УДК 62-523.6

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВИТРАТИ ЕНЕРГІЇ НА ПРОЦЕС ПОЧАТКОВОГО НАГРІВУ СУБСТРАТУ ЗА ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОТЕПЛОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ

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

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

СПОДОБА О.О. канд. техн. наук (PhD), асистент кафедри конструювання машин і обладнання, Національного університету біоресурсів і природокористування України, Київ, Україна, e-mail: sp1309@ukr.net;

Мета роботи. *Експериментальне визначення витрат енергії на процес початкового нагріву субстрату до температури анаеробного зброджування у біогазовому реакторі за використання електротепломеханічної системи з автоматичним керуванням для оцінки енергетичної ефективності процесу підігріву субстрату та рентабельності подальшої переробки утвореного біогазу у теплову та електричну енергії.*

Методи дослідження. *Експериментальні дослідження динаміки зміни температури електричного нагрівального кабелю, розміщеного у електротепломеханічній системі, визначення тривалості процесу і витраченої енергії початкового підігріву субстрату, обробка та порівняльний аналіз отриманих масивів даних, узагальнення отриманих результатів.*

Отримані результати. *У формуванні сучасної енергетичної системи важливу роль відіграють біогазові технології, рентабельність яких безпосередньо залежить від енергоефективності процесів інтенсифікації анаеробного зброджування. Процес анаеробного зброджування відходів є довготривалим, тому одним з основних методів інтенсифікації біогазового виробництва є перемішування відходів у процесі анаеробного бродіння. Існує необхідність підвищення енергоефективності процесів інтенсифікації анаеробного зброджування та рентабельності подальшої переробки біогазу у теплову та електричну енергії. Способи підвищення енергоефективності здебільшого полягають у скорочені часу підігріву субстрату у біогазовому реакторі, зменшенні витрати електричної енергії на процес термостабілізації анаеробного зброджування, структурному поєднані енергетично ефективних систем перемішування та підігріву сировини у реакторах, впровадженні систем автоматичного керування процесами інтенсифікації біогазового виробництва. Реалізація цих дій дозволить встановити оптимальні геометричні розміри електротепломеханічної системи з автоматичним керуванням для перемішування та підігріву субстрату у біогазовому реакторі та суттєво підвищити енергетичну ефективність біогазових установок і подальшу переробку утвореного біогазу у теплову та електричну енергії.*

Наукова новизна. *У результаті проведеного експериментального дослідження та аналізу отриманих даних встановлено, що за однакової потужності нагрівальних секцій зміна температури електричного нагрівального кабелю у кожній лопаті відбувається не однаково. Авторами встановлено, що середні значення температури секцій електричного нагрівального кабелю нижніх лопатей більше на 12.9% у порівнянні з верхніми лопатями електротепломеханічної системи. Авторами у ході експериментальних досліджень встановлено, що за використання системи підігріву, виконаної із електричного нагрівального кабелю, що вмонтований у лопаті двоярусної лопатевої мішалки, витрачається* $W_2=4.99\cdot10^6$ *Джна процес початкового підігріву субстрату з 9.3°С до 35.8°С у біогазовому реакторі об'ємом 40 літрів. Тривалість самого підігріву складає 300 хв. У ході експериментальних досліджень авторами було встановлено енергетичну ефективність від розділення електротепломеханічної системи на секції підігріву, коли кожна лопать є окремою секцією з власним автоматичним регулюванням температури електричного нагрівального кабелю вмонтованого у відповідну секцію, при цьому споживання електричної енергії зменшується на 27.9%.*

Практична цінність. *Отримані результати можуть бути використані при проектуванні, будівництві та модернізації систем інтенсифікації біогазового виробництва, а саме, перемішування та підігріву субстрату у біогазових установках. Це дозволить підвищити енергетичну ефективність процесу утворення біогазу та рентабельність його переробки у теплову та електричну енергії.*

Ключові слова: експеримент; енергоефективність; початковий нагрів субстрату; електротепломеханічна система; перемішування; енергоспоживання; температура зброджування.

© Заблодський М. М., Сподоба М. О., Сподоба О. О., 2022
DOI 10.15588/1607-6761-2022-1-5

I. ВСТУП

У формуванні сучасної енергетичної системи країн світу важливу роль відіграють біогазові технології, тому увага до їх енергетичної ефективності підвищена.

Збільшення фермерських та сільськогосподарських угідь, разом зі зростанням поголів'я тварин призводить до накопичення рослинних та тваринних відходів – біомаси. Це підштовхує населення на пошуки альтернативних методів утилізації та переробки отриманих відходів, оскільки системи збереження є джерелами небезпечних викидів метану та окисів азоту [1]-[4]. Така ситуація призводить до забруднення повітря, водних ресурсів, посилення кліматичних змін та парникового ефекту, що робить дослідження та розвиток відновлювальних джерел енергії актуальною справою [5].

Для утилізації побутових та промислових органічних відходів, каналізаційних стічних вод найбільшого розповсюдження отримала аеробна та анаеробна обробка у спеціальних резервуарах – біогазових реакторах [6].

На сьогоднішній день зброджування органічних відходів у біогазових установках є одним з найпрогресивніших, екологічно та економічно вигідних рішень для отримання енергії з накопичених органічних відходів у вигляді біогазу. Про це свідчить безліч наукових досліджень направлених на процес підвищення виходу біогазу та вироблення електричної енергії на біогазових установках [7]-[14].

Побічним ефектом зброджування органічних відходів у біогазових реакторах є отримання екологічно чистих добрив.

Використовуючи анаеробну обробку з органічних відходів можна отримати біогаз, здійснити його очищення та отримати біометан, який може замінити природний газ для використання як у власних потребах, так і для вироблення теплової та електричної енергії у когенераційних установках [15].

Процес анаеробного зброджування органічних відходів у біогазових реакторах є довготривалим, тому одними з основних методів інтенсифікації біогазового виробництва є перемішування та підігрів органічних відходів у процесі анаеробного бродіння у біогазових реакторах [16], [17].

Від енергоефективності процесів інтенсифікації анаеробного зброджування залежить рентабельність використання біогазової установки, через що вибір типу перемішувального та підігрівального пристроїв потребує особливої уваги з точки зору енергетичних витрат, які, у свою чергу, залежать від багатьох факторів. Внаслідок вище зазначених причин, у світі проводиться багато наукових досліджень у напрямку створення енергоефективного пристрою для перемішування та підігріву субстрату у біогазових реакторах.

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Енергетична ефективність біогазового виробництва залежить від величини енергетичних витрат на інтенсифікацію процесу.

Згідно з [17]-[20] на енергетичні витрати перемішуючого пристрою мають суттєвий вплив його геометричні розміри та режим перемішування органічних відходів [16], [21]. З точки зору енергозбереження, найбільш перспективним обладнанням для інтенсифікації процесу зброджування органічних відходів є біогазові реактори із механічними мішалками [7], [8], [16], [18], [22], [23]. При створені системи перемішування органічних відходів у біогазовому реакторі необхідно використовувати механічну мішалку з найбільшим раціональним співвідношенням площі проекції на речовину, що перемішується, та витраченої енергії на процес перемішування.

Температурний режим та рівномірність розподілення температурного поля по об'єму субстрату у біогазовому реакторі має суттєвий вплив на інтенсивність протікання анаеробного процесу. У роботах закордонних та вітчизняних науковців зустрічаються різноманітні системи для перемішування та підігріву сировини [6]-[13], [16]-[33].

Підігрів субстрату за допомогою електричних нагрівачів є найбільш ефективним, оскільки необхідна потужність є порівняно низькою. Проте, через можливе налипання субстрату на поверхню нагрівача, знижується рівномірність теплорозподілу [34], [35]. Проведені дослідження [31], [32], [34], [35] вказують на ефективність поєднання механічних перемішуючих пристроїв з електричними підігрівачами у один електротепломеханічний пристрій для перемішування та підігріву субстрату у біогазовому реакторі.

У роботі біогазового реактора можна виділити три основні етапи: процес початкового нагріву субстрату до температури зброджування; охолодження субстрату до температури вмикання підігріву; підтримка стабільної температури анаеробного зброджування.

Тому, стверджувати про енергетичну ефективність тієї чи іншої системи інтенсифікації біогазового виробництва можливо лише за результатами практичних та теоретичних досліджень енергетичних витрат для кожного з даних етапів.

Процес початкового нагріву субстрату до температури зброджування характеризується великим споживанням енергії, оскільки завантажений у біогазовий реактор органічний субстрат має початкову температуру нижчу за температурний режимпроцесу анаеробного бродіння.

Більшість країн світу покривають свої енергетичні потреби за рахунок імпорту енергетичних ресурсів із країн, які споживають меншу кількість енергоресурсів, ніж виробляють. Нестабільність ринків енергетичних ресурсів створює складності для прогнозуван-

ня зміни ціни, а це, у свою чергу, викликає невпевненість у майбутньому та нестабільність енергетичної політики країн [36].

Враховуючи вище розглянуте, та зважаючи на те, що тарифи на енергію та енергоресурси є головними факторами, котрі визначають сталий розвиток економіки країни [37], питання дослідження та створення енергетично ефективних систем інтенсифікації процесу анаеробного зброджування органічних відходів є актуальним питанням у будь-якій країні світу.

III. МЕТА РОБОТИ

Експериментальне визначення кількості витрати енергії на процес початкового нагріву субстрату до температури анаеробного зброджування у біогазовому реакторі за використання електротепломеханічної системи з автоматичним керуванням для оцінки енергетичної ефективності процесу підігріву субстрату та рентабельності подальшої переробки утвореного біогазу у теплову та електричну енергії.

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУТА АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Дослідження витрати енергії на процес початкового нагріву субстрату до температури зброджування було проведено на виготовленій експериментальній установці – біогазового реактора з електротепломеханічною системою з автоматичним керуванням процесу перемішування та підігріву субстрату. Зовнішній вигляд експериментальної установки наведено на рис. 1.

Для виготовлення біогазового реактора використано сталевий резервуар з наступними геометричними параметрами: $H = 0.6$ *м*, $d = 0.37$ *м*, $V = 0.06$ $м^3$.

Утеплення реактора виконано шаром мінеральної вати товщиною 100 мм. Для забезпечення захисту утеплювального шару від потрапляння вологи та механічних пошкоджень біогазовий реактор коаксіально розміщено всередені сталевого резервуару більшого діаметру.

Вал електротепломеханічної системи перемішування та підігріву виконано із порожнистої сталевої труби. Лопаті виготовлено із сталевих пластин з внутрішніми пазами, в яких розміщено електричний гнучкий нагрівальний кабель із вуглецевого волокна.

Схема розташування та технічна характеристика вимірювального обладнання використаного у експериментальній установці біогазового реактора з електротепломеханічною системою для перемішування та підігріву субстрату наведена у [38].

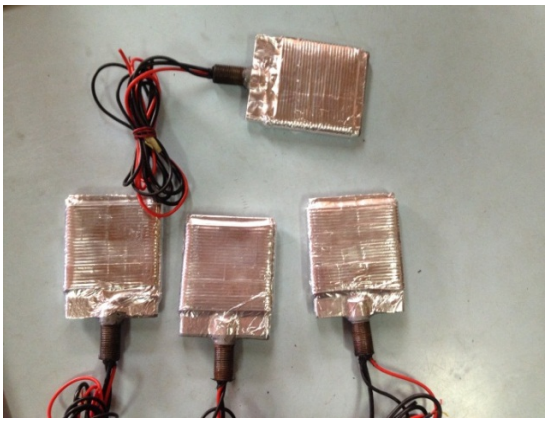
У якості субстрату використовувалися попередньо подрібненні картопляні залишки масою 10 кг, розбавлені чистою водою у об'ємі 30 літрів, завантаження у біогазовий реактора відбувається на 2/3 об'єму.

Рисунок 1. Зовнішній вигляд експериментальної біогазової установки

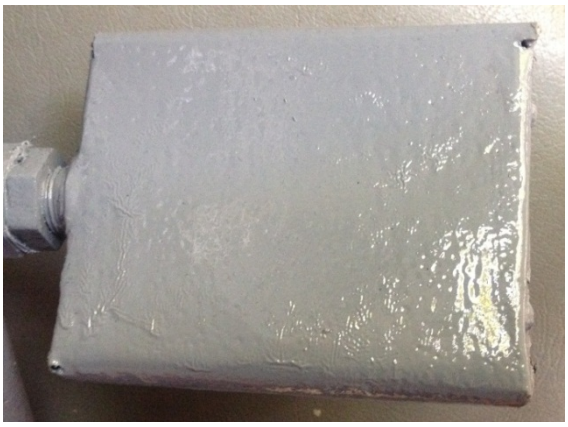
Під час проведення досліджень проводились реєстрація та аналіз отриманих експериментальним шляхом даних споживання енергії системою електричного підігріву при секційному розташуванні електричного нагрівального кабелю у лопатях електротепломеханічної системи з автоматичним керуванням для перемішування та підігріву субстрату у біогазовому реакторі (рис. 2).

Експериментальні дослідження проводилися наступним чином: підготовлений субстрат завантажувався у біогазовий реактор та залишався там на 12 годин з метою забезпечення врівноваження температури усіх об'єктів, котрі контактують із субстратом. Після вмикалась система електричного живлення установки, система автоматичного керування та реєстрації даних і проводилися експериментальні дослідження енергетичних витрат. Експеримент проводився у кліматичній зоні України, м. Київ.

Для вимірювання температури електричного нагрівального кабелю, субстрату та стінки реактора використано цифрові датчики температури DS18B20. Перетворення температури відбувається з точністю 12-біт, що відповідає точності вимірювання 0.0625 ^{o}C. Вимірювання споживаного електричними нагрівачами та електричним двигуном струму з мережі виконано за допомогою трансформаторів струму SCT-013-030 з похибкою вимірювання 1%. Живлення датчиків виконано за допомогою лабораторного блоку живлення PeakTech 6225A [39], похибка вихідної напруги становить ≤0.01% ± 1mV.



а)



б)

Рисунок 2. Лопаті, в яких розміщено електричний гнучкий нагрівальний кабель: а) розташування нагрівального кабелю на лопаті; б) лопать зі встановленим захисним кожухом

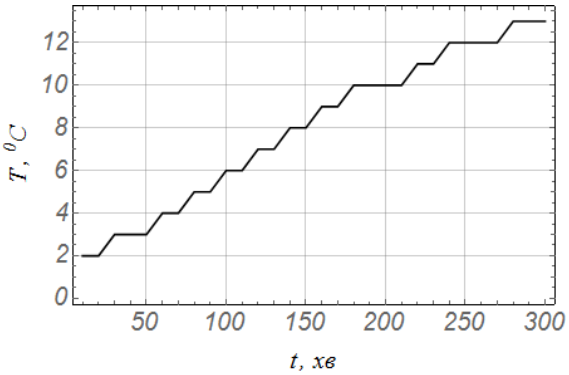


Рисунок 3. Температура навколишнього середовища за період експериментального дослідження

Температурні умови проведення експерименту відображено на графіку температури навколишнього середовища за період експериментального дослідження (рис.3).

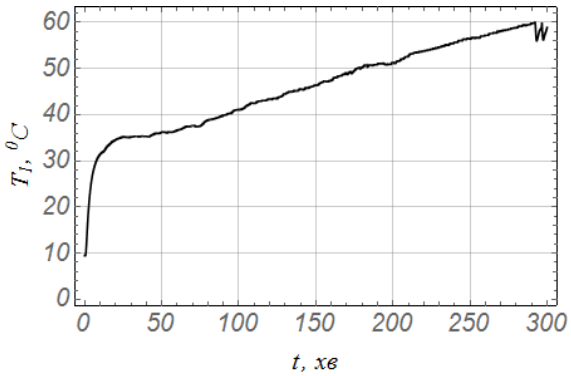
Реєстрація значень вимірювальних датчиків відбувалась безперервно та автоматично за допомогою розробленої системи автоматичного контролю та реєстрації.

Під час початкового нагріву субстрату до температури зброджування при розміщені електричного нагрівального кабелю у лопатях двоярусної лопатевої мішалки, середнє значення температури навколишнього середовища становить $T = 8\ °C$ (рис. 3), а середнє значення вологості – $\varphi = 70.2\ \%$.

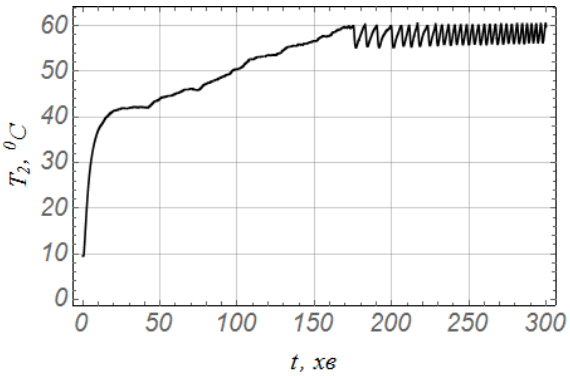
Результати експериментальних досліджень наведено у графічному вигляді на рис. 4, рис 5 та рис. 6.

З графічних залежностей зміни температури електричного нагрівального кабелю, розміщеного у лопатях мішалки (рис. 4 та рис. 5) помітно, що у перші 10 хвилин процесу нагріву відбувається стрімке зростання температури від значення $9\ °C$ до $31.26\ °C$.

На проміжку часу $\Delta t = 25...41$ *хв* (рис. 4, рис. 5), спостерігається рівномірна температура нагрівального кабелю, значення якої становить $35\ °C$.

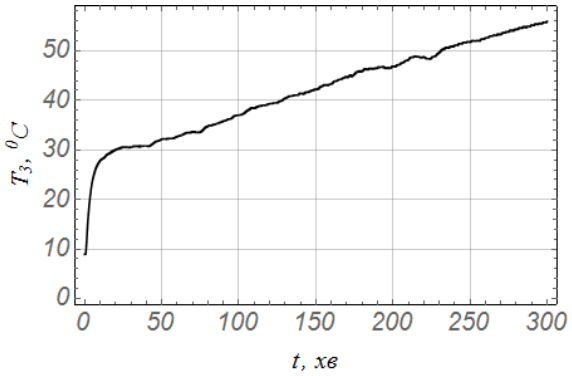


а)

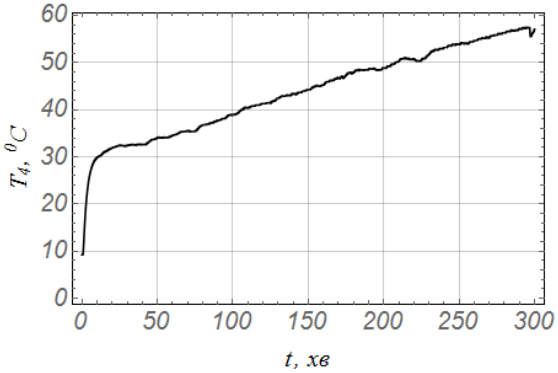


б)

Рисунок4. Графік зміни температури нижніх секцій електричного нагрівального кабелю розміщеного у лопатях електротепломеханічної системи: а) права нижня лопать; б) ліва нижня лопать



а)



б)

Рисунок 5. Графік зміни температури верхніх секцій електричного нагрівального кабелю розміщеного у лопатях електротепломеханічної системи: а) права верхня лопать; б) ліва верхня лопать

Після 41 хвилини відбувається плавне зростання температури до $60\ °C$ (рис. 4 а, б). У момент часу $\Delta t = 172\ хв$ (рис. 4 б) та $\Delta t = 291\ хв$ (рис. 4 а) спрацьовує терморегулятор і вимикає підігрівальну секцію. У момент часу $\Delta t = 174.5\ хв$ (рис. 4 б) $\Delta t = 293.5\ хв$ (рис. 4 а), температура нагрівального кабелю складає $56\ °C$, після чого напруга живлення подається на секцію нагріву і температура кабелю починає зростати (рис. 4 а та б), і в подальшому підтримується терморегулятором у межах 58-60 °С.

Середнє значення температури електричного нагрівального кабелю, розміщеного у лопатях мішалки, в період початкового нагріву становить для нижніх секцій – $46.04\ °C$ (рис. 4 а), $52.27\ °C$ (рис. 4 б), для верхніх секцій відповідно – $41.85\ °C$ (рис. 5 а), $43.8\ °C$ (рис. 5 б). Середнє значення температури електричних нагрівальних кабелів, розміщених у нижніх лопатях мішалки, становить $49.155\ °C$, у верхніх лопатях – $42.825\ °C$.

Загальне середнє значення температури нагрівального кабелю, розміщеного у лопатях мішалки, становить $45.99\ °C$.

Порівнюючи між собою середні значення температури електричного нагрівального кабелю секцій нагріву верхніх та нижніх лопатей мішалки помітно, що значення температури нижніх лопатей більше на 12.9%.

Встановлено також (рис. 4 та рис. 5), що зміна температури електричного нагрівального кабелю у кожній лопаті відбувається не однаково. Це пояснюється процесом тепловіддачі та наявністю на поверхні лопаті забруднення, товщину якого у процесі підігріву передбачити дуже складно. Проте, використовуючи розроблену систему автоматичного керування, створено умови, за яких відбувається терморегуляція кожної секції нагріву окремо, що і спостерігається на графічних залежностях (рис. 4 а, б).

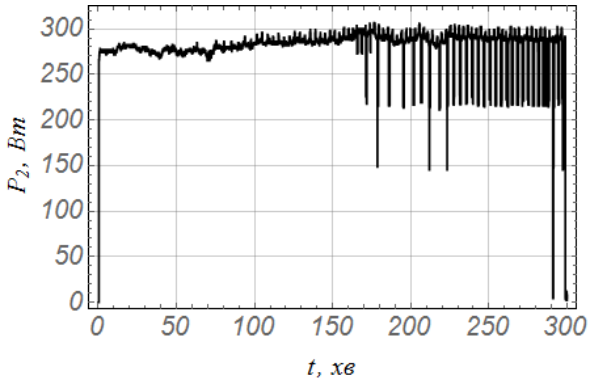


Рисунок 6. Графік витраченої потужності секціями електричного нагрівального кабелю, розміщеного у лопатях мішалки

З графічної залежності (рис. 6), помітно, що за використання електротепломеханічної системи при розміщенні електричного нагрівального кабелю у лопатях мішалки, у момент вмикання нагрівальних секцій виникає стрибкоподібне зростання потужності до значення ($P_2 = 278\ Вт$) з подальшим зростанням до значення номінальної потужності ($P_2 = 293\ Вт$). У момент часу ($\Delta t = 172\ хв$) спостерігається зниження споживаної потужності електричними нагрівачами до значення ($P_2 = 219\ Вт$), що зумовлено досягненням секції нагріву гранично допустимої температури (рис. 4 б).

У подальшому спостерігається періодичне зниження споживаної електричними нагрівачами потужності до значення ($P_2 = 219...150\ Вт$), що зумовлено вмикання-вимиканнясекцій підігріву вмонтованих у лопаті електротепломеханічної системи (рис. 4, рис. 5), Дана картина спостерігається аж до повного вимикання системи підігріву субстрату.

В цілому система підігріву, яка виконана із електричного нагрівального кабелю, що вмонтований у лопаті двоярусної лопатевої мішалки, витрачає енергію $W_2 = 4.99 \cdot 10^6$ Дж на процес початкового підігріву субстрату у біогазовому реакторі з $9.3\ °C$ до $35.8\ °C$.

Тривалість самого підігріву складає 300 хв., при цьому середнє значення споживаної потужності електричними нагрівачами складає $P_2 = 277.4$ Вт.

Аналіз енергетичних витрат на процес підігріву субстрату у біогазовому реакторі показав, що до моменту вимикання секції підігріву, тобто (рис. 4 б) за період часу $\Delta t = 172$ *хв*, системою підігріву було використано $W_2 = 2.9 \cdot 10^6$ Дж, тоді як, після початку роботи терморегулятора у момент часу $\Delta t = 172$ *хв* та до моменту вимикання системи підігріву $\Delta t = 300$ *хв* було використано $W_2 = 2.09 \cdot 10^6$ Дж.

Порівнюючи між собою отримані експериментальним шляхом значення витраченої енергії до початкового моменту роботи терморегулятора та після, помітно, що розділення електротепломеханічної системи на секції підігріву, коли кожна лопать є окремою секцією з власним автоматичним регулюванням температури нагрівального кабелю вмонтованого у відповідну секцію, споживання електричної енергії відбувається на 27.9% менше у порівнянні з моментом роботи системи підігріву без роботи терморегуляторів.

V. ВИСНОВКИ

У результаті проведеного експериментального дослідження та аналізу отриманих даних встановлено, що не зважаючи на однакову потужність нагрівальних секцій зміна температури електричного нагрівального кабелю у кожній лопаті відбувається не однаково, це пояснюється процесом тепловіддачі та наявністю на поверхні лопаті забруднення, товщину якого у процесі підігріву передбачити дуже складно.

Порівнюючи між собою середні значення температури електричного нагрівального кабелю секцій нагріву верхніх та нижніх лопатей мішалки встановлено, що значення температури нижніх лопатей більше на 12.9%.

Авторами у ході експериментальних досліджень встановлено, що за використання електричного нагрівального кабелю, який вмонтований у лопаті двоярусної лопатевої мішалки,система підігріву витрачає енергію $W_2 = 4.99 \cdot 10^6$ Дж на процес початкового підігріву субстрату до температури анаеробного зброджування у біогазовому реакторі. Тривалість самого підігріву складає 300 хв.

У ході експериментальних досліджень встановлено енергетичну ефективність розділення електротепломеханічної системи на секції підігріву, коли кожна лопать є окремою секцією з власним автоматичним регулюванням температури електричного нагрівального кабелю, вмонтованого у відповідну секцію. При цьому споживання електричної енергії зменшується на 27.9%.

Проведені експериментальні дослідження витрати енергії на процес початкового нагріву субстрату вказують на ефективність використання електротепломеханічної системи для підігріву субстрату.

За використання електротепломеханічної системи для підігріву субстрату здійснюється процес автоматичного регулюваннярежиму роботи окремих секцій, що забезпечує рівномірний розподіл температури у об'ємі реактора та недопущення перевищення гранично допустимої для процесу бродіння температури нагрівальної поверхні вище 60 °C.

Отримані результати можуть бути використані при проектуванні, будівництві та модернізації систем інтенсифікації біогазового виробництва, а саме, перемішування та підігріву субстрату у біогазових установках. Це дозволить підвищити енергетичну ефективність процесу утворення біогазу та рентабельність подальшої його переробки у теплову та електричну енергії.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

[1] Национальный кадастр антропогенных выбросовиз источников и абсорбции поглотителямипарниковых газов в Украине за 1990–2007 гг.[Электронный ресурс]/ М.В. Березницкая,О.В. Бутрим, Г.Г. Панченко. – К.: Министерство охраны окружающей природной средыУкраины, 2008. – 319 с. Режим доступа: http://climategroup.org.ua/upl/Nac_zvit_p_parn_gazy_90_07.pdf.

[2] Ch. McCombie, M. Jefferson. (2016). Renewable and nuclear electricity: Comparison of environmental impacts, *Energy Policy*, 96, 758-769.

[3] D. Weisser. (2007). A guide to life-cycle greenhouse gas (GHG) emissions from electric supply technologies, *Energy*, 32, 1543-1559.

[4] *IEA Statistics*, 2016.

[5] D.-A. Ciupăgeanu, G. Lăzăroiu, M. Tîrşu, (2017). Carbon dioxide emissions reduction by renewable energy employment in Romania, *2017 International Conference on Electromechanical and Power Systems (SIELMEN)*, 281-285.

[6] Нездойминов, В.И. Математическое описаниеосновных факторов, влияющих на формированиевзвешенного слоя осадка в илоотделителе [Текст]/В.И. Нездойминов, В.И. Зятина, В.С. Рожков// Сучасне промислове та цивільне будівництво, 2016. – №2. – 51-58 с.

[7] Куріс, Ю.В. Біоенергетичні установки. Обладнання та технології переробки органовмісних енергоресурсів [Текст]/ Ю.В. Куріс: монографія.

– Запоріжжя: ЗДІА, 2012. – 348 с.

[8] Веденев, А.Г., Веденева, Т.А. Руководство по биогазовым технологиям [Текст]. «ДЭМИ», 2011. – 84 с.

[9] BaaderV., DonetE., BrennderferM. (1982). Biogas. Theoryandpractice. 148.

[10] Семінський О. О. Дослідна установка для одержання біогазу з відходів целюлозно-паперового виробництва / О. О. Семінський, Ю. В. Мазепа // VI Всеукр. наук.-практ. конф. студентів, аспірантів і молодих вчених «Обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів» : тези доп. – К. : НТУУ «КПІ», 2010. – С. 96.

[11] PolischukV.N., TitovaL.L., ShvorovS.A., GunchenkoY.A. (2019). Estimation of Biogas Yield and Electricity Output during Cattle Manure Fermentation and Adding Vegetable Oil Sediment as a Co-substrate. In: *Problemele Energeticii Regionale*. 43(2), 117-132.

[12] Vasilevich S., Malko M., Shevchik N. (2016). The Use of the Biomass in the Republic of Belarus. Status and Prospects of Development. In: *Problemele Energeticii Regionale*. 32(3),72–77.

[13] Marks, S., Dach, J., FernandezMorales, F.J., Mazurkiewicz, J., Pochwatka, P., Gierz, Ł. (2020). NewTrendsinSubstratesand Biogas Systems in Poland.*Journal of Ecological Engineering*,21(4), 19-25. DOI: /10.12911/22998993/119528.

[14] ZablodskiyM., Kozyrskyi V., ZhyltsovA., Savchenko V., Sinyavsky O., SpodobaM., Klendiy G., Klendiy P. (2020). Electrochemical Characteristics of the Substrate based on Animal Excrement During Methanogenesis With the Influence of a Magnetic Field. *2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, 530-535.

[15] Atanasoae P., Pentiuc R.D. (2017). The qualification of electricity production in high efficiency cogeneration for the access to the support scheme through green certificates. In: *Problemele Energeticii Regionale*.35(3), 58-61.

[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] WardA.J., HobbsP.J., HollimanP.J., JonesD.L. (2008). Optimisationoftheanaerobicdigestion of agricultural resources. *Bioresour. Technol.* 99, 7928-7940.

[18] AmeurH. (2016). Mixingofcomplexfluidswith flat and pitched bladed impellers: effect of blade attack angle and shear-thinning behavior. *Food Bioprod. Process.* 99, 71-77.

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

[20] FoukrachM., BouzitM., AmeurH. (2020). EffectofAgitator'sTypesontheHydrodynamicFlowinanAgitatedTank. *Chin. J. Mech. Eng.* 33, 37. DOI: 10.1186/s10033-020-00454-2.

[21] 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.

[22] AmeurH. (2018). ModificationsintheRushtonturbineformixingviscoplasticfluids. *J. FoodEng.* 223, 117-125.

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

[24] Трахунова, И.А. Эффективность гидравлического перемешивания при различных способах загрузки органического субстрата в реактор БГУ [Текст]/ И.А. Трахунова, Ю.В. Караева// Молодой ученый, 2012. – №4. – 45-50 с.

[25] MarksS., JeżowskaA., KozłowskiK., DachJ., WilkB., Fudala-KsiążekS. (2017) Reviewofmixingsystemsoffermentationliquidusedinbiogasplants. *TechnikaRolniczaOgrodniczaLeśna*, 6, 24-26.

[26] Караева Ю.В. Модифицированная система гидравлического смешения в метантенке биогазовой установки. Вестник Казанского технологического университета – Вестник Казанского технологического университета, 2013, №1, с. 199-201.

[27] Шаяхметов, Р.Г. Исследование способов перемешивания в метантенках /Р.Г. Шаяхметов // Водоочистка Водоподготовка Водоснабжение. – М.: ИздвоООО «Издательский дом «Орион», 2011/4(40). – С.18-20.

[28] Шаяхметов, Р.Г. Влияние конструкций метантенков на интенсификациюпроцессов анаэробного сбраживания / Р.Г. Шаяхметов // Молодой учѐный. – Чита:Изд-во ООО «Молодой ученый». – №5(28). – 2011. – Том I. – С.113116.

[29] Pham C.H., Vu C.C., Sommer S.G., Bruun S. (2014). Factors Affecting Process Temperature and Biogas Production in Small-scale Rural Biogas Digesters in Winter in Northern Vietnam. 27(7), 1050–1056.

[30] RashedM. B. (2014). TheEffectofTemperatureonthebiogasProductionfromOlivePomace. UniversityBulletinISSUE. 3(16), 135-148.

[31] Заблодський М. М., Сподоба М. О. Обґрунтування створення електротепломеханічної системи перемішування та підігріву біомаси. Енергетика та автоматика, 0(5). Київ. 2020. – 136-148.doi:http://dx.doi.org/10.31548/energiya2020.05.

136
[32] Заблодський М. М., Сподоба М. О. Визначення енергетично ефективного рівня швидкості перемішувального органу електромеханічної системи. Електромеханічні і енергозберігаючі системи. 4(52). Кременчук, 2020. – 17-26 с. DOI: 10.30929/2072-2052.2020.4.52.17-26
[33] Сподоба М.О., Заблодський М.М. Залежність енергетичних витрат від типу використаної механічної мішалки у біогазовому реакторі. Електротехніка та електроенергетика. Випуск 1. Запоріжжя, 2021. – 26-33 с.https://doi.org/10.15588/1607-6761-2021-1-3
[34] Zablodskiy M., Spodoba M. (2021). Dynamic Analysis of Energy Consumption During Substrate Fermentation in a Biogas Reactor, *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, 147-152, doi: 10.1109/KhPIWeek53812.2021.9569995.
[35] Z. Mykola, S. Mykhailo. (2020). Mathematical Model Of Thermal Processes During The Fermentation Of Biomass In A Biogas Reactor, *2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, 227-231.
[36] Berzan V., Postolati V., Bykova E., Cernei M., Volconovich L. (2019). Trends and Risks in the Natural Gas Supply of the Republic of Moldova Tendințe și riscuri în asigurarea cu gaze naturale a Republicii Moldova. 42(1-3), 94-114. 10.5281/zenodo.3242741.
[37] PostolatiyV., BabichV. (2018). Tariff Policy in the Formation of the Price of Thermal Energy. Problemele energeticii regionale, 38(3), 170–181.
[38] Заблодський М. М., Сподоба М. О. Методика проведення експериментальних досліджень біогазового реактора з заглибною комбінованою системою перемішування та електричного підігріву. Матеріали IX Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування (теорія, практика, історія, освіта)», Київ, 19-22 травня 2020.
[39] Zablodskiy M.M., Spodoba M.O. Power supply of measuring sensors when performing experimental studies of electrical thermal mechanical system. *EnergyandAutomation, 0* (4), Kyiv, pp. 39-48. doi:10.31548/energiya2021.04.039

Стаття надійшла до редакції 19.02.2022

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСХОДА ЭНЕРГИИ НА ПРОЦЕСС НАЧАЛЬНОГО НАГРЕВА СУБСТРАТА ЗА ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОТЕПЛОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

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

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

СПОДОБА А.А. канд. техн. наук (PhD),ассистент кафедры конструирования машин и оборудования, Национального университета биоресурсов и природопользования Украины, Киев, Украина, e-mail: sp1309@ukr.net;

Цель работы. *Экспериментальное определение расхода энергии на процесс начального нагрева субстрата до температуры сбраживания в биогазовом реакторе при использовании электротепломеханической системы с автоматическим управлением для оценки энергетической эффективности процесса подогрева субстрата и рентабельности дальнейшей переработки образовавшегося биогаза в тепловую и электрическую энергии.*

Методы исследования. *Экспериментальные исследования динамики изменения температуры электрического нагревательного кабеля, размещенного в электротепломеханической системе, определения длительности процесса и израсходованной энергии начального подогрева субстрата, обработка и сравнительный анализ полученных массивов данных, обобщение полученных результатов.*

Полученные результаты. *В формировании современной энергетической системы важную роль играют биогазовые технологии, рентабельность которых напрямую зависит от энергоэффективности процессов интенсификации анаэробного сбраживания. Процесс анаэробного сбраживания отходов длительный, поэтому одним из основных методов интенсификации биогазового производства является перемешивание отходов в процессе анаэробного брожения. Существует необходимость повышения энергоэффективности процессов интенсификации анаэробного сбраживания и рентабельности дальнейшей переработки биогаза в тепловую и электрическую энергию. Способы повышения энергоэффективности в основном заключаются в сокращении времени подогрева субстрата в биогазовом реакторе, уменьшении расхода электрической энергии на процесс*

термостабилизации анаэробного сбраживания, структурном сочетании энергетически эффективных систем перемешивания и подогрева сырья в реакторах, внедрении систем автоматического производства. Реализация этих действий позволит установить оптимальные геометрические размеры электротепломеханической системы с автоматическим управлением для перемешивания и подогрева субстрата в биогазовом реакторе и существенно повысить энергетическую эффективность биогазовых установок и последующую переработку образовавшегося биогаза в тепловую и электрическую энергии.

Научная новизна.*В результате проведенного экспериментального исследования и анализа полученных данных установлено, что при одинаковой мощности нагревательных секций изменение температуры электрического кабеля в каждой лопасти происходит не одинаково. Авторами установлено, что среднее значение температуры секций электрического нагревательного кабеля нижних лопастей больше на 12.9% по сравнению с верхними лопастями электротепломеханической системы. Авторами в ходе экспериментальных исследований установлено, что при использовании системы подогрева, выполненной из электрического нагревательного кабеля, вмонтированного в лопасти двухъярусной лопастной мешалки, расходуется* $W_2 = 4.99 \cdot 10^6$ *Джна процесс начального подогрева субстрата из 9.3 к 35.8 °С в биогазовом реакторе объемом 40 литров. Продолжительность самого подогрева составляет 300 мин. В ходе экспериментальных исследований авторами была установлена энергетическая эффективность от разделения электротепломеханической системы на секции подогрева, когда каждая лопасть является отдельной секцией с собственным автоматическим регулированием температуры электрического нагревательного кабеля вмонтированного в соответствующую секцию, при этом потребление электрической энергии уменьшается на 27.9%.*

Практическая ценность. *Полученные результаты могут использоваться при проектировании, строительстве и модернизации систем интенсификации биогазового производства, а именно, перемешивании и подогреве субстрата в биогазовых установках. Это позволит повысить энергетическую эффективность процесса образования биогаза и рентабельность его переработки в тепловую и электрическую энергию.*

Ключевые слова: эксперимент; энергоэффективность; начальный нагрев субстрата; электротепломеханическая система; перемешивание; энергопотребление; температура сбраживания.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF ENERGY CONSUMPTION FOR THE PROCESS OF INITIAL HEATING OF A SUBSTRATE FOR THE USE OF ELECTRIC HEAT-MECHANICAL SYSTEM

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

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

SPODOBA A.O. Candidate of Technical Sciences (PhD), Assistant, Department of Design of Machines and Equipment, NationalUniversityofLifeandEnvironmentalSciencesofUkraine, Kyiv, Ukraine, e-mail: sp1309@ukr.net;

Purpose. *Experimental determination of energy consumption for the process of the substrate initial heating to the temperature of anaerobic digestion in a biogas reactor using an electrothermal-mechanical system with automatic control to assess the energy efficiency of the substrate heating process and the profitability of further processing of the resulting biogas into thermal and electrical energy.*

Methodology.*Experimental studies of the dynamics of temperature changes in the heating cable placed in electrothermal-mechanical system, determining the duration of the process and the energy consumed by the substrate initial heating, processing and analysis of the obtained data arrays, the obtained results summarizing.*

Findings.*Biogas technologies play an important role in the formation of a modern energy system, the profitability of which directly depends on the energy efficiency of anaerobic digestion intensification. The process of waste digestion is long, so one of the main methods of the biogas production intensification is the mixing of waste in the process of anaerobic fermentation. There is a need to improve the energy efficiency of anaerobic digestion intensification and the profitability processing of biogas into heat and electricity. Ways to improve energy efficiency mainly consist in reducing the time of the substrate heating in a biogas reactor, reducing the consumption of electrical energy for the process of thermal stabilization of anaerobic digestion, structural combination of energy-efficient systems for mixing and heating raw materials in reactors, and introducing automatic production systems. The implementation of these actions will make it possible to establish the optimal geometric dimensions of an electrothermal-mechanical system with automatic*

control for mixing and heating the substrate in a biogas reactor and significantly increase the energy efficiency of biogas plants and the subsequent processing of the resulting biogas into thermal and electrical energy.

Originality.*As a result of the experimental study and analysis of the data obtained, it was found that with the same power of the heating sections, the change in the temperature of the electric cable in each blade does not occur in the same way. The authors found that the average value of the temperature of the sections of the electric heating cable of the lower blades is 12.9% higher compared to the upper blades of the electrothermal-mechanical system. In the course of experimental studies, the authors found that when using a heating system made of an electric heating cable mounted in the blades of a two-tier paddle mixer, it consumes* $W_2 = 4.99 \cdot 10^6$ *J, on the process of initial heating of the substrate from 9.3 before 35.8 °C in a biogas reactor with a volume of 40 liters. The duration of the heating itself is 300 minutes. In the course of experimental studies, the authors established the energy efficiency from dividing the electrothermal-mechanical system into heating sections, when each blade is a separate section with its own automatic temperature control of the electric heating cable mounted in the corresponding section, while the consumption of electrical energy is reduced by 27.9%.*

Practical value.*The results obtained can be used in the design, construction and modernization of biogas production intensification systems, namely, mixing and heating of the substrate in biogas plants. This will improve the energy efficiency of the biogas formation process and the profitability of its processing into heat and electricity.*

Keywords: experiment; energy efficiency; initial heating of the substrate; electrothermal-mechanical system; mixing; energy consumption; fermentation temperature

REFERENCE

[1] Bereznitskaya, M.V., Butrim, O.V., Panchenko, G.G. (2008). Natsionalny y kadastrantro po gennykh vybrosovizistochnikoviab sorbtsiipoglotitelyamiparnikovykhgazovvUkraineza 1990–2007 gg. MinisterstvookhranyokruzhayushcheyprirodnoysredyUkrainy, Kyev 2008, 319 p. Rezhimdostupa: http://climategroup.org.ua/upl/ Nac_zvit_p_parn_gazy_90_07.pdf. (inUkrainian)

[2] Ch. McCombie, M. Jefferson. Renewable and nuclear electricity: Comparison of environmental impacts, *Energy Policy*, 2016, no. 96, pp. 758-769.

[3] D. Weisser. A guide to life-cycle greenhouse gas (GHG) emissions from electric supply technologies, *Energy*, 2007, no. 32, pp. 1543-1559.

[4] *IEA Statistics*, 2016.

[5] D.-A. Ciupăgeanu, G. Lăzăroiu, M. Tîrşu. (2017). Carbon dioxide emissions reduction by renewable energy employment in Romania, 2017 *International Conference on Electromechanical and Power Systems (SIELMEN)*, pp. 281-285.

[6] Nezdoyminov, V. I., Zyatina, V. I., Rozhkov, V. S. (2016). Matematicheskoye opisaniye osnovnykh faktorov. Vliya yushchikhna formirovaniye vzveshennogosloya osadkavi lootdelitele. Sucha snepromislove tatsivilne budivnitstvo, No.2, pp. 51-58. (in Ukrainian).

[7] Kuris Yu.V. (2012). Bioyenergetichni ustanovki. Obladnannya tatekhnologiï pererobki organov misnikhen ergoresursiv. Zaporizhzhya: ZDIA, 348 p. (in Ukrainian).

[8] Vedenev, A.G., Vedeneva, T.A. (2011). Rukovodstvo po biogazovy mtekhno logiyam. 2011, «DEMI», 84 p.

[9] Baader, V., Donet, E., Brennderfer, M. (1982). Biogas. Theoryandpractice. 148 p.

[10] Seminsky, O.O, Mazepa, Yu.V. (2010). Doslidna ustanovka dlya oderzhannya biogazuz vidhodiv celyulozno-paperovogo virobnictva. VI Vseukr. nauk.-prakt. konf. studentiv, aspirantiv i molodih vchenih «Obladnannya himichnih virobnictv i pidpriємstv budivel'nih materialiv» Ukraine, NTUU "KPI", 96 p. (in Ukrainian).

[11] Polischuk V.N., Titova L.L., Shvorov S.A., Gunchenko Y.A. (2019). Estimation of Biogas Yield and Electricity Output during Cattle Manure Fermentation and Adding Vegetable Oil Sediment as a Co-substrate. In: *Problemele Energeticii Regionale*. Vol. 43, No. 2, pp. 117-132.

[12] Vasilevich, S., Malko, M., Shevchik, N. (2016). The Use of the Biomass in the Republic of Belarus. Status and Prospects of Development. In: *Problemele Energeticii Regionale*. Vol. 32, No. 3, pp. 72–77.

[13] Marks, S., Dach, J., Fernandez Morales, F.J., Mazurkiewicz, J., Pochwatka, P., Gierz, Ł. (2020). NewTrendsinSubstratesand Biogas Systems in Poland.*Journal of Ecological Engineering*, Vol. 21, No. 4, pp. 19-25. DOI: /10.12911/22998993/119528.

[14] Zablodskiy, M., Kozyrskyi V., Zhyltsov, A., Savchenko, V., Sinyavsky, O., Spodoba, M., Klendiy, G., Klendiy, P. (2020). Electrochemical Characteristics of the Substrate based on Animal Excrement During Methanogenesis With the Influence of a Magnetic Field. *2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, pp. 530-535.

[15] Atanasoae, P., Pentiuc, R.D. (2017). The qualification of electricity production in high efficiency cogeneration for the access to the support scheme through green certificates. In: *Problemele Energeticii Regionale*. Vol. 35, No. 3, pp. 58-61.

[16] Ratushnyak, G.S., Anokhina, K.V., Dzhedzhula, V.V. (2010). Doslid zhennya parametriv protsesu peremishuvannya organichno masiv biogazov iyustanovtsi zvertik alnimpro pelernimperemi shuvachem. Vinnitsya,VNTU, 170 p. (inUkrainian)

[17] Ward, A.J., Hobbs, P.J., Holliman, P.J., Jones, D.L. (2008). Optimisation of thea naerobi cdigestion of agricultural resources. *Bioresour. Technol.* No. 99. pp. 7928-7940.

[18] Ameur H. (2016). Mixingo fcomplexflu idswith flat and pitched bladed impellers: effect of blade attack angle and shear-thinning behavior. *Food Bioprod. Process.* No. 99, pp. 71-77.

[19] Chervoniy, I.F., Kuris,Yu.V. (2012). Doslidzhennya pristroï vtaudosko nalennyaprot sesivpere mishuvannyavbi ogazovikhustanovkakh. *Energosberezheniye. Energetika. Energoaudit*, No. 2, 96 p. (in Ukrainian)

[20] Foukrach, M., Bouzit, M., Ameur H. (2020). Effecto fAgitator's Typesonthe Hydrodynamic Flowinan AgitatedTank. *Chin. J. Mech. Eng. N*o. 33, 37 p. DOI: 10.1186/s10033-020-00454-2.

[21] Spodoba, M.O., Zablodskiy, M.M., Radko, I.P. (2019). Osnovni skladovi metodologiï pobudo vizaglibnogoe lektromekha nichnogope retvory uvacha dly abiogazovikhkompleksiv. VMizhnar odnanaukovo-praktic hnakonferentsi yaprisvy achenapam'yati profesora Viktora MikhaylovichaSinkova «Problemitaperspektiviro zvitkuenergetiki. Elektrotekhnolo giytaavtomatikiv APK», Kyiv, NUBiP. (inUkrainian)

[22] Ameur, H. (2018). Modification sin the Rushtonturbineformix in gvisco plasticfluids. *J. FoodEng.* ,223, pp. 117-125.

[23] Ratushnyak G.S., Lyalyuk O.G., Koshcheev I.A. (2017). Biogazovi ustanovki zvidnovlyuvani midzherela mienergiï termostabilizatsiï protsesufer mentatsiï biomasi. Vinnitsya: VNTU, 88 p. (in Ukrainian)

[24] Trakhunova I.A., Karayeva Yu.V. (2012). Effektivnost gidravlichesko goperem eshivaniyaprira zlichnykhsposobakhzagruzk iorganichesko gosubstratavreaktor BGU. Molodoyuchenyy, No.4, pp. 45-50. (in Russian)

[25] 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*, No. 6, pp. 24-26.

[26] KaraevaYu.V. (2013). Modificiro vannayasi stemagidravli cheskogoperemesh ivaniyavmeta ntenkebio gazovojustanovki. Vestnik Kazanskogotek hnologiches kogouniversiteta, No.1, pp. 199-201. (in Russian)

[27] Shayakhmetov, R.G. (2011). Issledovanie sposobovpe remeshivaniyav metantenkah. Vodoochistka Vodopodgotovka Vodosnabzhenie. Moscow, Vol. 40, No. 4, pp. 18-20. (in Russian)

[28] Shayakhmetov, R.G. (2011). Vliyanie konstrukcij metantenkovna intensi fikaciyup rocessovanaer obnogosbrazhivaniya. Molodoyuchenyy, Vol. 28, No. 5, pp. 113-116. (in Russian)

[29] Pham, C.H., Vu, C.C., Sommer, S.G., Bruun, S. (2014). Factors Affecting Process Temperature and Biogas Production in Small-scale Rural Biogas Digesters in Winter in Northern Vietnam. Vol. 27, No.7, pp. 1050–1056.

[30] Rashed, M. B. (2014). The Effect of Temperature on the biogas Production from Olive Pomace. UniversityBulletinISSUE. Vol. 3, No. 16 pp. 135-148.

[31] Zablodsky, M.M., Spodoba, M.O. (2020). Obgruntuva nnyastvorenn yaelekt roteplom ekhanichnoï sistemi peremishuvan nyatapi digrivubiomasi. *Energetika ta avtomatika*, Kyiv, No.5, pp. 136-148. (in Ukrainian)

[32] Zablodsky M.M., Spodoba M.O. (2020). Viznachennya energetichno efektivnogo rivnya shvidkosti peremishuval'nogo organu elektromekhanichnoï sistemi. *Elektromekhanichni i energozberigayuchi sistemi*. Kremenchuk, Vol. 52, No. 4, pp. 17-26. DOI: 10.30929/2072-2052.2020.4.52.17-26 (in Ukrainian)

[33] Spodoba, M.O., Zablodsky, M.M. (2021). Zalezhnist' energetichnih vitrat vid tipu vikoristanoï mekhanichnoï mishalki u biogazovomu reaktori. Elektrotekhnika ta elektroenergetika, Zaporizhzhya, No. 1, pp. 26-33. (in Ukrainian)

[34] Zablodskiy, M., Spodoba, M. (2021). Dynamic Analysis of Energy Consumption During Substrate Fermentation in a Biogas Reactor, *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, pp. 147-152, doi: 10.1109/KhPIWeek53812.2021.9569995.

[35] Mykola, Z., Mykhailo, S. (2020). Mathematical Model Of Thermal Processes During The Fermentation Of Biomass In A Biogas Reactor, *2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, pp. 227-231.

[36] Berzan, V., Postolati, V., Bykova, E., Cernei, M., Volconovich, L. (2019). Trends and Risks in the Natural Gas Supply of the Republic of Moldova Tendințe și riscuri în asigurarea cu gaze naturale a Republicii Moldova. Vol. 42, No. 1-3, pp. 94-114. 10.5281/zenodo.3242741.

[37] Postolatiy, V., Babich, V. (2018). Tariff Policy in the Formation of the Price of Thermal Energy. Problemele energeticii regionale, Vol. 38, No. 3, pp. 170–181.

[38] Zablodsky, M.M., Spodoba, M.O. (2020). Metodika provedennya eksperimental'nih doslidzhen' biogazovogo reaktora z zaglibnoyu kombinovanoyu sistemoyu peremishuvannya ta elektrichnogo pidigrivu.Proceedings of the IX International Scientific and Technical Conference "Problems of modern energy and automation in the system of nature management (theory, practice, history, education)", Kyiv.

[39] Zablodskiy, M.M., Spodoba, M.O. Power supply of measuring sensors when performing experimental studies of electrical thermal mechanical system. *EnergyandAutomation, 0* (4), Kyiv, pp. 39-48. doi:10.31548/energiya2021.04.03