

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра машиновикористання та сервісу технологічних систем

Кваліфікаційна робота

на правах рукопису

ГОРДІЄНКО ВЛАДИСЛАВ СЕРГІЙОВИЧ

УДК 631.171

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**ОБГРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ
УТИЛІЗАЦІЇ ВІДХОДІВ ПТАХІВНИЦВА**

208 “Агроінженерія”

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр

кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело _____ В.С. Гордієнко

Керівник роботи

Савченко В.М.

к.т.н., доцент

Житомир – 2020

АНОТАЦІЯ

Гордієнко Владислав Сергійович. Обґрунтування технологічного процесу утилізації відходів птахівництва. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 208 – Агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2020.

На основі біохімічної природи анаеробного розпаду відходів птахівництва встановлено можливість акумуляції та застосування енергії, що утворюється в процесі утилізації відходів птахівництва та виділяється в результаті спалювання біогазу.

На основі аналізу існуючих конструкцій і пошукових експериментів, виконана структурна оптимізація процесу. В якості активатора процесу нами запропонована болотна рідина. Досліджено та обґрунтовано енергозберігаюча технологія вироблення біогазу в природних та ізотермічних умовах, що представляє інтерес птахівницьких господарств. Запропонована конструктивна схема установки безперервної дії, виготовлена за цією схемою установка використана для апробації отриманих режимів процесу утилізації пташиного посліду.

Розроблено математичну модель процесу вироблення біогазу з використанням методики планування чотирьохфакторного експерименту, оптимізовані параметри, що відповідають умовам енергозбереження: температура – 54,6 °С; тривалість процесу – 128 годин; частота перемішування – 8 раз за восьми годинний робочий день; концентрація активатора – 0, 18%.

Ключові слова: утилізація, біогазові установка, добрива, біогаз, оптимізація.

ANNOTATION

Gordienko Vladislav Sergeevich. Substantiation of the technological process of poultry waste utilization. - *Qualification work on the rights of the manuscript.*

Qualifying work for a master's degree in specialty 208 - Agricultural Engineering. - Polissya National University, Zhytomyr, 2020.

Based on the biochemical nature of anaerobic decomposition of poultry waste, the possibility of accumulation and use of energy released during utilization and energy released by biogas during combustion has been established.

Based on the analysis of existing structures and search experiments, the structural optimization of the process is performed. As an activator of the process we have proposed swamp liquid. The energy - saving technology of biogas production in natural and isothermal conditions, which is of interest to poultry farms, has been studied and substantiated. The proposed structural scheme of the installation of continuous operation, made according to this scheme, the installation is used to test the obtained modes of the process of utilization of bird droppings.

A mathematical model of the biogas production process using the planning method of a four-factor experiment has been developed, the parameters corresponding to the energy saving conditions have been optimized: temperature - 54.6 ° C; process duration - 128 hours; mixing frequency - 8 times in an eight-hour working day; activator concentration - 0, 18%.

Key words: utilization, biogas plant, fertilizers, biogas, optimization.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ СХЕМИ СПОСОБІВ УТИЛІЗАЦІЇ ПТАШИНОГО ПОСЛІДУ.....	9
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	15
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ОТРИМАННЯ БІОГАЗУ.....	24
ВИСНОВКИ.....	32
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	33

ВСТУП

Динамічно розвиваючі в Україні економічні перетворення об'єктивно розкривають виробничу діяльність підприємств агропромислового комплексу, відкривають широкі можливості для творчої активності та ініціативи господарських керівників і фахівців, створюючи при цьому умови для виходу на міжнародне взаємовигідне співробітництво. В агропромисловому комплексі існують підприємства підвищеної екологічної небезпеки, специфічною характеристикою яких нині, є те, що з нарощуванням потужностей, збільшенням обсягів товарообігу, пропорційно зростає їх небезпека для навколишнього середовища.

Найбільш яскравим представником такого роду підприємств є птахофабрики. Органічні відходи курячого посліду, що скупчуються на ефективно працюючих птахофабриках, фактично перетворює їх на «екологічну бомбу» величезної руйнівної сили, що отрує не тільки атмосферу самої птахофабрики, а й землю, і водні артерії, прилеглі до неї. З урахуванням величезної кількості існуючих на території України великих і середніх птахівницьких господарств і, відповідно, обсягів відходів безперервно утворюються на їх площах, очевидним стає загострення проблеми утилізації цих органічних відходів. Все вище викладене складає негативну сторону проблеми [1-3].

Використовуючи прогресивні технології власник великих птахофабрик можуть перетворити свої підприємства ефективні, економічно доцільні і головне екологічно чисті господарства. При цьому мається на увазі виключно проблема утилізації органічних відходів і, зокрема, курячого посліду. Основою такого перетворення є цінність утилізованих відходів, причому цінність багатofакторна, так як утилізований курячий послід є не тільки високоефективним багатокomпонентним органічним добривом, але і білковою кормовою добавкою, а також використовується для отримання біогазу.

Розвиток технологій мікробіологічної анаеробної переробки біомас можна пов'язати з етапом початку аналізу запасів енергетичних ресурсів Землі. Сировинні ресурси Землі використовувалися впродовж багатьох сторіч, і лише в останні десятиліття багато країн зіткнулися з реальним і часом критичним дефіцитом газу та інших видів корисних копалин.

Дана ситуація наштовхнула вчених на можливість використання в економіці ресурсів біосфери і, зокрема, біомаси. Однією із дуже ефективних можливостей використання біомаси в зазначених цілях і є мікробіологічна анаеробна конверсія її в біогаз.

Біомаса - найдешевша і великомасштабна форма акумульованої та відновлюваної енергії. Під біомасою можна мати на увазі будь-які матеріали біологічного походження, продукти життєдіяльності і органічні відходи, що утворюються в процесі їх переробки. Щорічний приріст біомаси на землі становить 200 млрд. тонн, що еквівалентно $3 \cdot 10^{11}$ Дж енергії. Ця величина приблизно в 10 разів перевищує річне споживання енергії усім людством на Землі.

Системи перетворення енергії біомаси для отримання біопалив досить різноманітні. Потенційною сировиною для виробництва біопалива може служити курячий послід.

Аналіз теплотворної здатності різних видів палива показує, що енергоємність біогазу перевищує відповідний показник бурого вугілля в 1,52 рази і становить 0,54% від очищеного газу.

Розроблюваний технологічний процес утилізації відходів птахівництва повинен відповідати економічно виправданою мінімізації втрат і витрати енергії, тобто вимогам енергозбереження.

Незважаючи на те, що багато видів виробництва існують давно, витрати енергії в них все ще не наблизилися до мінімальних розрахункових значень. Це свідчить скоріше про відсутність методології та системності в

енергозбереженні різних виробництв, пов'язаному більше з їх безальтернативністю, ніж з науковою і технічною неможливістю.

В зв'язку з цим сутність роботи полягає в обґрунтуванні та розробці технологічного процесу утилізації відходів птахівництва з використанням біогазових установок.

Мета і задачі дослідження. Мета дослідження - роботи є обґрунтування енергозберігаючої технології утилізації пташиного посліду на основі розробки і застосування біогазових установок.

Відповідно до поставленої мети вирішувалися завдання:

- обґрунтувати наукову передумову можливості об'єднання в єдиний цикл технології зброджування відходів птахівництва на установках безперервної дії;
- дослідити технологічний процес утворення біогазу в природних та ізотермічних умовах і обґрунтувати технологічні закономірності на основі мікробіологічної природи анаеробного розпаду відходів птахівництва;
- розробити модель утилізації відходів птахівництва, яка визначає умови енергозбереження.

Об'єкт дослідження: процес отримання біогазу та органічного добрива.

Предмет дослідження: енергетичні установки та мікробіологічні системи.

Методи дослідження. Основні дослідження виконано з використанням загальнонаукових методів пізнання, теплотехніки, теплофізики, хімії та механіки. Обробку експериментальних даних виконано за допомогою методів математичної статистики.

Перелік публікацій за темою роботи:

1. Савченко В. М., Гончарук В. А., **Гордієнко В. С.** Обладнання біогазових установок. Збірник тез V-ї Всеукраїнської науково-практичної конференції *«Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь»*. 28-29 березня 2019 року м. Житомир. ЖАТК. С. 267-271.

2. Гончарук В. А., Гордієнко В. С. Результати досліджень біогазової установки. Збірник тез VI-ї всеукраїнської науково-практичної конференції *«Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь»* 9-10 квітня 2020 року. Житомир : ЖАТК. С. 168-172

3. Гордієнко В.С. Конструктивно-технологічні схеми способів утилізації пташиного посліду. IX Міжнародної науково-технічної конференції *«Технічний прогрес у тваринництві та кормовиробництві»*, 5-24 жовтня 2020 року, смт. Глеваха Київської області, Національний науковий центр «ІМЕСГ» НААН України. м. Київ, Національний університет біоресурсів і природокористування України. Видавничий центр НУБіП України, 2020.

Практичне значення одержаних результатів. Результати роботи можуть бути впровадженні в тваринницьких комплексах агропромислових підприємств України.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 24 найменування. Загальний обсяг роботи становить 35 сторінок комп'ютерного тексту, містить 3 таблиці і 8 рисунків.

РОЗДІЛ 1

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ СХЕМИ СПОСОБІВ УТИЛІЗАЦІЇ ПТАШИНОГО ПОСЛІДУ

У теперішній час існують різні технології утилізації пташиного посліду.

Сушка пташиного посліду в приміщенні дозволяє зберігати корисні речовини в посліді і видаляти летючі його компоненти. Сушка істотно зменшує запах, дає можливості для складування і зменшує транспортувальні витрати. Стандартно система складається з двох ступенів.

Перша ступінь являє собою підсушку посліду безпосередньо на стрічках послідовидалача за допомогою повітря ззовні. У деяких випадках повітря ззовні змішується з теплим повітрям з пташника або підігрівається в теплообміннику.

На другому ступені вже підсушений послід сушиться за допомогою теплого повітря, що забирається з пташника.

З 1998 року компанія Dorset прийняла рішення використовувати в конструкції сушок тільки сталеві перфоровані пластини замість пластикової перфострічки, внаслідок низької надійності і високих вимог до обслуговування останньої. До того ж сталеві панелі здатні мати велику щільність перфорації, ніж пластикові стрічки, завдяки чому конструкція сушки Dorset значно компактніше. У Нідерландах сушка Dorset для 60000 курей-несучок має наступні габарити 22x2,5x3,5 м. Конструкція основана на довговічній конструкції промислової пасової сушки. При закритій конструкції галереї, де розташовуються сталеві перфоровані панелі, сушиться на 30% більше посліду. Багато фабрик не використовують першу фазу підсушування помету, заощаджуючи при цьому енергію. Система сушіння може бути доповнена заводом для грануляції [1,4].

Пасова сушка складається з фронтальної зони, зони сушки, довжина якої варіюється, кінцевої зони.

У фронтальній зоні свіжий або підсушений послід подається на сушку за допомогою конвеєра. Перфоровані панелі скидають сухий послід на розвантажувальний шнек [5-7].

У кінцевій зоні послід, пройшовши зону сушіння, падає з верхнього рівня на нижній. По нижньому рівню послід подається у фронтальну зону. Зона сушки складається з дворівневого конвеєра і бічних панелей. Конвеєр складається з перфорованих сталевих панелей. Сушка складається з секцій довжиною 300 см, кількість секцій не більше семи. Сушка моделі МВ складається з одного конвеєра, моделі МВБ - з двох конвеєрів, один над іншим [8-9].

Стрічки послідовидальча з підсушеним послідом знаходяться в пташнику.

Якщо стрічки послідовидальча порожні, то спочатку необхідно оцінити, скільки стрічок необхідно розвантажити для того, щоб забезпечити продуктивність сушіння, але не перевищити її. Підсушений послід транспортується конвеєром в сушку. Подача посліду повинна бути регулярною. Мінімальна пропускна здатність транспортуючого паса 1 м/год, максимальна 9 м/год. Додатковий ремінь може повертатися до місця найкращою завантаження сушки. У разі захворювань птахів або інших специфічних обставин послід може віддалятися з пташника безпосередньо, минаючи сушку.

Подача посліду на сушку здійснюється з подаючого рухомого паса на розподільчий пасок. Пасова передача отримує привід від реверсивного двигуна. Два кінцевих вимикача забезпечують автоматичне регулювання процесу. Як тільки ремінь активує один з кінцевих вимикачів, він починає рухатися в інший бік після передбаченої затримки. Швидкість руху сталевих перфорованих панелей може варіюватися, що дає можливість регулювати висоту шару посліду [10-11].

Пасова подача посліду допомагає зберегти його структуру, в той час як подача шнеком або гвинтом порушує структуру посліду і тим самим перешкоджає його сушці.

Перфоровані панелі виготовлені алюмінієвими або сталевими з покриттям. Покриття робить панелі менш липкими, що дає можливість використовувати більш вологий послід. Ланцюговий привід подає панелі до торця сушки. Далі панель опускається і йде у зворотному напрямку. Стандартно площа перфорації займає 35% від усієї площі панелі. Товщина шару висушуваного посліду дорівнює 15 см. Існує ряд способів визначення вмісту сухої речовини в посліді. Визначення на око, найбільш дешевий і швидкий спосіб визначення вмісту сухої речовини у висушеному продукті.

Швидкість проходження перфорованих панелей може регулюватися, таким же чином регулюється товщина шару посліду. У подвійній версії сушки швидкість нижніх панелей може відрізнятись від швидкості верхніх. Коли пташиний послід на верхньому рівні завантажений, послід з нижнього рівня подається на розвантажувальний. За допомогою шнека послід подається на склад для зберігання або подальшої переробки. Тільки частина повітря з пташника використовується для сушіння посліду. Вентилятори можуть розташовуватися як перед сушінням, так і після нього, залежно від технічних умов. Розрядження, що створюється вентиляторами, має становити 150 Па.

У деяких випадках набагато зручніше будувати окрему будівлю для сушки. Особливо це вигідно у випадках великих обсягів посліду. При цьому частина приміщення може бути зайнята сушінням, а інша використовуватиметься для складування сухого посліду. Необроблений послід з сушок занадто громіздкий (250 кг/м) для транспортування та продажу. Крім того, послід з великими грудками і пір'ям не виглядає привабливим для споживача. Тому послід нарізається і пресується, витримується при температурі 70 °C протягом 1 години і розфасовується в великі чи маленькі пакети. Обсяг посліду зменшується на 250%, що знижує витрати на транспортування і робить товар привабливим для споживачів. Завантаження необробленого матеріалу відбувається за допомогою трактора або карта. Необроблений матеріал збирається до складського відсіку. Складський відсік використовується для

зберігання курячого посліду. Місткість сховища становить 100 т. Неопрацьований послід з складського відсіку проходить через розвантажувальний шурф, гвинтовий конвеєр, елеватор і потрапляє в буферний контейнер. У деяких випадках доцільно провести подрібнення частинок в молотковій дробарці [12-14].

Завод розроблений для двох ліній грануляції. Продуктивність кожної лінії становить по 2...3 т/год. Буфер над гранулятором забезпечений індикаторами з двома рівнями. З буфера маса надходить через дозуючий гвинтовий конвеєр з регульованою швидкістю обертання в обертаючий змішуючий гвинтовий конвеєр. Продукт нагрівається парою до 60 °С. Змішуючий гвинтовий конвеєр подає необроблений матеріал у гранулятор. Гранулятор забезпечений системою з п'яти роликів. Після запресування гранули надходять через поворотну заслінку у відновник, до якого подається пар, необхідний для підтримки температури продукту на рівні 70 °С [15-20].

У відновлювачі продукт повинен бути витриманий 60 хвилин. Відновлювач виконаний з нержавіючої сталі і обладнаний паровою сорочкою. Завдяки цій обробці, продукт на виході з відновника не містить сальмонелу. З відновника гранули надходять через стрічковий конвеєр і поворотну заслінку в протиточні охолоджувачі. У охолоджувачі гранули охолоджуються до температури на 5 °С вище температури навколишнього середовища. Пил від циклопа збирається в контейнер. З охолоджувача гранули подаються по стрічковому транспортеру на пакувальну лінію.

Кінцевий продукт вивантажується в бункер над пакувальною лінією. З бункера продукт потрапляє через електропневматичну решітку в бак над ваговибійним апаратом [21-23].

Напівавтоматичний ваговибійний апарат, призначений для розфасовки гранул з продуктивністю 100 мішків по 25 кг на годину. Заповнені мішки занурюються на стрічковий транспортер, де вони прошиваються на швейній

машині. Після прошивки мішки встановлюються на піддон, потім можуть бути складені на палети [24].

Висновки по розділу 1

Закінчуючи розділ необхідно зазначити:

- існуючі установки утилізації пташиного посліду в країнах Європи, США, Китаї є дорогим устаткуванням.
- режими утилізації посліду для фермерських господарств методами анаеробного зброджування, вермифтехнології, сушінням і грануляцією, які застосовуються в зарубіжних країнах, потребують доопрацювання стосовно до умов великих птахофабрик України;
- в нашій країні недостатньо відпрацьованих технологій, які дозволяють вирішити проблему утилізації відходів тваринництва.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Для отримання достовірних результатів і зниження випадкових помилок експерименти проводяться з триразовою повторюваності. Збільшення числа повторень визначається в кожному конкретному випадку, дані обробляються в системах статистичного аналізу Microsoft Excel та статистичної графічній системі STATGRAPHICS (STATistical GRAPHICS System) plus for Windows фірми Manugistics.

Метою експериментальних досліджень є перевірка запропонованих наукових передумов можливості об'єднання в єдиний цикл трьох стадій процесу утилізації та визначення оптимальних параметрів роботи біогазових установок, що задовольняють технологічним вимогам при мінімальних енерговитратах.

Експериментальні дослідження проведені відповідно до чинних норм і загальноприйнятими методиками досліджень машин, забезпечують отримання первинної інформації у вигляді реалізацій випадкових процесів з наступною їх обробкою на персональному комп'ютері.

У процесі проведення досліджень використані наступні прилади та обладнання:

- термошафа;
- PENTIUM 4 - 2.0 ГГц з DVD-RW TEAC;
- Digital camera «Samsung SHD LENS-S830» - 3X opt. zoom 8.1 megapixel;
- ваги лабораторні ВЛТК-500;
- манометр електричний;
- манометр водний;
- Термометр РТ-049-4

Для експериментального обґрунтування наукової передумови проведені дослідження анаеробного зброджування пташиного посліду в три стадії. На

першій стадії експерименти проводилися при температурі від 18 °С до 35 °С, на другій стадії від 35 °С до 45 °С, на третій стадії від 45 °С до 55 °С. На першому етапі досліджено вплив параметрів процесу на вироблення біогазу в природних умовах без підігріву на лабораторній установці ємністю реактора 2,6 кг (рис. 2.1 і 2.2), при відключеній термошафі.

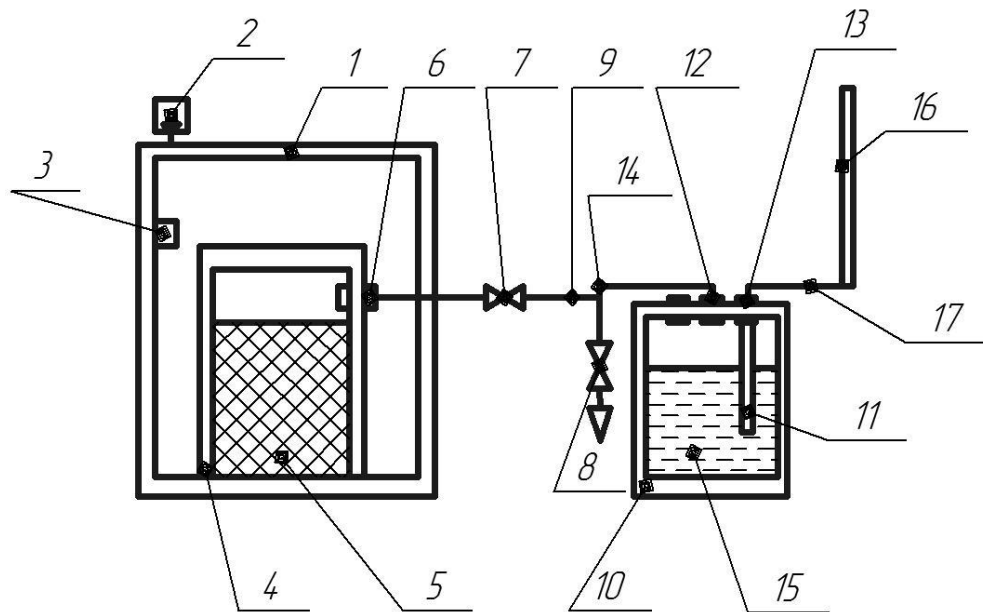


Рис. 2.1. Основні параметри лабораторної установки отримання біогазу: 1 – термошафа; 2 – термометр; 3 – датчик; 4 – реактор; 5 – біомаса; 7,8 – крани; 9,17 – шланги; 10 – водний затвор; 11 – трубка; 6,12,13,14 – ущільнення, 15 – вода; 16 – манометр.

Принцип роботи установки полягає в наступному. Одночасно із завантаженням біомаси в реактор, біомаса заражалась болотною рідиною. Вимірювання тиску виробленого біогазу проводилося водним манометром. На другому етапі досліджень реактор встановлювали в термошафу. На третьому етапі дослідження проводилися на експериментальній установці (рис. 2.2). У реактор подавалась шнеком зброжена маса з бункера гноєсховища, пов'язаного з накопичувачем. Для контролю параметрів процесу всередині корпусу реактора встановлювалися датчики температури, тиску і витратоміра. Періодично біомаса перемішувалася крильчаткою. Отриманий біогаз

накопичувався в ресивері. Видалення відпрацьованої біомаси проводили через зливний отвір.

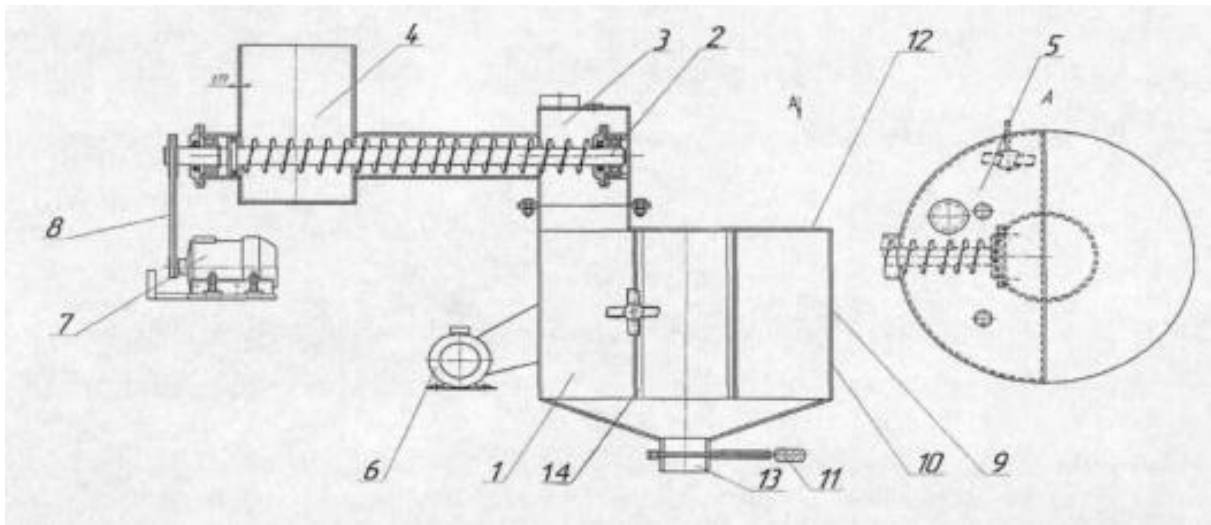


Рис. 2.2. Схема експериментальної установки утилізації відходів і птахівництва: 1 – реактор; 2 – шнек; 3 – бункер гноєсховища; 4 – накопичувач; 5 – крильчатка; 6,7 – електродвигун; 8 – ремінна передача; 9 – датчик тиску; 10 – датчик температури; 11 – засувка; 12 – лічильник газовий; 13 – зливний отвір; 14 – система обігріву.

Для моделювання процесу і проектування установки задіяний пакет Компас - Графік-3D V8, також пакети STATGRAPHICS (STATistical GRAPHICS System) plus for Windows фірми Manugistics., MATLAB- MS Excel.

Для дослідження процесу отримання біогазу використана методика планування багатофакторного експерименту.

Математична модель, що зв'язує критерій оптимізації з вибраними факторами, записується в наступному вигляді:

$$\gamma = f(T, \tau, \nu, K) \quad (2.1)$$

Проведені дослідження та їх аналіз дозволили виділити основні фактори, які найбільш суттєво впливають на виробництво біогазу, це такі фактори:

T – температура, °С;

τ – тривалість ізотермічного циклу, час;

ν – частота перемішування, раз в день;

K – концентрація, %.

При використанні повного факторного експерименту область визначення факторів задана рівнями. Математична модель отримання біогазу описується поліномом другого ступеня:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_4 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{14}X_1X_4 + b_{23}X_2X_3 + b_{24}X_2X_4 + b_{34}X_3X_4 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + b_{33}X_3^2 + b_{44}X_4^2 \quad (2.2)$$

де Y – вихідний параметр;

b_0 – загальний ефект всього експерименту;

b_0, b_1, b_2, b_3 – ефекти факторів;

$b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{24}, b_{34}, b_{14}$ – ефекти парних взаємодій;

$b_{11}, b_{22}, b_{33}, b_{44}$ – ефекти при квадратичних членах;

$X_1 \dots X_4$ – фактори.

На другому етапі дослідження планувалися за методикою чотирьохфакторного експерименту. Рівні, інтервали варіювання і кодування чотирьох факторів наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Інтервали та рівні варіювання факторів

Фактори	Рівні варіювання			Інтервал варіювання
	нижній (-)	основний (0)	верхній (+)	
$X_1, ^\circ\text{C}$	30	35	40	5
$X_2, \text{година}$	6	51	96	6
$X_3, \text{раз в день}$	0	1	2	1
$X_4, \%$	0,15	0,26	0,37	0,11

Проведеними на другому етапі експериментами з обраної моделі встановлено, що максимальні значення параметрів процесу не виявлено. Максимальне значення вхідних параметрів виходить за межі обраного інтервалу варіювання. Звідси випливає необхідність проведення третього етапу досліджень. В основі розробленої математичної моделі закладені розширені інтервали варіювання факторів. Кодування факторів розглядається як вибір відповідного масштабу і точки відліку по осях факторів. Верхній (найбільший) рівень фактора відповідає +1, нижній (мінімальний) відповідає -1, кодоване значення основного рівня фактора (центр експерименту) дорівнює 0. Рівні,

інтервали варіювання і кодування чотирьох факторів для третього етапу наведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Інтервали та рівні варіювання факторів

Фактори	Рівні варіювання			Інтервал варіювання
	нижній (-)	основний (0)	верхній (+)	
X ₁ , °C	35	45	55	5
X ₂ , година	8	64	128	1
X ₃ , раз в день	0	4	8	1
X ₄ , %	0,1	0,14	0,18	0,02

У плануванні експерименту, оптимізації параметрів і режимів значна увага приділяється способам відображення експериментальної інформації. У STATGRAPHICS (STATistical GRAPHICS System) plus for Windows можна ясно і точно бачити особливості аналізованого матеріалу.

Таблиця 2.3. – Матриця експерименту по плану 2⁴

Дослід	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₁	X ₁	X ₁	X ₂	X ₂	X ₃	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄
						X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
						2	3	4	3	4	4	1	2	3	4
1	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	+	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+
4	+	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	0	0	0
5	+	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	+	0	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	0	0
7	+	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
8	+	0	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	0	0
9	+	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	+	+	+	+
10	+	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	+	+	+	+
11	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	+	+	+
12	+	+	-	+	+	-	+	+	-	-	+	+	+	+	+
13	+	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	+	+	+	+
14	+	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-	+	+	+	+
15	+	0	0	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	0
16	+	0	0	0	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+

Одночасно з аналізом чинників використовується модуль планування експерименту STATGRAPHICS Design of Experiment (DOE), що допомагає

сформулювати критерій оптимальності плану експерименту, що пропонує ряд оптимальних планів та продукує всі необхідні табличні та графічні викладки на кожному етапі проведення експерименту. Для отримання аналітичного виразу, з достатньою точністю описуючого поведінку функції в інтересуючій нас області зміни факторів, експеримент проведений за планом другого порядку. Враховуючи все вище сказане, було прийнято рішення про проведення випробувань за планом 2^4 . Матриця планування в розгорнутому вигляді за планом другого порядку представлена в табл. 2.3 .

Досліди згідно матриці плану типу 2^4 проводилися в лабораторіях кафедри «Машиновикористання та сервісу технологічних систем» ЖНАЕУ.

Отримане за результатами досліджень рівняння регресії для графічного зображення поверхні відгуку аналізується на комп'ютері звикористанням програм "STATGRAPHIC Plus" for Windows фірми Manugistics, 3D Grapher.

На першому етапі досліджено вплив тривалості процесу на вироблення біогазу та температуру в реакторі. Тривалість циклу 16 днів.

На другому етапі дослідження проводилися в ізотермічних умовах. Розроблений перший варіант математичної моделі виробництва біогазу. Проведено цикл досліджень.

На третій стадії дослідження технологічного процесу в ізотермічних умовах розширено факторний простір:

- температура процесу підвищена до 55 °С;
- частота перемішування збільшена до 8 разів на день;
- концентрація активатора процесу змінена до 0,18%.

Дані досліджень другого етапу були використані при розробці другого варіанту математичної моделі процесу виробництва біогазу.

Проведені дослідження покладено в основу розробленого технологічного процесу одержання біогазу з відходів птахівництва, а моделювання процесу в САПР «КОМПАС-ГРАФІК» дозволяє скоротити час досліджень.

З метою підтвердження результатів теоретичних досліджень проводилася цифрова фото та відеозйомка технологічного процесу отримання біогазу.

Для уточнення і конкретизації явищ процесу, які не може розрізнити око людини, в процесі роботи застосовувалася Digital camera «Samsung SHD LENS-S830» - 3X opt. zoom 8.1 megapixel, що дозволяє «зафіксувати» момент горіння біогазу. Процес закінчення полум'я з мундштука фіксувала цифрова відеокамера «Sony model no. DCR-HC22E».

Включалася експериментальна установка і при стабільності її роботи проводилася фото та відеозйомка процесу виробництва біогазу.

Перед початком відеозйомки експериментальна установка підготовлялася наступним чином: на сталому режимі виробництва біогазу відкривався кран водного затвора, і відбувалося підпалювання біогазу

Фотоматеріал процесу горіння виробленого газу метану відзнятий у кадровому режимі, а відеоматеріал процесу горіння перетворений в цифровий матеріал, і окремі кадри відформатовані з використанням персонального комп'ютера. Характер полум'я, зафіксований в режимі стоп-кадру, відео та фотозйомки підтвердили експериментальні дослідження.

Відзнятий матеріал через USB порт за допомогою комп'ютера переводиться в цифровий відеоформат. Це дозволяє в режимі реального часу і в покадровому режимі аналізувати процес горіння біогазу. У модулі 3D проектування - САПР «КОМПАС-ГРАФІК» задавалося положення біогазового полум'я, отримано графічне відображення процесу, що відбувається.

Проведення експериментальних досліджень і обробка дослідних даних здійснюється за методикою, яка викладена в джерелах відповідно чотирьохрівневому плану Draher-lin small composite design.

Всі досліді повторюються в трьохкратній повторюваності. За результатами визначається середньо арифметична величина показника, що визначається за формулою:

$$\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i, \quad (2.3.)$$

де y_i – значення показника при i -тій повторюваності.

Середнє квадратне відхилення показника визначається по формулі:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{Y})^2}, \quad (2.4)$$

а коефіцієнт варіації:

$$v = \pm \frac{\sigma}{Y} \cdot 100\% \quad (2.5)$$

Обробка результатів дослідження проводяться в наступній послідовності:

Дисперсія помилок дослідів визначається за формулою:

$$S_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^m (y_{ij} - \bar{Y})^2}{N(m-1)}, \quad (2.6)$$

де m – число повторюваності одного дослідів;

N – число строк плану;

y_i – значення критерій оптимізації в паралельних дослідів;

\bar{Y} – середнє значення критерію оптимізації в паралельних дослідів.

Для визначення можливості проведення регресійного аналізу, використовуємо дані однорідності дисперсії паралельних дослідів по критерію Кохрена за формулою:

$$G_p = \frac{S_{y_i \max}^2}{S_y^2} \langle G_m, \quad (2.7)$$

де G_p і G_m – визначене і табличне значення критерія Кохрена (при виконанні умов однорідності дисперсії);

$S_{y_i \max}^2$ – найбільша строкова дисперсія помилки дослідів.

Адекватність моделі перевіряємо за допомогою критерію Фішера. Для цього визначається F -критерій Фішера і порівнюється з табличним значенням.

Для визначення F -критерію використовується формули.

$$F = \frac{S_{LF}^2}{S_y^2}; \quad (2.8)$$

$$S_{LF}^2 = \frac{m \left(\sum_1^N \bar{Y}^2 - N \sum_1^k b_1^2 \right)}{N - (k + 1)}, \quad (2.9)$$

де S_{LF}^2 – дисперсія неадекватності математичної моделі;

S_y^2 - дисперсія помилки досліджу.

Обробка експериментальних даних проводиться на персональному комп'ютері з використанням Microsoft Excel і STATGRAPHICS (STATistical GRAPHICS System) plus for Windows фірми Manugistics.

Висновки по розділу 2.

В другому розділі магістерської роботи розроблена методик проведення дослідження, представлено конструкцію лабораторної установки та математичний апарат для обробки експериментальних даних.

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ОТРИМАННЯ БІОГАЗУ

У природних умовах на лабораторній установці були отримані експериментальні залежності вироблення біогазу і температури в реакторі витривалості процесу і температури навколишнього середовища.

Узагальнені дані досліджень в природних умовах представлені на рис. 3.1.

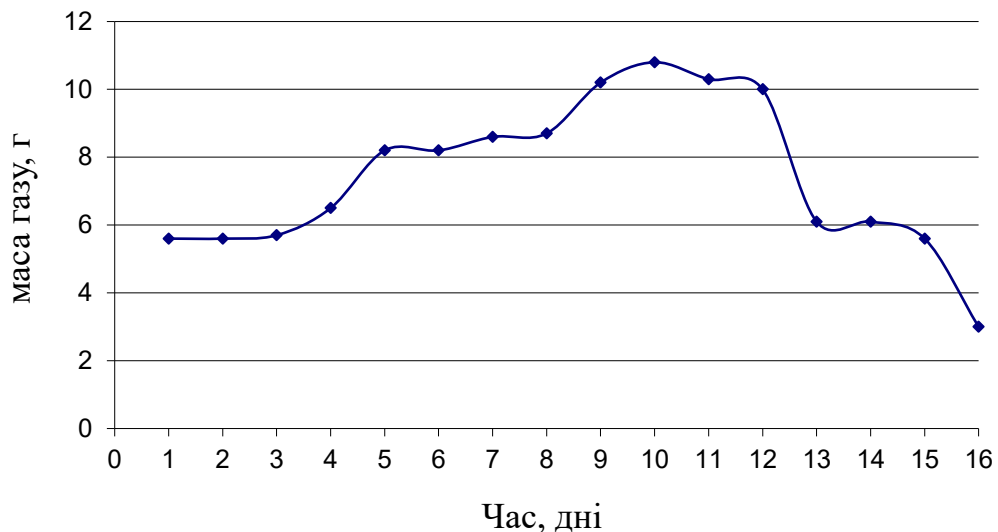


Рис. 3.1 Зміна вироблення біогазу по днях досліджень (в природних умовах)

Температура в реакторі безперервно, але незначно підвищується протягом циклу. Підвищення температури відбувається навіть при зниженні температури навколишнього середовища. Крім того, реактор не мав теплоізоляцію, тому відбувалися втрати тепла в навколишнє середовище. Безперервне збільшення температури процесу пояснюється тим, що при зброджуванні біомаси звільняється енергія за рахунок фізіологічної діяльності мезофільних бактерій. За даними В.Л. Омелянського і М.В. Федорова, окислючись субстрат виділяє енергію східчасто, невеликими порціями, так як процес бродіння пов'язаний з проходженням різних проміжних етапів. При

окисних процесах енергія окислення пов'язана у формі макроергічних фосфатних зв'язків.

Кожний макроергічний фосфатний зв'язок аденозинтрифосфату рівноцінний приблизно 42...48 кДж енергії. Втрати тепла мали місце в нашому процесі, але температура в реакторі підвищувалася. З цієї причини вироблення газу на початку циклу зростає, потім знижується (рис. 3.1). Це пояснюється зниженням життєдіяльності мезофільних бактерій.

На другому етапі дослідження проводилися на дослідній установці в ізотермічних умовах. Проведено цикл досліджень. Зміна вироблення біогазу по днях досліджень в ізотермічних умовах представлено на рис. 3.2.

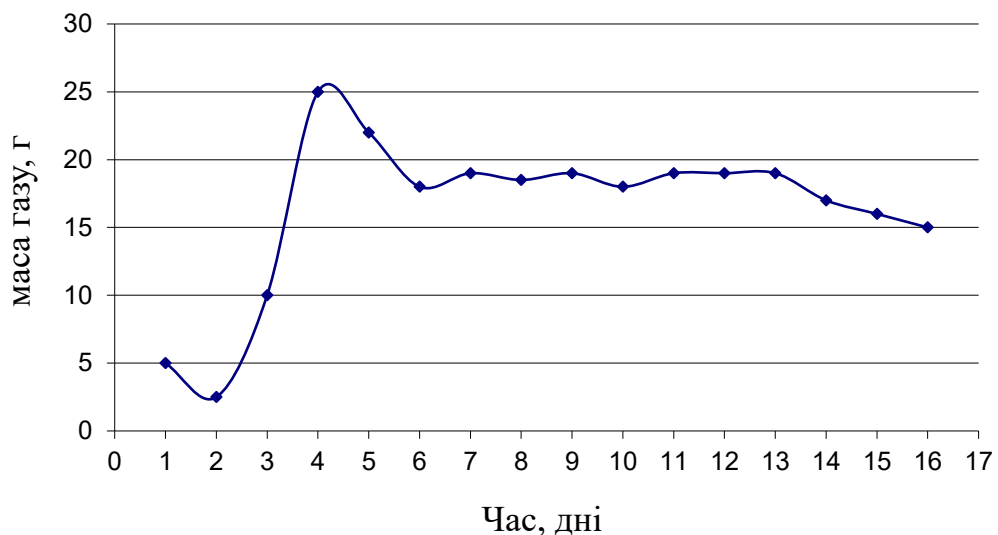


Рис. 3.2 Зміна вироблення біогазу по днях досліджень (в ізотермічних умовах)

З аналізу виробництва біогазу на першому і другому етапах експериментів випливає, що на другому етапі вироблення біогазу зростає. Це обумовлено дією бактерій проміжного етапу в ході процесу утилізації пташиного посліду. За допомогою програми «Statgraphics Plus» отримані графічні зображення поверхонь відгуків, що показують залежність між критерієм оптимізації.

Аналіз ліній рівного виходу (ізоліній) дозволяє встановити, що оптимальне значення вхідних параметрів (температура, частота перемішування

і концентрація) опинилися поза області факторного простору. Таким чином, оптимальні значення параметрів знаходяться за межами обраного інтервалу дослідження.

Як впливає з аналізу експериментальних залежностей першого і другого етапів дослідження, виробництва біогазу на другому етапі значно перевищує виробництво першого етапу експериментів. Більш інтенсивне виробництво біогазу на другій стадії циклу свідчить про високу активність бактерій цього періоду. Отже, можливе об'єднання мезофільної і проміжної стадій процесу анаеробного зброджування пташиного посліду в єдиний цикл.

При розробці моделі процесу на третій стадії розширено факторний простір. Верхній рівень температури підвищений до 55 °С, частота перемішування до 8 разів на день.

Обробка дослідних даних здійснювали по плану Draper-lin small composite desing за методикою викладеною в розділі 2. Отримані залежності виробництва біогазу від параметрів процесу. Вплив параметрів процесу на виробництво біогазу обґрунтовується залежностями процесу анаеробного зброджування біомаси.

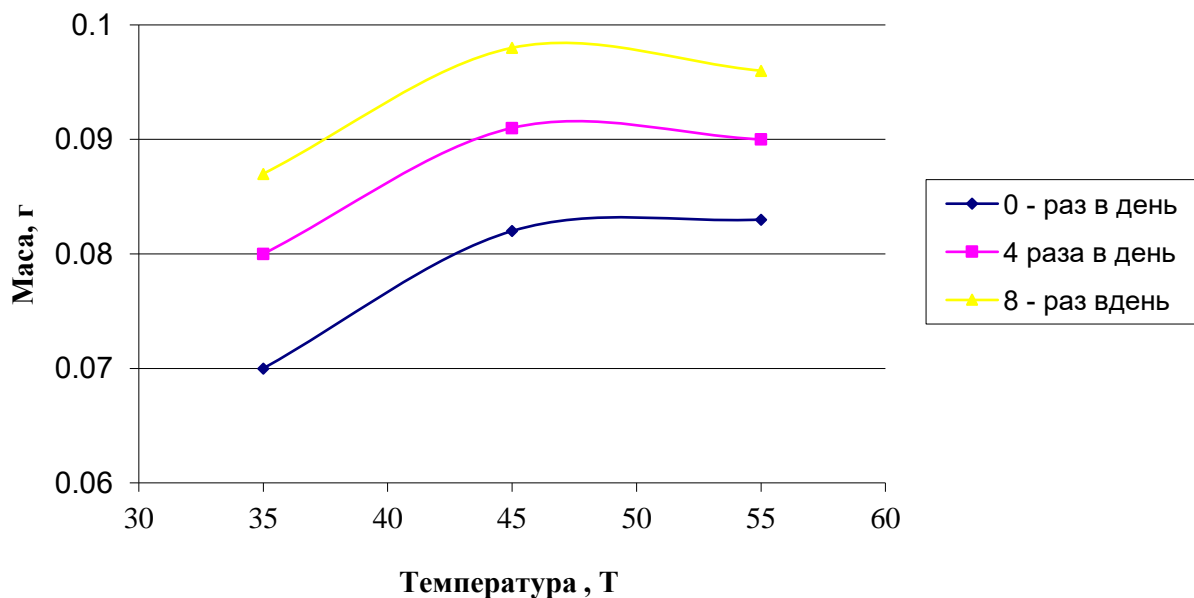


Рис. 3.3. Залежність виробництва газу від температури при різній частоті перемішування ($k=0,14$, $\tau=8$ год).

Аналіз результатів наших досліджень показує, що якщо прийняти вироблення біогазу при температурі 35 °С за 1, то цей показник при температурі 40 °С становитиме 1.1, при температурі 55 °С складе 1.38. Нами запропоновано заражати біомасу болотної рідиною. При введенні в біомасу болотної рідини процес бродіння викликається мезофільними, а в подальшому і термофільними бактеріями.

Із збільшенням числа перемішування збільшується активна поверхня взаємодії зброженої маси з активатором процесу, тобто збільшується вільна енергія біомаси, здатна здійснювати роботу. Таким чином, із збільшенням числа перемішування вироблення біогазу наростає, потім стабілізується.

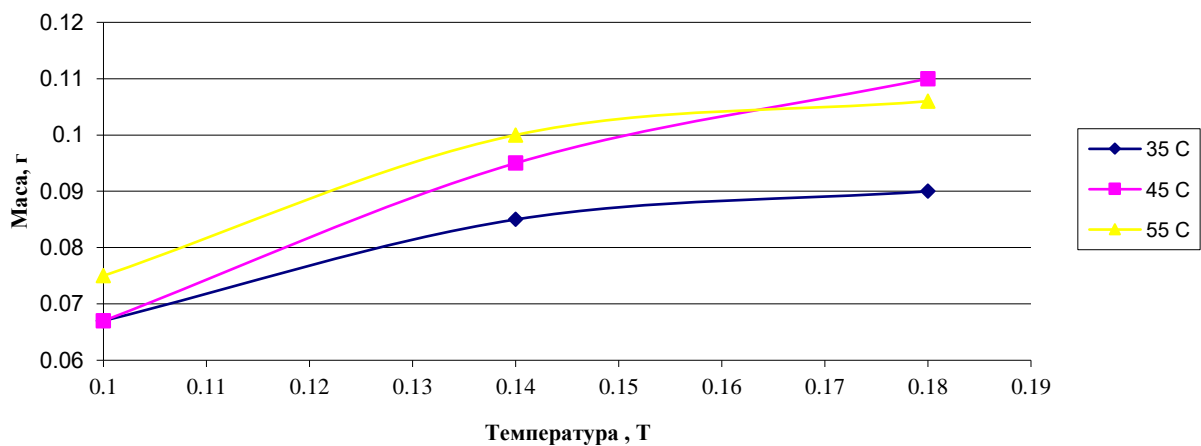


Рис. 3.4. Залежність вироблення газу від концентрації активатора при різних температурах

Відповідно до методики дослідження, температура в реакторі піднімалася поступово, щоб не загинули мезофільні бактерії. Після 35 °С бродіння викликається дією термофільних бактерій, які найбільш ефективно впливають на виробництво біогазу. Наростання виробки зі збільшенням тривалості процесу стабілізується, після 16 дня вироблення і йде на зниження.

Для визначення можливості проведення регресійного аналізу розраховували однорідність дисперсії паралельних дослідів за критерієм Кохрена, при цьому маємо $G_p = 0,081408$.

Розрахункове значення критерію Кохрена G_p порівнюємо з табличним $G_{\text{табл}}$, для ступеня свободи чисельника $f_1 = r-1 = 2$ і числі дослідів $f_2 = N = 16$ при обраному рівні значущості $\alpha = 0,05$, отримуємо $G_{\text{табл}0,05,2,16} = 0,322$.

Бачимо, що $G_{\text{табл}} > G_p$ отже, гіпотеза про однорідність дисперсії відтворюваності дослідів приймається. Звідси дисперсія відтворюваності $S_y^2 = 0,000028$, тоді помилка експерименту $S_y = 0,00529$.

Розрахунок коефіцієнтів регресії моделі здійснюється з використанням програми "Statgraphics Plus",

В результаті розрахунку коефіцієнтів отримано математичну модель процесу отримання біогазу. Таким чином, рівняння запишеться в наступному вигляді:

$$Y=0,106698+0,0145X_1+0,007X_2+0,004X_3+0,019X_4-0,00675X_1^2+0,00825X_1X_2-0,0015X_1X_3+0,00475X_1X_4-0,007264X_2^2-0,00375X_2X_3-0,00025X_2X_4-0,001264155X_3^2-0,003 X_3X_4-0,00626X_4^2 \quad (34.1)$$

Значимість коефіцієнтів перевірялася за критерієм Стюдента. Коефіцієнти моделі регресії вважаються значущими, якщо розрахункові значення t_p більше t_t - критерію табличного, рівного 1.1 для рівня значущості $p = 0,05$.

Після відсіву незначущих коефіцієнтів математична модель процесу має вигляд:

$$Y=0,106698+0,00145X_1+0,007X_2+0,004X_3-0,019X_4-0,00675415X_1^2+0,00475X_2X_4-0,00726415X_2^2-0,00626X_4^2 \quad (3.2)$$

Адекватність результатів експериментів з подальшою математичною моделлю другого порядку перевіряли за допомогою критерію Фішера. Його розрахункове значення знайдене за формулами (2.8) і (2.9); $F_{\text{роз}}=1,33$ виявилось менше табличного $F_{\text{таб}}=1,99$, відповідного 5%-ному рівні значущості і ступенів свободи $f=8$. Отже, рівняння регресії з ймовірністю 95% можна вважати адекватним реальному процесу.

Після розкочування факторів модель об'єкта у фізичних величинах приймає вигляд:

$$Y = -0,69375 + 0,0035T + 0,06525\tau - 0,01365\nu + 9,31875K + 0,00118T\tau - 0,8437\tau K - 0,24375\nu K \quad (3.3)$$

Отримана математична модель процесу вироблення біогазу дозволила визначити оптимальні значення факторів:

де T – температура - 54,6 °С;

τ – тривалість ізотермічного циклу – 128 годин;

ν – частота перемішування, 8 разів на день;

K – концентрація, 0,18%.

Об'єднання в один цикл трьох стадій анаеробного зброджування покладена в основу розробленої конструктивно-технологічної схеми установки анаеробного зброджування відходів птахівництва.

Запуск установки проводиться таким чином. Спочатку відходи птахівництва подаються зі сховища в зовнішній відсік. Потім біомаса заражається болотною рідиною. Включається обігрів секцій реактора. Передача тепла відбувається конвективно від теплообмінника, виконаного у вигляді труб, що омиваються зсередини гарячою водою. Теплообмінник встановлюється в центральній секції. Вільний кінець трубопроводу прийому виведений у верхню частину зовнішньої секції, а трубопровід відведення в нижню частину центральної секції. В результаті анаеробного зброджування в біомасі відбувається ряд послідовних перетворень, що супроводжуються виділенням енергії і газів. За рахунок виділення енергії і виникаючого тиску утворюючих газів відбувається ефект, званий «труба в трубі». Під дією виділення енергії і тиску газів, а також гідростатичного підпору, біомаса з зовнішньої секції реактора переміщається вниз і перетікає в середню секцію - в зону низького тиску. Бродіння триває в середній секції при більш високій температурі +35...+45 °С. При підвищенні тиску в середній секції зброжувана маса переміщається в центральну секцію, в якій температура 45...55 °С. Процесу

зброджування сприяють бактерії болотної рідини, якими заражена біомаса. У зовнішній секції встановлюється перемішуючий пристрій. Частота обертання крильчатки визначає інтенсивність масообміну в зброжуваній масі.

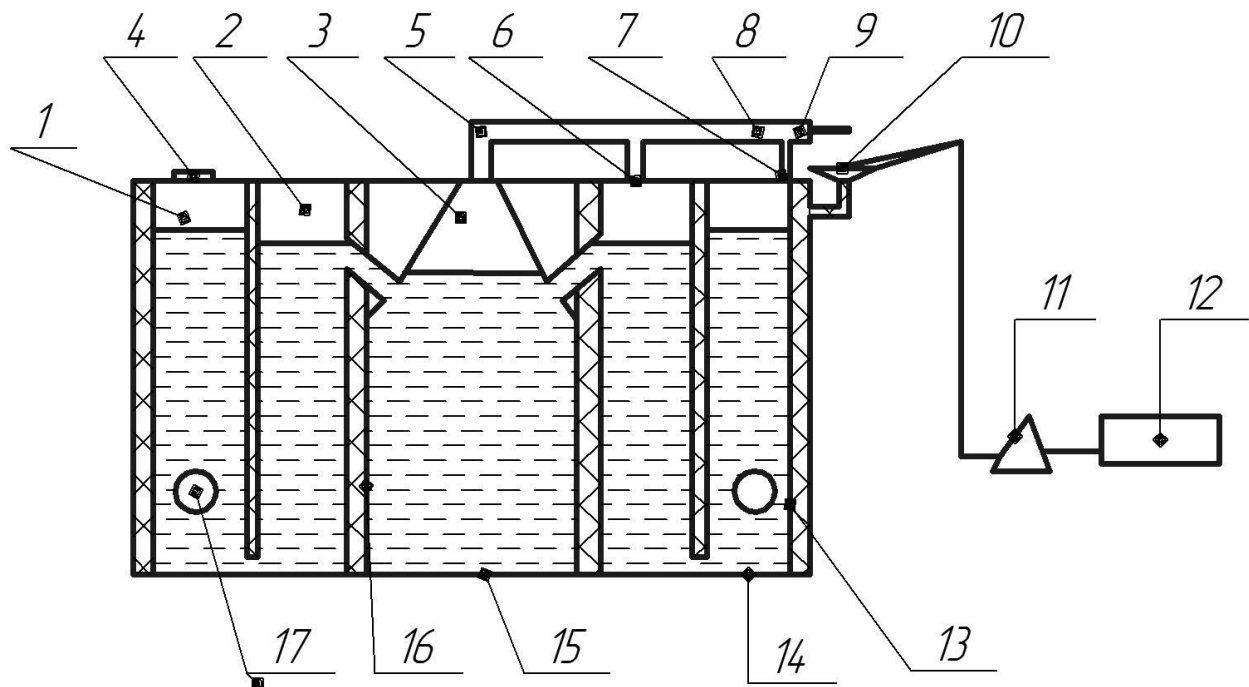


Рис. 3.5. Конструктивно-технологічна схема установки анаеробного зброджування відходів птахівництва: 1 – зовнішня секція; 2 – середня секція; 3 – центральна секція; 4 – люк подачі активатора процесу; 5,6,7 – перепускні клапани; 8 – газозбірник; 9 – випускний кран; 10 – завантажувальний люк; 11 – насосна станція; 12 – сховище; 13 – теплоізоляція; 14 – аварійний вивантажний люк; 15 – вивантажний люк; 16 – теплообмінник; 17 – пристрій що перемішує.

Висновки по розділу 3

Закінчуючи розділ можна зробити висновки:

- досліджено і розроблено технологічний процес утилізації відходів птахівництва;
- розроблена математична модель процесу утилізації пташиного посліду дозволила визначити оптимальні значення параметрів процесу
- $T - T$ – температура - 54,6 °C;

τ – тривалість ізотермічного циклу – 128 годин;

ν – частота перемішування, 8 разів на день;

K – концентрація, 0,18%.

- досліджені режими технологічного процесу виробництва високоефективного, багатоконпонентного органічного добрива та біогазу обґрунтовані з допомогою мікробіологічної природи анаеробного зброджування посліду;

- Запропонована конструктивна схема установки безперервної дії, виготовлена за цією схемою установка використана для апробації отриманих режимів процесу утилізації пташиного посліду.

ВИСНОВКИ

На підставі дослідження мікробіологічних закономірностей анаеробного зброджування запропонована можливість об'єднати три стадії зброджування пташиного посліду. Наукова гіпотеза підтверджена результатами експериментальних досліджень. На основі біохімічної природи анаеробного розпаду відходів птахівництва встановлена можливість акумуляції та застосування енергії.

На основі аналізу існуючих конструкцій і пошукових експериментів, виконана структурна оптимізація процесу. В якості активатора процесу нами запропонована болотна рідина. Досліджено та обґрунтовано енергозберігаюча технологія вироблення біогазу в природних та ізотермічних умовах, що представляє інтерес птахівницьких господарств. Запропонована конструктивна схема установки безперервної дії, виготовлена за цією схемою установка використана для апробації отриманих режимів процесу утилізації пташиного посліду.

Розроблено математичну модель процесу вироблення біогазу з використанням методики планування чотирьохфакторного експерименту, оптимізовані параметри, що відповідають умовам енергозбереження:

- температура – 54,6 °С;
- тривалість процесу – 128 годин;
- частота перемішування – 8 раз за восьми годинний робочий день;
- концентрація активатора – 0,18%.

Досліджені режими технологічного процесу виробництва високоефективного, багатоконпонентного органічного добрива та біогазу обґрунтовані з допомогою мікробіологічної природи анаеробного зброджування посліду.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гелетуха Г. АПК и «зеленая» энергетика: проблемы и перспективы. *Корми і факти*. 2015. №3 (55). - С. 30 – 31.
2. Баадер В., Доне Е., Бренндерфер М. Биогаз теория и практика. Москва : Колос, 1982. 148 с.
3. Скляр О. Г., Скляр Р. В. Аналіз існуючих багатопарових захисних конструкцій біогазових установок. Науковий вісник ТДАТУ. Мелітополь, 2014. Вип.4. Т.1. С. 88-94.
4. Артамонов В. Н. Биотехнология – агропромышленному комплексу. Москва : Наука, 1989. 115.
5. Семененко И.В. Проектирование биогазовых установок. Сумы : Мрія, 1996. 347 с
6. Хажмурадов М. А. Установка та технологія по утилізації біогазу. Наука та інновації. 2006. № 4. С. 19.
7. Калетнік Г. М., Здирко Н. Г., Фабіянська В. Ю. Біогаз в домогосподарствах – запорука енергонезалежності сільських територій України. Економіка. Фінанси. Менеджмент: актуальні питання науки і практики. 2018. № 8. С. 7-22. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/efmapnp_2018_8_3.
8. Энергозберігаючі відновлювальні джерела теплопостачання : навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ, 2010. 170 с.
9. Яремчук О. С. Теоретичні аспекти застосування біотехнологій утилізації відходів тваринницьких підприємств в умовах закритої зооекосистеми: автореф. дис..... докт. с.-г. наук: 16.00.06. Харків: ХНУСГ ім. П. Васлінка. 2013. 42 с.
10. Skliar A., Skliar R. Justification of conditions for research on a laboratory biogas plant. MOTROL: Motoryzacja I Energetyka Rolnictwa. Lublin, 2014. Vol.16. №2. P.183-188.
11. Лысенко В. П. Микробиологические и химические процессы при

использовании органических удобрений *Ефективне птахівництво*. 2015. №2 (122). С. 44 – 48.

12. Куценко Ю. М. Аналіз основних чинників анаеробного метанового збродження для отримання біогазу. *Праці ТДАТУ*. 2011. Вип. 11, № 3. С. 49–56.

13. Новітні технології біоенергоконверсії : монографія. Київ : Аграр Медіа Груп, 2010. 326 с.

14. Матвеев Ю. Б. Обзор биогазовых проектов в Украине и перспективы их развития. Биоэнергетическая ассоциация Украины: Біогаз - шанс для енергетичної незалежності України і її європейської інтеграції. Київ, 2012 р. [Електрон. ресурс] – Режим доступа: <http://uabio.org/img/files/news/pdf/matveev.pdf>

15. Ратушняк Г. С., Джеджула В. В. Інтенсифікація виробництва та підготовка біогазу до використання в теплотехнічному обладнанні. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*. 2005 № 8. С. 52 – 60.

16. Поліщук В. М. Вплив режимів метанового бродіння на ефективність виробництва біогазу. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування: Зб. наук. праць. Київ, 2013. № 185. Ч. 3 С. 180-191.

17. Hashimoto A. G. Methane from cattle waste. *Biotechnologie & Bioengineering*. 1982. Vol. 24, № 9. P. 2039 –2052.

18. Мариненко Е. Е. Основы получения и использования биотоплива для решения вопросов энергосбережения и охраны окружающей среды в жилищно-коммунальном и сельском хозяйстве. Волгоград: ВолгГАСА, 2003. 100 с.

19. Вербицький, П. Утилізація відходів тваринного походження в Україні / П. Вербицький // *Тваринництво України*. 2008. № 5. С. 2–6.

20. Никитин Г. А. Метановое брожение в биотехнологии: учебное пособие. Київ : Вища школа. 1990. 207 с.

21. Стребков Д. С., Ковалев А. А. Биогазовые установки для обработки отходов животноводства. *Техника и оборудование для села*. 2006. №11. С. 28–30.

22. Шацький В. В., Скляр О. Г., Скляр Р. В., Солодка О. О. Вплив структури субстрату на вихід біогазу при метановому зброджуванні. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. Мелітополь: ТДАТУ, 2013. Вип. 13. Т.3. С. 3-12.

23. Маккинерни М., Брайант М. Основные принципы анаэробной ферментации с образованием метана. Биомасса как источник энергии. Москва : Мир, 1985. С. 246-265.

24. Ратушняк Г. С. Автоматичне управління в системах біоконверсії. *Вісник ВПІ*. 2006. № 6. С. 116 –121.