

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

ЯРЕМЕНКО ОКСАНА АНАТОЛІЇВНА

УДК 620.952: 620.953

**ОБҐРУНТУВАННЯ БІОТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ
ВИРОБНИЦТВА БІОГАЗУ ІЗ ОСАДУ СТІЧНИХ ВОД
СИСТЕМ ШТУЧНОГО ВИРОЩУВАННЯ РИБИ**

03.00.20 «Біотехнологія»

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2026

Дисертацією є кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису

Роботу виконано у Національному університеті біоресурсів і природокористування України
Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник

доктор технічних наук, професор
ГОЛУБ Геннадій Анатолійович,
Національний університет біоресурсів
і природокористування України,
професор кафедри технічного сервісу
та інженерного менеджменту імені М. П. Момотенка

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, доцент
ГОЛУБ Наталія Борисівна,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»,
завідувач кафедри біоенергетики,
біоінформатики та екобіотехнології

доктор технічних наук, професор
ДАНИЛЕНКО Світлана Григорівна,
Інститут продовольчих ресурсів НААН,
завідувач відділу біотехнології

Захист відбудеться «01» травня 2026 року о 10⁰⁰ годині на засіданні докторської спеціалізованої вченої ради Д 26.004.13 у Національному університеті біоресурсів і природокористування України за адресою: 03041, м. Київ, вул. Героїв Оборони, 15, навчальний корпус № 3, кімната 301

З дисертацією можна ознайомитися у науковій бібліотеці Національного університету біоресурсів і природокористування України за адресою: 03041, м. Київ, вул. Героїв Оборони, 13, навчальний корпус № 4, кімната 41а

Реферат розісланий «31» березня 2026 року

Вчений секретар докторської
спеціалізованої вченої ради

Наталія СЛОБОДЯНЮК

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. У сучасних умовах кліматичних змін людство має приділяти максимум уваги ефективному використанню енергії та природних ресурсів. Аквакультура одна із галузей харчової індустрії, яка має значні темпи розвитку. Для забезпечення потреб людства у рибній продукції до 2030 року її річне виробництво повинно зрости до 120 млн т. В установках аквакультури виробляється більше половини рибної продукції.

Все більшого поширення набуває виробництво продукції аквакультури в рециркуляційних системах аквакультури. Обсяги вирощування за допомогою таких систем прісноводних риб (найчастіше вугра і сома) та форелі невпинно зростають. Використання рециркуляційних систем аквакультури – найбільш перспективна світова тенденція. Такі системи забезпечують низький рівень впливу на навколишнє середовище, а також зменшують потреби у воді та енергії. Вихід риби в таких системах є постійним і передбачуваним. Мають вони також суттєвий недолік – високі капітальні та експлуатаційні витрати.

Культивування риби в рециркуляційних системах аквакультури повинно забезпечити часткову енергетичну автономність за рахунок тепла і електроенергії, отриманих при когенерації біогазу, який утворюється при метановому зброджуванні органічних складових осаду (залишки кормів, продукти метаболізму, відходи переробки риби та ін.), що відстоюється при функціонуванні системи.

Таким чином, використання рециркуляційних систем аквакультури потребує подальшого поширення з метою забезпечення населення рибною продукцією, а самі рециркуляційні системи аквакультури – подальшого удосконалення для підвищення їх енергетичної ефективності.

Останнім часом виконано значний обсяг досліджень щодо розроблення технічних засобів для реалізації процесу біогазового зброджування органічної біомаси. Однак, процес виробництва біогазу із осаду стічних вод рециркуляційних системах аквакультури при штучному вирощуванні риби потребує подальшого удосконалення в напрямі обґрунтування параметрів біотехнологічного процесу виробництва біогазу із осаду стічних вод рециркуляційних систем аквакультури та підвищення їх енергетичної автономності.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження за обраним напрямом дисертації виконувалися у відповідності з планами науково-дослідних робіт Національного університету біоресурсів і природокористування України за темою «Розробити технологію інтегральної переробки біологічних відходів у біогазових установках нового покоління» (номер державної реєстрації 0111U003687).

Мета та завдання дослідження. Мета роботи – підвищити вихід метану в біотехнологічному процесі анаеробного зброджування в метантенках із періодичним завантаженням ущільненого осаду стічних вод систем штучного вирощування риби шляхом обґрунтування показників ущільнення осаду та процесу анаеробного зброджування.

Для досягнення мети необхідно було вирішити такі завдання:

- провести аналіз технологічних операцій та технічних засобів очистки стічних вод систем штучного вирощування риби та виробництва біогазу із осаду стічних вод;
- обґрунтувати вихід метану в біотехнологічному процесі анаеробного зброджування біомаси в метантенках із періодичним завантаженням;
- розробити експериментальний зразок відстійника та обґрунтувати показники ущільнення осаду стічних вод систем штучного вирощування риби;
- обґрунтувати вихід метану в біотехнологічному процесі анаеробного зброджування в метантенках із періодичним завантаженням ущільненого осаду стічних вод систем штучного вирощування риби;
- виконати техніко-економічну оцінку ущільнення та анаеробного зброджування осаду стічних вод систем штучного вирощування риби.

Об'єкт дослідження – біотехнологічний процес анаеробного зброджування в метантенках із періодичним завантаженням ущільненого осаду стічних вод систем штучного вирощування риби.

Предмет дослідження – обґрунтування показників ущільнення та виходу метану в біотехнологічному процесі анаеробного зброджування в метантенках із періодичним завантаженням осаду стічних вод систем штучного вирощування риби.

Методи дослідження. Оцінка питомого виходу осаду в установці для вирощування риби проводилася на базі підприємств з вирощування риби у Васильківському районі Київської області. Вміст сухої речовини визначався шляхом фільтрування стічних вод і осадів із наступним висушування залишків на фільтрах у муфельній печі. Вміст органічної маси в осаді визначалася шляхом висушування проб у муфельній печі. Оцінка агрохімічних показників осаду та стічної води після відстоювання у відстійнику проводилася за стандартними методиками у спеціалізованій лабораторії Національного університету біоресурсів і природокористування України. Дослідження показників анаеробного зброджування проводилися на базі лабораторії виробництва біогазу Інституту технічної теплофізики НАН України із використанням осаду стічної змивної води механічного фільтра рециркуляційної системи аквакультури для вирощування нільського кларієвого сома (*Clarias gariepinus*).

Наукова новизна одержаних результатів. Вперше отримано залежності, які дозволяють визначити інтегральний рівень розкладу органічної біомаси, її інтегральну швидкість розкладу та інтегральний питомий вихід метану в залежності від часу зброджування та періодичності завантаження біогазового реактора, а також максимальне значення періодичності завантаження біогазового реактора для забезпечення максимального виходу метану під час анаеробної ферментації.

Вперше, для умов відстоювання та анаеробного зброджування осаду стічної змивної води механічних фільтрів рециркуляційних систем аквакультури при вирощуванні нільського кларієвого сома (*Clarias gariepinus*), експериментально встановлено показники ущільнення осаду стічних вод систем штучного вирощування риби; залежність рівня та швидкості розкладу сухої органічної речовини та питомого виходу метану від часу анаеробного зброджування; вихід біогазу й метану та концентрацію метану в біогазі під час анаеробної ферментації.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблено алгоритм розрахунку питомого виходу біогазу та метану під час анаеробної ферментації та роботі біогазового реактора в режимі періодичного завантаження. Встановлено доцільність створення системи відстоювання на основі двох відстійників: перший для відстоювання стічної змивної води механічних фільтрів; другий – для ущільнення отриманого осаду. Розроблено технологічну схему відстоювання та анаеробного зброджування осаду стічної змивної води механічних фільтрів рециркуляційних систем аквакультури, яка дозволить отримати прибуток від виробництва метану 4,29 грн/м³ та 3,39 грн/кВт год від виробництва електроенергії на основі метану. Впровадження обладнання для підготовки змивної води механічних фільтрів до анаеробного зброджування з метою отримання біогазу із продуктивністю за кількістю змивної води механічних фільтрів 1577 м³/рік в ТОВ «Аква Систем Органік» дозволило отримати фактичний економічний ефект 10 тис. грн/м³ ущільненого осаду та додатковий розрахунковий прибуток від виробництва електроенергії на основі метану – 320 грн/м³ зброженого осаду. Результати досліджень впроваджено в навчальний процес Національного університету біоресурсів і природокористування України.

Особистий внесок здобувачки. Основні результати досліджень дисертації отримано здобувачкою самостійно, а саме: проаналізовано сучасний стан рециркуляційних систем аквакультури; узагальнено сучасні системи анаеробного зброджування біомаси, на основі яких розроблено математичну модель для визначення інтегрального рівня розкладу органічної біомаси, її інтегральної швидкості розкладу та інтегрального питомого виходу метану в залежності від часу зброджування та періодичності завантаження біогазового реактора;

експериментально досліджено умови відстоювання та анаеробного зброджування осаду стічної змивної води механічних фільтрів рециркуляційних систем аквакультури при вирощуванні нільського кларієвого сома (*Clarias gariepinus*); проведено економічну оцінку виробництва біогазу. Дисертація є самостійно виконаною науковою працею. Наукові положення, висновки й рекомендації, що викладені в дисертації і виносяться на захист, одержано автором особисто.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертації доповідалися й обговорювалися на: IX Міжнародній науково-практичній конференції «Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні» (м. Львів, 2017 р.); VIII Міжнародній науковій конференції «Rural Development» (м. Каунас, Литва, 2017 р.); IV Всеукраїнській науково-практичній конференції «Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь» (м. Житомир, 2018 р.); Міжнародній науково-практичній конференції за участю ФАО «Кліматичні зміни та сільське господарство. Виклики для аграрної науки та освіти» (м. Київ, 2018 р.); II Міжнародній науково-практичній конференції «Біоенергетичні системи в агропромисловому виробництві» (м. Житомир, 2018 р.); Міжнародній науково-практичній конференції приуроченій до Всесвітнього дня водних ресурсів «Водні екосистеми у контексті євроінтеграції: Реалії та перспективи» (м. Житомир, 2019 р.); VI Міжнародній науково-технічній конференції «Крамаровські читання» з нагоди 112-ї річниці від дня народження д. т. н., професора, члена-кореспондента ВАСГНІЛ Крамарова Володимира Савовича (м. Київ, 2019 р.); II Міжнародній науково-практичній конференції, присвяченій 90-й річниці з дня заснування механіко-технологічного факультету НУБіП України «Агроінженерія: сучасні проблеми та перспективи розвитку» (м. Київ, 2019 р.); XIX Міжнародній науковій конференції, присвяченій 85-річчю від дня народження академіка Л. В. Погорілого та 150-річчю від дня народження професора К. Г. Шиндлера «Науково-технічні засади розробки, випробування та прогнозування сільськогосподарської техніки і технологій» (Дослідницьке, 2019 р.); 18 Міжнародна наукова конференція «Інженерія для розвитку сільських районів» (м. Єлгава, Латвія, 2019 р.); XXII Міжнародній науково-практичній конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті» (м. Київ, 2021 р.); 20 Міжнародна наукова конференція «Інженерія для розвитку сільських районів» (м. Єлгава, Латвія, 2021 р.); XXV Міжнародній науково-практичній конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті» (м. Київ, 2024 р.).

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 30 наукових праць, з яких 5 статей у періодичних наукових виданнях, включених до категорії «А» Переліку наукових фахових видань України та/або в закордонних виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus, 2 статті у наукових виданнях, включених до Переліку наукових фахових видань України, 2 патенти України на винахід, 4 патенти України на корисну модель, навчальний посібник, науково-методичні рекомендації, 15 тез наукових доповідей.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з анотацій, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи складає 183 сторінки. Список використаних джерел налічує 148 найменувань. Дисертація містить 62 рисунки та 17 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У першому розділі «**Огляд сучасного стану розробок та досліджень рециркуляційних систем аквакультури**» проаналізовано рециркуляційні системи аквакультури, які знайшли найбільше поширення у виробництві продукції аквакультури, оскільки дають можливість забезпечити підготовку води у відповідності до встановлених вимог. Однак їх суттєвим недоліком, як і великої кількості конструктивних реалізацій даних установок є те, що при їх використанні відсутня можливість утилізації промивної води та осадів, що утворюється під час роботи рециркуляційних систем аквакультури на стадії

механічної фільтрації води. Біологічній деградації осадів аквакультури сьогодні приділяється недостатньо уваги, а тому такі класичні методи, як аеробна та анаеробна деградація органічних речовин осадів, доцільно розглядати в їх поєднанні із розробленням відповідного наукового обґрунтування біотехнологічних процесів та технічних засобів для їх реалізації.

Наразі виконано значний обсяг досліджень щодо розроблення біотехнологічних процесів та технічних засобів для реалізації процесу біогазового зброджування біомаси. Отримано кінетичні рівняння анаеробної ферментації органічної біомаси для умов порційного зброджування. Досліджено процес анаеробного зброджування осаду, що утворюється в морських рециркуляційних системах аквакультури та в установках аквапоніки. Однак, виробництво біогазу із осаду стічних вод систем штучного вирощування риби потребує подальшого удосконалення в напрямі обґрунтування біотехнологічного процесу виробництва біогазу із осаду стічних вод систем штучного вирощування риби з метою підвищення рівня їх енергетичної автономності.

Для забезпечення підвищеного рівня енергетичної автономності за рахунок тепла і електроенергії, отриманих при когенерації біогазу, який утворюється при метановому зброджуванні органічних складових осадів стічних вод систем штучного вирощування риби може бути забезпечено за допомогою рециркуляційних систем аквакультури, приведеної на рис. 1.

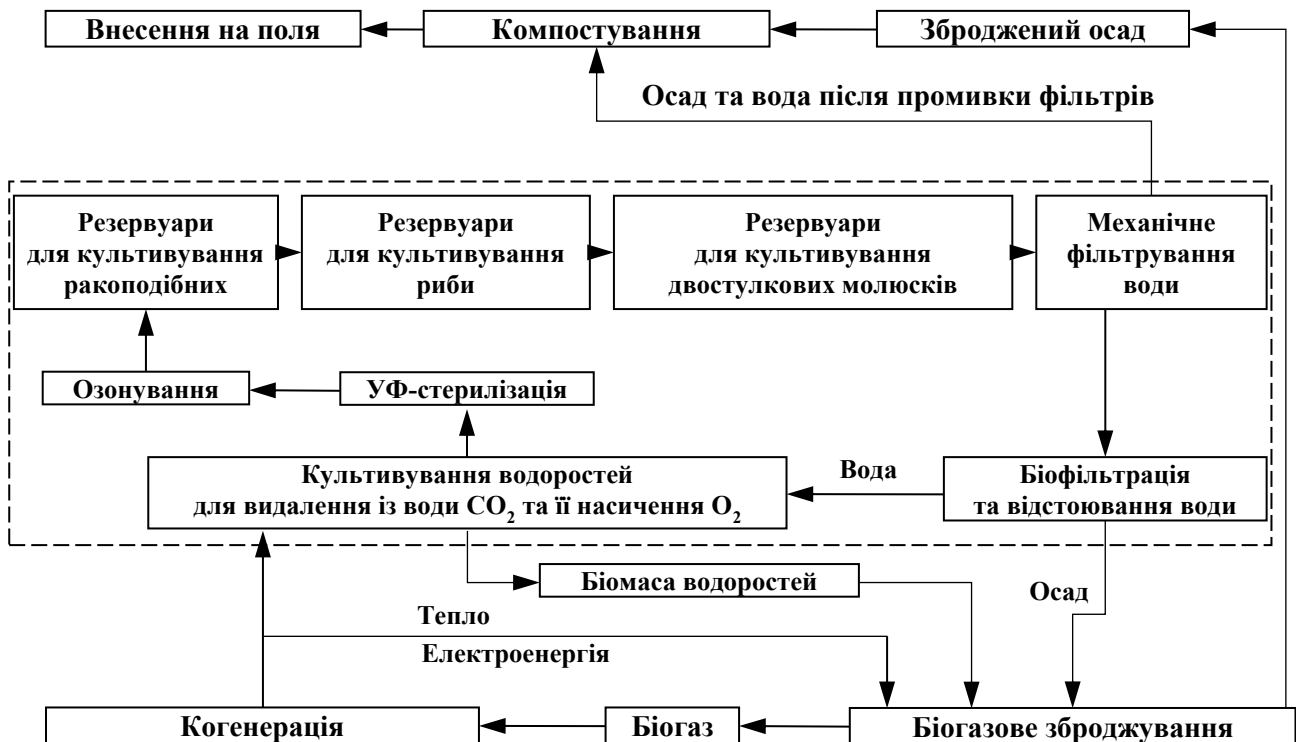


Рис. 1. Блок-схема рециркуляційних систем аквакультури для виробництва ракоподібних, риби і двостулкових молюсків з культивуванням водоростей для очистки води та виробництвом біогазу

Запропонована блок-схема ще не реалізована у повному обсязі, у тому числі на світовому ринку, однак рух у напрямі її наукового обґрунтування та використання є актуальним для багатьох фірм-виробників продукції аквакультури.

Проаналізовано теоретичні та експериментальні дослідження біогазових установок для анаеробного зброджування гною, посліду та осадів стічних вод. Цим питанням присвячено значну кількість наукових робіт відомих вітчизняних і зарубіжних учених: С. М. Кухарця, К. Ф. Форстера, Д. А. Дж. Вейза, Дж. Франса, Дж. Х. М. Торнли, С. Соуфера, О. Забарски Г. А. Голуба, X. Zhang, S. Konontcev, R. C. V. Ferreira, O. A. Маруса, R. A. Leng, R. Gebauer, I. A. Шевченка, Т. Амон, V. Kryvoruchko, П. П. Кучерука та ін.

Наукова гіпотеза роботи: обґрунтування біотехнологічного процесу виробництва біогазу із осаду стічних вод систем штучного вирощування риби може мати суттєвий вплив на показники виробництва метану та підвищення рівня енергетичної автономності рециркуляційних систем аквакультури.

У другому розділі «Теоретичні дослідження процесу біогазового зброджування осаду рециркуляційних систем аквакультури» за основу приведення теоретичних досліджень використано ідеалізовану схему біогазового реактора у вигляді поєднаних ємностей, що вміщують одну завантажену порцію субстрату (рис. 2).

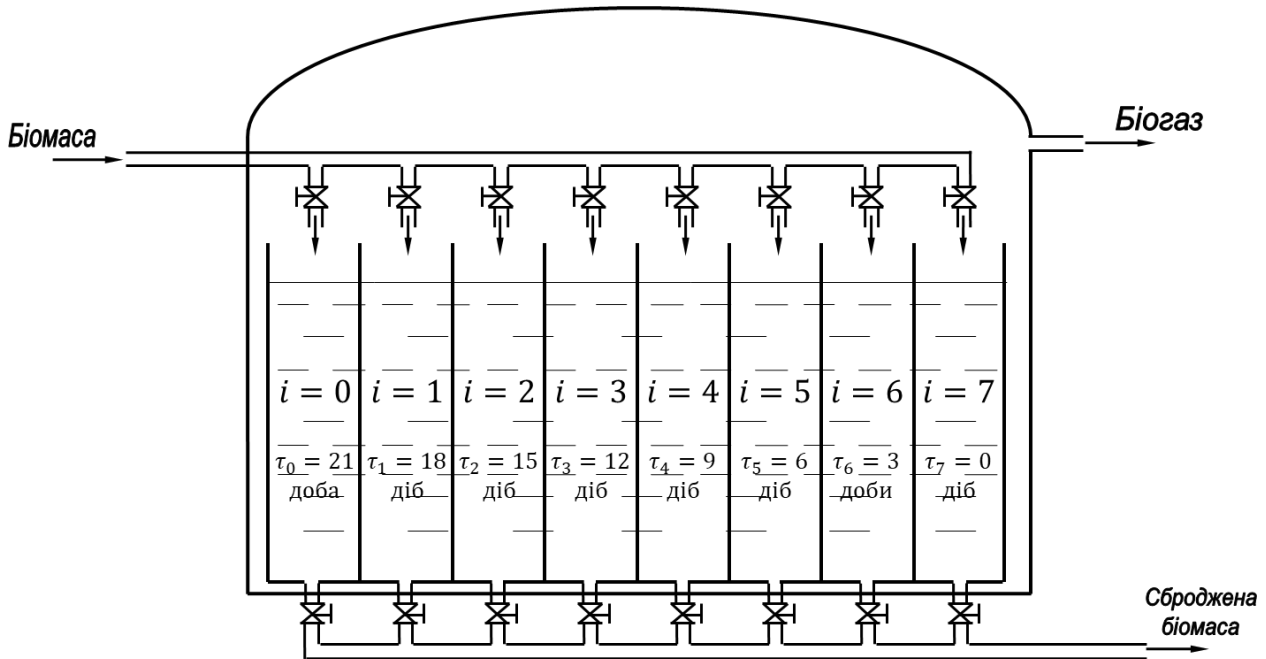


Рис. 2. Ідеалізована схема біогазового реактора у вигляді поєднаних ємностей, що вміщують одну завантажену порцію субстрату

Для таких умов інтегральний середній рівень розкладу органічної біомаси під час анаеробної ферментації становитиме:

$$\alpha = \alpha_0 \left[1 - \exp(-k\tau_{ЗБ}) \frac{\tau_3}{\tau_{ЗБ} + \tau_3} \sum_{i=0}^n \exp(k\tau_3 i) \right]. \quad (1)$$

де α – рівень розкладу органічної речовини на поточний момент часу, відносних од.; $\alpha_0 = \frac{M_0 - M^*}{M_0}$ – максимальний рівень розкладу органічної речовини в процесі анаеробної ферментації, відносних од.; M_0 – загальний уміст органічної речовини біомаси на початок анаеробної ферментації, кг; M^* – уміст органічної речовини біомаси, яка не розкладається під час анаеробної ферментації, кг; k – коефіцієнт швидкості процесу біогазової ферментації, діб⁻¹; $n = \frac{\tau_{ЗБ}}{\tau_3}$ – кількість завантажених порцій біомаси у біогазовому реакторі, од.; $\tau_{ЗБ}$ – час зброджування (загальний час перебування біомаси в реакторі), діб; τ_3 – періодичність завантаження біогазового реактора, діб; $i = 0 \dots n = 0 \dots \frac{\tau_{ЗБ}}{\tau_3}$ – нумерація завантажених порцій біомаси у біогазовий реактор.

Інтегральна середня швидкість розкладу органічної біомаси під час анаеробної ферментації, як диференціал виразу (1), становитиме:

$$\frac{d\alpha}{d\tau_{ЗБ}} = \alpha_0 k \exp(-k\tau_{ЗБ}) \frac{\tau_3}{\tau_{ЗБ} + \tau_3} \sum_{i=0}^n \exp(k\tau_3 i). \quad (2)$$

Розроблено алгоритм розрахунку питомого виходу біогазу під час роботи біогазового реактора в режимі періодичного завантаження, який має наступну послідовність:

1. Визначення густини біомаси, $\rho_{БМ}$, вологості біомаси, $W_{БМ}$ та вмісту органічної маси в сухій речовині біомаси, VS .

2. Визначення залежності для апроксимації експериментальних даних зміни рівня розкладу органічної складової біомаси від часу анаеробного зброджування у вигляді $\alpha = \alpha_0[1 - \exp(-kt)]$.

3. Визначення залежності для апроксимації експериментальних даних зміни питомого виходу метану від часу анаеробного зброджування у вигляді $\gamma = \gamma_0[1 - \exp(-k_{BM}\tau_{ЗБ})]$.

4. Визначення інтегрального значення рівня та швидкості розкладу органічної біомаси й інтегрального значення питомого виходу метану під час анаеробної ферментації біомаси від часу зброджування та періодичності завантаження реактора.

5. Визначення питомого виходу метану η_{BM} та біогазу η_{BM} із реактора під час анаеробної ферментації за нормальних умов.

У третьому розділі «Програма та методика експериментальних досліджень параметрів біотехнологічного процесу виробництва біогазу із осаду стічних вод систем штучного вирощування риби» приведено програму досліджень, яка передбачала визначення: питомого виходу осаду в рециркуляційних системах аквакультури; кількості та рівня ущільнення осаду змивної води рециркуляційних систем аквакультури; кінетичних параметрів анаеробного зброджування та питомого виходу біогазу із осаду рециркуляційних систем аквакультури.

Оцінка питомого виходу осаду в установці для вирощування риби проводилася на базі підприємства з вирощування риби у Васильківському районі Київської області. Один із басейнів був зариблений російським осетром живою масою 31,5 кг, а інший бестером живою масою 52,5 кг. Для проведення досліджень використано установку, схема якої приведена на рис. 3. Вологість осаду визначалася шляхом висушування проб у муфельній печі SNOL 7,2/1100 при температурі 105 °С до постійної маси. Вміст органічної маси в осаді визначався шляхом прожарювання проб у цій же печі температурі 550 °С.

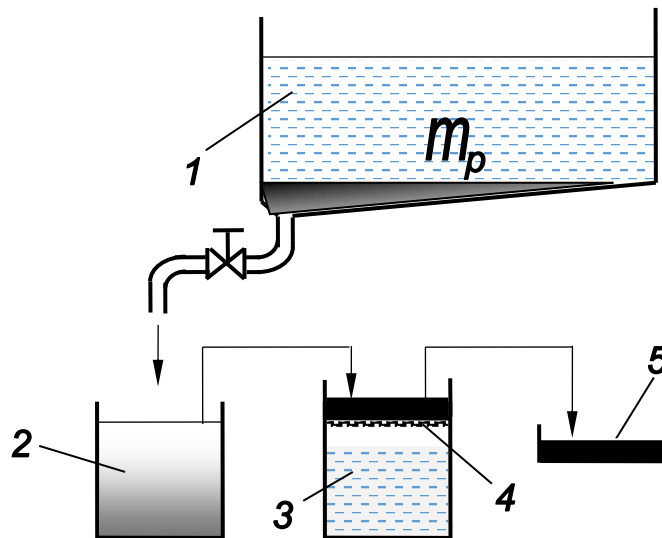


Рис. 3. Загальна схема проведення досліджень з визначення питомого виходу осаду: 1 – басейн для риби; 2 – ємність для збору суміші осаду і води; 3 – фільтрувальна ємність; 4 – фільтр; 5 – ємність для осаду

Розрахунок питомого виходу осаду із розрахунку на масу риби в басейні визначався за наступним виразом:

$$Q_{ПВ} = \frac{m_0 V_{CD}}{V_C m_P} \left(1 + \frac{W_0}{100 - W_0} \right) \quad (3)$$

де $Q_{ПВ}$ – питомий вихід осаду заданої вологості, г осаду/кг риби; m_0 – суха маса осаду, г; V_{CD} – добовий вихід суміші осаду і води в системі, л; V_C – об'єм суміші осаду і води, яка відбиралася для проведення дослідів, л; m_P – загальна маса риби в басейні, кг; W_0 – задана вологість осаду, %.

Дослідження кількості та рівня ущільнення осаду змивної води рециркуляційних систем аквакультури проводилися із використанням стічної змивної води механічного фільтра для рециркуляційних систем аквакультури під час вирощування кларієвого сома (*Clarias gariepinus*) (рис. 4).

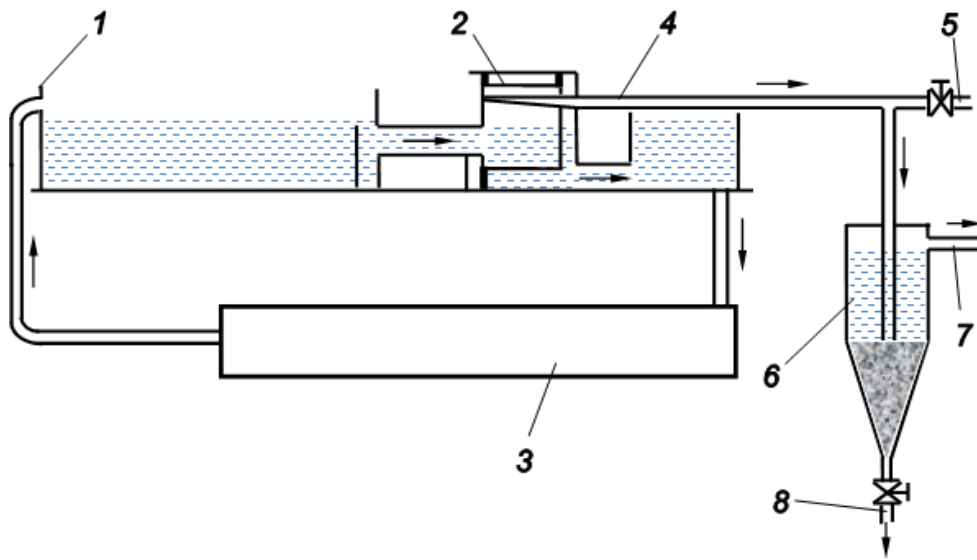


Рис. 4. Загальна схема рециркуляційної системи очистки стічних вод аквакультури та седиментації осаду із стічної промивної води із механічного фільтра: 1 – басейн для риби; 2 – механічний фільтр; 3 – система біологічної очистки води; 4 – трубопровід відводу стічної промивної води із механічного фільтра на утилізацію; 5 – точка відбору проб стічної промивної води; 6 – відстійник; 7 – трубопровід відстояної стічної води; 8 – трубопровід відводу осаду стічної води

На першому етапі досліджень стічна змивна вода механічного фільтра відбиралася у мірні циліндри для відстоювання (рис. 5). Відбір стічної змивної води проводився перед її надходженням у відстійник (позиція 5 на рис. 4).

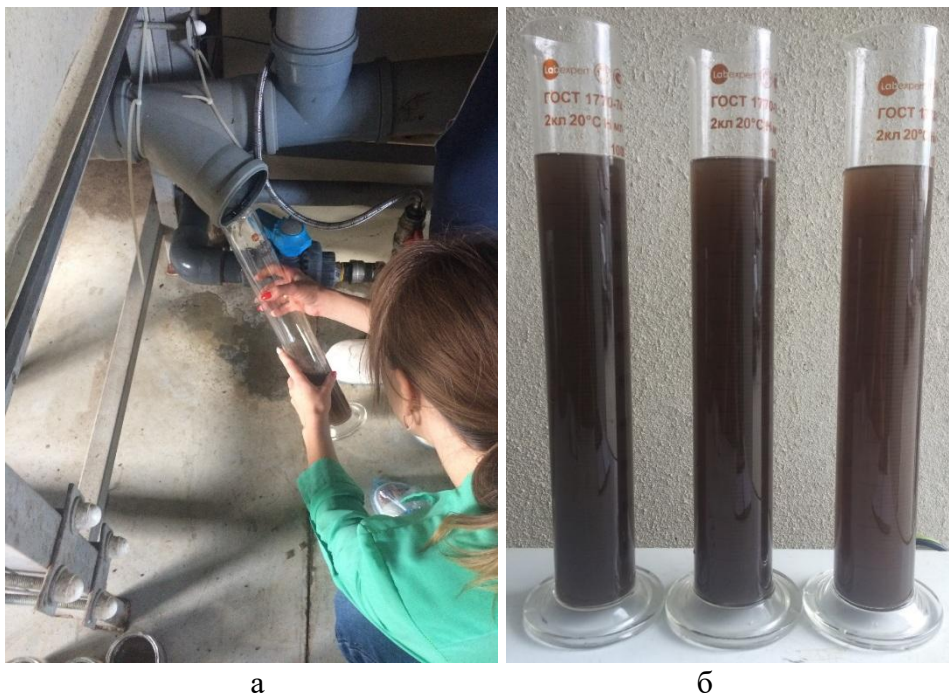


Рис. 5. Загальний вигляд місця відбору проб стічної промивної води стічної (а) та промивної води із механічного фільтра (б) в мірних циліндрах

Досліди проводилися у три різні дні, щоб нівелювати вплив технологічних факторів та у 3-кратній повторності. На основі отриманих даних визначалися стандартне відхилення даних і довірчий інтервал при 5 % рівні значимості для кількості осаду, вмісту сухої речовини в стічній змивній воді механічного фільтра, осаді та відстоюній стічній воді. Кількість осаду визначалася зі зміною часу відстоювання, а вміст сухої речовини у стічній змивній воді механічного фільтра, осаді та відстоюній стічній воді визначалися по закінченню процесу відстоювання.

На другому етапі досліджень стічна змивна вода механічного фільтра відстоювалася у відстійнику (позиція 6 на рис. 4). Відбір осаду та стічної води проводився після відстоювання у відстійнику упродовж доби (рис. 6, рис. 7). Для порівняння вмісту сухої речовини у стічній воді після відстоювання у відстійнику та рециркуляційної води після механічного фільтра відбиралися і аналізувалися проби рециркуляційної води після механічного фільтра.

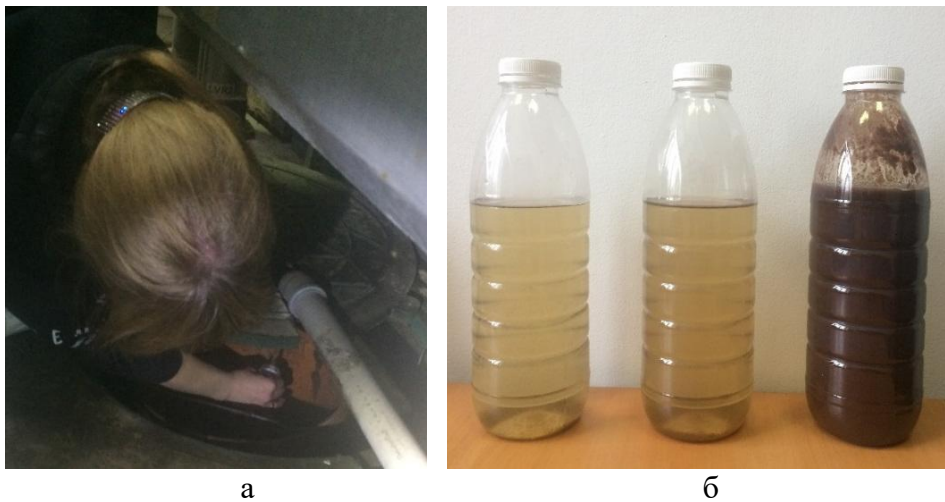


Рис. 6. Загальний вигляд місця відбору проб стічної після відстійника (а) та рециркуляційної води після механічного фільтра, стічної води й осаду після відстоювання у відстійнику упродовж доби (б)



Рис. 7. Загальний вигляд місця відбору проб осаду після відстійника та осаду після відстоювання у відстійнику упродовж доби

Вміст сухої речовини під час проведення досліджень визначався шляхом фільтрування стічних вод і осадів та послідовним висушуванням залишків на фільтрах у сушильній шафі при температурі 105 °С.

Оцінка агрохімічних показників осаду та стічної води після відстоювання у відстійнику проводилося за стандартними методиками у спеціалізованій лабораторії Національного університету біоресурсів і природокористування України.

Об'єктом дослідження процесу анаеробної ферментації був ущільнений осад стічних вод аквакультури, отриманого шляхом відстоювання стічної води у рециркуляційних системах аквакультури під час вирощування нільського кларієвого сома (*Clarias gariepinus*). Дослідження проводилися на базі лабораторії виробництва біогазу Інституту технічної теплофізики НАН України. Загальний вигляд експериментальної установки приведено на рис. 8.

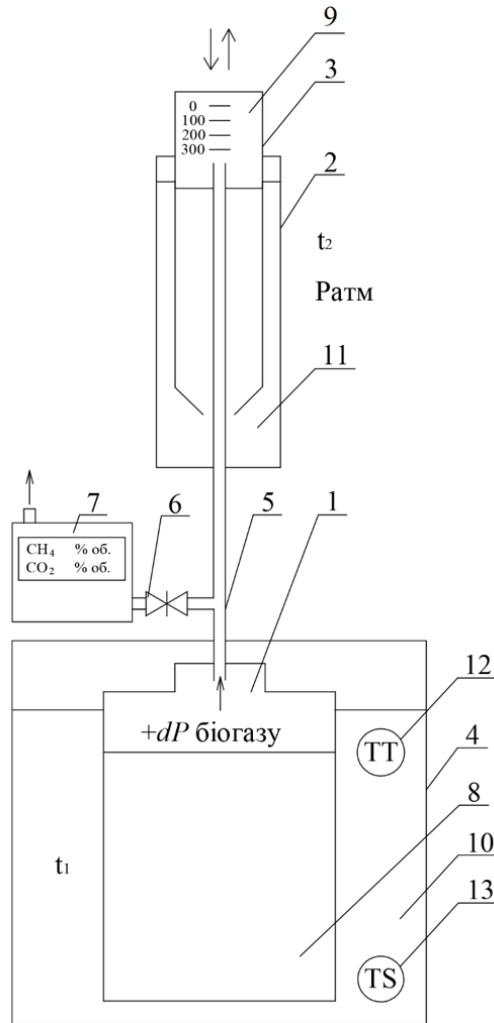


Рис. 8. Принципова схема одиної системи дослідної установки: 1 – ємність біореактора; 2 – нерухома частина евідіометра; 3 – рухома частина евідіометра; 4 – ємність з теплоносієм; 5 – трубка з ПВХ для руху біогазу; 6 – газовий запірний кран; 7 – газоаналізатор; 8 – робоче середовище біореактора; 9 – внутрішній простір евідіометра з біогазом; 10 – теплоносій (вода); 11 – 5 % водний розчин NaCl; 12 – ртутний термометр; 13 – терморегулятор

Експериментальне дослідження процесу анаеробного зброджування осаду стічної змивної води проводилися в урахуванням положень, викладених в німецькому стандарті VDI 4630:2016. Відібрані проби осаду стічної змивної води, а також інокулят, було проаналізовано на предмет вмісту сухих речовин та зольності. Інокулят, що містив активну популяцію метаногенних бактерій та архей, отримано в лабораторних умовах у процесі метанового бродіння органічних матеріалів змінного виду і складу. На основі даних про вміст сухої органічної речовини в осадах та в інокуляті було підготовлено тестові суміші. Після внесення дослідних сумішей в реактори, в залишковий газовий простір реакторів було подано газоподібний азот з метою витіснення кисню повітря, після чого кожен реактор було герметично з'єднано з евідіометром за допомогою гнучкої силіконової трубки. Утворення

біогазу в реакторі приводило до збільшення його парціального тиску в газовому просторі евідіометра, в результаті чого рухома частина евідіометра піднімалася на певну висоту. Рухома частина евідіометра є градуйованою в мл. Зчитування об'єму виділеного біогазу проводилося візуально. Абсолютна похибка візуального зчитування об'єму накопиченого в евідіометрі біогазу складала ± 10 мл. Відносна похибка візуальної фіксації об'єму виділеного біогазу не перевищувала 2 % кумулятивного виходу біогазу, виділеного за весь період експерименту. Повторність кожної із трьох дослідних сумішей дослідів була трикратною.

Рівень розкладу сухої органічної речовини визначався як відношення маси виділеного біогазу до початкової маси сухої органічної речовини осаду, внесеного в реактор та із урахуванням приросту біомаси бактерій в реакторі згідно положень, викладених у німецькому стандарті VDI 4630:2016.

Температурний режим в реакторах (36 ± 0.2 °C) забезпечувався за допомогою нагрівального елемента для водних середовищ з терморегулятором. Вимірювання температури проводилося за допомогою температурного датчика, встановленого в ємності з теплоносієм (водою). Вимірювання вмісту CH_4 та CO_2 у виділеному біогазі проводилося за допомогою портативного газоаналізатора Landtec GEM-500. Експериментальні дані оброблялися шляхом визначення середнього значення результатів вимірювань та їх довірчого інтервалу. Визначення параметрів анаеробного зброджування для умов, коли в біогазовому реакторі знаходиться декілька порцій осаду, які знаходяться на різних стадіях рівня розкладу сухої органічної речовини проводилося на основі власних теоретичних досліджень.

У четвертому розділі «**Результати експериментальних досліджень процесу біогазового зброджування осаду рециркуляційних систем аквакультури**» приведено результати досліджень питомого виходу осаду в рециркуляційних системах аквакультури, на основі яких здійснювався перерахунок виходу осаду на вологість оптимальну для біогазового зброджування (рис. 9).

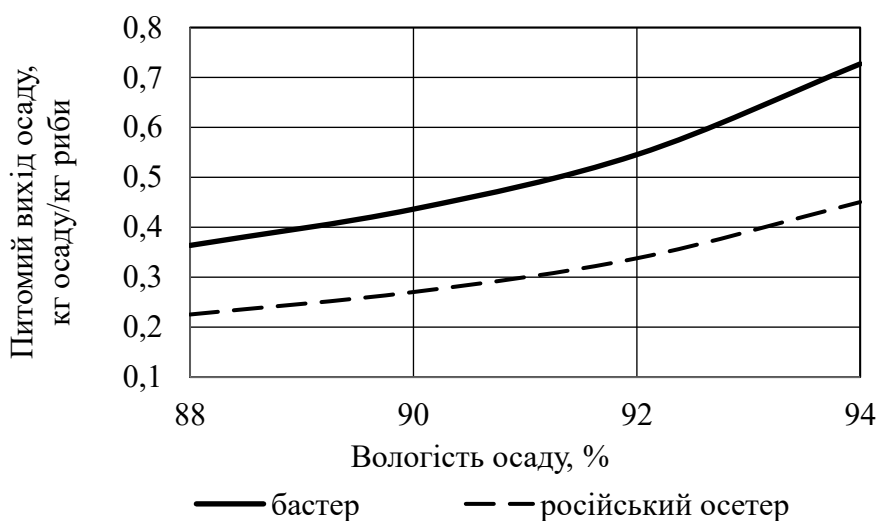


Рис. 9. Зміна питомого виходу осаду в залежності від його вологості та виду риби

Встановлено, що питомий вихід сухої маси осаду в рециркуляційних системах аквакультури становить від 0,027 при вирощуванні російського осетра до 0,044 г осаду/кг при вирощуванні бастера. Перерахунок питомого виходу осаду на вологість оптимальну для біогазового зброджування показав, що в такому випадку питомий вихід осаду в рециркуляційних системах аквакультури збільшується в 10 разів і становить від 0,27 при вирощуванні російського осетра до 0,44 г осаду/кг риби при вирощуванні бастера.

Було також встановлено, що випадіння осаду із стічної води відбувається за 3–4 хв, а в подальшому, упродовж 15 хв, відбувається поєднання очищення (освітлення) стічної води та ущільнення осаду під дією ваги стічної води. Цей процес завершається упродовж 20 хв (рис. 10). Таким чином можна вважати, що рівень відстоювання осаду стічної змивної води

механічного фільтра становить біля 7 % від загальної кількості стічної змивної води механічного фільтра.

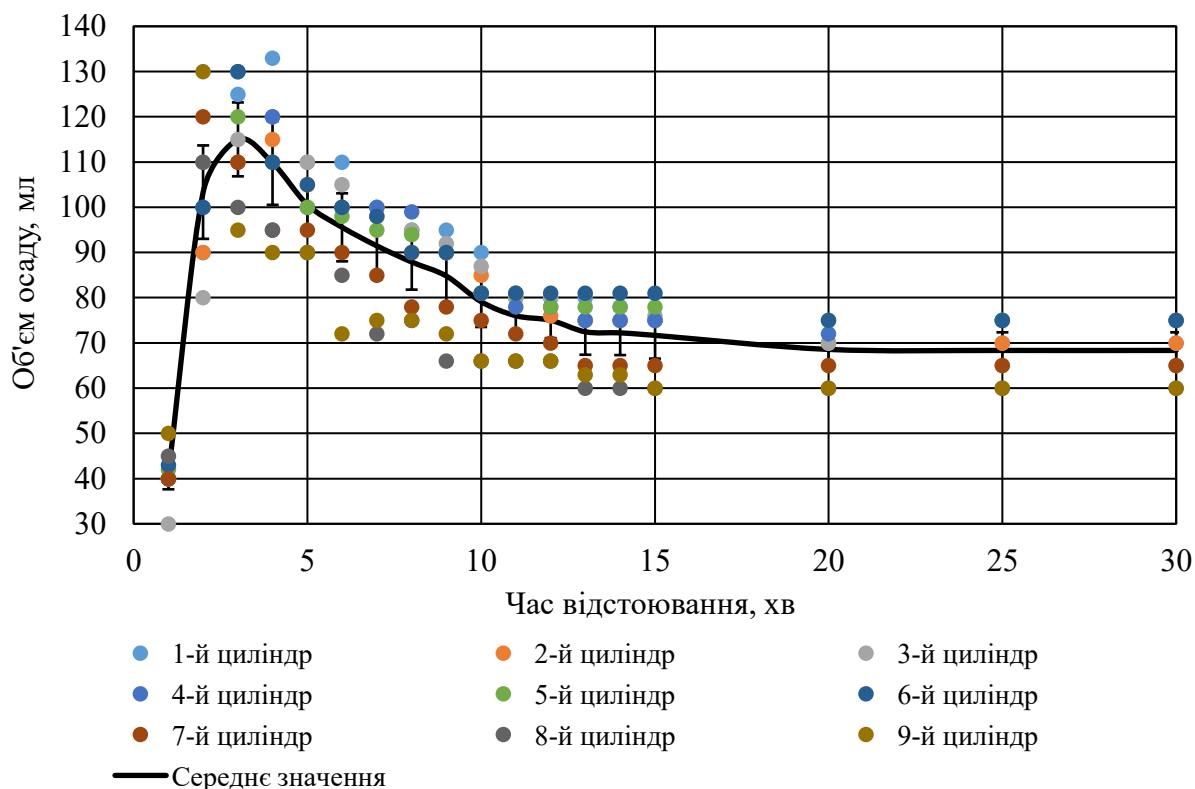


Рис. 10. Залежність об'єму осаду від часу відстоювання у мірних циліндрах

Осад після відстоювання у відстійнику упродовж доби піддавався подальшому відстоюванню у мірних циліндрах. Було встановлено, що об'єм осаду продовжує знижуватися упродовж 15 діб. Максимальне значення зменшення рівня осаду становило 45 %. На основі цих даних було встановлено, що при відстоюванні осаду упродовж 15 діб, його розрахункова вологість становила близько 92,8 %.

Відстоювання осаду безпосередньо у відстійнику упродовж 15 діб дозволило отримати диференціальний та інтегральний розподіл результатів визначення вологості осаду (рис. 11).

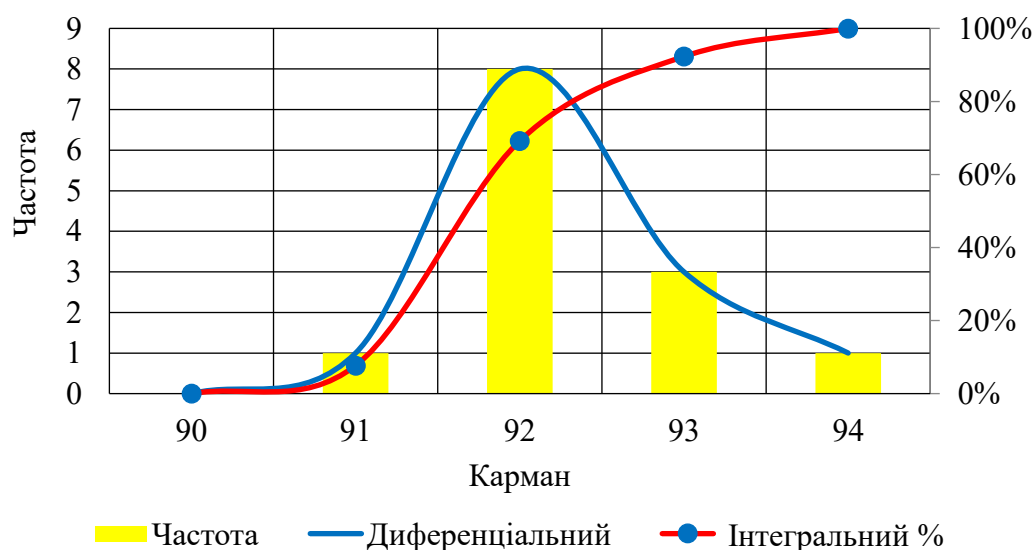


Рис. 11. Розподіл значень вологості осаду після відстоювання у відстійнику упродовж 15 діб

Було встановлено, що вологість осаду на рівні 92 % може бути отримана після відстоювання осаду упродовж 15 діб із ймовірністю 69,23 %. Що стосується вологості осаду на рівні 93 %, то її можна отримати після відстоювання осаду упродовж 15 діб із ймовірністю 92,31 %. Під час проведення досліджень зразків осаду із вологістю більше 94 % не отримано.

Оцінка агрохімічних показників осаду після відстоювання у відстійнику упродовж 15 діб показала (на вихідну вологу), що масова частка загального азоту (N) становила $0,28 \pm 0,01$ %, загального фосфору (P_2O_5) $0,28 \pm 0,03$ %, а масова частка загального калію (K_2O) $0,01 \pm 0,002$ %. Слід відмітити, що рівень загального азоту становить таку ж величину, як і рівень загального фосфору, що є особливо цінним для ґрунтів в Україні, які збіднені на фосфор.

Використання для відстоювання стічної змивної води механічних фільтрів та отриманого осаду за допомогою мірних циліндрів та експериментальних відстійників показало суттєву відмінність отриманих результатів. Це обумовлено динамічним режимом відстоювання у відстійнику, який працював у безперервному режимі, а також ущільненням осаду під дією ваги самого осаду та стічної води у відстійнику. Дослідження показали доцільність створення системи відстоювання на основі двох відстійників: перший – для відстоювання стічної змивної води механічних фільтрів; другий: – для відстоювання осаду, отриманого на першій стадії відстоювання. Відстій, отриманий на першій стадії відстоювання, може бути повернутий у рециркуляційну систему аквакультури у випадку ефективної роботи системи біологічної очистки рециркуляційної води.

Після проведення експерименту та обробки експериментальних даних було встановлено, що поточне розрахункове значення рівня анаеробного зброджування сухої органічної речовини ущільненого осаду рециркуляційних систем аквакультури можна представити наступним експоненціальним виразом:

$$\alpha = \alpha_0 [1 - \exp(-k_F \tau_{ЗБ})] = 0,74 [1 - \exp(-0,108 \tau_{ЗБ})], \quad (4)$$

де $\alpha_0 = 0.74$ відн. од. – максимальне значення рівня анаеробного зброджування сухої органічної речовини (згідно рис. 12); $k_F = 0.108$ відн. од./добу – швидкість процесу анаеробної ферментації.

Графік значень рівня анаеробного зброджування сухої органічної речовини за кожною повторністю, середнє значення рівня анаеробного зброджування сухої органічної речовини та розрахункове значення рівня анаеробного зброджування сухої органічної речовини приведено на рис. 12.

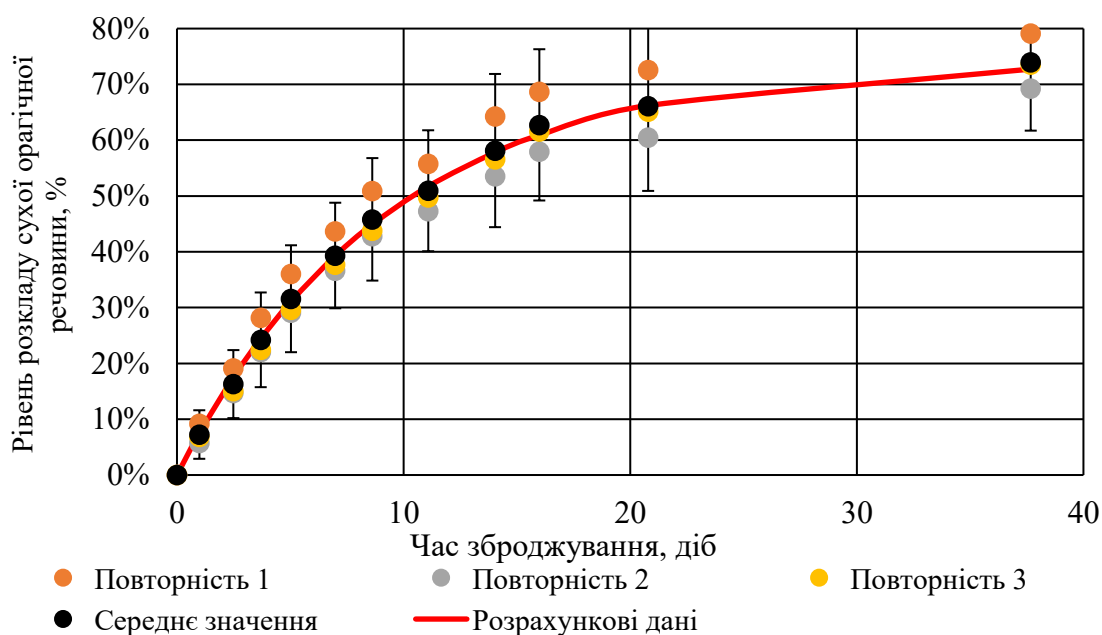


Рис. 12. Експериментальна залежність рівня розкладу сухої органічної речовини від часу зброджування

Отримана залежність (4) знаходиться в межах довірчого інтервалу результатів експериментальних досліджень, а тому адекватно їх описує. Це дало підстави використати отриману залежність для опису реальних умов анаеробного зброджування, коли в біогазовому реакторі знаходиться декілька порцій осаду, які знаходяться на різних стадіях рівня розкладу сухої органічної речовини.

Таким чином, із урахуванням виразу (4), розрахункове значення інтегрального середнього рівня анаеробного зброджування сухої органічної речовини та інтегральна середня швидкість розкладу органічної біомаси під час анаеробної ферментації будуть мати наступний вигляд:

$$\alpha = 0,74 \left[1 - \exp(-0,108\tau_{3Б}) \frac{\tau_3}{\tau_{3Б} + \tau_3} \sum_{i=0}^{n=\frac{\tau_{3Б}}{\tau_3}} \exp(0,108\tau_3 i) \right]; \quad (5)$$

$$\frac{d\alpha}{d\tau_F} = 0,74 \times 0,108 \exp(-0,108\tau_{3Б}) \frac{\tau_3}{\tau_{3Б} + \tau_3} \sum_{i=0}^{n=\frac{\tau_{3Б}}{\tau_3}} \exp(0,108\tau_3 i). \quad (6)$$

Розрахунки показали, що інтегральний середній рівень розкладу сухої органічної речовини упродовж 21 доби анаеробного зброджування може досягати лише 0,43 відн. од. Очевидно, що це обумовлено тим, що кожна порція біомаси в реакторі, крім першої, має рівень розкладу сухої органічної речовини менший, ніж перша порція. Було також встановлено, що інтегральна середня швидкість розкладу сухої органічної речовини максимальна у початковий момент зброджування і на 21 добу встановлюється на рівні 0,033 відн. од. за добу. Отримані рівняння (5) та (6) можуть бути використані для оцінки інтенсивності зброджування при заданому часі зброджування, періодичності завантаження біогазового реактора та кількості завантажених порцій в реакторі.

Було встановлено, що поточне розрахункове значення питомого виходу метану можна представити наступним експоненціальним виразом:

$$\gamma = \gamma_0 [1 - \exp(-k_{BM}\tau_{3Б})] = 585,393 [1 - \exp(-0,21\tau_{3Б})], \quad (7)$$

де γ – поточне розрахункове значення питомого виходу метану, мл (н.у.)/г СОРр; $\gamma_0=585.393$ мл (н.у.)/г СОРр – максимальне значення виходу метану; $k_{BM}=0.21$ мл (н.у.)/г СОРр/добу – швидкість зміни питомого виходу метану.

Отримана залежність (7) знаходиться в межах довірчого інтервалу результатів експериментальних досліджень, що дозволяє зробити висновок про її адекватність. Графік значень питомого виходу метану за кожною повторністю, середнє значення питомого виходу метану та розрахункове значення питомого виходу метану приведено на рис. 13.

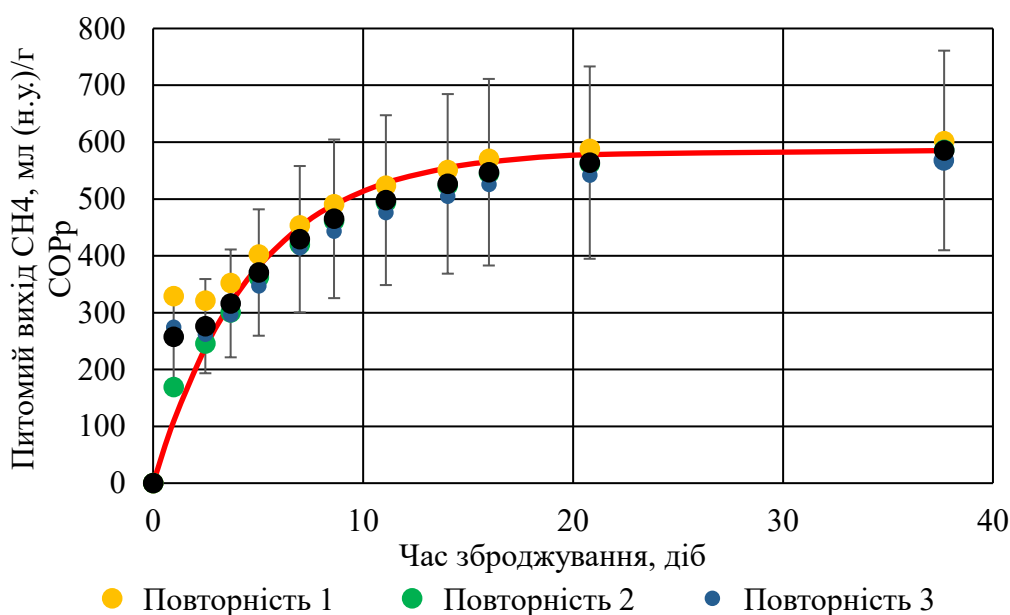


Рис. 13. Експериментальна залежність питомого виходу метану на одиницю розкладеної сухої органічної речовини (СОРр) від часу зброджування

В умовах анаеробного збродження в біогазовому реакторі декількох порцій осаду, які знаходяться на різних стадіях рівня розкладу сухої органічної речовини, а відповідно і питомого виходу метану, визначення питомого виходу метану можна провести на основі розрахункового значення інтегрального середнього питомого виходу метану на основі (7):

$$\gamma = 585,393 \left[1 - \exp(-0,21\tau_{3Б}) \frac{\tau_3}{\tau_{3Б} + \tau_3} \sum_{i=0}^{n=\frac{\tau_{3Б}}{\tau_3}} \exp(0,21\tau_3 i) \right]. \quad (8)$$

Питомий вихід метану на одиницю біомаси в реакторі залежить від вмісту органічної маси в реакторі і визначається швидкістю розкладу органічної біомаси осаду та питомим виходом метану із одиниці розкладеної органічної біомаси.

Це може бути формалізовано наступним чином:

$$\eta = \rho \left(1 - \frac{W}{100} \right) \frac{VS}{100} \frac{d\alpha}{d\tau_F} \gamma, \quad (9)$$

де η – питомий вихід метану на одиницю біомаси в біогазовому реакторі, м³/т добу⁻¹; ρ – густина біомаси, т/м³; W – вологість біомаси, %; VS – вміст сухої органічної речовини в біомасі; γ – питомий вихід метану на одиницю маси розкладеної сухої органічної речовини, м³ (н. у.)/т СОРр.

Розрахунок питомого виходу метану на одиницю біомаси в біогазовому реакторі згідно виразу (8) приведено на рис. 14.

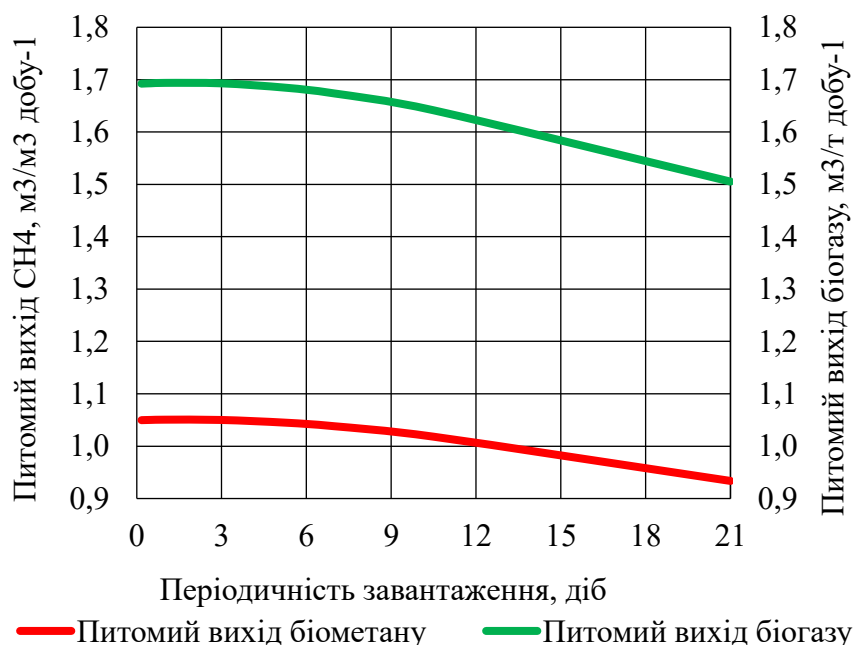


Рис. 14. Питомий вихід метану під час анаеробної ферментації та питомий вихід метану на одиницю біомаси в залежності від періодичності завантаження біогазового реактора при часі збродження $\tau_{3Б}=21$ доба

Встановлено, що питомий вихід метану під час анаеробної ферментації має максимальне значення в залежності від періодичності завантаження біогазового реактора на рівні 1,05 м³ метану на куб. м біомаси в реакторі за одну добу при періодичності завантаження біогазового реактора від 1 до 3 діб.

У п'ятому розділі «**Результати виробничої перевірки та оцінки економічної ефективності застосування біотехнологічного процесу біогазового збродження осаду рециркуляційних систем аквакультури**» приведено результати розроблення інженерної методики розрахунку параметрів біотехнологічного процесу біогазового збродження осаду рециркуляційних систем аквакультури. Розраховано економічну ефективність процесу біогазового збродження осаду рециркуляційних систем аквакультури, у результаті якої було встановлено, що при часі збродження 21 доба, максимальному значенні питомого виходу метану 1,05 м³ на один куб. м біомаси в реакторі за одну добу, розрахунковий прибуток

від виробництва метану становив 5,63 грн/м³, прибуток від виробництва електроенергії на основі метану 3,73 грн/кВт год. Впровадження обладнання для підготовки змивної води механічних фільтрів до анаеробного зброджування із продуктивністю за кількістю змивної води 1577 м³/рік в ТОВ «Аква Систем Органік» дозволило отримати фактичний економічний ефект 10 тис. грн/м³ ущільненого осаду та додатковий розрахунковий прибуток від виробництва електроенергії на основі метану – 250 грн/м³ збродженого осаду.

ВИСНОВКИ

У дисертації наведено обґрунтування показників ущільнення осаду та біотехнологічного процесу анаеробного зброджування в метантенках із періодичним завантаженням ущільненого осаду стічних вод систем штучного вирощування риби.

1. Основним недоліком рециркуляційних систем аквакультури є відсутність можливості утилізації промивної води механічних фільтрів, а тому виробництво метану із ущільненого осаду стічних вод систем штучного вирощування риби сприятиме виробництву додаткової енергії та біологічній деградації органічних речовин, що потребує відповідного наукового обґрунтування біотехнологічного процесу виробництва біогазу із осаду стічних вод систем штучного вирощування риби.

2. Вихід метану в біотехнологічному процесі анаеробного зброджування біомаси в метантенках із періодичним завантаженням визначається інтегральними середніми швидкостями розкладу органічної біомаси та виходу метану в залежності від часу зброджування та періодичності завантаження біогазового реактора, що дає змогу розробити удосконалений алгоритм розрахунку питомого виходу метану.

3. Встановлено, що перша стадія ущільнення змивної води механічних фільтрів систем штучного вирощування риби дозволяє видаляти осад в кількості 7 % від загальної кількості стічної води із вологістю після відстійника на рівні 96–97 %. Встановлено також, що друга стадія відстоювання осаду у відстійнику упродовж 15 діб дозволило отримати диференційний та інтегральний розподіл результатів визначення вологості осаду, які показали, що вологість осаду на рівні 92 % може бути отримана із ймовірністю 69,23 %, а вологість на рівні 93 % – із ймовірністю 92,31 %.

4. Встановлено, що інтегральний середній рівень розкладу органічної речовини упродовж 21 доби анаеробного зброджування в метантенку із періодичним завантаженням може досягати 0,43 відн. од., а інтегральна середня швидкість розкладу встановлюється на рівні 0,033 відн. од. за добу. Встановлено, що питомий вихід метану під час анаеробної ферментації має максимальне значення в залежності від періодичності завантаження біогазового реактора. Це значення становить 1,05 м³ метану на один кубічний метр біомаси в реакторі за одну добу при періодичності завантаження біогазового реактора від 1 до 3 діб. Із урахуванням щільності біомаси та концентрації метану в біогазі, значення виходу біогазу із реактора за нормальних умов становитиме 1,69 м³ на одну тону біомаси в реакторі за одну добу, що не більше, ніж на 6,5 % перевищує середні значення, що приводяться в літературних джерелах, де досліджувався вихід біогазу.

5. Розрахунок економічних показників виробництва метану із осаду, отриманого після двохстадійного гравітаційного ущільнення стічних вод систем штучного вирощування риби показав, що при оптимальному значенні питомого виходу метану, розрахунковий прибуток від виробництва метану становив 5,63 грн/м³, а прибуток від виробництва електроенергії на основі метану 3,73 грн/кВт год. Впровадження обладнання для підготовки змивної води механічних фільтрів до анаеробного зброджування з метою отримання біогазу із продуктивністю за кількістю змивної води механічних фільтрів 1577 м³/рік в ТОВ «Аква Систем Органік» дозволить отримати додаткову виручку від реалізації 10 тис. грн/м³ ущільненого осаду та додатковий розрахунковий прибуток від виробництва електроенергії на основі метану – 250 грн/м³ збродженого осаду.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

**Статті у періодичних наукових виданнях,
включених до категорії «А» Переліку наукових фахових видань України
та/або в закордонних виданнях, проіндексованих у базах даних
Web of Science Core Collection та/або Scopus**

1. Golub G., Kukharets S., **Zavadska O. (Yaremenko O.)**, Marus O. Determination of the rate of organic biomass decomposition in biogas reactors with periodic loading. International Journal of Renewable Energy Research. 2019. Vol. 9. No. 4. P. 1741–1750. *(Здобувачкою визначено інтегральні рівні та швидкість процесу розкладу сухої органічної речовини під час процесу анаеробного зброджування біомаси у біогазових реакторах, розроблено алгоритм розрахунку питомого виходу біогазу).*

2. Golub G., **Zavadska O. (Yaremenko O.)**, Kukharets V. Development of block-scheme of installation of closed water supply for production of aquaculture products. Scientific Horizons. 2019. No. 5. P. 105–111. *(Здобувачкою розроблено блок-схему рециркуляційних систем аквакультури та проведено їх аналіз).*

3. Четверик Г. О., **Яременко О. А.**, Голуб Г. А. Передумови забезпечення енергетичної автономності підприємств аквакультури. Відновлювана енергетика. 2023. No. 2 (73). P. 66–75. *(Здобувачкою розроблено блок-схеми рециркуляційних систем аквакультури та проведено їх аналіз).*

4. Golub G., **Yaremenko O.**, Kucheruk P., Marus O., Tsyvenkova N., Nadykto V., Chuba V., Yarosh Y. Defining indicators for the anaerobic fermentation process of aquaculture wastewater sediments. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2024. Vol. 6/8(132). P. 66–78. *(Здобувачкою проведено експериментальні дослідження та виконано їх аналіз).*

5. Golub G., **Yaremenko O.**, Marus O., Tsyvenkova N., Chetveryk H. Sedimentation properties of aquaculture wastewater sludge during the cultivation of *Clarias gariepinus*. Відновлювана енергетика. 2025. № 1 (80). P. 148–158. *(Здобувачкою проведено експериментальні дослідження та виконано їх аналіз).*

**Статті у наукових виданнях,
включених до Переліку наукових фахових видань України**

6. Голуб Г. А., **Завадська О. А. (Яременко О.)**, Щербак С. Д. Дослідження виходу та властивостей осаду в установках для виробництва продукції аквакультури. Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. 2019. Вип. 10. № 2. С. 83–88. *(Здобувачкою проведено експериментальні дослідження та виконано їх аналіз).*

7. Голуб Г., Кепко О., **Яременко О.**, Марус О., Кепко В. Ефективність виробництва біогазу в аграрному виробництві. Електромеханічні і енергозберігаючі системи. 2023. № 1 (61). С. 26–33. *(Здобувачкою виконано розрахунки економічної ефективності виробництва біогазу).*

Патенти України на винаходи

8. Голуб Г. А., Швець Р. Л., **Завадська О. А. (Яременко О.)**, Чуба В. В., Дворник А. В., Гох В. В. Метантенк: патент на винахід № 113249. Україна: МПК C02F 11/04, A01C 3/02, C02F 3/28, C02F 103/20, 2016. Заявка № а 2016 11159; заявлено 13.11.2015; опубліковано 26.12.2016. Бюл. № 24. 3 с. *(Здобувачкою проведено патентний пошук і розроблено конструкцію метантенка).*

9. Голуб Г. А., **Завадська О. А. (Яременко О.)**, Павленко М. Ю., Чуба В. В., Осипчук О. Ю. Відстійник: патент на винахід № 114971. Україна: МПК C02F 1/52, C02F 103/00, B01D 21/02, B01D 21/24, 2017. Заявка № а 2015 11160; заявлено 13.11.2015; опубліковано 28.08.2017. Бюл. № 16. 3 с. *(Здобувачкою проведено патентний пошук і розроблено конструкцію відстійника).*

Патенти України на корисні моделі

10. Голуб Г. А., **Завадська О. А. (Яременко О.)**, Кузьменко М. С., Кухарець С. М., Щербак С. Д., Маєвська А. Г. Установка замкнутого водопостачання для виробництва продукції аквакультури: патент на корисну модель № 116270. Україна: МПК А01К 61/10, А01К 63/00, 2017. Заявка № а 2016 12663; заявлено 12.12.2016; опубліковано 10.05.2017. Бюл. № 9. 2 с. *(Здобувачкою проведено патентний пошук і розроблено конструкцію установки)*.

11. Голуб Г. А., Маєвська А. Г., **Завадська О. А. (Яременко О.)**, Щербак С. Д. Установка замкнутого водопостачання для виробництва продукції аквакультури: патент на корисну модель № 125463. Україна: МПК А01К 61/00, 2018. Заявка № u 2017 12145; заявлено 11.12.2017; опубліковано 10.05.2018. Бюл. № 9. 2 с. *(Здобувачкою проведено патентний пошук і розроблено конструкцію установки)*.

12. Щербак С. Д., Голуб Г. А., **Завадська О. А. (Яременко О.)**, Маєвська А. Г. Установка замкнутого водопостачання для виробництва продукції аквакультури: патент на корисну модель № 125464. Україна: МПК А01К 61/00, 2018. Заявка № u 2017 12146; заявлено 11.12.2017; опубліковано 10.05.2018. Бюл. № 9. 2 с. *(Здобувачкою проведено патентний пошук і розроблено конструкцію установки)*.

13. Голуб Г. А., **Завадська О. А. (Яременко О.)**, Щербак С. Д., Чуба В. В., Маєвська А. Г. Установка замкнутого водопостачання для виробництва продукції аквакультури: патент на корисну модель № 125465. Україна: МПК А01К 61/00, 2018. Заявка № u 2017 12147; заявлено 11.12.2017; опубліковано 10.05.2018. Бюл. № 9. 2 с. *(Здобувачкою проведено патентний пошук і розроблено конструкцію установки)*.

Навчальний посібник, науково-методичні рекомендації

14. Голуб Г. А., Сидорчук О. В., Кухарець С. М., Гох В. В., Осауленко С. В., **Завадська О. А. (Яременко О.)**, Рубан Б. О., Поліковська Н. Л., Швець Р. Л., Чуба В. В., Павленко М. Ю. Технологія переробки біологічних відходів у біогазових установках з обертовими реакторами: науково-методичні рекомендації. Київ: НУБіП України, 2014. 106 с. *(Здобувачкою обґрунтовано параметри процесу анаеробного зброджування біомаси у біогазових реакторах)*.

15. Голуб Г. А., Цивенкова Н. М., Марус О. А., Павленко М. Ю., **Яременко О. А.** Машини та обладнання для біоенергетики: навчальний посібник. Київ: НУБіП України, 2022. 203 с. *(Здобувачкою підготовано розділи щодо обґрунтування параметрів процесу анаеробного зброджування біомаси у біогазових реакторах)*.

Тези наукових доповідей

16. **Завадська О. А. (Яременко О.)**, Голуб Г. А. Удосконалена блок-схема установки замкнутого водопостачання для виробництва продукції аквакультури. Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні: ІХ Міжнародна науково-практична конференція, м. Львів, 6–7 квітня 2017 року: тези доповіді. Львів, 2017. С. 121–122. *(Здобувачкою розроблено блок-схему установки та проведено її аналіз)*.

17. Голуб Г. А., **Завадська О. А. (Яременко О.)** Стан та перспективи розвитку установок замкнутого водопостачання для аквакультури. Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь: ІV Всеукраїнська науково-практична конференція, м. Житомир, 28–29 березня 2018 року: тези доповіді. Житомир, 2018. С. 29–32. *(Здобувачкою проаналізовано стан та перспективи розвитку установок замкнутого водопостачання для аквакультури)*.

18. **Завадська О. А. (Яременко О.)**, Голуб Г. А. Тенденції розвитку виробництва продукції аквакультури в установках замкнутого водопостачання. Кліматичні зміни та сільське господарство: Міжнародна науково-практична конференція за участю ФАО,

м. Київ, 13–14 березня 2018 року: тези доповіді. Київ, 2018. С. 301–303. *(Здобувачкою проаналізовано тенденції розвитку виробництва продукції аквакультури).*

19. Голуб Г. А., **Завадська О. А. (Яременко О.)** Екологічна актуальність виробництва продукції аквакультури в установках замкнутого водопостачання. Біоенергетичні системи в агропромисловому виробництві: II Міжнародна науково-практична конференція, м. Житомир, 15–16 листопада 2018 року: тези доповіді. Житомир, 2018. С. 30–35. *(Здобувачкою проаналізовано екологічну актуальність виробництва продукції аквакультури).*

20. Голуб Г. А., **Завадська О. А. (Яременко О.)** Інтеграція аграрного виробництва та аквакультури. Водні екосистеми у контексті євроінтеграції: реалії та перспективи: Міжнародна науково-практична конференція, м. Житомир, 21–22 березня 2019 року: тези доповіді. Житомир, 2019. С. 75–78. *(Здобувачкою проаналізовано можливість інтеграції аграрного виробництва та аквакультури).*

21. Голуб Г. А., **Завадська О. А. (Яременко О.)** Аквакультура в системі аграрного виробництва. Крамаровські читання: VI Міжнародна науково-технічна конференція, м. Київ, 21–22 лютого 2019 року: тези доповіді. Київ, 2019. С. 336–338. *(Здобувачкою проаналізовано можливість аквакультури в агровиробництві).*

22. Голуб Г. А., **Завадська О. А. (Яременко О.)** Апроксимація експоненціальними залежностями рівня розкладу органічної біомаси під час анаеробного зброджування. Агроінженерія: сучасні проблеми та перспективи розвитку: II Міжнародна науково-практична конференція, присвячена 90-й річниці з дня заснування механіко-технологічного факультету НУБіП України, м. Київ, 7–8 листопада 2019 року: тези доповіді. Київ, 2019. С. 65–68. *(Здобувачкою проаналізовано можливості апроксимації рівня розкладу органічної біомаси).*

23. Голуб Г. А., **Завадська О. А. (Яременко О.)** Системи аквакультури на основі замкнутого водопостачання. Науково-технічні засади розробки, випробування та прогнозування сільськогосподарської техніки і технологій: XIX Міжнародна наукова конференція, с. Дослідницьке, 13 вересня 2019 року: тези доповіді. Дослідницьке, 2019. С. 128–130. *(Здобувачкою проаналізовано системи аквакультури на основі замкнутого водопостачання).*

24. Golub G., Kukharets S., Yarosh Y., **Zavadska O. (Yaremenko O.)** Diversified production and bioenergy conversion for rural development. Proceedings of the 8th International Scientific Conference Rural Development 2017, Lithuania, 2017. *(Здобувачкою проаналізовано використання аквакультури в системі біоенергоконверсії).*

25. Golub G., Kukharets S., Yarosh Ya., **Zavadska O. (Yaremenko O.)** Structural models of agroecosystems and calculation of their energy autonomy. Proceedings of the 18th International Scientific Conference Engineering for Rural Development 2019, Jelgava, Latvia, May 22–24, 2019. P. 1344–1350. *(Здобувачкою проаналізовано використання аквакультури в системі біоенергоконверсії).*

26. Golub G., Lutak V., Kerpko O., Marus O., **Yaremenko O. (Yaremenko O.)** Determining impact of difference in price of liquid manure and digestate on production costs of biomethane and electricity. Proceedings of the 20th International Scientific Conference Engineering for Rural Development 2021, Jelgava, Latvia, May 26–28, 2021. P. 314–319. *(Здобувачкою виконано розрахунки економічної ефективності виробництва біогазу).*

27. Голуб Г. А., **Яременко О. А.** Методика розрахунку виходу біогазу. Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті: XXII Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 20–21 травня 2021 року: тези доповіді. Київ, 2021. С. 847–850. *(Здобувачкою розроблено алгоритм розрахунку питомого виходу біогазу).*

28. **Яременко О. А.**, Голуб Г. А. Алгоритм розрахунку виходу біогазу. Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті: XXIV Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 18–19 травня 2023 року: тези доповіді. Київ, 2023. С. 395–396. *(Здобувачкою розроблено методику розрахунку виходу біогазу).*

29. **Яременко О. А.**, Голуб Г. А. Методика визначення періодичності завантаження біогазового реактора. Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті:

XXVI Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 21–23 травня 2025 року: тези доповіді. Київ, 2025. С. 484–485. (Здобувачкою розроблено методику періодичності завантаження біогазового реактора).

30. Голуб Г. А., Яременко О. А. Інженерна методика розрахунку параметрів процесу біогазового зброджування осаду рециркуляційних систем аквакультури. Технічний прогрес у тваринництві та кормовиробництві: XIV Міжнародна науково-технічна конференція, смт Глеваха Київської області, 1–17 жовтня 2025 року: тези доповіді. Глеваха – Київ, 2025. С. 35–37. (Здобувачкою розроблено методику періодичності завантаження біогазового реактора).

АНОТАЦІЯ

Яременко О. А. Обґрунтування біотехнологічного процесу виробництва біогазу із осаду стічних вод систем штучного вирощування риби. Кваліфікаційна друкована праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 03.00.20 «Біотехнологія». Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ, 2026.

Дослідження сточується підвищення ефективності використання біогазових установок шляхом обґрунтування біотехнологічного процесу виробництва біогазу із осаду стічних вод систем штучного вирощування риби. Експериментально встановлено, що обсяг осаду після відстоювання, становитиме не більше 7 % від кількості стічної змивної води механічних фільтрів. Відстоювання осаду безпосередньо у відстійнику упродовж 15 діб дозволило отримати вологість осаду на рівні 92–93 %. Експериментально встановлено залежності, які пов'язують: рівень розкладу органічної речовини осаду, отриманого після гравітаційного ущільнення та питомого виходу метану із даного осаду від часу анаеробного зброджування; вихід біогазу й метану та концентрацію метану в біогазі під час анаеробної ферментації осаду, отриманого після гравітаційного ущільнення. Встановлено також, що вихід біогазу та метану під час анаеробної ферментації на 21 добу анаеробного зброджування становлять 4,083 та 2,627 л відповідно. При цьому концентрація метану в біогазі на 7 добу зброджування досягала 74–75 % і трималася на цьому рівні до 21 доби, у подальшому, до 38 доби концентрація метану в біогазі рівномірно знижувалася до 64–65 %. Було також встановлено, що максимальний рівень питомого виходу метану під час анаеробного зброджування досягнутий на 38 добу становив 803,936 мл (н. у.)/г розкладеної органічної речовини. При цьому параметр, який характеризує швидкість зміни величини питомого виходу метану під час анаеробного зброджування осаду стічних вод аквакультури становив 0.207 мл (н. у.)/г розкладеної органічної речовини за добу. Водночас інтегральний питомий вихід метану упродовж 21 доби анаеробного зброджування може досягати лише 580–590 мл (н. у.)/г розкладеної органічної речовини. Встановлено, що при часі зброджування 21 доба, питомий вихід метану під час анаеробної ферментації має оптимальне значення в залежності від періодичності завантаження біогазового реактора. Це значення становить 1,05 м³ метану на один кубічний метр біомаси в реакторі за одну добу при періодичності завантаження біогазового реактора один раз за час від 1 до 3 діб. Розрахунок економічних показників виробництва метану із осаду, отриманого після гравітаційного ущільнення стічних вод систем штучного вирощування риби показав, що при оптимальному значенні питомого виходу метану, розрахунковий прибуток від виробництва метану становив 5,63 грн/м³, а прибуток від виробництва електроенергії на основі метану 3,73 грн/кВт год.

Ключові слова: рециркуляційна система аквакультури, механічний фільтр, осад, ущільнювач, відстій, біогаз, метан, питомий вихід метану.

ANNOTATION

Yaremenko O. A. Justification of the biotechnological process of biogas production from sewage sludge of artificial fish farming systems. Qualifying printed work with the manuscript rights.

The dissertation for obtaining of a scientific degree of the candidate of technical sciences on a specialty 03.00.20 «Biotechnology». National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Kyiv, 2026.

The research is aimed at improving the efficiency of the use of biogas plants by substantiating the biotechnological process of biogas production from sewage sludge of artificial fish farming systems. It has been experimentally established that sedimentation, the amount of which will be no more than 7 % of the amount of wastewater washing water of mechanical filters. Sedimentation of the sediment directly in the clarifier for 15 days made it possible to obtain the humidity of the sediment at the level of 92–93 %. Experimentally established dependencies that connect: the level of decomposition of organic matter of the sediment obtained after gravity compaction and the specific yield of biomethane from this sediment with the time of anaerobic fermentation; yield of biogas and biomethane and concentration of biomethane in biogas during anaerobic fermentation of sludge obtained after gravity compaction. It was also established that the yield of biogas and biomethane during anaerobic fermentation per 21 days of anaerobic fermentation is 4.083 and 2.627 liters, respectively. At the same time, the concentration of biomethane in biogas on the 7th day of fermentation reached 74–75 % and remained at this level until the 21st day, later, until the 38th day, the concentration of biomethane in the biogas decreased uniformly to 64–65 %. It was also established that the maximum level of specific yield of biomethane during anaerobic fermentation reached on the 38th day was 803.936 ml (n. c.)/g of decomposed organic matter. At the same time, the parameter that characterizes the rate of change in the specific yield of biomethane during the anaerobic fermentation of aquaculture wastewater sludge was 0.207 ml (n. c.)/g of decomposed organic matter per day. At the same time, the integrated specific yield of biomethane during 21 days of anaerobic fermentation can reach only 580–590 ml (n. c.)/g of decomposed organic matter. It was established that with a fermentation time of 21 days, the specific yield of biomethane during anaerobic fermentation has an optimal value depending on the periodicity of loading the biogas reactor. This value is 1.05 m³ of biomethane per one cubic meter of biomass in the reactor for one day, with the periodicity of loading the biogas reactor once every 1 to 3 days. The calculation of the economic indicators of biomethane production from sediment obtained after gravity compaction of wastewater from artificial fish farming systems showed that at the optimal value of the specific output of biomethane, the estimated profit from biomethane production was 5.63 UAH/m³, and profit from electricity production based on biomethane 3.73 UAH/kWh.

Key words: recirculation aquaculture system, mechanical filter, sediment, thickener, sludge, biogas, biomethane, specific output of biomethane.