

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

**ШАПОВАЛОВ ЄВГЕНІЙ БОРИСОВИЧ**

УДК 662.767.2:636.5/.6

**УДОСКОНАЛЕННЯ БІОТЕХНОЛОГІЇ АНАЕРОБНОЇ ФЕРМЕНТАЦІЇ  
КУРЯЧОГО ПОСЛІДУ ЗІ ЗНИЖЕНОЮ КІЛЬКІСТЮ СТОКІВ**

03.00.20 «Біотехнологія»

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ – 2019

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано у Національному університеті харчових технологій  
Міністерства освіти і науки України

**Науковий керівник** кандидат технічних наук, професор  
**Салюк Анатолій Іванович**,  
Національний університет  
харчових технологій,  
професор кафедри харчової хімії

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Дичко Аліна Олегівна**,  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського»,  
професор кафедри інженерної екології

кандидат технічних наук  
**Кучерук Петро Петрович**,  
Інститут технічної теплофізики НАН України,  
старший науковий співробітник  
лабораторії теплофізичних проблем біоенергетики  
відділу теплофізичних проблем  
систем теплопостачання

Захист відбудеться «10» грудня 2019 року о 15<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 26.004.22 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

Автореферат розіслано «08» листопада 2019 року

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

Н. М. Слободянюк

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Виробництво курячого м'яса та яєць є важливою складовою агропромислового комплексу України та світу. Однак діяльність птахівничих комплексів супроводжується утворенням небезпечного для довкілля курячого посліду. Одним із підходів, що характеризуються економічною привабливістю, є анаеробна ферментація. Вагомий вклад у дослідження закономірностей і методів підвищення ефективності процесу виробництва біогазу з біомаси зробили вітчизняні вчені: Г. А. Нікітін, С. П. Циганков, Г. А. Голуб, О. А. Марус, А. О. Дичко, Н. Б. Голуб, П. П. Кучерук, Г. Г. Гелетуша, О. А. Козловець, М. В. Потапова, В. В. Нікіфоров, В. О. Дубровін, І. Г. Войтович, М. П. Талавири, А. І. Салюк, С. О. Жадан, а також зарубіжні, зокрема К. Ферроу, Х. Ніе, А. Висер, Ш. Ву, Х. Якобі, Г. Бужочек, М. Сінкора, Л. де Баре, Г. Маркау та ін.

Станом на 2018 р. в Україні відомо про функціонування 33 установок, які працюють на органічних відходах. Такий показник є досить низьким, порівняно з європейськими показниками (понад 11000 установок у Німеччині). Одним із факторів, що обмежують поширення технології, є еколого-економічні аспекти, важливим з яких є утворення надмірної кількості стоків, що є корисним органомінеральним добривом, однак у сучасних умовах його реалізація є ускладненою, що погіршує економічну привабливість технології (Ніе Х., 2015; Якушенко С., 2006). Окрім того, відповідно до Закону України «Про відходи», забороняється будувати біогазові установки без систем утилізації дегістату, що значно підвищує вартість впровадження технології.

Особливо гостро це питання стоїть для біогазових установок, що працюють на курячому посліді. Так, класичні підходи біотрансформації курячого посліду в біогаз передбачають розбавлення водою у понад 2,5 раза до вологості більше ніж 92 % (Жадан С., 2018). Основним обмежуючим фактором для зниження утворення стоків є вміст амонійного Нітрогену (Ніе Х., 2015; Білостоцький Д., 2013; Ву Ш., 2016). Зниження об'ємів стоків біогазових установок можливе шляхом твердофазної ферментації або рециркуляції рідкої фази. Обидва підходи є досить мало вивченими, і для них характерний вищий ступінь інгібування амонійним Нітрогеном, порівняно з класичними підходами (Жадан С., 2018; Ніе Х., 2015; Білостоцький Д., 2013; Ву Ш., 2016).

Внаслідок процесів адаптації інокуляту за твердофазної ферментації, частково процес може проходити без пригнічення, однак у результаті цього виникають проблеми зі стабільністю процесу і функціонуванням технологій у промислових умовах. Для інтенсифікації процесу можливо застосовувати коферментацію з відходами, що мають вищий вміст Карбону, ніж послід, або проводити процес із вилученням амонійного Нітрогену (Буойчек, 2000). До того ж було здійснено ряд досліджень щодо зниження інгібуючого впливу амонійного Нітрогену на анаеробну ферментацію курячого посліду шляхом вакуумування, продувки, адаптації й очищення від вмісту амонійного Нітрогену шляхом вилучення його з газової фази. Проте вони

характеризувалися негативним економічним ефектом за рахунок використання додаткових хімічних сполук та електроенергії.

Рециркуляція рідкої фази метанового ефлюенту також є можливою. Для її проведення застосовували методи вилучення амонійного Нітрогену. Однак запропоновані попередньо методи вилучення амонійного Нітрогену не характеризувалися позитивним економічним ефектом (Ніе Х., 2015; Білостоцький Д., 2013; Ву Ш., 2016).

Отже, доцільною є розроблення технологій твердофазної ферментації та рециркуляції рідкої фази за умови вилучення амонійного Нітрогену з можливістю регулювання кількості стоків і розширенням видів кінцевої продукції з метою підвищення техніко-економічної привабливості технології.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертацію виконано згідно з планами держбюджетних науково-дослідних тематик кафедри екологічної безпеки та охорони праці Національного університету харчових технологій «Екологічні ризики сталого розвитку» (номер державної реєстрації 0114U007222) та Національного центру «Мала академія наук України» «Науково-технологічні засади створення трансдисциплінарного онтологічного інформаційно-освітнього простору Малої академії наук України» (номер державної реєстрації 0118U003089).

**Мета та завдання дослідження.** Мета роботи – удосконалити біотехнологію анаеробної ферментації курячого посліду, що забезпечує мінімізацію кількості стоків.

Відповідно до поставленої мети було визначено такі завдання:

- оцінити можливість переробки курячого посліду у твердофазних умовах;
- оцінити можливість переробки відходів птахівництва шляхом рідиннофазної анаеробної ферментації за умови рециркуляції рідкої фази;
- розробити промислову технологію утилізації курячого посліду зі зниженою кількістю утворення стоків та оцінити її економічну ефективність.

*Об'єкт дослідження* – анаеробна ферментація курячого посліду.

*Предмет дослідження* – інгібуючий вплив амонійного Нітрогену в процесі анаеробної ферментації курячого посліду.

**Методи дослідження.** Для виконання поставлених завдань використано біохімічні, фізико-хімічні та математичні методи. Дослідження анаеробної ферментації було проведено у періодичному та напівбезперевному режимі. Для досліджень було застосовано сучасні методи, зокрема газову хроматографію, ядерно-магнітний резонанс і рентгенофлуоресцентний аналіз. Застосовано комп'ютерні прикладні програми: Microsoft Excel 2019, Mathcad 15.0, Advanced Grapher 2.2, SigmaPlot 13, CorelDRAW Graphics Suite X7, КОМПАС-3D V18. Для систематизації інформації застосовано інструменти ІТ-платформи ТОДОС.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Вперше доведено, що твердофазна ферментація курячого посліду характеризується низькою стабільністю через високі концентрації амонійного Нітрогену та сірководню. Додавання бентонітової глини дає змогу забезпечити підвищення стабільності

процесу. Встановлено тісний кореляційний зв'язок між концентрацією червоної бентонітової глини та вмістом амонійного Нітрогену і сірководню.

Вперше встановлено взаємозв'язки між кількістю рідини, що рециркулюється та вмістом амонійного Нітрогену в процесі анаеробної ферментації курячого посліду з вилученням амонійного Нітрогену.

Вперше досліджено процес каталітичної деструкції ефлюенту з метою покращення якості біодобрих, що утворюються в процесі анаеробної ферментації відходів птахівництва.

Вперше досліджено особливості регенерації сорбенту, який використовується для сорбції аміаку з газової фази та забезпечує замкнутий цикл сорбенту в біореакторах.

**Практичне значення одержаних результатів.** Виявлено закономірності, що дають змогу встановити значення технологічних параметрів, за яких концентрація амонійного Нітрогену підтримується на безпечному для процесу рівні за умови рециркуляції рідкої фази та вилучення аміаку з газової фази.

Розроблено анаеробний ферментер для утилізації нітрогенвмісних відходів, що складається з резервуара, мішалки, біомаси та підігрівника, який відрізняється тим, що в середині біогазового реактора над поверхнею субстрату співвісно валу розміщено додаткові ємності, які посередині мають отвір для проходження валу мішалки та містять сорбент і патрубки для його заміни.

Запропоновано технологічні рішення щодо можливості рециркуляції рідкої фази, які апробовано у підприємстві ПАТ «Птахофабрика «Васильківська».

Розроблено спосіб виробництва аміаку, який характеризується простотою, високою економічною ефективністю та екологічною чистотою.

Результати наукових досліджень використовують у науковій роботі та навчальному процесі кафедри екологічної безпеки та харчових продуктів Національного університету харчових технологій під час викладання курсів лекцій «Екологія харчових виробництв», «Природоохоронне законодавство та екологічне право», «Менеджмент відходів», «Природоохоронні технології та обладнання» і «Стратегія сталого розвитку» для студентських груп зі спеціальності 101 «Екологія» та Національному центрі «Мала академія наук України» під час підготовки дослідницьких робіт і проведення навчальних семінарів з напрямку «Екологія».

**Особистий внесок здобувача** полягає у проведенні аналізу сучасного стану науково-практичних розробок з теми дисертації; постановці завдань, плануванні, організації та проведенні лабораторних досліджень; аналізі, обробленні та узагальненні одержаних результатів; підготовці до публікації результатів досліджень, а також проведенні апробації основних результатів дисертації на наукових конференціях.

Здобувач брав участь у плануванні та проведенні промислових випробувань технології рециркуляції рідкої фази у процесі анаеробної ферментації курячого посліду.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертації представлено на 82 Міжнародній конференції молодих учених, аспірантів

і студентів «Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті» (м. Київ, 2016 р.); II Міжнародному науково-практичному семінарі «Розвиток біоенергетичного потенціалу в сільському господарстві» (м. Київ, 2017 р.); III Міжнародному науково-практичному семінарі «Розвиток біоенергетичного потенціалу в сільському господарстві» (м. Київ, 2018 р.); науково-практичній конференції «Відновлювальна та воднева енергетика – 2018» (м. Київ, 2018 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Вплив біоекономіки на просторовий розвиток територій» (м. Київ, 2018 р.); XVII Міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні технології управління екологічною безпекою, природо-користуванням, заходами в надзвичайних ситуаціях: розробки та досягнення до 100-річчя Національної академії наук України» (м. Київ, 2018 р.); VII Міжнародній науково-технічній конференції «Наукові проблеми харчових технологій та промислової біотехнології в контексті Євроінтеграції» (м. Київ, 2018 р.); I Міжнародній конференції «Sustainable Mineral Resource Development & Utilization» (м. Джамшоро, Пакистан, 2019 р.); IV Міжнародному науково-практичному семінарі «Розвиток біоенергетичного потенціалу в сільському господарстві» (м. Київ, 2019 р.); II Міжнародній (XII Українській) науковій конференції студентів, аспірантів і молодих учених «Хімічні проблеми сьогодення» (м. Вінниця, 2019 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Європейські виміри сталого розвитку» (м. Київ, 2019 р.); XX Міжнародній науково-практичній конференції «Екологія. Людина. Суспільство» (м. Київ, 2019 р.).

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано 23 наукові праці, з яких 2 статті у наукових фахових виданнях України, 4 статті у наукових фахових виданнях України, включених до міжнародних наукометричних баз даних, стаття в іншому науковому виданні, патент України на корисну модель, 15 тез наукових доповідей.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається з анотацій, вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Роботу викладено на 123 сторінках, вона містить 30 таблиць та 60 рисунків. Список використаних джерел включає 288 найменувань.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дослідження, зв'язок роботи з науковими темами, визначено мету та завдання, необхідні для її досягнення, розкрито наукову новизну і практичне значення одержаних результатів, відмічено особистий внесок здобувача, подано інформацію про апробацію результатів, а також структуру та обсяг дисертації.

У першому розділі «**Водоспоживання як ключова проблема поширення біогазових технологій утилізації курячого посліду**» висвітлено еколого-економічні передумови розвитку технологій анаеробної ферментації курячого посліду. Викладено характеристику нормативно-правової бази щодо виробництва біогазу в Україні та ЄС. Наведено особливості анаеробної

ферментації курячого посліду за умов зниженого водоспоживання. Проаналізовано можливість проведення процесу у твердофазних умовах і за умови рециркуляції рідкої фази. Описано особливості інгібування процесу та підходи до зниження інгібованого стану біогазових установок, що працюють на курячому посліді.

У другому розділі «Матеріали та методи досліджень» надано детальну характеристику методології дослідження та описано матеріали дослідження. Викладено детальний опис методик, математико-статистичної обробки результатів, модифікації експериментальної установки. Експерименти було розроблено відповідно до поставлених завдань і передбачали вимірювання показників, необхідних для перевірки поставлених наукових гіпотез.

У періодичному режимі проводили дослідження стабільності твердофазної ферментації та коферментації курячого посліду з гліцерином у твердофазних умовах. Для забезпечення значимої кількості повторностей використовували поршневі біореактори. Дослідження стабільності твердофазної ферментації проводили у тринадцятикратній повторності за вологості 78 %, 80, 82 та 84 % у термофільному та мезофільному режимах (табл. 1). До необхідної вологості послід доводився водопровідною водою. Експеримент проводили у періодичному режимі протягом 160 діб. Вміст інокуляту становив 10 %.

Таблиця 1

**Характеристика суміші, завантаженої до біореакторів  
за дослідження стабільності твердофазної ферментації курячого посліду**

Вологість, %	Вміст сухих речовин, %	Вміст сухих органічних речовин, %	Вміст загального Нітрогену, мг/дм <sup>3</sup>	Вміст вільного амоніаку, мг/дм <sup>3</sup>	pH
78	22	67	7956	11,14	6,21
80	20		8840	13,56	6,24
82	18		9724	17,76	6,32
84	16		10608	19,56	6,33

Дослідження коферментації курячого посліду з гліцерином проводили за вмісту гліцерину 10 %, 20, 30 %, вологості 74 %, 78, 82, 86, 90 і 94 % у трикратній повторності. Вміст інокуляту становив 10 % (табл. 2).

Для дослідження впливу глини на вилучення амонійного Нітрогену, було використано модельний розчин амоній хлориду, з концентрацією амонійного Нітрогену 5000 мг/дм<sup>3</sup>. Конічні колби з таким розчином розміщували у сухоповітряному термостаті за температури 50 °С. Загальний вміст ємностей становив 250 см<sup>3</sup> із вмістом сорбентів 5 та 10 %. Як сорбенти використовували аргелітову та бентонітову глини. Концентрацію амонійного Нітрогену вимірювали за методом Неслера після 30 та 120 хв процесу сорбції. Дослідження здійснювали у трикратній повторності.

Для дослідження розроблено біореактори, що працювали у напівбезперевному режимі. Один з них використовувався як контрольний та передбачав тільки рециркуляцію рідкої фази, а інший – як дослідний та передбачав рециркуляцію рідкої фази з вилученням амонійного Нітрогену

шляхом сорбції ортофосфорною кислотою. Установку для дослідження процесу рециркуляції рідкої фази представлено на рис. 1.

Таблиця 2

**Характеристика суміші, завантаженої до біореакторів  
за дослідження можливості інтенсифікації анаеробної ферментації  
курячого посліду шляхом коферментації з гліцерином**

Вологість, %	Вміст води у біореакторі, г/20 г	Вміст сухих речовин у біореакторі, г/20 г	Вміст сухих органічних речовин у біореакторі, г/20 г		
			Вміст гліцерину, %		
			10 %	20 %	30 %
74	14,8	5,2	4,06	4,16	4,26
78	15,6	4,4	3,43	3,52	3,61
82	16,4	3,6	2,81	2,88	2,95
86	17,2	2,8	2,18	2,24	2,30
90	18	2	1,56	1,60	1,64
94	18,8	1,2	0,94	0,96	0,98

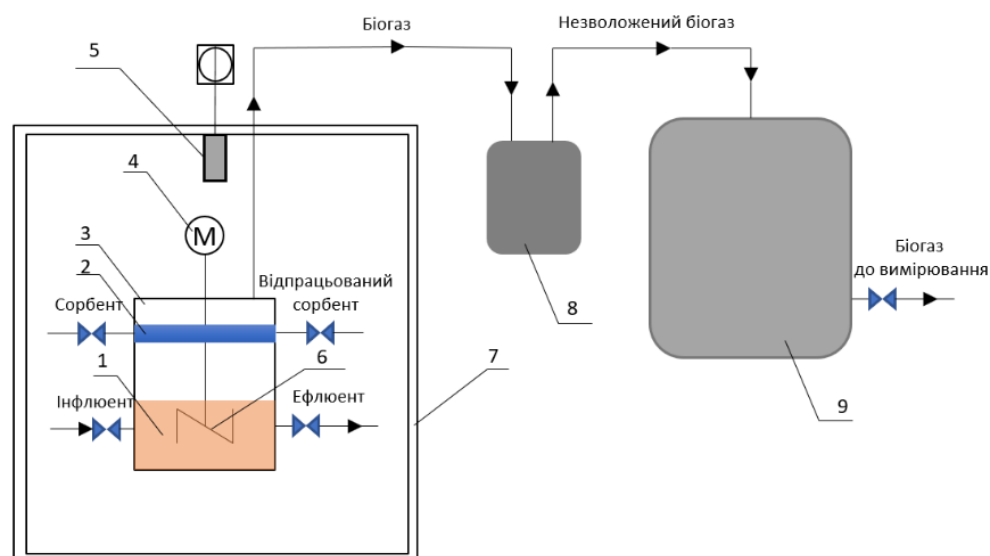


Рис. 1. Схема функціонування біореактора з вилученням амонійного Нітрогену: 1 – робочий об'єм біореактора; 2 – сорбент; 3 – біореактор; 4 – двигун мішалки; 5 – нагрівальний елемент; 6 – лопаті мішалки; 7 – термостат; 8 – сепаратор вологи; 9 – газгольдер

Корисний об'єм реакторів з нержавіючої сталі становив 2 дм<sup>3</sup>. Параметри анаеробної ферментації підбирали відповідно до результатів моделювання виробництва метану в безперервному режимі (Жадан С., 2018). Так, вологість субстрату становила 92 %. Процес проводили у напівбезперервному режимі з гідравлічним часом утримання 5 діб за температури 50 °С, що відповідає максимуму виробництва метану. Навантаження на біореактор становило 12,2 г сухих органічних речовин/(дм<sup>3</sup>·добу). Дослідження тривало протягом семи оборотів, у зв'язку з тим, що анаеробна ферментація вважається виведеною в квазістаціонарний стан після четвертого обороту реактора (Уільямс К., 1989). Біореактори розміщували у термостатах на решічастих підставках. Ефлюент після анаеробної ферментації центрифугували. Центрифугат у повному обсязі



використовувався для розбавлення свіжого посліду до необхідної вологості. В обох реакторах передбачалося очищення газу від вологи у сепараторах вологи.

У третьому розділі «**Онтологічний аналіз попередньої інформації**» описано результати онтологізації наукових досліджень з метою систематизації та забезпечення інформаційного менеджменту наукової інформації. Результати попередніх досліджень представлено у вигляді онтологій з можливістю їх ранжування та фільтрування на базі ІТ-платформи ТОДОС, розробленого сумісно з Інститутом телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України. Такий підхід дозволив системно оцінювати результати попередніх досліджень і підвищив операціональність роботи з цими даними. Крім того, розроблено інтерактивний класифікатор мікроорганізмів, що значно покращило та пришвидшило виконання роботи.

У четвертому розділі «**Твердофазна ферментація як метод зниження кількості стоків**» проведено аналіз стабільності твердофазної анаеробної ферментації курячого посліду у мезофільних і термофільних умовах, а також досліджено можливість інтенсифікації анаеробної ферментації курячого посліду шляхом коферментації з відходами виробництва біодизелю та шляхом додавання глиноподібних сорбентів.

Відповідно до результатів дослідження, виробництво метану варіювалося від 181 до 208 см<sup>3</sup>/г сухих органічних речовин у мезофільних умовах та від 105,26 до 183,17 см<sup>3</sup>/г сухих органічних речовин у термофільних умовах. У мезофільних умовах максимальний вихід метану був характерний для процесу з вологістю 84 %, а у термофільному – 82 %.

Коефіцієнт варіації виробництва метану є вищим за 10 % для всіх значень вологостей та температурних режимів у твердофазних умовах. Термофільний режим характеризувався більшою нестабільністю, ніж мезофільний. Найвищий коефіцієнт варіації характерний для вологості 78 % у термофільних умовах, що пов'язано з наявністю інгібуючих анаеробну ферментацію факторів. Коефіцієнт варіації виробництва метану за твердофазної ферментації у мезофільному та термофільному режимах представлено на рис. 2.

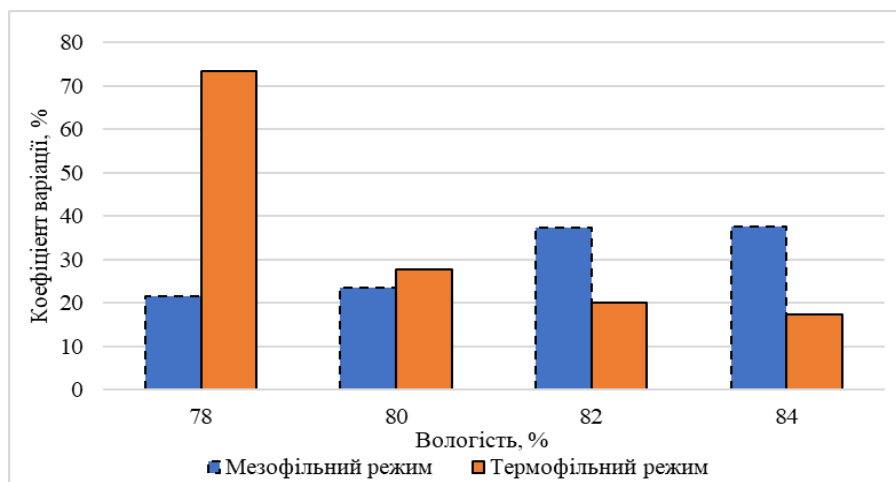


Рис. 2. Коефіцієнт варіації виробництва метану у мезофільному та термофільному режимах

Для дослідження можливості інтенсифікації процесу було проведено анаеробну ферментацію курячого посліду з відходами виробництва біодизелю – неочищеним гліцерином. Як у мезофільному, так і у термофільному режимах додавання гліцерину (за його вмісту 10 %, 20 та 30 % від загальної маси) не призвело до інтенсифікації. У термофільному режимі інгібування анаеробної ферментації відбувалося інтенсивніше, ніж у мезофільному.

У мезофільному режимі виробництво метану відбувалося лише за вмісту гліцерину у субстраті 10 %. За вмісту гліцерину 20 і 30 % біогаз та метан практично не вироблялися, що вірогідно пов'язано з залишками після синтезу гліцерину – метанолом і калій гідроксидом.

За вмісту гліцерину 10 % вихід біогазу з одиниці маси сухих речовин варіювався від 29,7 до 55,5 см<sup>3</sup>/г сухих органічних речовин, а вихід метану – від 8,7 до 22,0 см<sup>3</sup>/г сухих органічних речовин. У твердофазному режимі максимальний вихід біогазу становив 51,5 см<sup>3</sup>/г сухих органічних речовин, а метану – 14,5 см<sup>3</sup>/г сухих органічних речовин, що було характерно для вологості 82 %. Такі показники виробництва біогазу та метану є значно нижчими, ніж без додавання неочищеного гліцерину (вихід біогазу – 293 см<sup>3</sup>/г сухих органічних речовин та 181 см<sup>3</sup>/г сухих органічних речовин метану).

У термофільному режимі за вмісту гліцерину 10 % вихід біогазу з одиниці маси сухих речовин варіював від 9,1 до 32,1 см<sup>3</sup>/г сухих органічних речовин, а вихід метану – від 0,0 до 14,0 см<sup>3</sup>/г сухих органічних речовин. За іншого вмісту гліцерину у субстраті виробництво метану не відбувалося взагалі. За вмісту гліцерину 10 % і вологості субстрату 74 % виробництво метану не відбувалося взагалі. Найбільша кількість виробленого біогазу та метану у твердофазних умовах була характерною для вологості 82 % і становила 16,6 см<sup>3</sup>/г сухих органічних речовин та 5,9 см<sup>3</sup>/г сухих органічних речовин відповідно. Виробництво біогазу та метану з одиниці об'єму за різної вологості посліду та об'ємних часток гліцерину у мезофільному і термофільному режимах представлено на рис. 3а і 3б.

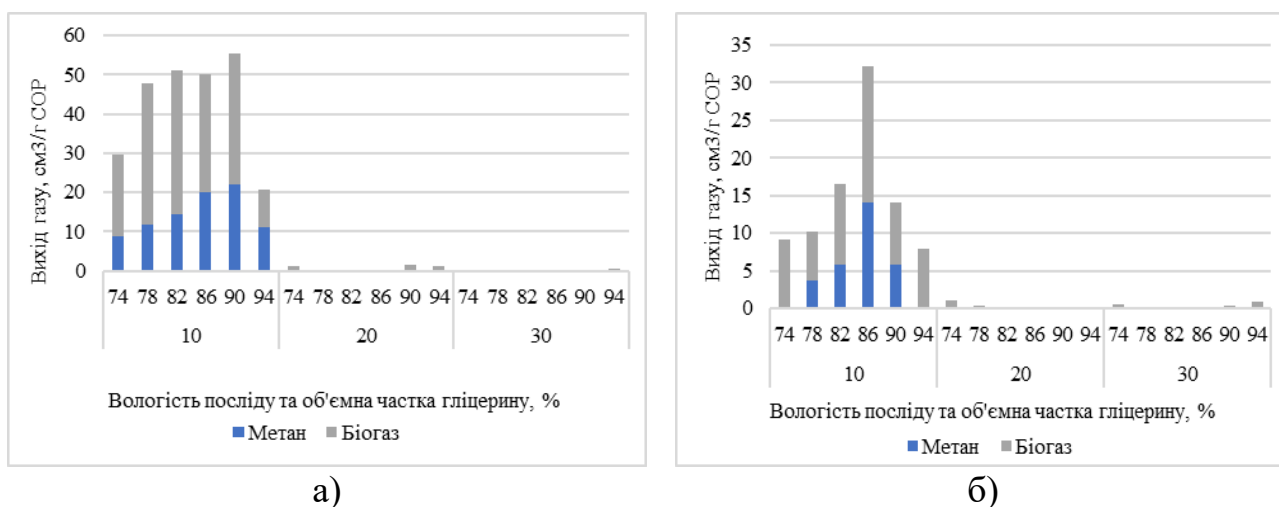


Рис. 3. Виробництво біогазу та метану з одиниці маси за різної вологості посліду та об'ємних часток гліцерину у мезофільному (а) і термофільному (б) режимах

Враховуючи те, що як мезофільна, так і термофільна коферментації курячого посліду з відходами біодизелю знижували ефективність анаеробної ферментації, то виявляти стабільність процесу не є доцільним.

Отже, враховуючи те, що за коферментації курячого посліду інгібування спричинене факторами, відмінними від амонійного Нітрогену, доцільно відзначити, що інгібування проявляється значно сильніше у термофільному режимі, ніж у мезофільному.

Встановлено, що інтенсифікація процесу можлива шляхом додавання глиноподібних сорбентів. Дослідження сорбційної здатності глин вказує на більшу ефективність використання бентонітової глини, порівняно з аргелітовою. Зниження концентрації амонійного Нітрогену за використання глиноподібних сорбентів представлено у табл. 3.

Таблиця 3

**Зниження концентрації амонійного Нітрогену  
за використання глиноподібних сорбентів**

Тривалість процесу, хв	Концентрація амонійного Нітрогену, мг/дм <sup>3</sup>			
	Вміст 5 %		Вміст 10 %	
	Аргелітова глина	Бентонітова глина	Аргелітова глина	Бентонітова глина
30	4297	4531	4843	4358
120	4267	2671	3890	1890

Додавання бентонітової глини дозволило покращити ефективність процесу за її застосування у кількості 25 % об'ємних частин завдяки сорбції іонів амонію та поглинання сульфідів. Однак закупівля глини призводить до виникнення додаткових затрат.

Отже, застосування твердофазної ферментації у промислових умовах може викликати ряд проблем зі стабільністю процесу та запуском біогазових установок, а її інтенсифікація характеризується погіршенням економічної привабливості процесу. Тому доцільним є дослідження можливості рециркуляції рідкої фази у процесі анаеробної ферментації курячого посліду з подальшим порівнянням обох підходів.

У п'ятому розділі «Рециркуляція рідкої фази як метод зниження кількості стоків» викладено аналіз особливостей функціонування біогазових установок за умови рециркуляції рідкої фази та вилучення амонійного Нітрогену. Виявлено, що концентрація метану за умови вилучення амонійного Нітрогену, є вищою, ніж без нього. Частка метану у реакторі з вилученням амонійного Нітрогену становила 74 %, а без нього – 63 %. Швидкість виходу метану у контрольному реакторі варіювалася від 0,044 до 0,83 дм<sup>3</sup>/(дм<sup>3</sup>·добу), а у дослідному реакторі – від 0,11 до 1,1 дм<sup>3</sup>/(дм<sup>3</sup>·добу). На рис. 4 представлено виробництво метану у контрольному та дослідному реакторах.

Вміст вільного аміаку протягом сьомого обороту у контрольному реакторі варіювався від 1986,6 до 2510,8 мг/дм<sup>3</sup>, а у дослідному від 919,6 до 1445,4 мг/дм<sup>3</sup>. Середня концентрація вільного амоніаку протягом сьомого обороту в контрольному реакторі становила 2136,8 мг/дм<sup>3</sup>, а у дослідному – 1285,7 мг/дм<sup>3</sup>. Тобто ефективність зниження вмісту вільного амоніаку

становила 40 %. Виходячи з цього, інгібування процесу в контрольному біореакторі відбувалося значно інтенсивніше, ніж у дослідному, та є поясненням значної різниці у виробництві біогазу. Вміст вільного амоніаку в контрольному та дослідному реакторах представлено на рис. 5.



Рис. 4. Швидкість виходу метану у контрольному та дослідному реакторах

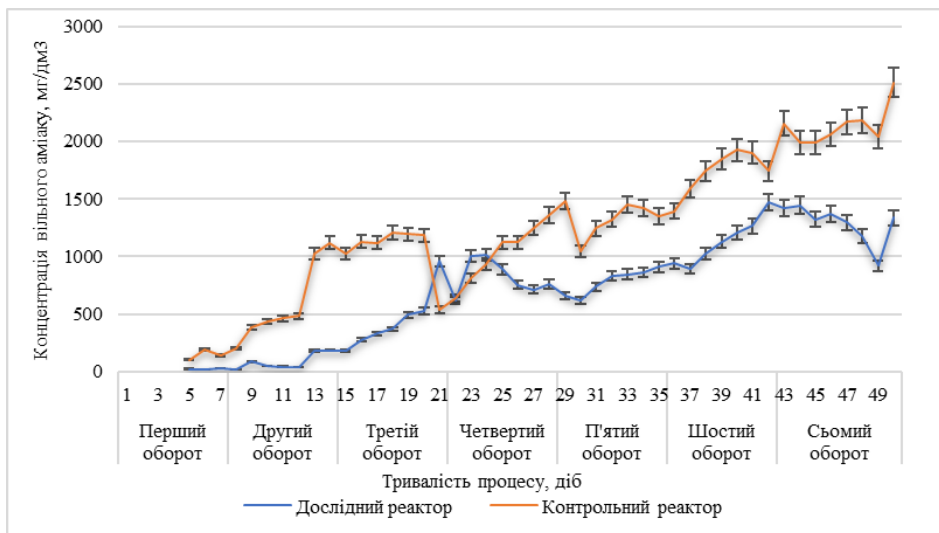


Рис. 5. Вміст вільного амоніаку в контрольному та дослідному реакторах

Отже, інтенсифікація процесу анаеробної ферментації за умови рециркуляції рідкої фази шляхом сорбції аміаку нелетким сорбентом, розміщеним у біореакторі, є можливою. Для визначення оптимальних умов проведення процесу було проведено математичне моделювання результатів сорбції амонійного Нітрогену в процесі анаеробної ферментації ортофосфорною кислотою, розміщеною у реакторі.

Зниження концентрації амонійного Нітрогену в розчині об'ємом  $0,25 \text{ дм}^3$  за початкової концентрації  $8000 \text{ мг/дм}^3$  у результаті сорбції амоніаку з газової

фази ортофосфорною кислотою з концентрацією 4 моль/дм<sup>3</sup> за температури 50 °С апроксимовано функцією:

$$y = a \times e^{-b \times x}, \quad (1)$$

де  $a$  і  $b$  – параметри, значення залежності яких від рН розчину наведено у табл. 4.

Таблиця 4

**Значення параметрів функції, що апроксимує  
зниження концентрації амонійного Нітрогену в розчині**

рН	$a$	$b$	$R^2$	$\sigma$
7,5	8036,6789202	0,0030988	0,9531770	239,8978764
8,0	8064,7175745	0,0078838	0,9740226	259,9980683
8,5	8189,8241458	0,0186242	0,9785655	208,0494536

Концентрацію амонійного Нітрогену в реакторі на певний момент часу після початку рециркуляції ефлюенту визначали за формулою:

$$C_{n+2} = C_{n+1} - \frac{C_{n+1} \cdot d}{HRT} + N + \frac{C_n \cdot R \cdot d}{100 \cdot HRT}, \quad (2)$$

де  $C$  – концентрація амонійного Нітрогену в біогазовому реакторі, мг/дм<sup>3</sup>;  $m$  – маса амонійного Нітрогену в біогазовому реакторі, мг;  $n$  – номер доби від початку рециркуляції;  $d$  – період, який описує формула, що дорівнює 1, діб;  $HRT$  – гідравлічний час утримання, діб;  $R$  – ступінь рециркуляції, %;  $N$  – маса амонійного Нітрогену, що поступає в біогазовий реактор з курячим послідом, мг.

Концентрацію амонійного Нітрогену в реакторі, у якому проходить сорбція амоніаку з газової фази, на певний момент часу після початку рециркуляції ефлюенту визначали за формулою:

$$C_{n+2} = C_{n+1} - \frac{C_{n+1} \cdot d}{HRT} + N + \frac{C_n \cdot R \cdot d}{100 \cdot HRT} - s(C_n, C_{n+1}, HRT, N, R, a, b), \quad (3)$$

де  $s$  – маса амонійного Нітрогену, що видаляється з рідкої фази за рахунок сорбції амоніаку з газової фази протягом доби, мг;  $a$  та  $b$  – значення параметрів функції, що апроксимує зниження концентрації амонійного Нітрогену в розчині у періодичному режимі.

Значення  $s$  визначається за формулою:

$$s = \frac{C_{n+1} - \frac{C_{n+1} \cdot d}{HRT} + N + \frac{C_n \cdot R \cdot d}{100 \cdot HRT} - a \cdot e^{-b \cdot \left( \frac{\ln \left( \frac{C_{n+1} - \frac{C_{n+1} \cdot d}{HRT} + N + \frac{C_n \cdot R \cdot d}{100 \cdot HRT}}{a} \right)}{b} + 24 \right)}}{4}, \quad (4)$$

де 4 – коефіцієнт, що враховує приведення вилучення амонійного Нітрогену до одиниці об'єму.

Наведені вище формули враховують такий порядок дій за обслуговування біогазової установки:

1. Ефлюент у кількості  $V/HRT$  зливається з апарату, де  $V$  – корисний об'єм біогазового реактора, дм<sup>3</sup>;

2. Курячий послід доводиться водою та ефлюентом у кількості  $VR/(100HRT)$ .

3. Отриманий субстрат подається в біогазовий реактор.

За результатами моделювання, виявлено, що стан системи, за якого буде досягнутий безпечний вміст амонійного Нітрогену, може бути досягнутий за умови рециркуляції 40 % рідкої фази за проведення процесу з гідравлічним періодом утримання 10 діб і вологості субстрату 90 % (рис. 6).

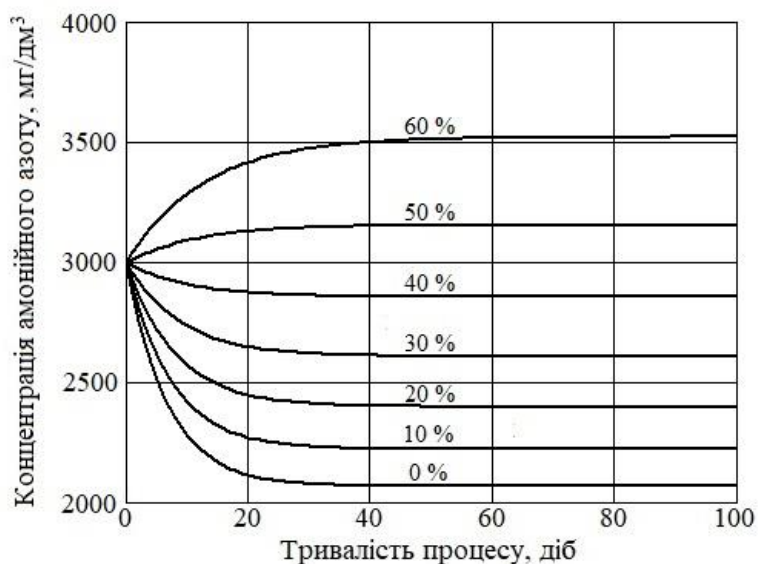


Рис. 6. Динаміка вмісту амонійного Нітрогену в реакторі з гідравлічним періодом утримання 10 діб, у якому проходить сорбція аміаку з газової фази за рН рідкої фази 8,0, після початку рециркуляції ефлюенту за різного її ступеня щодо тривалості процесу

Запропонований метод регулювання вмісту амонійного Нітрогену, в ряді випадків, дозволяє підтримувати його концентрацію на нижчому від наведеного значення рівні навіть в умовах рециркуляції рідкої фази.

Ступінь вилучення амонійного Нітрогену може бути суттєво збільшено завдяки зміні геометричних розмірів біогазової установки, збільшенні площі контакту сорбенту з газовою фазою та гідравлічного часу утримання.

У шостому розділі «**Технологічні особливості утилізації курячого посліду зі зниженою кількістю стоків**» проведено техніко-економічну оцінку технологій твердофазної ферментації із сорбцією амонійного Нітрогену бентонітовою глиною та рідкофазної ферментації курячого посліду з рециркуляцією рідкої фази. Виявлено, що рідкофазна технологія утилізації курячого посліду з рециркуляцією рідкої фази характеризується кращими економічними показниками, ніж твердофазна ферментація (табл. 5). Виходячи з цього, наведено детальну характеристику технології утилізації курячого посліду за умови рециркуляції стоків. Основними недоліками запропонованого підходу є продовження газовиділення під час зберігання ефлюенту, а також незамкнутий цикл технології, що передбачає постійну закупівлю ортофосфорної кислоти та реалізацію кормового моноамоній фосфату, що

в разі відсутності попиту на кормовий моноамоній фосфат може призводити до збитковості процесу.

Таблиця 5

**Порівняння економічних показників запропонованих твердофазного та рідкофазного підходів утилізації курячого посліду зі зниженою кількістю утворення стоків для птахофабрики з поголів'ям курей 750000 голів**

Технологія	Твердофазна ферментація	Рідкофазна ферментація за умови рециркуляції рідкої фази ефлюенту*
Капітальні затрати, тис. грн	60000	75000
Дохід, тис. грн	319285	5760872
Затрати, тис. грн	299557	5700729
Прибуток, тис. грн	19727	60142
Період окупності, років	3,04	1,25

Примітка. \*З урахуванням запропонованих рішень

Приведено результати детального аналізу процесу каталізу ефлюенту, що здійснювався у співпраці з Інститутом біоорганічної хімії та нафтохімії НАН України. Виявлено, що більш доцільним є підхід лужного каталізу, який характеризується утворенням цінного органо-мінерального добрива, що має високу вартість на ринку.

Запропоновано та обґрунтовано можливість рециркуляції сорбенту в реакторі з отриманням аміаку. Обґрунтовано потенційні підходи для поводження з аміаком. Досліджено можливість регенерації аміаку та визначено особливості процесу. Виявлено, що від температури залежить ступінь розкладання діамоній фосфату (рис. 7).

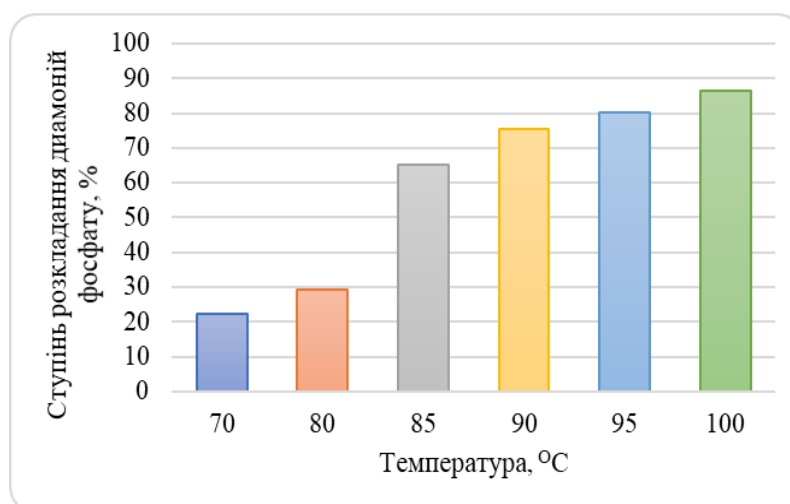


Рис. 7. Ступінь розкладання діамоній фосфату за різних температур протягом 10 хв

Розроблена технологія характеризується позитивним еколого-економічним ефектом завдяки зниженню інгібування процесу, зниженню водоспоживання процесу, можливості вибору кінцевих продуктів залежно від особливостей ринку та контролю кількості утворених добрив.

Запропоновано отримувати біогаз, біодобрива та амонійний Нітроген в одній із таких форм: моноамонію фосфату (зокрема кормового); діамонію фосфату; аміачної води; зрідженого аміаку; електричної енергії (виробленої в аміачній паливній комірці).

У табл. 6 представлено економічне обґрунтування поводження з амоніаком. Доцільно зазначити, що у країнах ЄС та США виробництво електроенергії може бути значно більш рентабельним.

Таблиця 6

**Характеристика питомого прибутку  
від виробництва нітрогенвмісних продуктів**

Назва продукту	Кількість, що виробляється з 1 т курячого посліду	Ціна	Вартість отриманих продуктів з 1 т курячого посліду, грн
Кормовий моноамоній фосфат	16,9 кг	20000* грн/т	50,73
Аміак безводний	2,65 кг	10000 грн/т	26,5
Аміачна вода	10,6 кг	3000 грн/т	31,8
Електроенергія	7,95 кВт·год	1 грн/кВт·год	7,95

Примітка. \*Без врахування затрат на придбання кислоти

Використання регенерації сорбенту та додаткової ферментації ефлюенту вирішує наявні проблеми анаеробної ферментації курячого посліду зі зниженим водоспоживанням. Доцільно детально розглянути технологію анаеробної ферментації курячого посліду із запропонованими модифікаціями. На рис. 8 представлено схему утилізації курячого посліду зі зниженим водоспоживанням.

Курячий послід завантажується стрічковим конвеєром на самоскид і транспортується до місця утилізації. Навантажувачем послід скидається у бункер-накопичувач та за допомогою шнеку подається у приймальний резервуар, що передбачає гомогенізацію та нагрівання до температури 50 °С. Вологість становить 90 %. Гідравлічний період утримання – 10 діб. Біогаз очищається за вищеописаною технологією.

У реакторі відбувається сорбція амонійного Нітрогену ортофосфорною кислотою з концентрацією 4 моль/дм<sup>3</sup>. Залежно від особливостей ринку, моноамоній фосфат може реалізовуватися як кормова добавка (за технологією, запропонованою раніше) або відновлюватися до моноамонію фосфату та повертатися до сорбційних ємностей.

Діамоній фосфат, що формується у процесі сорбції, надходить до біореактора, де й проходить процес його відновлення до моноамонію фосфату за температури 90 °С. Після цього аміак може застосовуватися з метою реалізації або використання у паливній комірці для отримання електроенергії.

Запропоновано забезпечити збільшення площі поглинання аміаку з біогазу сорбентом. Для цього розроблено біогазовий реактор, що відрізняється від попередньо запропонованого реактора кількістю ємностей для сорбції, що й призводить до зростання площі сорбції. Загальний вигляд анаеробного реактора для ферментації нітрогенвмісних відходів представлено на рис. 9.



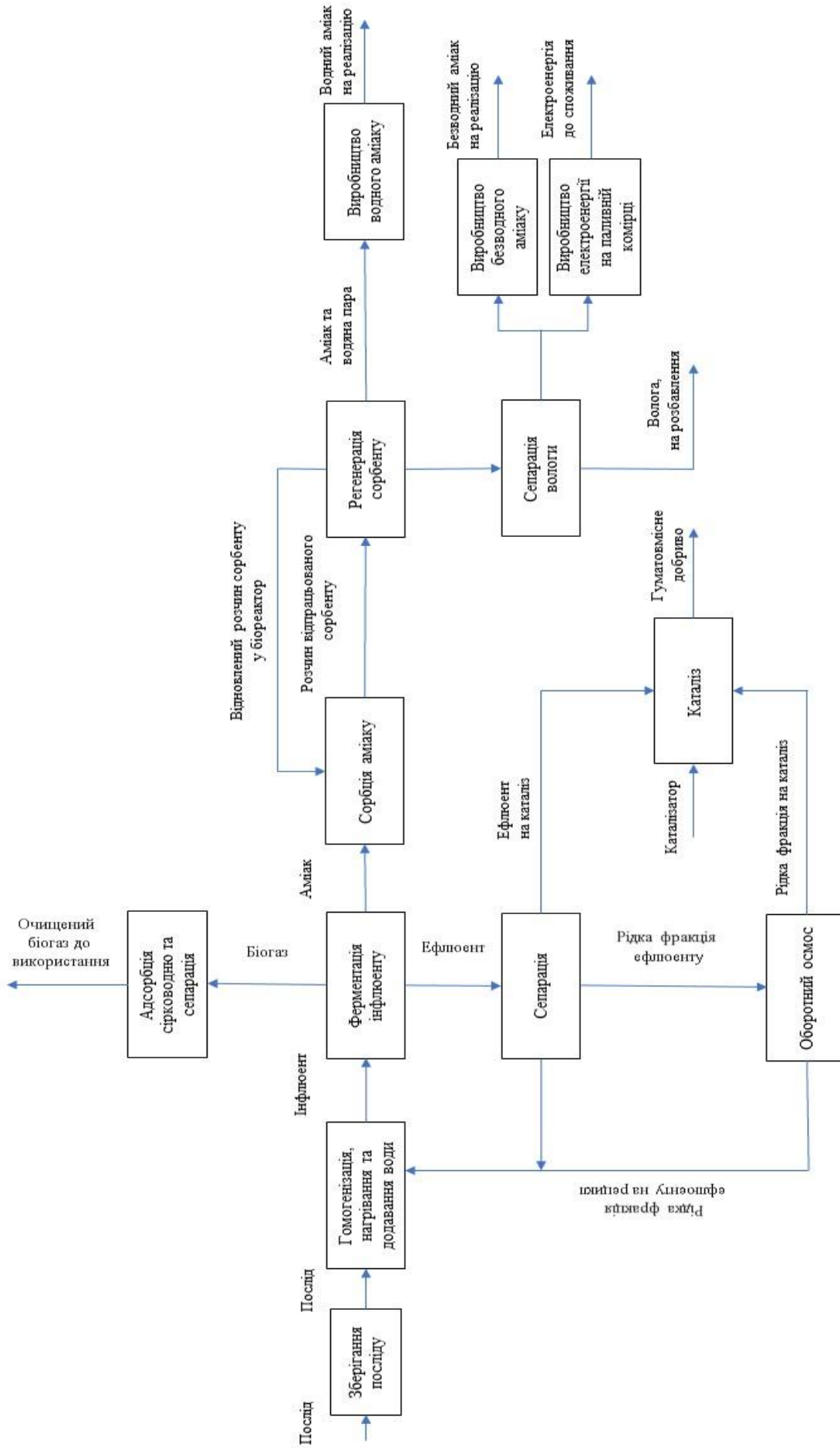


Рис. 8. Схема анаеробної ферментації курячого посліду зі зниженим водоспоживанням

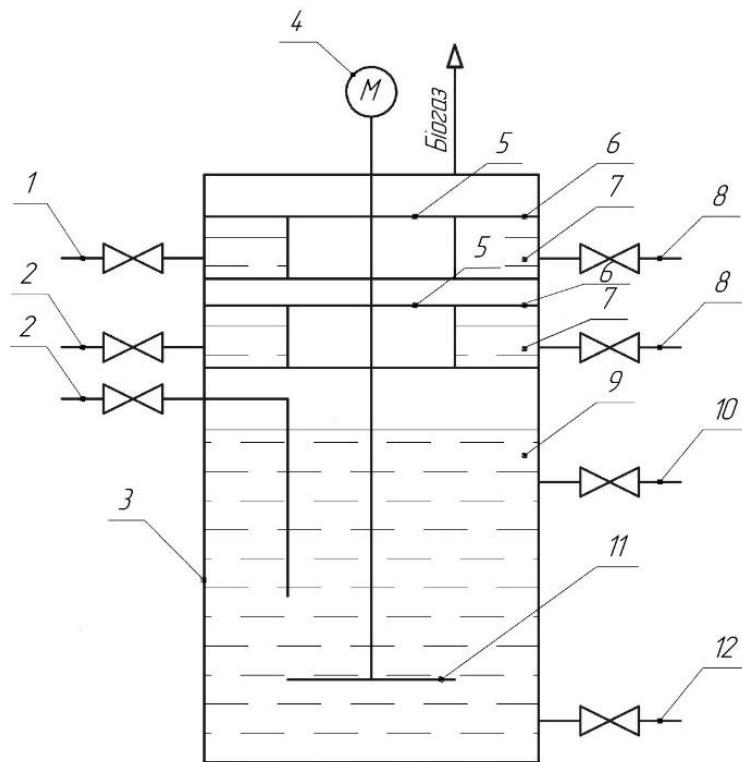


Рис. 9. Анаеробний ферментер для утилізації нітрогеновмісних відходів: 1 – патрубки для завантаження сорбенту; 2 – патрубків для завантаження інфлюенту; 3 – корпус біореактора; 4 – двигун мішалки; 5 – отвір для проходження біогазу; 6 – ємність з сорбентом; 7 – сорбент; 8 – патрубок для відведення відпрацьованого сорбенту; 9 – субстрат та біомаса; 10 – патрубок для відведення ефлюенту; 11 – робочий орган мішалки; 12 – патрубок для відведення осілих твердих часточок з біореактора

Розроблена технологія є економічно ефективною. Прибуток птахофабрики потужністю 750 тис. курей-несучок за технологічних параметрів роботи біогазової установки, встановлених в експерименті, оцінюється в 60142 тис. грн на рік.

## ВИСНОВКИ

У дисертації висвітлено вирішення завдання щодо удосконалення біотехнології анаеробної ферментації курячого посліду зі зниженою кількістю стоків. Основні наукові результати:

1. Твердофазна ферментація курячого посліду є нестабільною. Підвищення стабільності процесу твердофазної ферментації курячого посліду можливо досягнути шляхом додавання бентонітової глини, що дає змогу застосовувати такий підхід у промислових умовах.

2. Можливість рециркуляції рідкої фази за рідкофазної метанової ферментації курячого посліду підтверджено експериментально. Шляхом математичного моделювання встановлено залежності, що дають змогу визначити параметри проведення процесу, за яких концентрація амонійного Нітрогену не перевищує небезпечний рівень.

3. Доведено, що більш економічно доцільним для мінімізації кількості стоків є проведення анаеробної ферментації курячого посліду у рідкофазних умовах з рециркуляцією рідкої фази, ніж проведення твердофазної ферментації.

4. Запропоновано новий підхід щодо недостатнього біологічного розкладання органічних речовин ефлюенту біогазової установки шляхом каталізу з отриманням гуматвмісного добрива та синтез-газу.

5. Для забезпечення замкнутого циклу технології запропоновано проводити регенерацію діамоній фосфату до моноамоній фосфату з утворенням аміаку, водночас, отриманий аміак може бути використаний для утворення нітрогенвмісних продуктів або як джерело безкарбонної енергії.

6. Розроблено технологію утилізації курячого посліду з рециркуляцією рідкої фази, що характеризується періодом окупності 1,25 року та щорічним прибутком 60142 тис. грн за утилізації відходів птахофабрики з поголів'ям 750 тис. голів.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Статті у науковому фаховому виданні України:

1. **Shapovalov Y. B.**, Salyuk A. I. The liquid phase recirculation under methanogenic fermentation of chicken manure. Environmental problems. 2018. Vol. 3. № 3. С. 203–209. *(Здобувачем проведено дослідження метанової ферментації курячого посліду за умов рециркуляції рідкої фази).*

2. **Shapovalov Y. B.**, Salyuk A. I., Kotynsky A. Tarasenco R. The Reaserch of Dry Chicken Manure Methanogenesis Stability. Environmental Problems. 2019. Vol. 4. № 1. С. 14–18. *(Здобувачем проведено дослідження у термофільному та мезофільному режимі твердофазної анаеробної ферментації курячого посліду та проведено подальший аналіз).*

### Статті у наукових фахових виданнях України,

#### включених до міжнародних наукометричних баз даних:

3. **Шаповалов Є. Б.**, Шаповалов В. Б., Стрижак О. Є., Салюк А. І. Використання онтологічних інструментів для систематизації та аналізу інформації щодо утилізації відходів шляхом метаногенезу. Екологічна безпека та природокористування. 2018. № 3 (27). С. 68–79. *(Здобувачем побудовано онтологічні графи та проведено онтологізацію попередніх результатів).*

4. **Шаповалов Є. Б.**, Салюк А. І., Котинський А. В. Дослідження стабільності метаногенезу курячого посліду у твердофазних умовах. Наукові праці Національного університету харчових технологій. 2018. № 4. С. 57–64. *(Здобувачем проведено дослідження анаеробної ферментації та визначено коефіцієнти варіації за виробництвом метану).*

5. **Шаповалов Є. Б.**, Шаповалов В. Б., Салавор О. М., Якименко І. Л. Порівняння нормативної бази ЄС та України щодо виробництва біогазу з органічних відходів. Наукові праці Національного університету харчових технологій. 2018. № 5. С. 61–70. *(Здобувачем проаналізовано нормативні документи щодо виробництва біогазу та здійснено систематизацію й аналіз).*

6. **Шаповалов Є. Б.**, Жадан С. О., Салюк А. І., Котинський А. В. Регулювання концентрації амонійного азоту при метановій ферментації курячого посліду в умовах рециркуляції рідкої фази. Наукові праці Національного університету харчових технологій. 2018. № 6. С. 65–72. *(Здобувачем запропоновано ряд математичних рівнянь для побудови математичних моделей).*

#### Стаття в іншому науковому виданні

7. **Sharovalov Y. B.**, Sharovalov V. B., Stryzhak O. Y., Salyuk A. Ontology-Based Systemizing of the Science Information Devoted to Waste Utilizing by Methanogenesis. International Journal of Computer and Information Engineering. 2018. Vol. 12. № 11. P. 1004–1009. *(Здобувачем побудовано онтологічні графи та запропоновано використання інструментів ранжування, досліджуючи метанову ферментацію курячого посліду).*

#### Патент України на корисну модель:

8. Жадан С. О., **Шаповалов Є. Б.**, Салюк А. І., Шаповалов В. Б. Патент України на корисну модель 127615 Україна. МПК (2006.01) C12P 7/14. Анаеробний ферментер для утилізації нітрогевмісних відходів; патенто-власники С. О. Жадан, Є. Б. Шаповалов, А. І. Салюк, В. Б. Шаповалов. № 201802844; заявлено 21.03.18; опубліковано 10.08.18; Бюл. № 15. 4 с. *(Здобувачем запропоновано підхід до модернізації біореактора для інтенсифікації процесу сорбції амонійного Нітрогену в процесі анаеробної деструкції біомаси).*

#### Тези наукових доповідей:

9. **Шаповалов Є.**, Салюк А. Використання твердофазної метанової ферментації курячого посліду з метою зниження водопостачання. Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті: 82 Міжнародна наукова конференція молодих учених, аспірантів і студентів, м. Київ, 13–14 квітня 2016 року: тези доповіді. К., 2016. С. 383. *(Здобувачем проведено аналіз проблем твердофазної ферментації та запропоновано підходи до їх вирішення).*

10. Колесник О. С., **Шаповалов Є. Б.** Сумісна ферментація стічних вод птахофабрик з відходами виробництва біодизелю. Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті: 82 Міжнародна наукова конференція молодих учених, аспірантів і студентів, м. Київ, 13–14 квітня 2016 року: тези доповіді. К., 2016. С. 387. *(Здобувачем оцінено можливість проведення коферментації курячого посліду з гліцерином після виробництва біодизелю).*

11 **Шаповалов Є. Б.**, Салюк А. І. Твердофазна ферментація: переваги та недоліки. Розвиток біоенергетичного потенціалу в сільському господарстві: II Міжнародний науково-практичний семінар, м. Київ, 04 квітня 2017 року: тези доповіді. К., 2017. С. 69–70. *(Здобувачем проведено аналіз щодо переваг та недоліків застосування твердофазної ферментації).*

12. **Шаповалов Є. Б.**, Жадан С. О. Коферментація курячого посліду з відходами виробництва біодизелю. Розвиток біоенергетичного потенціалу в сільському господарстві: III-й Міжнародний науково-практичний семінар, м. Київ, 09–10 лютого 2018 року: тези доповіді. К., 2018. С. 90–93. *(Здобувачем здійснено дослідження коферментації курячого посліду з гліцерином та проведено аналіз даних).*

13. **Шаповалов Є. Б.**, Жадан С. О., Салюк А. І. Регулювання концентрації амонійного Нітрогену при метановій ферментації курячого посліду в умовах рециркуляції рідкої фази. Відновлювана та воднева енергетика – 2018: науково-практична конференція присвячена 100-річчю Національної академії наук України, 120-річчю КПІ імені Ігоря Сікорського, 100-річчю факультету електроенергетики та автоматики КПІ імені Ігоря Сікорського, м. Київ, 18 травня 2018 року: тези доповіді. К., 2018. С. 180–183. *(Здобувачем побудовано математичні моделі концентрації амонійного Нітрогену в процесі анаеробної ферментації курячого посліду).*

14. Шаповалов Е. Б. Економічне обґрунтування функціонування установок на курячому посліді в Україні. Вплив біоекономіки на просторовий розвиток територій: Міжнародна науково-практична, м. Київ, 14–15 вересня 2018 року: тези доповіді. К., 2018. С. 263–265.

15. Шаповалов Є. Б. Метаногенез курячого посліду за високого вмісту сухих речовин. Інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами в надзвичайних ситуаціях: розробки та досягнення до 100-річчя Національної академії наук України: XVII Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 24–25 вересня 2018 року: тези доповіді. Київ, 2018. С. 233–236.

16. **Шаповалов Є. Б.**, Якименко І. Л., Шаповалов В. Б., Салавор О. М. Особливості врегулювання відносин в галузі виробництва метану в Україні та ЄС. Наукові проблеми харчових технологій та промислової біотехнології в контексті Євроінтеграції: VII Міжнародна науково-технічна конференція, м. Київ, 6–7 листопада 2018 року: тези доповіді. К., 2018. С. 110–114. *(Здобувачем проведено аналіз особливостей нормативної бази України та ЄС щодо метанової ферментації курячого посліду).*

17. Ahmed Z., **Shapovalov E.**, Stabnikov V., Zhadan S., Salyuk A., Sallem S., Ivanov V. Large-scale application of iron-containing mineral resources in environmental engineering. Sustainable Mineral Resource Development & Utilization: 1st International Conference, Jamshoro, Pakistan, 12–13 February 2019: abstract. Jamshoro, Pakistan, 2019. P. 72. *(Здобувачем здійснено теоретичне дослідження сорбтивної здатності ферумвмісних мінералів щодо амонійного Нітрогену).*

18. Салюк А. І., **Шаповалов Є. Б.** Водоспоживання метанової ферментації курячого посліду як ключовий аспект до поширення технології. Розвиток біоенергетичного потенціалу в сільському господарстві: IV Міжнародний науково-практичний семінар, м. Київ, 15–16 лютого 2019 року: тези доповіді. К., 2019. С. 114–117. *(Здобувачем обґрунтовано*

водоспоживання як основний чинник, що перешкоджає поширенню технології анаеробної ферментації курячого посліду).

19. Салюк А. І., **Шаповалов Є. Б.**, Тарасенко Р. А. Зниження концентрації амонійного Нітрогену в процесі твердофазної ферментації шляхом додавання глиноподібних сорбентів. Хімічні проблеми сьогодення: II Міжнародна (XII Українська) наукова конференція студентів, аспірантів і молодих учених, м. Вінниця, 19–21 березня 2019 року: тези доповіді. Вінниця, 2019. С. 178. *(Здобувачем проведено дослідження здатності глини до сорбції амонійного Нітрогену в процесі анаеробної ферментації курячого посліду).*

20. Stabnikov V., Ivanov V., Salyuk A., Stabnikova O., **Shapovalov E.**, Zubair A. Biotechnological application of iron ore mining waste in environmental engineering. European dimensions of sustainable development: international conference. Kyiv, 23–24 April 2019: abstract. K., 2019. P. 29. *(Здобувачем розглянуто особливості біотехнологічного застосування відходів у екологічній інженерії).*

21. Салюк А. І., **Шаповалов Є. Б.** Стан розвитку біогазових установок в Україні. Європейські виміри сталого розвитку: Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 23–24 квітня 2019 року: тези доповіді. К., 2019. С. 30. *(Здобувачем побудовано інтерактивну карту розміщення біогазових установок та проведено аналіз щодо стану розвитку біогазових технологій в Україні).*

22. **Шаповалов Є. Б.**, Шаповалов В. Б. Досвід розвитку біогазових технологій в Україні та ЄС. Європейські виміри сталого розвитку: Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 23–24 квітня 2019 року: тези доповіді. К., 2019. С. 33–34. *(Здобувачем проведено аналіз основних чинників розвитку біогазових установок в Україні та ЄС).*

23. Жадан С. А., **Шаповалов Є. Б.**, Тарасенко Р. А., Усенко С. А., Салюк А. І. Спосіб производства биогаза с куриного помета. Екологія. Людина. Суспільство: XX Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 23 травня 2019 року: тези доповіді. К., 2019. С. 50–52. *(Здобувачем розроблено та описано технологічні рішення, використані для опису технологій).*

## АНОТАЦІЯ

**Шаповалов Є. Б. Удосконалення біотехнології анаеробної ферментації курячого посліду зі зниженою кількістю стоків.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 03.00.20 «Біотехнологія». Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ, 2019.

Дисертацію присвячено дослідженню підходів до зниження кількості утворення стоків у процесі анаеробної ферментації курячого посліду.

Проведено дослідження стабільності анаеробної ферментації у твердофазних умовах і запропоновано підхід до інтенсифікації процесу.

Досліджено анаеробну ферментацію курячого посліду за умови рециркуляції рідкої фази з вилученням амонійного Нітрогену.

Здійснено економічну оцінку обох підходів та обґрунтовано вищу економічну ефективність за використання рідиннофазної ферментації з рециркуляцією рідкої фази.

Запропоновано новий метод відновлення сорбенту для вилучення амонійного Нітрогену, що передбачає економічно привабливий метод виробництва амоніаку.

Розроблено біотехнологію анаеробної ферментації курячого посліду за умови рециркуляції рідкої фази, що характеризується значимим зниженням кількості стоків.

**Ключові слова:** курячий послід, біотрансформація, анаеробна ферментація, стоки, амонійний Нітроген.

## АННОТАЦИЯ

**Шапвалов Е. Б. Совершенствование биотехнологии анаэробной ферментации куриного помета с пониженным количеством стоков.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 03.00.20 «Биотехнология». Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины. Киев, 2019.

Диссертация посвящена исследованию подходов к снижению количества образования стоков в процессе анаэробной ферментации куриного помета.

Проведено исследование стабильности анаэробной ферментации в твердофазных условиях и предложен подход к интенсификации процесса.

Проведено исследование анаэробной ферментации куриного помета при рециркуляции жидкой фазы с изъятием аммонийного азота.

Осуществлена экономическая оценка обоих подходов и обоснована более высокая экономическая эффективность при использовании жидкофазной ферментации с рециркуляцией жидкой фазы.

Предложен новый метод восстановления сорбента для извлечения аммонийного азота, предусматривающий экономически привлекательный метод производства аммиака.

Разработана биотехнология анаэробной ферментации куриного помета при рециркуляции жидкой фазы, характеризующаяся значительным снижением количества стоков.

**Ключевые слова:** куриный помет, биотрансформация, анаэробная ферментация, стоки, аммонийный азот.

## ANNOTATION

**Shapovalov Ye. Improvement of Chicken Manure Anaerobic Digestion Biotechnology With Reduced Wastewater Production.** – The Manuscript.

The thesis for scientific degree of candidate of technical sciences in specialty 03.00.20 «Biotechnology». National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Kyiv, 2019.

The dissertation is devoted to the study of approaches to reducing the amount of wastewater formation in the process of chicken manure anaerobic digestion.

It has been proved that dry anaerobic digestion of chicken manure is characterized by low stability due to high concentrations of ammonium Nitrogen and hydrogen sulfide. The coefficient of variation of methane production ranged from 14.84 to 35.17 % in the mesophilic conditions and from 14.4 to 78.21 % in the thermophilic conditions. The highest coefficient of variation is characteristic of humidity of 78 % in thermophilic conditions, which is due to the presence of anaerobic fermentation inhibiting factors. It is worth noting that the moisture content had a much greater effect on the stability of the process in thermophilic mode than in mesophilic mode.

Co-fermentation of chicken manure with glycerol after biodiesel production in concentrations of 10 %, 20, 30 % is characterized by decreasing the process efficiency. Biogas and methane production was observed only in case of 10 % addition of glycerol and it was decreased. During the anaerobic digestion process with addition 20 and 30 % of glycerol, biogas production wasn't observed at all. It may be due to that glycerol can contain alkali and methanol residues. Given that both mesophilic and thermophilic co-fermentation of chicken manure with biodiesel waste reduced the efficiency of anaerobic fermentation wasn't determined at all. Due that co-fermentation of chicken manure inhibition is caused by factors other than ammonium, it is appropriate to note that inhibition as a fact manifests itself much more strongly in thermophilic mode than in mesophilic ones.

A more promising effect to intensify the dry anaerobic digestion of chicken manure is clay additions. The bentonite clay is characterized by better efficiency of ammonium sorption than agrellite clay. The addition of 25 % of red bentonite clay with an iron content of 15 % leads to decreasing of inhibition by both, ammonia and sulfides. The addition of bentonite clay allows for greater process stability. A close correlation between the content of red bentonite clay and the concentration of ammonium and hydrogen sulfide was established.

During liquid anaerobic digestion of chicken manure with liquid phase recycling, it is proved the possibility of process intensification by sorption of ammonia using phosphoric acid located in the bioreactor. Therefore, biogas production in the control reactor varied from 0.044 to 0.83 l/(l·day) and 0.11 to 1.1 l/(l·day) in control bioreactor and bioreactor with ammonia reduction, respectively. The methane content in biogas from the bioreactor with ammonia sorption is significantly higher than in control bioreactor and it varied from 70 to 90 %. It is found that ammonia sorption leads to pH, conductivity, ammonium content, free ammonium content, and ammonia content in gas phase decreasing.

The content of free ammonia during the seventh retention in the control reactor ranged from 1986.6 to 2510.8 mg/l, and in the experimental from 919.6 to 1445.4 mg/l. The average concentration of free ammonia during the seventh retention in the control reactor was 2136.8 mg/l and in the experimental 1285.7 mg/l. It means, that the efficiency of free ammonia content decreasing was 40 %. The process inhibition in the control bioreactor was much more intense than in the experimental one and is the explanation for the significant difference in biogas production.



To find the quantity of recycled effluent during which ammonia content will not be higher than inhibition level (3 g/l), the mathematical modeling of sorption process was provided for recycled effluent quantity of 10–60 %, for the pH levels of 7.5, 8.0 and 8.5 and hydraulic retention time of 5 and 10 days. It is found that a safe content of ammonia can be obtained during using 40 % of effluent recycling in case of pH 8.0 and hydraulic retention time of 10 days. The degree ammonium extraction can be significantly increased by changing the geometric dimensions of the biogas plant, increasing the contact area of the sorbent with the gas phase and the hydraulic retention time.

It is proved that more economically effectively for minimization of more wastewater quantity is the technology of effluent recycling during liquid anaerobic digestion of chicken manure with payback period of 1.25 years compared to more than 3 years during dry anaerobic fermentation with clay addition.

It proved the efficiency of catalysis proving to decrease the volume of effluent and stop permanent biological activity during its storage. In addition, catalytical pyrolysis increases quality of the fertilizers by increasing the humate content which led to its cost increasing. It is proved, that obtained by catalytical pyrolysis fertilizer is characterized by high content of humates and will be useful for agriculture.

The technology of sorbent regeneration which can provide its recycling without the necessity of additional sorbent purchasing costs is designed. The technology provides low-cost ammonia production which can be used as a single product or as fuel in ammonia fuel cells. The research results show that intensive process of the sorbent regeneration begins at the temperature of 80 °C. However, choosing the temperature modes will depend on the installation used produced ammonia.

It is proposed to increase the sorbent area to provide increasing of the efficiency of ammonia sorption. Biogas reactor with larger sorbent area was developed. It differs from the previously proposed reactor by the increasing of the sorption tanks number.

Anaerobic digestion biotechnology of chicken manure utilizing effluent recycling is characterized by the lower quantity produced wastewater and by high economical attractiveness with 1.25 years of payback period and annually profit 60142 thousand UAH when using poultry farms with the 750 thousand of laying hens.

**Key words:** chicken manure, biotransformation, anaerobic digestion, effluent, ammonium.

Підписано до друку 08.11.19  
Ум. друк. арк. 0,9  
Наклад 100 прим.

Формат 60x84\16  
Обл.-вид.арк. 0,9  
Зам. № 191019

Віддруковано у редакційно-видавничому відділі НУБіП України  
вул. Героїв Оборони, 15, Київ, 03041  
тел.: 527-81-55



