисної енергії витраченої у період пуску від корисної енергії, витраченої за один повний цикл перемішування: 10 об/хв – 4,17 %; 20 об/хв – 1,68 %; 30 об/хв – 0,78 %; 40 об/хв – 0,62 %; 50 об/хв – 0,58 %; 60 об/хв. – 0,51 %. Аналізуючи витрату корисної енергії на один повний цикл перемішування (рис. 4, б), виявлено, що залежність кількості витраченої енергії при збільшенні частоти обертання, відповідає степеневій функції $P = f(\omega^\alpha)$.

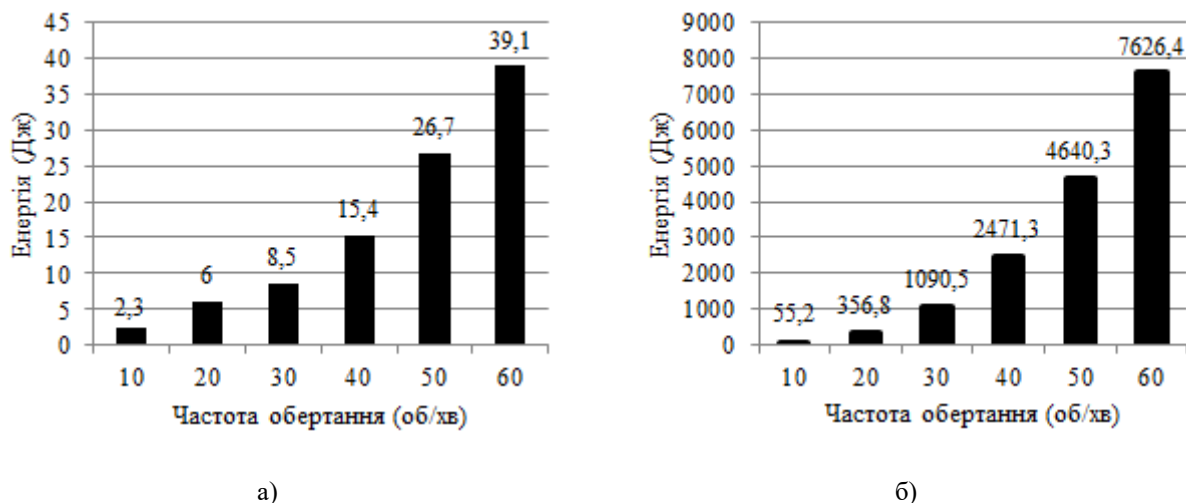


Рисунок 4 – Корисна енергія, що витрачається на перемішування субстрату за різної швидкості обертання перемішувального пристрою за а) період пуску; б) один повний цикл перемішування (20 хвилин)

Беручи до уваги отримані графічні результати, представлені на рис. 2–4, а також, відсоткове значення кількості енергії, що витрачається у період пуску, від енергії, що витрачається за весь період перемішування, зроблено висновок, що для лопатевої двоярусної мішалки з лопатями встановленими під кутом 45° , енергетично ефективною частотою обертання $\epsilon - 40$ об/хв. При такій частоті обертання створюються майже однакові за швидкістю потоки речовини у всьому об'ємі (рис. 2, г), що забезпечує рівномірне та обережне перемішування субстрату у біогазовому резервуарі.

Визначивши корисну потужність перемішувального пристрою для встановленої енергетично ефективною частоти обертання, необхідно провести аналіз його електричного приводу. Враховуючи коефіцієнти запасу потужності на тертя в підшипникових вузлах, сальникових ущільненнях та можливих перевантажень ($K_3 = 1,1 \dots 1,5$), коефіцієнти корисної дії електричного двигуна та редуктора, передаточне число редуктора, визначити кількість споживаної із електричної мережі потужності та енергії за період пуску та повного циклу перемішування субстрату у біогазовому резервуарі (20 хвилин).

Біогазові реактори невеликих об'ємів переважно націлені на приватні сектори та невеликі приватні підприємства, які під'єднані до однофазної електричної мережі. Зважаючи на це, доцільно у якості приводу мішалки використовувати асинхронні однофазні електродвигуни у поєднанні з понижуючими редукторами.

Враховуючи визначену у роботі енергетично ефективну частоту обертання (40 об/хв) для визначення кількості споживаної із електричної мережі потужності та енергії у якості електричного приводу мішалки приймаємо однофазний асинхронний електродвигун-редуктор марки 5RK40GN-C/5GN30K з наступними технічними характеристиками: номінальна потужність електродвигуна $P_n = 40$ Вт; номінальний струм електродвигуна $I = 0,35$ А; номінальна частота обертання на виході з редуктора $n_n = 40$ об/хв; передаточне число редуктора $z = 30$; номінальні параметри конденсатора: ємність – 2,5 мкФ, напруга конденсатора – 450 В; коефіцієнт корисної дії $\eta = 73$ %.

Для запропонованого електродвигуна-редуктора, враховуючи коефіцієнт корисної дії (η), коефіцієнт запасу (K_3), розраховано споживану потужність (P_c) та енергію (W_c) за період пуску та протягом усього періоду перемішування за

формулами:

$$P_c = K_3 \frac{P_n}{\eta}; \quad (2)$$

$$W_c = \sum (P_c \cdot \Delta t). \quad (3)$$

Результати розрахунків наведено на рис. 5.

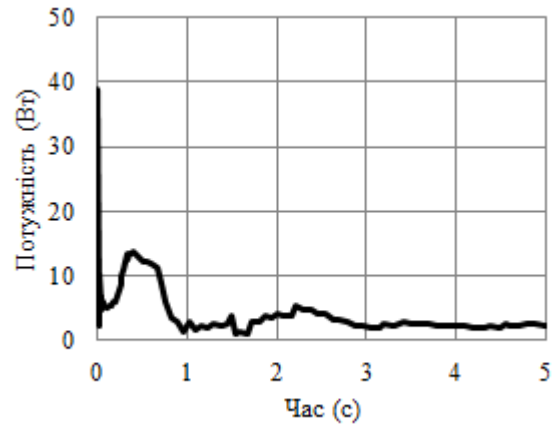


Рисунок 5 – Графіки споживаної потужності однофазним асинхронним електродвигуном-редуктором у момент пуску, при стабільній напрузі мережі $U_m = 220$ В

Встановлено, що у перші секунди пуску електромеханічної системи перемішування відбуваються значні коливання споживаної потужності з подальшим затуханням та виходом на усталене значення. При цьому пускова потужність електромеханічної системи перемішування у 13 разів більша за усталене значення потужності перемішування. Подібне співвідношення потужностей буде спостерігатися і для значно більших об'ємів біогазових реакторів, для яких, відповідно потрібна значно більша потужність електромеханічної системи.

Поява коливань та значне перевищення значення пускової потужності пояснюється тим, що на початку перемішування речовина у резервуарі знаходиться у стані спокою, тому електромеханічній системі необхідно подолати інерційні сили для збурення речовини та встановлення направленою потоку у замкненому об'ємі резервуару.

В процесі анаеробного зброджування фізико-хімічний склад субстратів змінюється, тому вибір електричного приводу мішалки необхідно виконувати для найважчого режиму експлуатації електричного двигуна з урахуванням можливих перевантажень з коефіцієнтом запасу по потужності близьким до $K_3 = 1,5$.

Використовуючи графічні результати (рис. 5) та формулу (3), визначено споживану електродвигуном-редуктором енергію у період пуску – 23,2 Дж та протягом усього періоду

перемішування – 3723,8 Дж.

ВИСНОВКИ. Запропоновано методику визначення енергоефективної частоти обертання перемішувального органу електромеханічної системи біогазових реакторів, яка може бути застосована для різних модифікацій конструкції мішалки, потужностей електропривода і об'ємів реактора.

У результаті проведення 3D моделювання за різної швидкості обертання лопатевої двоярусної мішалки з лопатями встановленими під кутом 45° , отримано картини траєкторій переміщення елементарних об'ємів та швидкостей потоків субстрату у трьохвимірному просторі. З метою визначення енергоефективної частоти обертання перемішувального органу електромеханічної системи біогазових реакторів розраховані енергетичні показники найбільш навантаженого періоду перемішуючого пристрою, а саме, початкового періоду руху.

Встановлено такий рівень частоти обертання лопатевої двоярусної мішалки, який забезпечує створення майже однакової швидкості потоків у всьому об'ємі речовини і рівномірність перемішування речовини у біогазовому реакторі малого об'єму.

Виявлено закономірність, за якою підвищення частоти обертання перемішуючого пристрою зменшує тривалість перехідного періоду на початку руху.

Пускова потужність електромеханічної системи перемішування у багато разів вища за усталене значення потужності перемішування, тому вибір електричного приводу мішалки необхідно виконувати для найважливішого режиму експлуатації електричного двигуна, враховуючи можливі перевантаження.

Визначено напрям необхідних подальших наукових досліджень, реалізація яких підвищить енергетичну ефективність біогазового виробництва та рентабельність подальшої переробки біогазу у теплову та електричну енергію.

Отримані результати можуть бути використані при будівництві та модернізації існуючих біогазових установок невеликих розмірів для зменшення енергоспоживання процесу перемішування субстрату.

ЛІТЕРАТУРА

1. Березницкая М. В., Бутрим О. В., Панченко Г. Г. Национальный кадастр антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов в Украине за 1990–2007 гг. *Министерство охраны окружающей природной среды Украины*. Киев, 2008. С. 319. URL: http://climategroup.org.ua/upl/Nac_zvit_p_parn_gazy_90_07.pdf.
2. Баадер В., Бренндерфер Е., Доне М. Биогаз. Теория и практика. Москва : Колос, 1982. 148 с.
3. Нездойминов В. И., Зятин В. И., Рожков В. С., Лесной В. И. Математическое описание основных факторов, влияющих на формирование взвешенного слоя осадка в илоотделителе. *Сучасне промислове та цивільне будівництво*. 2016. № 2. С. 51–58.
4. Hatsenko K. V., Voloshin N. D. Technology of biogas production on the basis of food waste. *Collection of scientific works of the Dnipro State Technical University (technical sciences)*. Dnipropetrovsk, 2019. Vol. 1. № 34. P. 131–136. DOI: 10.31319/2519-2884.34.2019.26
5. Spodoba M. O., Zablodskiy M. M. Improvement of the method for determining energy consumption in a biogas reactor. *XII International Conference "Electronic Processes in Organic and Inorganic Materials" ICEPOM-12, (June 01-05, 2020)*, Kamianets-Podilskiy. 2020. P. 311.
6. Ратушняк Г. С., Анохіна К. В., Джеджула В. В. Энергозберігаючі поновлювані джерела тепла. Вінниця : ВНТУ, 2010. 170 с.
7. Ратушняк Г. С., Лалюк О. Г., Кошечев І. А. Біогазові установки з відновлюваними джерелами енергії для термічної стабілізації бродиння біомаси : монографія. Вінниця : ВНТУ, 2017. 188 с.
8. Куріс Ю. В. Біоенергетичні установки. Обладнання та технології переробки органомісних енергоресурсів: монографія. Запоріжжя : ЗДІА, 2012. 348 с.
9. Садчиков А. В., Кокарев Н. Ф. Оптимізація теплового режиму у біогазових установках. Фундаментальне дослідження. 2016. № 2, Ч. 1. С. 90–93.
10. Marks S., Dach J., Fernandez M. F. J., Mazurkiewicz J., Pochwatka P., Gierz Ł. New Trends in Substrates and Biogas Systems in Poland. *Journal of Ecological Engineering*. 2020. Vol. 21. № 4. P. 19–25. DOI: 10.12911/22998993/119528
11. Marks S., Jeżowska A., Kozłowski K., Dach J., Wilk B., Fudala-Książek S. Review of mixing systems of fermentation liquid used in biogas plants. *Technika Rolnicza Ogrodnicza Leśna*. 2017. № 6. P. 24–26
12. 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. С. 67.
13. Червоний І. Ф., Куріс Ю. В. Біогазові технології : монографія. Запоріжжя : ЗДІА, 2010. 493 с.

14. Веденев А. Г., Веденева Т. А. Руководство по биогазовым технологиям. Бишкек : ДЭМИ, 2011. С. 84.

15. Луняка К. В., Вус Д. Н., Русанов С. А., Ключев О. И. Розчинення твердої речовини при перемішуванні мішалками в посудинах з вертикальними перегородками. «Теорія і практика сучасного природознавства». Збірник наукових праць. 2009. С. 36–39.

16. Червоний І. Ф., Куріс Ю. В. Дослідження пристроїв та удосконалення процесів перемішування в біогазових установках. *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*. 2012. № 2. С. 96.

17. Закоморний Д. М., Поводзинський В. М., Шибецький В. Ю. Класифікація та аналіз роботи ферментерів з механічними перемішувачами в аеробних процесах біотехнології. *ScienceRise*. 2015. № 2. Ч. 5. С. 24–32. DOI: 10.15587/2313-8416.2015.42614

18. Стренк Ф. Перемішування та апарати з мішалками : Пер. с польск., под ред. І. А. Щупляка. Ленінград : Хімія, 1975. С. 384.

19. Юркова В. В., Шкляр В. І., Дубровська В. В. Аналіз енергоефективності роботи когенераційних установок на біопаливі. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2014. № 3. С. 29–33.

DETERMINATION OF ENERGY EFFICIENT LEVEL OF THE SPEED OF MIXING BODY OF ELECTROMECHANICAL SYSTEM

N. Zablodskiy, M. Spodoba

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

vul. Heroiv Oborony, 12, Kyiv, 03041, Ukraine. E-mail: spmisha@ukr.net

Purpose. Today, biomass fermentation in biogas plants is one of the most advanced, environmentally and economically viable solutions for energy production from waste. However, the process of anaerobic digestion of waste is long, so the main process of intensification is mixing. Analysis of well-known studies of domestic and foreign scientists indicates the urgency of reducing energy consumption for the mixing process. The aim of the study is to determine the energy-efficient speed of a paddle stirrer with blades set at an angle of 45° for small biogas reactors. **Methodology.** At the decision of the set tasks the general methods of physics, three-dimensional modeling, processing and visualization of the received results in the SolidWorks Flow Simulation and Wolfram Mathematica programs are applied. **Results.** Using 3D modeling, the influence of the stirrer speed on the picture of the distribution of the velocity vectors of the substrate flows in the biogas reactor was studied. Graphs of power consumption at the beginning of mixing for different stirrer speeds were obtained and analyzed, and the levels of energy consumed for mixing biomass during the start-up period and the whole mixing period were compared. A method for determining the energy efficient rotation speed of the stirring mechanism of the electromechanical system of biogas reactors is proposed.

Practical value. The results can be used in the construction and modernization of biogas plants to reduce energy consumption of the substrate mixing process. **Conclusion.** Based on the research, it was concluded that for a paddle two-tier mixer with blades set at an angle of 45° energy-efficient speed, is 40 rpm. At this speed, careful and intensive mixing of the biomass is observed throughout the volume of the tank. The average velocity of flow vectors in the biomass volume is 0,273 m/s. The energy consumed per cycle of biomass mixing is 2471,3 J, and the percentage of energy consumed during the start-up period from the energy consumed during the entire mixing period is 0,62 %. References 19, figures 5.

Key words: energy efficiency, rotation frequency, power consumption, 3D modeling, SolidWorks.

REFERENCES

1. Berezniatskaya, M.V., Butrim, O.V., & Panchenko, G.G. (2008). Nacional'nyj kadastr antropogennyh vybrosov iz istochnikov i absorbcii poglotitelyami parnikovyh gazov v Ukraine za 1990–2007 gg. [National inventory of anthropogenic emissions from sources and removals by sinks of greenhouse gases in Ukraine for 1990–2007 years] Ministry of Environmental Protection of Ukraine, Kyiv. 319. Retrieved from http://climategroup.org.ua/upl/Nac_zvit_p_parn_gazy_90_07.pdf. [in Ukrainian]

2. Baader, V., Donet, E., & Brennderfer, M. (1982). *Biogaz. Teoriya i praktika [Biogas. Theory and practice]*. Moscow : Kolos. [in Russian]

3. Nezdoyminov, V.I., Zyatina, V.I., & Rozhkov V.S. (2016). Matematicheskoe opisanie osnovnyh faktorov, vliyayushchih na formirovanie vzheshennogo sloya osadka v ilootdelitele. [Mathematical description of the main factors influencing the formation of a suspended sediment layer in a desilter]. *Suchasne promislove ta civil'ne budivnictvo*, 12 (2), 51–58. [in Ukrainian]

4. Hatsenko, K.V., & Voloshin, N.D. (2019). Technology of biogas production on the basis of food waste. *Collection of scientific works of the Dnipro State Technical University (technical sciences)*, 1 (34). 131-136. DOI: 10.31319/2519-2884.34.2019.26.

5. Spodoba, M.O., & Zablodskiy, M.M. (2020). Improvement of the method for determining energy consumption in a biogas reactor. *XII International Conference "Electronic Processes in Organic and Inorganic Materials" ICEPOM-12, (June 01-05, 2020)*, Kamianets-Podilskiy, 311.
6. Ratushnyak, G.S., Dzhedzhula, V.V., & Anokhina, K.V. (2010). *Energozberigayuchi ponovlyuvani dzherela tepla [Energy-saving renewable heat sources]*. Vinnytsia : VNTU. [in Ukrainian]
7. Ratushnyak, G.S., Lyalyuk, O.G., & Koshcheev, I.A. (2017). *Biogazovi ustanovki z vidnovlyuvanimi dzherelami energii dlya termichnoi stabilizacii brodinnya biomasi : monografiya [Biogas plants with renewable energy sources for thermal stabilization of biomass fermentation: monograph]*. Vinnytsia : VNTU. [in Ukrainian]
8. Kuris, Yu.V. (2012). *Bioenergetichni ustanovki. Obladnannya ta tekhnologii pererobki organovmisnih energoresursiv : monografiya. [Bioenergy installations. Equipment and technologies of processing of organ-containing energy resources: monograph]*. Zaporizhzhia : ZDIA. [in Ukrainian]
9. Sadchikov, A.V., & Kokarev, N.F. (2016). *Optimizaciya teplovogo rezhimu u biogazovih ustanovkah. Fundamental'ne doslidzhennya. [Optimization of the thermal regime in biogas plants. Fundamental research]*. 2 (1), 90–93. [in Russian]
10. Marks, S., Dach, J., Fernandez, M.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
11. 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.
12. Spodoba, M.O., Zablodskiy, M.M., & Radko, I.P. (2019). Osnovni skladovi metodologii pobudovi zaglibnogo elektromekhanichnogo peretvoryuvacha dlya biogazovih kompleksiv. [Main components of methodology of construction of submersible electromechanical converter for biogas complexes]. *V Mizhnarodna naukovopraktichna konferenciya prisvyachena pam'yati profesora Viktora Mihajlovicha Sin'kova «Problemi ta perspektivi rozvitku energetiki, elektrotekhnologij ta avtomatiki v APK»*. Kyiv, 67. [in Ukrainian]
13. Chervonyi, I.F., & Kuris, Yu.V. (2010). *Biogazovi tekhnologii : monografiya. [Biogas technologies: monograph]*. Zaporizhzhia : ZDIA. [in Ukrainian]
14. Vedenev, A.G., & Vedeneva, T.A. (2011). *Rukovodstvo po biogazovym tekhnologiyam. [Biogas Technology Guide]*. Bishkek: DEMI.
15. Lunyaka, K.V., Vus, D.N., Rusanov, S.A., & Klyuev, O.I. (2009). Rozchinennya tverdoi rechovini pri peremishuvanni mishalkami v posudinah z vertikal'nimi peregorodkami. [Dissolution of solids with stirring with stirrers in vessels with vertical partitions]. *«Teoriya i praktika suchasnogo prirodznavstva»*. *Zbirnik naukovih prac'*. 36–39. [in Ukrainian]
16. Kuris, Yu.V., & Chervonyi, I.F. (2012). Doslidzhennya pristroiv ta udoskonalennya procesiv peremishuvannya v biogazovih ustanovkah. [Research of devices and improvement of mixing processes in biogas plants]. *Energosberezhenie. Energetika. Energoaudit*, 2, 96. [in Ukrainian]
17. Zakomorny, D.M., Povodzinsky, V.M., & Shibetsky, V.Yu. (2015). Klasifikaciya ta analiz roboti fermenteriv z mekhanichnimi peremishuyuchimi pristroyami v aerobnih procesah biotekhnologii. [Classification and analysis of fermenters with mechanical mixing devices in aerobic processes of biotechnology]. *ScienceRise*, 5 (2), 24–32. DOI: 10.15587/2313-8416.2015.42614 [in Ukrainian]
18. Strenk, F. (1975). Peremishuvannya ta aparati z mishalkami. [Mixing and apparatus with stirrers]. Leningrad : Chemistry. [in Ukrainian]
19. Yurkova, V.V., Shklyar, V.I., & Dubrovskaya V.V. (2014). Analiz energoefektivnosti roboti kogeneracijnih ustanovok na biopalivi. [Analysis of energy efficiency of cogeneration plants using biofuels]. *Energetika: ekonomika, tekhnologii, ekologiya*, 3, 29–32. [in Ukrainian]

Стаття надійшла 18.12.2020.