

**ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ**

**Інженерно-технологічний факультет**

Кафедра тракторів і сільськогосподарських машин

**П о я с н ю в а л ь н а   з а п и с к а**

до дипломної роботи

освітнього ступеня "Магістр"

на тему:

**«Оптимізація процесу отримання біогазу з органічних відходів для  
підвищення енергетичної ефективності фермерських господарств»**

**Виконав:** студентка 2 курсу, групи МГАІ-24  
за спеціальністю 208 "Агроінженерія"

\_\_\_\_\_ Осадчий Владислав Сергійович

**Керівник:** \_\_\_\_\_ Теслюк Геннадій Володимирович

**Рецензент:** \_\_\_\_\_

Дніпро 2025

**ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ**

Інженерно-технологічний факультет

Кафедра: тракторів і сільськогосподарських машин  
Освітній ступінь: "Магістр"  
208 "Агроінженерія"

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри

ТСГМ

(назва кафедри)

ДОЦЕНТ

(вчене звання)

Теслюк Г.В.

(підпис)

(прізвище, ініціали)

„\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**З А В Д А Н Н Я  
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Осадчий Владислав Сергійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

**1. Тема роботи:** Оптимізація процесу отримання біогазу з органічних відходів для підвищення енергетичної ефективності фермерських господарств  
керівник роботи к.т.н., доцент Теслюк Геннадій Володимирович

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від

“24” жовтня 2025 року №3182

**2. Строк подання студентом роботи** 29.11.2025 р

**3. Вихідні дані до роботи** 1. Аналіз сучасного стану та перспектив розвитку органічного землеробства в Україні, аналіз джерел та обґрунтування дослідження з обраної тематики.

**4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)** 1. Аналіз сучасного стану біогазових установок 2. Теоретичне обґрунтування дипломної роботи. 3. Обґрунтування методики проведення та результатів експериментальних досліджень 4. Охорона праці та захист навколишнього середовища. 5. Техніко-економічна оцінка ефективності розробленого комбінованого агрегату. Висновок. Список літератури.

**5 Перелік демонстраційного матеріалу**

1. Мета і завдання досліджень. (2 аркуш, А4).

2. Обґрунтування конструкцій (1 аркуш, А4). 3. Теоретичне обґрунтування (2 аркуші, А4). 4. Експериментальне обґрунтування (2 аркуші А4)  
 5. Економічна ефективність. (1 аркуш 4А)

### 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1.	Золотовська О.В., доцент		
2	Золотовська О.В., доцент		
3	Золотовська О.В., доцент		
4	Золотовська О.В., доцент		
5	Золотовська О.В., доцент		
Нормо-контроль	Теслюк Г.В., завідувач кафедри		

7. Дата видачі завдання 30.03.2025

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Аналіз технічних рішень	до 27.05.25 р	
2.	Виконання теоретичних досліджень	до 30.06.25 р	
3	Виконання експериментальних досліджень	до 8.09.25 р.	
4	Охорона праці	до 06.11.25 р.	
5	Економічна частина	до 20.11.25 р.	
6.	Демонстраційний матеріал	до 23.11.25 р.	

Студент \_\_\_\_\_  
( підпис )

Осадчий В.С.  
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
( підпис )

Теслюк Г.В  
(прізвище та ініціали)



## АНОТАЦІЯ

Осадчий В.С. Оптимізація процесу отримання біогазу з органічних відходів для підвищення енергетичної ефективності фермерських господарств /Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «магістр» за спеціальністю 208 «Агроінженерія» – ДДАЕУ, Дніпро, 202.

У даній дипломній роботі проведено комплексне дослідження сучасних конструкцій біогазових установок із визначенням їхніх техніко-економічних та енергетичних характеристик. Виконано порівняльний аналіз існуючих типів біореакторів, що дозволив виявити їхні конструктивні переваги та обмеження, а також окреслити перспективи впровадження ефективних рішень у виробництві біогазу та органічних добрив.

Особлива увага приділена аналітичним дослідженням теплових процесів у біореакторі, що враховують взаємозв'язок геометричних параметрів установки та її енергетичних характеристик. Розроблено методика проведення лабораторних експериментів з виробництва біогазу та біодобрива на біогазовій установці з перемішувачем. Сформовано оптимальний комплекс конструктивно-режимних параметрів роботи установки, що забезпечують підвищену ефективність процесів бродіння та теплового обміну.

Проведена економічна оцінка запропонованої установки підтверджує її доцільність для використання в малих та середніх агропромислових підприємствах, дозволяючи підвищити рентабельність виробництва та ефективність використання біомаси як джерела відновлюваної енергії. Практичне значення роботи полягає у формуванні комплексних рекомендацій щодо оптимізації конструкції та режимів роботи біогазових установок для одночасного виробництва енергії та органічних добрив.

**Ключові слова:** біопаливо, біоорганічні відходи, термічні процеси, метантек, змішувач.

## ЗМІСТ

Вступ	7
1 СУЧАСНИЙ СТАН ТА ТЕХНІЧНІ АСПЕКТИ БІОГАЗОВИХ УСТАНОВОК	10
1.1 Технологічні аспекти обробки та утилізації пташиного посліду	12
1.2 Конструктивні особливості та типи біореакторів	14
1.3 Особливості складу та якості біогазу і біодобрив	23
2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ПРОЦЕСІВ В БІОГАЗОВІЙ УСТАНОВЦІ	26
2.1 Інтенсивність перебігу мікробіологічних процесів	26
2.2 Моделювання інтенсивності теплообміну в біореакторі	28
2.3 Моделювання конструктивно-режимних характеристик	32
2.4 Аналітична оцінка отриманих результатів	39
3 ОБГРУНТУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ	43
3.1 Принципова схема та особливості роботи біогазової установки	43
3.2 Оцінка теплових характеристик біореактора на основі експериментальних даних	44
3.3 Методичні підходи до визначення конструктивних характеристик біогазової установки	51
3.4 Розрахунок режимів експлуатації БГУ з метою максимізації продуктивності біодобрива	55
4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА	60
5. ТЕХНІЧНА ТА ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА БГУ	64
ВИСНОВКИ	69
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	70

## ВСТУП

Сучасна екологічна ситуація у світі свідчить про те, що безвідповідальне та споживацьке ставлення до природних ресурсів призводить до їх виснаження, погіршення стану довкілля та створює загрозу сталому розвитку людства. Актуальність вирішення цих проблем вимагає впровадження ресурсозберігаючих технологій у виробництві, використання енергії з невичерпних або відновлюваних джерел та здійснення природоохоронних заходів щодо реанімації й збереження деградованих природних комплексів. Україна належить до країн із комплексними екологічними проблемами, які зумовлені економічними перетвореннями: непропорційне використання природних ресурсів і їх виснаження, забруднення навколишнього середовища промисловою діяльністю, а також недостатньо ефективна утилізація відходів. Обсяг утворених відходів постійно зростає, тоді як їх переробка залишається мінімальною. Практика захоронення відходів на переповнених полігонах підвищує ризики для здоров'я населення та навколишнього середовища.

Особливу проблему становить сучасна сільськогосподарська практика, що призводить до виснаження та збіднення родючих ґрунтів, забруднення земель, інтенсивної експлуатації маловикористовуваних територій, розвитку монокультур та надмірного застосування мінеральних добрив. Зменшення запасів земельних, лісових і водних ресурсів спричиняє втрату екосистем та біорізноманіття, при цьому частка охоронюваних територій (6,6% площі країни) є недостатньою для протидії таким процесам.

У цьому контексті зростає інтерес до альтернативної енергетики, що зумовлено обмеженістю традиційних енергоресурсів, зростанням тарифів на електроенергію та теплову енергію, а також здешевленням обладнання для відновлюваних джерел енергії. Перспективним напрямом у сільському господарстві є отримання енергії за рахунок біотехнологій.

Особливу увагу приділяють малим сільськогосподарським підприємствам, зокрема фермерським і селянським господарствам. Використання біогазових установок (БГУ) у таких господарствах дозволяє

забезпечити їх енергетичну незалежність. Технічні засоби для БГУ виготовляються як українськими, так і зарубіжними виробниками. Зарубіжне обладнання, як правило, розраховане на великі обсяги переробки і не завжди придатне для малих господарств. Вітчизняні розробки невеликих установок простіші за конструкцією, проте ще не отримали широкого застосування.

Раціональне використання місцевих енергетичних ресурсів набуває особливого значення при організації сільськогосподарського виробництва та розробці машин для його механізації та електрифікації. Енергетичні ресурси від сільськогосподарських відходів, включно з відходами птахівництва, використовуються недостатньо через технічні обмеження сучасного обладнання.

Традиційні енергоресурси у сільській місцевості є обмеженими та дорогими, що робить їх застосування економічно не вигідним. Відповідно, виникає потреба у розвитку нових джерел енергії, здатних замінити дороге привізне паливо. Біотехнології та біогазова енергетика одночасно вирішують проблеми утилізації сільськогосподарських відходів і забезпечення енергією малих регіонів.

**Мета дослідження:** вдосконалення процесу отримання біогазу з органічних відходів шляхом удосконалення конструкції біореактора

**Об'єкт дослідження:** біогазова установка малих фермерських господарств, включно з її перемішувальними та теплообмінними пристроями.

**Предмет дослідження:** процеси отримання біогазу та біодобрив, що формуються під час термофільного зброджування органічних відходів, яке супроводжується інтенсифікованим перемішуванням і керованим теплопідведенням, що визначають закономірності теплообміну в реакторі.

**Задачі дослідження:**

1. Проаналізувати перспективи застосування біотехнологій у сільському господарстві.
2. Аналіз конструктивно-технологічну схему біогазової установки та визначити оптимальні режими роботи біореактора, обладнаного комбінованим перемішувально-нагрівальним елементом.

3. Здійснити теоретичний аналіз теплових режимів біореактора, інтегруючи залежності між конструктивними параметрами та параметрами теплопостачання установки.

4. Сформувати концепцію проведення лабораторних випробувань біогазової установки з перемішувачем, визначивши раціональні параметри та режими її експлуатації.

5. Оцінити економічну результативність розробленої біоустановки та її експлуатаційні переваги.

# 1 СУЧАСНИЙ СТАН ТА ТЕХНІЧНІ АСПЕКТИ БІОГАЗОВИХ УСТАНОВОК

Одним із найбільш ефективних способів утилізації та переробки сільськогосподарських відходів є процес анаеробного зброджування, у результаті якого утворюються біогаз і високоякісні біодобрива. Теплотворна здатність біогазу становить у середньому 20–30 МДж/м<sup>3</sup> (приблизно 6–7 кВт·год) і залежить від вмісту метану (СН<sub>4</sub>) та вуглекислого газу (СО<sub>2</sub>) у газовій суміші.

Крім отримання енергії, біогазові технології забезпечують дешеве та ефективне виробництво органічних добрив, збагачених мікроелементами. За традиційних умов ферментації (6–9 місяців) значна частина поживних речовин втрачається, тоді як анаеробне зброджування дає змогу скоротити тривалість процесу та зберегти максимальну кількість біологічно активних сполук.

Отримані біодобрива мають низку переваг порівняно з іншими органічними видами:

- відсутність насіння бур'янів;
- можливість безпосереднього внесення у ґрунт без додаткової підготовки;
- наявність активної мікрофлори, що стимулює ріст рослин;
- збереження сполук азоту та підвищена стійкість до вимивання поживних речовин;
- екологічна безпечність і відсутність патогенних мікроорганізмів.

Таким чином, виробництво біогазу й органічних добрив забезпечує енергетичну, економічну та екологічну вигоду для фермерських господарств, сприяючи зростанню їх конкурентоспроможності. Саме тому розроблення енергоефективних біогазових установок (БГУ) для малих аграрних підприємств є актуальним завданням сучасного сільськогосподарського виробництва.

Серед органічних субстратів найбільш ефективним для біогазових установок є гній. Наприклад, один тонний послід курей-несучок дає в середньому 132–142 м<sup>3</sup> біогазу при клітковому утриманні та близько 80 м<sup>3</sup> при підлоговому утриманні з підстилкою.

Нині в Україні активно розробляються й упроваджуються біогазові комплекси різної потужності. Біогазова установка - це технологічний комплекс обладнання, призначений для переробки органічних відходів з утворенням біогазу та біодобрих, що можуть використовуватись для виробництва теплової й електричної енергії.

Основні цілі впровадження біогазових технологій у сільському господарстві полягають у:

- отриманні доступного джерела енергії;
- підвищенні врожайності сільськогосподарських культур;
- поліпшенні якості продукції;
- зниженні собівартості виробництва та енергетичній незалежності господарств.

Розрахунки показують, що термін окупності біогазових установок становить не більше трьох років. Їх застосування дозволяє економити традиційні енергоресурси (вугілля, газ, нафту), підвищувати продуктивність угідь, підтримувати екологічну рівновагу та забезпечувати децентралізоване енергопостачання, що зменшує втрати в енергосистемі.

Для стабільної роботи біореактора необхідно забезпечити:

- підтримання анаеробних умов зброджування;
- дотримання заданих температурних і кислотно-лужних режимів;
- ефективне перемішування біомаси;
- стабільний теплообмін у системі.

Біогазову установку доцільно розміщувати поруч із джерелом органічних відходів (пташниками, тваринницькими комплексами, сховищами тощо). Резервуари повинні мати зручну конструкцію для монтажу та обслуговування, бути обладнаними автоматизованою системою керування, включно з газовими детекторами, сигналізацією та аварійним відключенням у разі небезпеки.

Усі елементи біогазових систем мають відповідати вимогам промислової та екологічної безпеки, адже суміш біогазу з повітрям у концентрації 5–15 % є вибухонебезпечною, а при вмісті понад 12 % може виникати займання від відкритого полум'я.

## 1.1 Технологічні аспекти обробки та утилізації пташиного посліду

Обсяги пташиного посліду, що щорічно утворюються на птахофабриках і перевищують 55 млн тонн при вологості 70–75%, ускладнюють його безпечну утилізацію та становлять загрозу для стану водойм, ґрунтів і природних екосистем. [23, 24]. Пташиний послід є потужним органічним добривом із високою концентрацією поживних речовин та швидким ефектом, до складу якого входить 34,5–48,3% сухої речовини, 15–40% золи, 3–4,5% сирого жиру, 15–25% клітковини та 45–49% безазотистих екстрактивних речовин. Середня добова кількість посліду становить: 175–190 г для курей-несучок, 280–300 г для бройлерів, 455 г для індиків, 425 г для качок, 598 г для гусей; у молодих курей — від 25 г у віці 1–4 тижнів до 177 г у 10–22 тижні.

Для збереження поживних речовин рекомендується компостування посліду з торфом, соломою, тирсою або суперфосфатом, при цьому вологість компостної суміші не повинна перевищувати 70%, а співвідношення компонентів становить 1 частина наповнювача на 3–4 частини гною. Використання свіжого посліду без попередньої обробки недопустиме через ризик поширення збудників хвороб і насіння бур'янів. Компостування зазвичай проводять на спеціальних майданчиках біля птахофабрик, у безпосередній близькості до місць утворення відходів. Приготування торф'яно-гноювих компостів здійснюють шляхом чергування шарів гною та торфу (1:3) з верхнім торф'яним покриттям, що сприяє збереженню азоту та зменшенню запахів. Компости додатково збагачують фосфоритним борошном і калійними солями, що підвищує їхню агрохімічну цінність. Ще одним ефективним методом обробки є термічна сушка пташиного посліду у барабанних сушарках при температурі 500–600 °С. Процес включає: транспортування сировини, завантаження у бункери, дозування, сушіння, гранулювання (у грануляторі ГМО-1,5) та фасування готової продукції у мішки по 20–25 кг. Після сушіння вологість посліду знижується до 12–14%, що

забезпечує його тривале зберігання у сухих приміщеннях або навалом у гранульованій формі [18].

Однією з ключових переваг пташиного посліду є високий вихід біогазу під час анаеробного зброджування — він перевищує показники гною великої рогатої худоби та свиней (табл. 1.1). Це робить його перспективною сировиною для біогазових установок, які одночасно вирішують проблему утилізації відходів і забезпечують виробництво відновлюваної енергії.

Таблиця 1.1

Вихід біогазу при анаеробному зброджуванні різних видів біомаси

Біомаса	Вміст сухої речовини, %	Вихід біогазу, м <sup>3</sup> /т
Гній ВРХ	8	22
Гнойова жижа свиней	6	25
Пташиний послід	22	76
Подрібнена солома	86	300
Силосна трав'яна маса	40	200
Силосна кукурудзяна маса	35	208
Кукурудзяна зернострижнева суміш	65	414
Пшенична солома	86	280
Лучна трава	18	95

Сільськогосподарські підприємства, зокрема птахофабрики та тваринницькі комплекси, є потенційними джерелами екологічного навантаження, тому питання переробки відходів є надзвичайно актуальним. Наприклад, одна курка продукує близько 290 г посліду на добу, і навіть невелика ферма на 1 000 голів генерує майже 290 кг органічних відходів щодня, що потребує спеціальних заходів з утилізації. Розміщення таких об'єктів повинно враховувати санітарно-захисні зони та вимоги екологічної безпеки, зокрема заборону зберігання посліду поблизу водних джерел або житлових територій.

Високі економічні витрати на вивезення та утилізацію органічних відходів створюють значне фінансове навантаження на аграрні підприємства. Застосування технології анаеробного зброджування дозволяє суттєво зменшити ці витрати, одночасно отримуючи біогаз як енергоресурс та біодобрива високої якості.

## **1.2 Конструктивні особливості та типи біореакторів**

Продуктивність біогазової установки у реальних умовах значною мірою визначається низкою факторів, які залежать від конструктивних особливостей обладнання та умов технологічного процесу [3, 4]. До основних факторів, що впливають на проектні параметри установки, належать:

- завантаження робочої камери, тобто кількість субстрату на одиницю корисного об'єму реактора та швидкість його подачі;
- тривалість циклу анаеробного зброджування, що визначає час перебування органічної маси у реакторі;
- інтенсивність перемішування субстрату, яка забезпечує рівномірний контакт біомаси з мікроорганізмами.

На рисунку 1.1 представлено класифікацію біогазових реакторів з урахуванням їх конструктивно-технологічних ознак, що дозволяє систематизувати установки за типом конструкції та функціональними характеристиками.

Основні стадії технологічного процесу виробництва біогазу включають:

1. збір і підготовка біомаси до подальшої переробки;
2. пряме анаеробне бродіння біомаси з отриманням біогазу.
3. раціональне використання продуктів бродіння, зокрема біогазу та органічного компосту.

Для забезпечення оптимального перебігу ферментаційного процесу субстрат, що подається в біореактор, необхідно попередньо нагріти до встановленої температури, а додатковий підігрів використовується для компенсації теплових втрат. Навіть незначне зниження температури на 1–2 °C може негативно впливати на активність мікроорганізмів. Крім того, важливо запобігати осіданню зважених часток на поверхні нагрівального елемента або

теплообмінника. Основні методи та схеми нагріву субстрату представлені на рисунку 1.2.

Підігрів субстрату всередині робочого об'єму біореактора здійснюється за допомогою різних теплообмінних систем, інтегрованих у конструкцію установки, або через застосування водяної сорочки, гарячої води чи пари під тиском. Основні варіанти розташування нагрівальних елементів включають:

- на внутрішніх стінках реактора (рис. 1.2а);
- на днищі біореактора (рис. 1.2б);
- у внутрішньому співвісному циліндрі, розташованому в середині реактора (рис. 1.2в);
- виносні теплообмінники, розташовані поза корпусом біореактора (рис. 1.2г);
- змійовикові теплообмінники, інтегровані всередині реактора
- підведення тепла за допомогою пари під тиском (рис. 1.2е);
- використання водяний кожух для підтримки необхідної температури субстрату (рис. 1.2ж).

Застосування таких різних способів підігріву дозволяє забезпечити рівномірне нагрівання біомаси, підтримувати стабільний термофільний режим і уникати осідання зважених часток на нагрівальних елементах, що сприяє ефективності анаеробного процесу зброджування.



Рисунок 1.1 – Конструктивні особливості біогазових установок

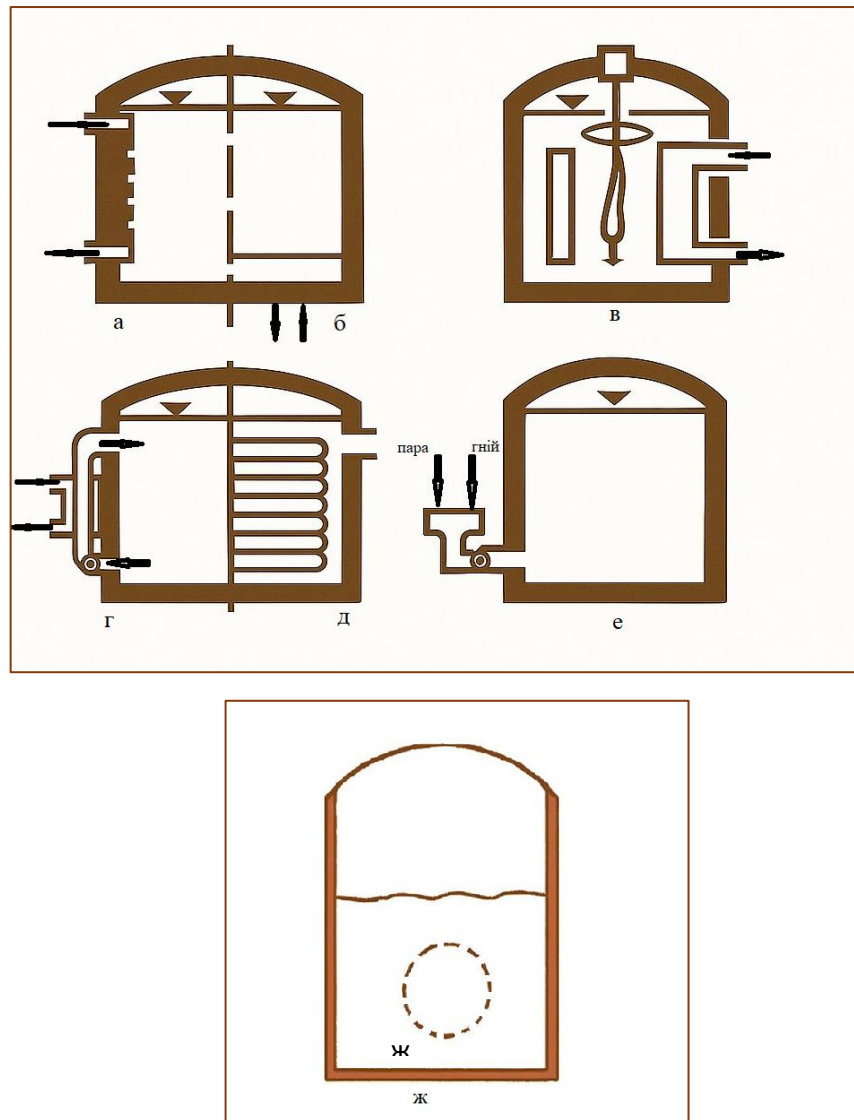


Рисунок 1.2 – Принципові схеми розташування теплообмінників в біореакторі

а – на стінках; б – на днищі; в – в циліндричному теплообміннику; г – розташованому зовні; д – змійовикового типу; е – з парою; ж – з водяною сорочкою

Біореактор може мати різну конфігурацію залежно від вимог до процесу анаеробного зброджування. Щоб забезпечити оптимальну гомогенізацію рідких органічних сумішей, ефективної акумуляції біогазу, видалення залишків добрив та запобігання осадженню солей на поверхні доцільно застосовувати ємності овальної конструкції (рис. 1.3). Водночас великі біореактори з такою конструкцією зазвичай виготовляють із залізобетону, що значно збільшує їхню вартість та обмежує широке впровадження.

Менші реактори можна виготовляти зі скловолокна, армованого поліефірною смолою, що дозволяє знизити витрати та спростити виробничий процес.

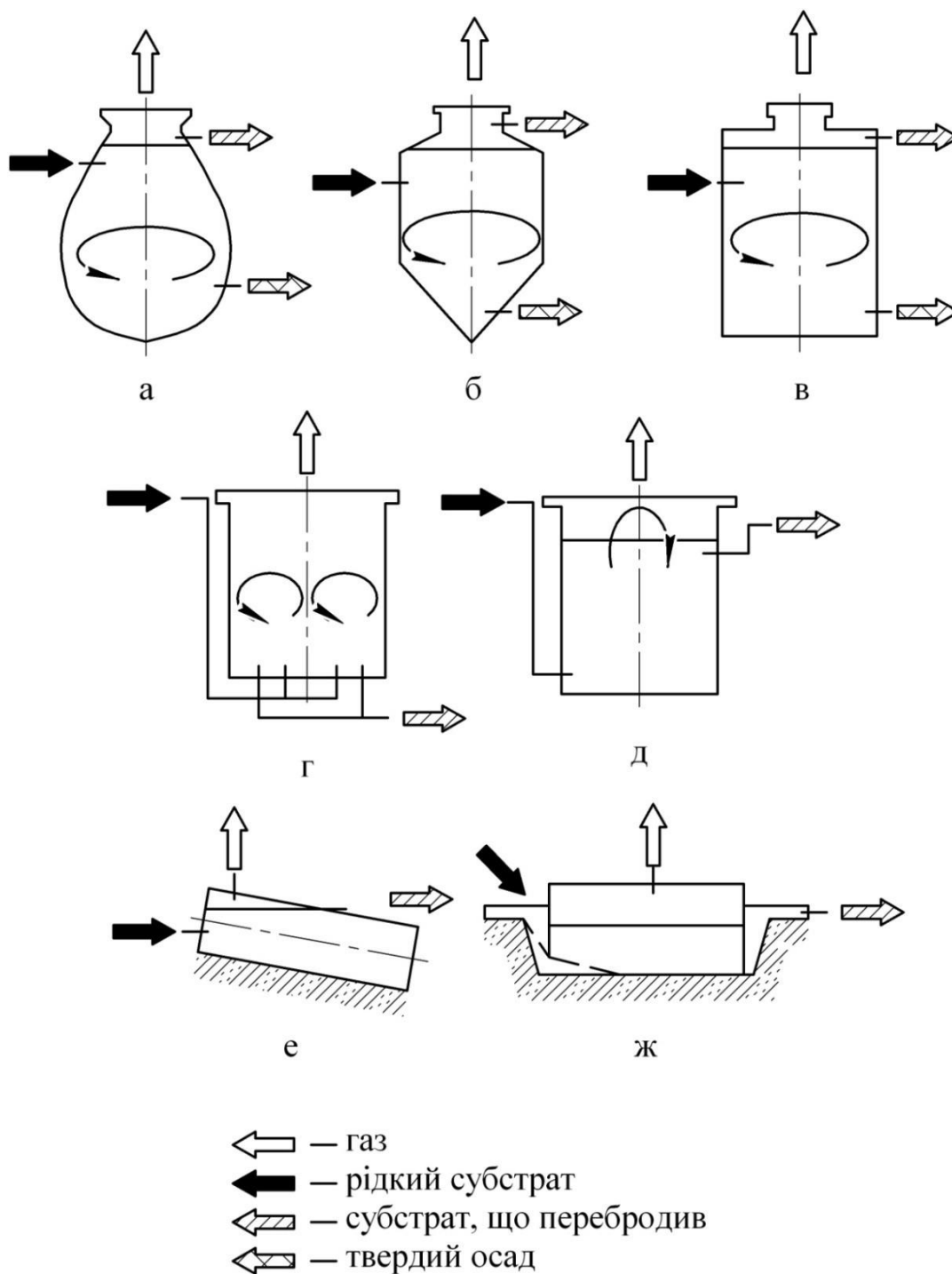


Рисунок 1.3 – Класифікація типів резервуарів біореакторів

а – овальний, б – циліндричний з конусними верхньою та нижньою частинами, в – циліндричний, г – циліндричний з перегородкою, д – у вигляді паралелепіпеда (з перегородкою), е – циліндричний (розміщений з нахилом), ж – траншея в ґрунті (із кришкою).

Резервуари циліндричної або овальної форми з конічним дном і верхом забезпечують компактне накопичення газу та зручне видалення зважених часток, проте обмежують циркуляцію рідких субстратів, що може знижувати ефективність ферментації. У малих установках такі реактори зазвичай виготовляють зі сталі або скловолокна, що робить їх економічно доступними, при цьому у скловолоконних конструкціях рух субстрату більш рівномірний [3].

Циліндричні резервуари прості в виробництві завдяки використанню перевірених матеріалів — сталі, бетону та склопластику. Обмежена циркуляція субстрату ускладнює видалення осаду та підвищує енергетичні витрати на перемішування, знижуючи загальну продуктивність установки.

У малих саморобних системах камери бродіння виконують у вигляді трубчастих резервуарів або критих ям. Для підвищення ефективності їх поділяють перегородками на основну камеру ферментації та камеру остаточної ферментації для видалення осаду. Така конфігурація не забезпечує повної гомогенізації біомаси і точного контролю часу перебування субстрату, що обмежує вихід біогазу і підвищує витрати на утилізацію осаду [14].

Найбільш поширена конструкція біореактора в Україні показана на рисунку 1.4.

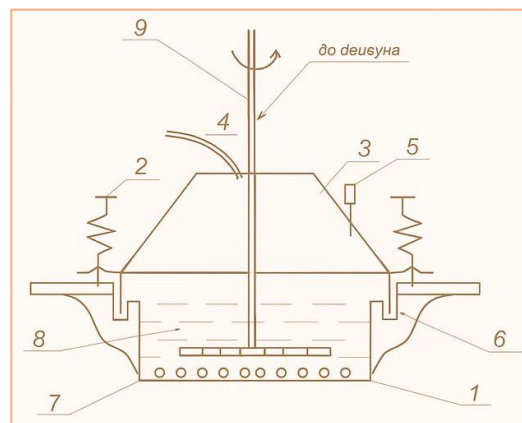


Рисунок 1.4 – Загальна конструкція біореактора

1 – корпус, 2 – напрямні ковпака, 3 – ковпак, 4 – газовідвідна трубка, 5 – манометр, 6 – гідрозатвори, 7 – нагрівальний елемент, 8 – субстрат, 9 – мішалка

У циліндричних резервуарах з вертикальною поперечною перегородкою виробництво біогазу можна організувати щоб камери застосовувались послідовно (рис. 1.5). Використання однієї ємності з внутрішньою стінкою є економічно вигіднішим, ніж будівництво двох окремих ємностей, оскільки зменшує потребу в ізоляції зовнішніх стінок і дозволяє зручно встановлювати нагрівальні елементи в перегородці, виготовлені з матеріалів із високою теплопровідністю.

У горизонтальних резервуарах перемішування субстрату відбувається вздовж резервуара, що забезпечує міцкість та механічну стійкість конструкції.

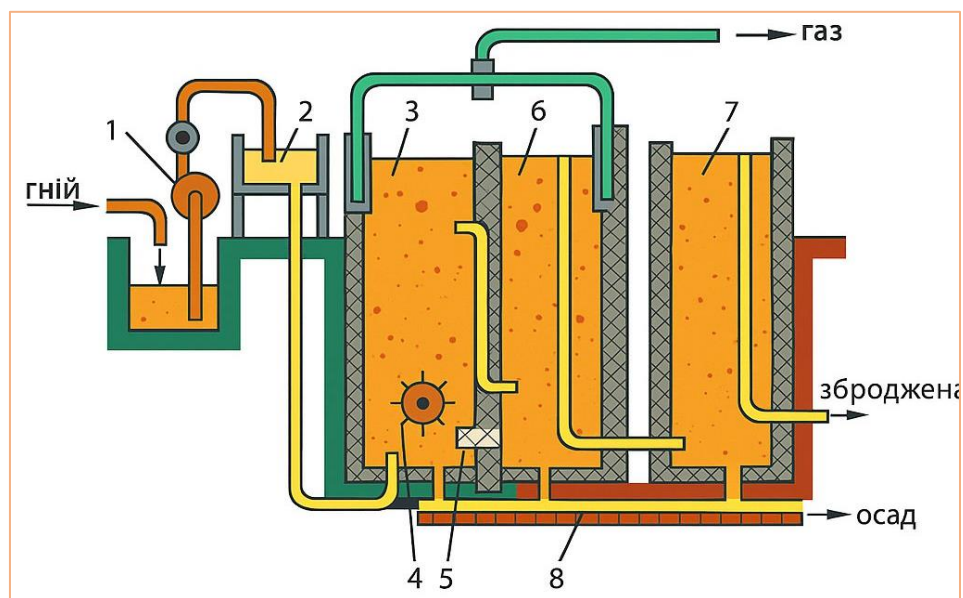


Рисунок 1.5 – Біогазова установка з двома камерами проточного типу

1 – насос; 2 – приймальна камера; 3 – бродильна камера;  
4 – пристрій для перемішування; 5 – підігрівач біомаси; 6 – камера остаточного зброджування; 7 – збірник зброженої маси; 8 – шнек

Похиłe розташування резервуарів спрощує процес вивантаження відходів з реактора. Така конструкція дозволяє легко організувати механізм перемішування субстрату. Траншейні контейнери, вкопані в землю, забезпечують можливість переробки великих об'ємів біомаси. Вона обладнана

системою перемішування та бункером для вивантаження збродженого субстрату.

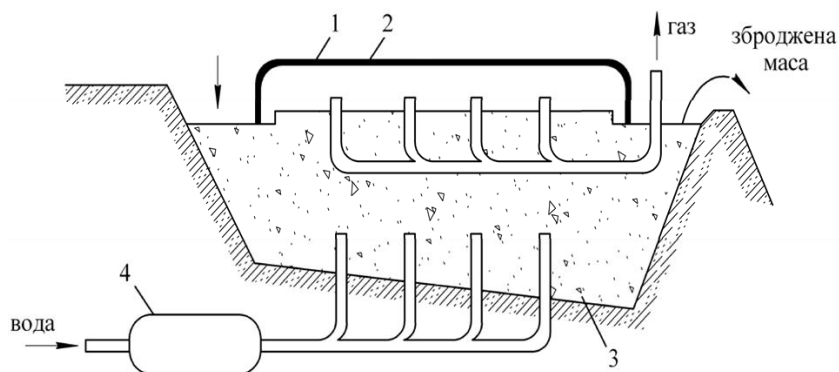


Рисунок 1.6 – Біогазова установка траншейного типу

1 – еластичний збірник біогазу; 2 – плити із пінопласту; 3 – бродильна камера; 4 – нагрівач(бойлер)

Висока вологість біогазу вимагає додаткових заходів безпеки при його підготовці до використання. Для забезпечення стабільного процесу ферментації субстрат необхідно примусово циркулювати, що дозволяє рівномірно розподілити тепло та зменшити різницю температур між вхідним матеріалом і масою в реакторі. Це сприяє підтриманню оптимальної температури ферментації та підвищенню ефективності процесу.

Для інтенсивного перемішування субстрату застосовують лопатеві мішалки, які забезпечують обертальний рух рідини, або фіксовані форсунки для гідравлічного перемішування, при цьому особливу увагу приділяють формі і розмірам бункера, а також напрямку потоку субстрату. У деяких випадках біогаз, що виробляється, використовується для аерації та циркуляції маси в реакторі, що додатково підвищує ефективність ферментації.

Системи перемішування та аерації можуть бути механічними, гідравлічними або газовими, і їх конструктивні особливості є ключовим критерієм класифікації біореакторів. Механічні мішалки зазвичай використовують у малих реакторах, а газові - для впорскування газу безпосередньо в субстрат.

Перед використанням біогаз піддають фільтрації, осушенню та видаленню вуглекислого газу для забезпечення необхідних енергетичних та експлуатаційних характеристик.

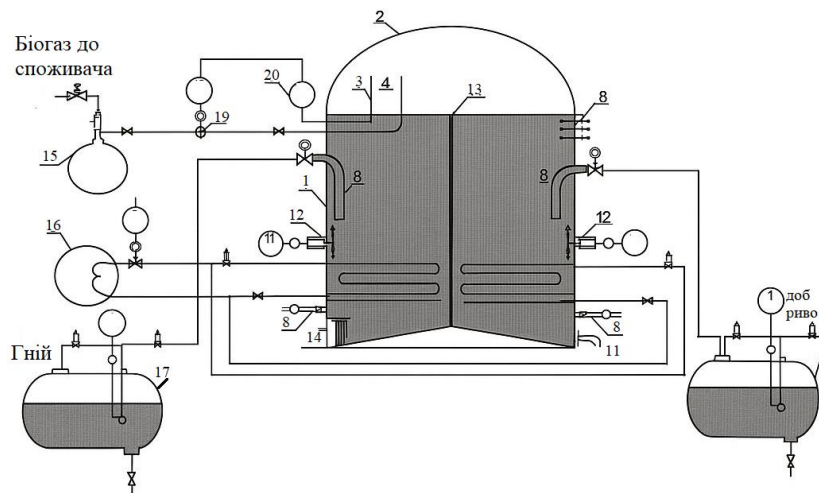


Рисунок 1.7 – Чотирьохкамерна біогазова установка

1 - вертикальна ємність; 2 - купол; 3 - відбірний пристрій для манометра; 4 - вихід біогазу; 5 - теплообмінник; 6 - заслінка; 7 - завантажувальний патрубок; 8 - температурний датчик; 9 - датчики рівня; 10 - вивантажувальний патрубок; 11 - запірний клапан; 12 - мішалка; 13 - перегородка; 14 - перепускні вікна; 15 - газгольдер; 16 - котел; 17 - ємність для біомаси; 18 - ємність для добрива; 19 - компресор; 20 - датчик тиску; 21, 22, 23, 24 - секції; 25 - регулювальна арматура.

У складі біогазової установки (рис. 1.7) виділяють чотири камери, між якими розташовані внутрішні розділові елементи корпусу, а в кожній камері встановлені незалежні теплообмінні та перемішувальні пристрої. У першій камері відбувається попереднє бродіння біомаси в мезофільному режимі при температурі 30 °С. Далі матеріал надходить до другої камери, де ферментація відбувається при температурі 40 °С. У третій і четвертій камерах процес проходить у термофільному режимі при 50 °С, з подальшим доброджуванням. Після завершення ферментації перебродивша маса вивантажується в накопичувальний резервуар.

Біогазова установка барботажного типу (рис. 1.8) виконана у вигляді металевого корпусу з інтегрованими циркуляційною та перфорованою системами труб. Підігріта за допомогою електронагрівача вода циркулює по трубах, передаючи тепло зброджуваній масі. Одночасно частина виробленого біогазу подається в перфоровані труби, де він піднімається через масу

субстрату, забезпечуючи додаткове перемішування та інтенсивне аераційне впливання на біомасу.

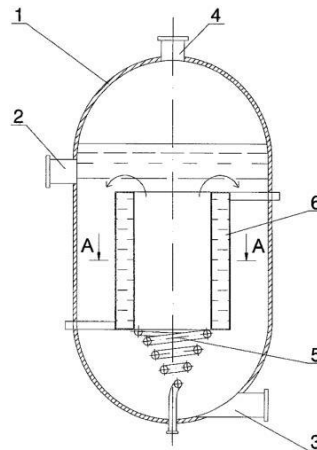


Рисунок 1.8 - Біогазова установка з мішалкою перфорованого типу

1 - корпус; 2,3,4 - патрубки; 5 - циркуляційна труба; 6 - перфорована труба

Найбільш досконалою конструктивно є біогазова установка з вертикальним біореактором (рис. 1.9), всередині якого інтегровані теплообмінні та змішувальні пристрої. Вертикальний вал із закріпленими лопатками забезпечує перемішування субстрату.

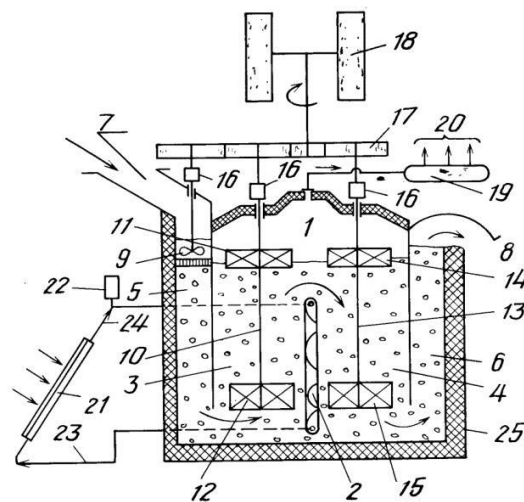


Рисунок 1.9 – Біогазова установка з мішалкою механічного типу

1 - біореактор; 2 - теплообмінник; 3,4 - бродильні камери; 5 - завантаження вихідної сировини; 6 - вивантаження відпрацьованої сировини; 7 - завантажувальний патрубок; 8 - люк; 9 - подрібнювальний пристрій; 10, 13 - вал; 11, 14 - верхні лопатки; 12, 15 - нижні лопатки; 16 - муфта; 17 - передача; 18 - вітродвигун; 19 - газгольдер; 20 - споживачі; 21 - сонячний нагрівач; 22 - розширювальний бак; 23, 24 - трубопроводи; 25 - ізоляція

Біомаса спочатку надходить у камеру 3 біореактора 1, де відбувається ферментація в мезофільному режимі, при цьому нагрів забезпечується теплообмінником 2 та сонячним колектором 21. Привід змішувального механізму, що включає верхні лопатки 11, 14 та нижні лопатки 12, 15, здійснюється через систему передач 17 і муфт 16, приводячи в рух вітрову енергоустановку 18. Утворений біогаз накопичується в газгольдері 19 і надалі подається до споживачів 20.

Існуючі біогазові установки мають низку недоліків, серед яких складна конструкція, надмірне перемішування субстрату, нераціональне використання виробленого біогазу та нерівномірний розподіл температури всередині біореактора.

аналіз показує, що в більшості наявних БГУ нагрівання та перемішування біомаси виконуються окремими вузлами — теплообмінником і мішалкою, що працюють незалежно один від одного. Отже, актуальним є проведення досліджень, спрямованих на підвищення енергетичної ефективності біогазової установки та оптимізацію конструктивних і експлуатаційних параметрів метантенка.

### **1.3 Особливості складу та якості біогазу і біодобрив**

Біогаз утворюється в процесі анаеробного бродіння органічної сировини, тобто розкладання без доступу кисню. Склад біогазу залежить від виду сировини, умов ферментації та тривалості процесу. Основними компонентами є метан (до 70%) та вуглекислий газ (до 45%). Крім того, він містить невеликі кількості сірководню та водню (до 3%), а також домішки і баластні гази, частка яких може досягати 50%. Ці забруднення ускладнюють експлуатацію обладнання і можуть пошкоджувати трубопроводи та газгольдери.

## Фізико-хімічні характеристики біогазу

Показник	Значення
Основний склад	Метан – до 70%, CO <sub>2</sub> – до 45%
Домішки (H <sub>2</sub> S, H <sub>2</sub> )	До 3%
Баластні гази	До 50%
Щільність (кг/м <sup>3</sup> )	1,1–1,2
Температура займання	650–750 °С
Теплота згоряння	20–30 МДж/м <sup>3</sup> (6–7 кВт)

Біодобриво, що утворюється як побічний продукт процесу бродіння, характеризується високою концентрацією поживних речовин та мікроелементів, таких як азот, фосфор, калій, марганець, цинк, кобальт, мідь та залізо. Завдяки контролюваному ферментаційному процесу, біодобриво містить максимальну кількість біологічно активних речовин порівняно з традиційними органічними добривами.

Таблиця 1.3

## Порівняння біодобрив за властивостями

Показник	Біодобриво	Традиційне органічне добриво
Вміст мікроелементів	Максимальний	Середній
Наявність насіння бур'янів	Практично відсутнє	Часто присутнє
Швидкість дії	Миттєва	Повільна
Активна мікрофлора	Присутня	Обмежена
Утримання азоту	Високе	Середнє
Стійкість до вимивання	Висока	Низька
Екологічна безпека	Висока	Залежить від джерела

Використання біогазу та біодобрив дозволяє не лише ефективно утилізувати органічні відходи, а й отримувати додаткове джерело енергії та

органічні добрива високої якості для сільськогосподарського виробництва. Це підвищує економічну ефективність фермерських господарств і забезпечує екологічну безпеку.

## **Висновки**

1. Проведено аналіз сучасних конструкцій біогазових установок, визначено їхні переваги та недоліки, зокрема складність конструкції, нерівномірний нагрів біомаси та неефективне використання виробленого біогазу.
2. Розглянуто фізико-хімічні властивості біогазу та біодобрив, встановлено склад газу та рівень забруднюючих домішок, що впливає на ефективність використання біогазу та довговічність обладнання.
3. Вивчено технологічні аспекти анаеробного зброджування органічних відходів, у тому числі пташиного посліду, та описано оптимальні режими ферментації (мезофільний та термофільний).
4. Проаналізовано способи підігріву та перемішування субстрату у біореакторах, визначено переваги механічних, гідравлічних і газових мішалок для підвищення ефективності ферментації.
5. Обґрунтовано доцільність використання вертикальних біореакторів із внутрішніми теплообмінними та змішувальними пристроями, що дозволяє забезпечити однорідний нагрів і покращене перемішування субстрату.
6. Визначено шляхи підвищення енергоефективності біогазових установок та оптимізації конструктивних і енергетичних параметрів метантенка, що є перспективним напрямом подальших досліджень.
7. Виробництво біогазу та органічних добрив з відходів має значний екологічний та економічний потенціал, дозволяє зменшити навантаження на навколишнє середовище і підвищити енергетичну самостійність сільськогосподарських підприємств.

## 2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ПРОЦЕСІВ В БІОГАЗОВІЙ УСТАНОВЦІ

### 2.1 Інтенсивність перебігу мікробіологічних процесів

Інтенсивність перебігу мікробіологічних процесів у метантенку значною мірою зумовлюється температурним режимом бродіння, показником кислотності середовища (рН) та ступенем інтенсивності перемішування субстрату. Для стабільного функціонування біогазової установки передбачено допоміжні системи, що забезпечують нагрівання, перемішування, підтримання оптимального рівня рН і відведення надлишкового тепла. Загальна результативність процесу метанового бродіння визначається швидкістю утворення біогазу, тобто зміною його об'єму з плином часу. [11]. Загальна продуктивність процесу метанового бродіння визначається швидкістю утворення біогазу, тобто зміною його об'єму з часом. Кількісно цей процес можна описати рівнянням::

$$P = \frac{dG}{d\tau} \quad (2.1)$$

де  $\frac{dG}{d\tau}$  - зміна кількості продукту в часі, м<sup>3</sup>/с

Узагальнене рівняння для визначення продуктивності біогазоутворення з урахуванням технологічних характеристик процесу має вигляд:

$$P = k\Delta C \quad (2.2)$$

де  $k$  – стала швидкості процесу

$\Delta C$  – рушійна сила процесу.

Оскільки концентрація органічних речовин у субстраті (наприклад, у посліді тварин чи птахів) практично не змінюється і визначається технологією їх утримання, рушійна сила процесу  $\Delta C$  залишається сталою величиною.

Швидкість мікробіологічних реакцій визначається температурою середовища і описується рівнянням Арреніуса::

$$k = k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (2.3)$$

де  $k_0$  – передекспоненціальний множник;

$E$  – уявна енергія активації процесу, Дж/моль;

$R$  – молярна стала газу, Дж/мольК;

$T$  – абсолютна температура, К

З цього співвідношення випливає, що активність метаногенних бактерій прямо залежить від температури: при її зростанні швидкість реакцій збільшується, однак надмірне підвищення температури може призвести до пригнічення життєдіяльності мікроорганізмів.

Практичний досвід експлуатації біогазових установок свідчить, що для підтримання оптимального температурного режиму використовується від 20% до 50% виробленого біогазу. Тому забезпечення ефективного теплообміну та стабільності температури є ключовим фактором для підвищення загальної ефективності процесу метаногенезу.

Залежно від температурного режиму розрізняють два основних типи бродіння:

- мезофільне - у діапазоні температур 25...38 °С, оптимальною вважається температура близько 37 °С;
- термофільне - у межах 45...60 °С, з оптимальною температурою близько 56 °С.

У кожному з цих режимів функціонують різні групи мікроорганізмів, які забезпечують перетворення органічних сполук на метан і вуглекислий газ. Правильний вибір режиму бродіння визначає швидкість, стабільність і економічну доцільність роботи біогазової установки.

У процесі метанового бродіння розрізняють два основних режими зброджування мезофільний та термофільний, кожен із яких має свої переваги та недоліки.

Мезофільний режим характеризується вищою стабільністю процесу, оскільки незначні коливання температури (в межах 1–2 °С від оптимального значення) практично не впливають на продуктивність утворення біогазу. Крім

того, для підтримання необхідної температури потрібно менше енергії. Проте до недоліків такого режиму належать менша інтенсивність газоутворення, тривалий період розкладання субстрату (до 25 діб), а також часткова стерильність отриманого біодобрива.

Термофільний режим, навпаки, забезпечує вищу швидкість процесу бродіння та інтенсивніше виділення біогазу, що дозволяє скоротити час зброджування до приблизно 12 діб. Отримане біодобриво при цьому є повністю стерильним і може навіть використовуватися як добавка до кормів для тварин. Основними недоліками термофільного режиму є висока чутливість до змін температури (зниження продуктивності при відхиленні всього на 1–2 °С) і підвищені енергетичні витрати на підтримання стабільного теплового режиму. Біогазові установки зазвичай обладнані механізмами перемішування субстрату. Основне призначення перемішування - запобігти утворенню поверхневої кірки та згустків осаду, що сповільнюють процес бродіння. Для ефективного функціонування БГУ важливо враховувати теплові процеси, які відбуваються в реакторі, адже саме вони визначають тепловіддачу та інтенсивність теплообміну. При цьому потік тепла завжди спрямовується в бік зниження температури, забезпечуючи термічну рівновагу в системі.

## 2.2 Моделювання інтенсивності теплообміну в біореакторі

Процес теплоперенесення в біореакторі відбувається таким чином: частинки рідини мають різну швидкість руху, і чим ближче вони до стінки реактора, тим менша їх швидкість. Безпосередньо біля поверхні стінки частинки практично нерухомі. У цьому шарі передача теплоти відбувається переважно шляхом теплопровідності. Відповідно до закону Фур'є, тепловий потік, що проходить через шар рідини поблизу стінки біореактора, визначається градієнтом температури та характеризує інтенсивність теплопередачі в цьому середовищі.

$$q = -\lambda_s \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=0} \quad (2.4)$$

де  $\lambda_e$  – коефіцієнт теплопровідності води, Вт/(мК);

T- поточна температура, К.

Диференційне рівняння, що описує рух окремої частинки рідини, можна записати у загальному вигляді як:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + \sigma_x \frac{\partial T}{\partial x} + \sigma_y \frac{\partial T}{\partial y} + \sigma_z \frac{\partial T}{\partial z} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\Theta}{c\rho} \quad (2.5)$$

де  $\tau$  - час, с;

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  - складові швидкості води, м/с;

$\Theta$  - кількість теплоти, яка поглинається одиницею об'єму в одиницю часу, Дж/с;

$c\rho$  - питома об'ємна теплоємність, Дж/(м<sup>3</sup>К);

$x, y, z$  – координати.

Для розрахунку процесу теплопередачі потрібне знання просторово-часової структури температурного поля  $T(x,y,z,t)$  у рідині. Це поле задовольняє рівнянню теплопровідності з урахуванням конвективного перенесення, яке в загальному вигляді записується так:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial \tau} + \sigma_x \frac{\partial \sigma}{\partial x} + \sigma_y \frac{\partial \sigma}{\partial y} + \sigma_z \frac{\partial \sigma}{\partial z} = \nu \left( \frac{\partial^2 \sigma_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \sigma_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \sigma_x}{\partial z^2} \right) + \left( g_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} \right) \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial \sigma}{\partial \tau} + \sigma_x \frac{\partial \sigma}{\partial x} + \sigma_y \frac{\partial \sigma}{\partial y} + \sigma_z \frac{\partial \sigma}{\partial z} = \nu \left( \frac{\partial^2 \sigma_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \sigma_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \sigma_y}{\partial z^2} \right) + \left( g_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} \right) \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial \sigma}{\partial \tau} + \sigma_x \frac{\partial \sigma}{\partial x} + \sigma_y \frac{\partial \sigma}{\partial y} + \sigma_z \frac{\partial \sigma}{\partial z} = \nu \left( \frac{\partial^2 \sigma_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \sigma_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \sigma_z}{\partial z^2} \right) + \left( g_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} \right) \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho\sigma_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho\sigma_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho\sigma_z)}{\partial z} = 0 \quad (2.9)$$

Повне моделювання теплових процесів вимагає доповнення цієї системи рівнянь додатковими співвідношеннями, які враховують граничні умови фізичного, геометричного та часовго характеру.

Процес тепловіддачі визначається за законом Ньютона–Ріхмана:

$$Q = \alpha_c F (t_e - t_c) \quad (2.10)$$

$\alpha_c$  - коефіцієнт теплопередачі стінки біореактора;

$F$  – площа поверхні зіткнення рідини з стінкою теплообмінника;

$t_g, t_c$  - температури рідини та поверхні стінки теплообмінника.

Для визначення коефіцієнта теплопередачі використовується наступний вираз:

$$\alpha_c = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{h_{cб}}{\lambda_c} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (2.14)$$

$\alpha_1, \alpha_2$  - коефіцієнт теплопередачі від гарячої рідини до стінки теплообмінника та від стінки до біомаси відповідно, Вт/(м<sup>2</sup>К);

$h_{cб}$  - товщина стінки біореактора, м

$\lambda_c$  - коефіцієнт теплопровідності матеріалу теплообмінника, Вт/(мК)

Лінійну щільність теплового потоку визначають за виразом:

$$q = \frac{\pi(t_g - t_n)}{\frac{1}{\alpha_n D_{вв}} + \frac{1}{2\lambda_c} \ln \frac{D_{нв}}{D_{вв}} + \frac{1}{\alpha_g D_{нв}}} \quad (2.15)$$

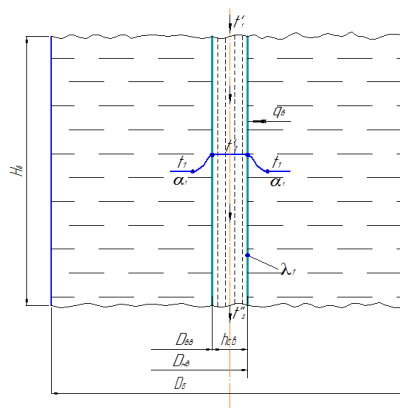


Рисунок 2.1 – Розрахункова схема теплообмінника-змішувача біореактора

Швидкість теплопередачі рідиною на субстрат через перегородку теплообмінного пристрою, що входить до знаменника рівняння (2.15), приймемо за коефіцієнт  $K_T$ .

У результаті термічний опір процесу теплопередачі можна подати у вигляді:

$$R = \frac{1}{K_T} = \frac{1}{\alpha_n D_{66}} + \frac{1}{2\lambda_c} \ln \frac{D_{н6}}{D_{66}} + \frac{1}{\alpha_6 D_{н6}} \quad (2.16)$$

Де лінійний тепловий опір теплопровідності стінки біореактора:

$$R_c = \frac{1}{2\lambda_c} \ln \frac{D_{н6}}{D_{66}} \quad (2.17)$$

$$q_{66} = \frac{Q}{\pi D_{66} H_M} = \frac{K_T}{D_{66}} (t_6 - t_n) \quad (2.18)$$

$$q_{н6} = \frac{Q}{\pi D_{н6} H_M} = \frac{K_T}{D_{н6}} (t_6 - t_n) \quad (2.19)$$

де  $H_M$  – висота біогазової установки, м

Таким чином

$$K_{66} = \frac{K_T}{D_{66}}, K_{н6} = \frac{K_T}{D_{н6}} \quad (2.20)$$

Отже

$$\begin{aligned} q_{66} &= K_{66} (t_6 - t_n), \\ q_{н6} &= K_{н6} (t_6 - t_n) \end{aligned} \quad (2.21)$$

Знаходимо температуру стінки всередині біореактора:

$$\begin{aligned} t_{c_1} &= t_n - \frac{q_{66}}{\pi \alpha_n D_{66}} \frac{1}{}, \\ t_{c_2} &= t_6 + \frac{q_{н6}}{\pi \alpha_6 D_{н6}} \frac{1}{} \end{aligned} \quad (2.22)$$

$$R_{nc} = \frac{1}{\alpha_6 D_{6н}} + \frac{1}{2\lambda_c} \ln \frac{D_{нн}}{D_{6н}} + \frac{1}{\alpha_o D_{нн}} \quad (2.23)$$

$\alpha_o$  - коефіцієнт теплопередачі оточуючого повітря;

$D_{нн}$ ,  $D_{6н}$  - зовнішній та внутрішній діаметр стінки біореактора, м.

Тепловий опір зовнішньої оболонки біореактора

$$R_{nc} = \frac{1}{2\lambda_c} \ln \frac{D_{нн}}{D_{6н}} \quad (2.24)$$

З рівняння (2.24) випливає, що зі збільшенням діаметра зростає теплопровідний опір зовнішньої стінки БР, тоді як опір теплопередачі на її поверхні залишається сталим. Загальний термічний опір визначається взаємодією цих двох складових. Діаметр зовнішньої стінки біореактора, при якому досягається мінімальний повний термічний опір стінки, визначається як критичний діаметр реактора та обчислюється за формулою:

$$D_{нк} = \frac{2\lambda_c}{\alpha_o} \quad (2.25)$$

Використання розглянутих залежностей є обов'язковим при виборі ізоляції зовнішньої стінки біореактора. Розрахунок критичного діаметра ізоляційного шару проводиться через визначення опору теплопередачі:

$$R = \frac{1}{\alpha_e D_{вн}} + \frac{1}{2\lambda_c} \ln \frac{D_{нн}}{D_{вн}} + \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{D_i}{D_{нн}} + \frac{1}{\alpha_o D_{нн}} \quad (2.26)$$

$D_i$  - діаметр ізоляції БР, м.

Після вибору матеріалу ізоляції зовнішньої стінки БР знаходимо:

$$D_{кі} = \frac{2\lambda_i}{\alpha_o} \quad (2.34)$$

Розглянута система рівнянь є складною для аналітичного розв'язання, тому чисельні значення змінних визначаються за допомогою експерименту. На основі цих даних формується математичне описання результатів досліджень.

### 2.3 Моделювання конструктивно-режимних характеристик

Створення процесу математичного моделювання конкретної частини біореактора розглядається з метою полегшення дослідження теплових процесів у системі. Схема розташування лопастей мішалки наведена на рис. 2.3.

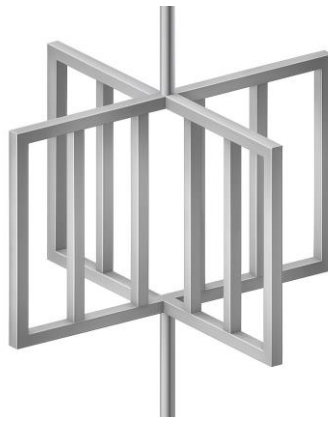


Рисунок 2.3 Модель розташування лопатей теплообмінника-мішалки

Представлено детальну схему, що відображає геометричні параметри біореактора та конструктивні характеристики мішалки, необхідні для побудови математичної моделі та оцінки гідродинамічних процесів у його об'ємі (рис.2.4).

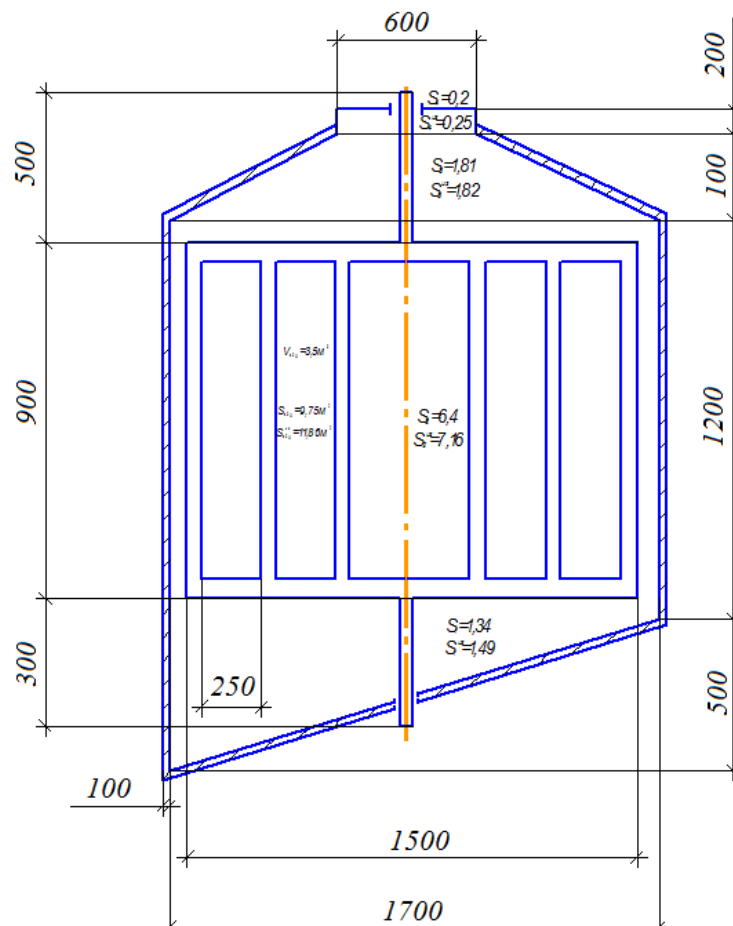


Рисунок 2.4 – Геометричні параметри БР та ТО-М

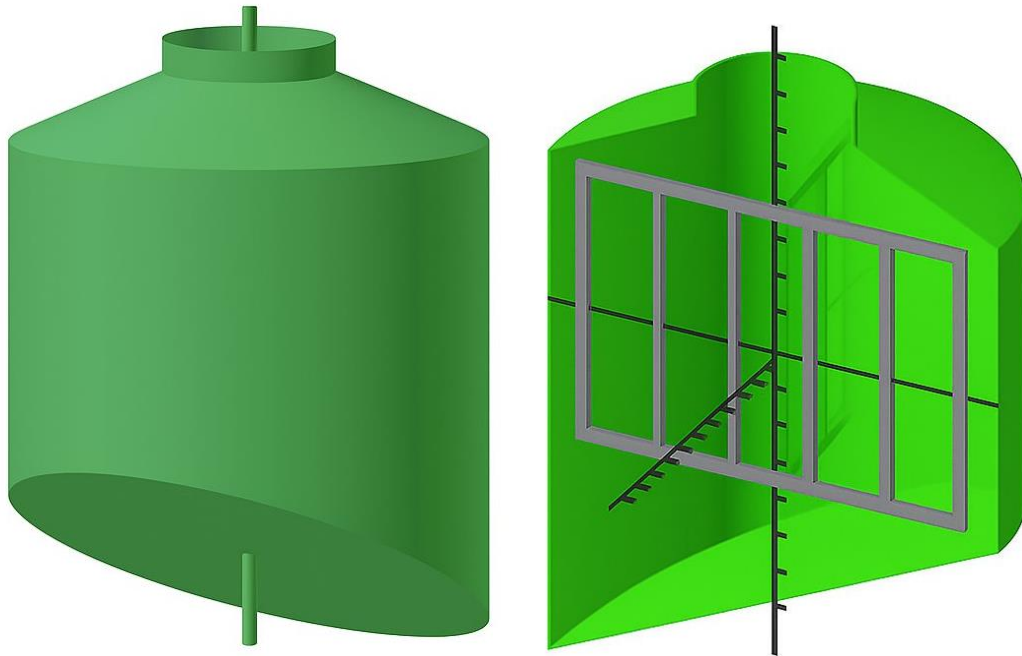


Рисунок 2.5 – Розрахункова тривимірна модель БР

У вигляді спрощеної схеми (рис. 2.6) подано частину біореактора, що моделюється для аналізу теплових процесів.

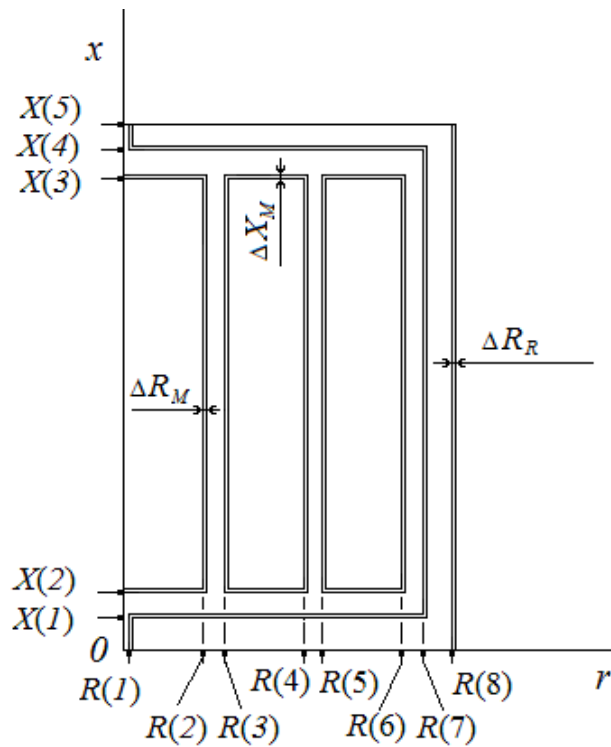


Рисунок 2.7 – Розрахункова схема об'єкту моделювання з геометричними параметрами

$x, r$  – просторові координати;

$\tau$  – час;

$R(\alpha), \alpha = 1, 2, \dots, 8, \Delta R_m, \Delta R_R$  – основні геометричні параметри камери по осі  $r$ ;

$X(\alpha), \alpha = 1, 2, \dots, 5, \Delta X_m$  – основні геометричні параметри по осі  $x$ .

Таким чином, рівняння теплопровідності, що описує дослідний об'єкт, наводиться у наступній формі:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a(\beta) \cdot \nabla^2 T, T = f(x, r, \tau), \beta = 1, 2, \dots, 4,$$

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial r^2}, \tau > 0$$

Якщо  $\beta=1$ , тоді:

$$1) \frac{\partial T}{\partial \tau} = a(\beta) \cdot \nabla^2 T - g \frac{\partial T}{\partial x}, 0 < x < X(1) + \Delta X_m, 0 < r < R(1);$$

$$2) \frac{\partial T}{\partial \tau} = a(\beta) \cdot \nabla^2 T - g \frac{\partial T}{\partial r}, X(1) + \Delta X_m \leq x < X(2), 0 < r < R(7);$$

$$3) \frac{\partial T}{\partial \tau} = a(\beta) \cdot \nabla^2 T - g \frac{\partial T}{\partial x}, X(2) + \Delta X_m \leq x < X(3) + \Delta X_m, \\ R(2) + \Delta R_m < r < R(3);$$

$$4) \frac{\partial T}{\partial \tau} = a(\beta) \cdot \nabla^2 T - g \frac{\partial T}{\partial x}, X(2) + \Delta X_m \leq x < X(3) + \Delta X_m, \\ R(4) + \Delta R_m < r < R(5);$$

$$5) \frac{\partial T}{\partial \tau} = a(\beta) \cdot \nabla^2 T - g \frac{\partial T}{\partial x}, X(2) + \Delta X_m \leq x < X(3) + \Delta X_m, \\ R(6) + \Delta R_m < r < R(7);$$

$$6) \frac{\partial T}{\partial \tau} = a(\beta) \cdot \nabla^2 T - g \frac{\partial T}{\partial x}, X(3) < x < X(4), 0 < r < R(7);$$

$$7) \frac{\partial T}{\partial \tau} = a(\beta) \cdot \nabla^2 T - g \frac{\partial T}{\partial x}, X(4) \leq x < X(5), 0 < r < R(1).$$

Якщо  $\beta=2$ , тоді:

$$8) 0 < x < X(1), R(1) + \Delta R_m < r < R(8);$$

$$9) X(1) \leq x \leq X(3) + \Delta X_m, R(7) + \Delta R_m < r < R(8);$$

$$10) X(4) + \Delta X_m \leq x < X(5), R(1) + \Delta R_m < r < R(8);$$

$$11) X(2) + \Delta X_m < x < X(3), 0 < r < R(2);$$

$$12) X(2) + \Delta X_m \prec x \prec X(3), R(3) + \Delta R_m \prec r \prec R(4);$$

$$13) X(2) + \Delta X_m \prec x \prec X(3), R(5) + \Delta R_m \prec r \prec R(6);$$

Якщо  $\beta=3$ , тоді:

$$14) 0 \prec x \prec X(1), R(1) \prec r \prec R(1) + \Delta R_m;$$

$$15) X(1) \prec x \prec X(1) + \Delta X_m, R(1) \prec r \prec R(7) + \Delta R_m;$$

$$16) X(1) + \Delta X_m \prec x \prec X(4), R(7) \prec r \prec R(7) + \Delta R_m;$$

$$17) X(4) \prec x \prec X(4) + \Delta X_m, R(1) \prec r \prec R(7) + \Delta R_m;$$

$$18) X(4) + \Delta X_m \prec x \prec X(5), R(1) \prec r \prec R(1) + \Delta R_m;$$

$$19) X(2) \prec x \prec X(2) + \Delta X_m, 0 \prec r \prec R(2) + \Delta R_m;$$

$$20) X(2) + \Delta X_m \leq x \leq X(3), R(2) \prec r \prec R(2) + \Delta R_m;$$

$$21) X(3) \prec x \prec X(3) + \Delta X_m, 0 \prec r \prec R(2) + \Delta R_m;$$

$$22) X(2) \prec x \prec X(2) + \Delta X_m, R(3) \prec r \prec R(4) + \Delta R_m;$$

$$23) X(2) + \Delta X_m \leq x \leq X(3), R(3) \prec r \prec R(3) + \Delta R_m;$$

$$24) X(2) + \Delta X_m \leq x \leq X(3), R(4) \prec r \prec R(4) + \Delta R_m;$$

$$25) X(3) \prec x \prec X(3) + \Delta X_m, R(3) \prec r \prec R(4) + \Delta R_m;$$

$$27) X(2) + \Delta X_m \leq x \leq X(3), R(5) \prec r \prec R(5) + \Delta R_m;$$

$$28) X(2) + \Delta X_m \leq x \leq X(3), R(6) \prec r \prec R(6) + \Delta R_m;$$

$$29) X(3) \prec x \prec X(3) + \Delta X_m, R(5) \prec r \prec R(6) + \Delta R_m.$$

Якщо  $\beta=3$ , тоді:

$$30) 0 \prec x \prec X(5), R(8) \prec r \prec R(8) + \Delta R_R.$$

З урахуванням того, що зовнішня частина камери теплоізолювана, маємо:

$$\frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial \tau} = 0, 0 \leq x \leq X(5), r = R(8) + \Delta R_R, \tau \geq 0$$

Залежно від умов симетрії, у центральній частині камери справедлива наступна умова:

$$\frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial \tau} = 0, 0 \leq x \leq X(5), \tau \geq 0.$$

Верхня та нижня частини біореактора підпорядковуються наступним умовам, залежно від його особливостей:

$$\lambda(1) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial x} = q1(\tau), x = X(5), 0 \leq r \leq R(1), \tau \geq 0$$

$$-\lambda(1) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial x} = q2(\tau), x = X(5), R(1) < r \leq R(8) + \Delta R_R, \tau \geq 0$$

$$-\lambda(1) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial x} = q3(\tau), x = 0, 0 \leq r \leq R(8) + \Delta R_R, \tau \geq 0$$

( $\tau \geq 0$ ):

$$S5: \lambda(2) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial r} = \lambda(3) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial r}, 0 < x \leq X(1) + \Delta X_M, r = R(1);$$

$$S6: \lambda(3) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial r} = \lambda(1) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial r}, 0 < x \leq X(1), r = R(1) + \Delta R_R;$$

$$S7: \lambda(3) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial x} = \lambda(1) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial x}, x = X(1), R(1) + \Delta R_R \leq r \leq R(7) + \Delta R_R;$$

$$S8: \lambda(2) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial x} = \lambda(3) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial x}, x = X(1) + \Delta X_M, R(1) \leq r \leq R(7);$$

$$S9: \lambda(3) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial r} = \lambda(1) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial r}, X(1) \leq x \leq X(4) + \Delta X_M, r = R(7) + \Delta R_M;$$

$$S10: \lambda(3) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial r} = \lambda(2) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial r}, X(1) + \Delta X_M \leq x \leq X(4), r = R(7)$$

$$S11: \lambda(3) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial x} = \lambda(1) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial x}, x = X(4) + \Delta X_M, R(1) + \Delta R_R \leq r \leq R(7) + \Delta R_R;$$

$$S12: \lambda(2) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial x} = \lambda(3) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial x}, x = X(4), R(1) \leq r \leq R(7);$$

$$S13: \lambda(3) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial r} = \lambda(1) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial r}, X(4) + \Delta X_M \leq x \leq X(5), r = R(1) + \Delta R_R$$

$$S14: \lambda(2) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial r} = \lambda(3) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial r}, X(4) \leq x \leq X(5), r = R(1);$$

$$S15: \lambda(2) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial x} = \lambda(3) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial x}, x = X(2), 0 \leq r \leq R(2) + \Delta R_M;$$

$$S16: \lambda(3) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial x} = \lambda(1) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial x}, x = X(2) + \Delta X_M, 0 \leq r \leq R(2);$$

$$S17: \lambda(1) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial r} = \lambda(3) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial r}, X(2) + \Delta X_M \leq x \leq X(3), r = R(2);$$

$$S18: \lambda(2) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial r} = \lambda(3) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial r}, X(2) \leq x \leq X(3) + \Delta X_M, r = R(2) + \Delta R_M;$$

$$S19: \lambda(2) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial x} = \lambda(3) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial x}, x = X(3), 0 \leq r \leq R(2) + \Delta R_M;$$

$$S20: \lambda(3) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial x} = \lambda(1) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial x}, x = X(3) + \Delta X_M, 0 \leq r \leq R(2);$$

$$S21: \lambda(2) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial x} = \lambda(3) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial x}, x = X(2), R(3) \leq r \leq R(4) + \Delta R_M;$$

$$S22: \lambda(3) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial x} = \lambda(1) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial x}, x = X(2) + \Delta X_m, R(3) + \Delta R_R \leq r \leq R(4);$$

$$S23: \lambda(2) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial r} = \lambda(3) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial r}, X(2) \leq x \leq X(3) + \Delta X_m, r = R(3);$$

$$S24: \lambda(1) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial r} = \lambda(3) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial r}, X(2) + \Delta X_m \leq x \leq X(3), r = R(3) + \Delta R_m;$$

$$S25: \lambda(1) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial r} = \lambda(3) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial r}, X(2) + \Delta X_m \leq x \leq X(3), r = R(4);$$

$$S26: \lambda(2) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial r} = \lambda(3) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial r}, X(2) \leq x \leq X(3) + \Delta X_m, r = R(4) + \Delta R_m;$$

$$S27: \lambda(2) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial x} = \lambda(3) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial x}, x = X(2), R(3) \leq r \leq R(4) + \Delta R_m;$$

$$S28: \lambda(3) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial x} = \lambda(1) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial x}, x = X(3) + \Delta X_m, R(3) + \Delta R_m \leq r \leq R(4);$$

$$S29: \lambda(2) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial x} = \lambda(3) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial x}, x = X(2), R(5) \leq r \leq R(6) + \Delta R_m;$$

$$S30: \lambda(3) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial x} = \lambda(1) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial x}, x = X(2) + \Delta X_m, R(5) + \Delta R_m \leq r \leq R(6);$$

$$S31: \lambda(2) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial r} = \lambda(3) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial r}, X(2) \leq x \leq X(3) + \Delta X_m, r = R(5);$$

$$S32: \lambda(1) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial r} = \lambda(3) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial r}, X(2) + \Delta X_m \leq x \leq X(3), r = R(5) + \Delta R_m;$$

$$S33: \lambda(1) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial r} = \lambda(3) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial r}, X(2) + \Delta X_m \leq x \leq X(3), r = R(6);$$

$$S34: \lambda(2) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial r} = \lambda(3) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial r}, X(2) \leq x \leq X(3) + \Delta X_m, r = R(6) + \Delta R_m;$$

$$S35: \lambda(2) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial x} = \lambda(3) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial x}, x = X(3), R(5) \leq r \leq R(6) + \Delta R_m;$$

$$S36: \lambda(3) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial x} = \lambda(1) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial x}, x = X(3) + \Delta X_m, R(5) + \Delta R_m \leq r \leq R(6);$$

$$S37: \lambda(1) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial r} = \lambda(4) \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial r}, 0 \leq x \leq X(4), r = R(8).$$

де  $\Delta R_R$ ,  $\Delta X_m$  - товщина стінок біореактора та труб теплообмінника-мішалки;

$q_1(\tau)$  – тепловий потік в теплообміннику-мішалки;

$q_2(\tau)$ ,  $q_3(\tau)$  – теплові втрати;

$g$  - швидкість потоку теплоносія.

Моделювання виконували за умов рівномірного початкового розподілу температури по камері. Температуропровідність розраховуються за формулою:

$$a(\beta) = \frac{\lambda(\beta)}{c(\beta)\rho(\beta)}, \left[ \frac{m^2}{c} \right], \beta = 1, 2, \dots, 4,$$

де  $\rho$  – густина речовини, кг/м<sup>3</sup>;

$\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності речовини, Вт/(мК);

$c$ - теплоємність речовини, Дж/(кгК).

- Жаростійка сталь

$$a(3) = \alpha(4) \frac{54,4}{7800 \cdot 486} = 1,42505 \cdot 10^5, \left[ \frac{m^2}{c} \right];$$

- повітря

$$a(1) = \frac{0,0075}{960 \cdot 1,32} = 0,0000059 \left[ \frac{m^2}{c} \right];$$

- вода

$$a(2) = \frac{0,561}{4,195 \cdot 915} = 0,0004291 \left[ \frac{m^2}{c} \right];$$

Таблиця 2.2 – Теплофізичні параметри речовин

Речовина	Теплопровідність, $\lambda$ [Вт/мК]	Густина, $\rho$ [кг/м <sup>3</sup> ]	Теплоємність, $c$ [Дж/кгК]	Температуропровідність, $a$ [м <sup>2</sup> /с]
Вода	0,561	915	4,179	0,0004291
Повітря	0,0075	1,32	960	0,0000059
Жаростійка сталь	54,4	7760-8000	486	0,0000143505

## 2.4 Аналітична оцінка отриманих результатів

У роботі досліджувалося анаеробне перероблення органічної сировини для отримання біогазу в умовах мезофільного та термофільного режимів. Підтримання заданих температурних режимів є складним, особливо за низьких зовнішніх температур, що ускладнює забезпечення оптимальних умов

бродиння. Для стабілізації процесу та зменшення тепловтрат конструкція біореактора оснащується ефективною теплоізоляцією.

Температурний режим визначає як обсяг біогазу, що може бути отриманий із певної кількості сировини протягом встановленого часу, так і тривалість процесу бродиння, необхідного для досягнення заданого газовиділення.

Відповідно, для різних температурних режимів проведено аналітичні дослідження теплових втрат, що виникають через термічний опір конструкцій біореактора у діапазоні температур від  $-20$  до  $20$  °C, із урахуванням захисних елементів конструкції.

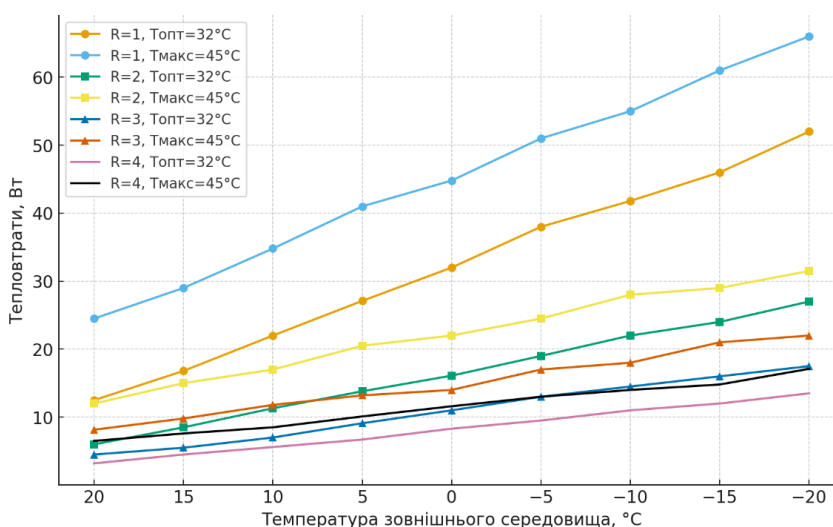


Рисунок 2.8– Тепловтрати для мезофільного інтервалу бродиння (T=25-45°C, T<sub>опт</sub>=32-42 °C)

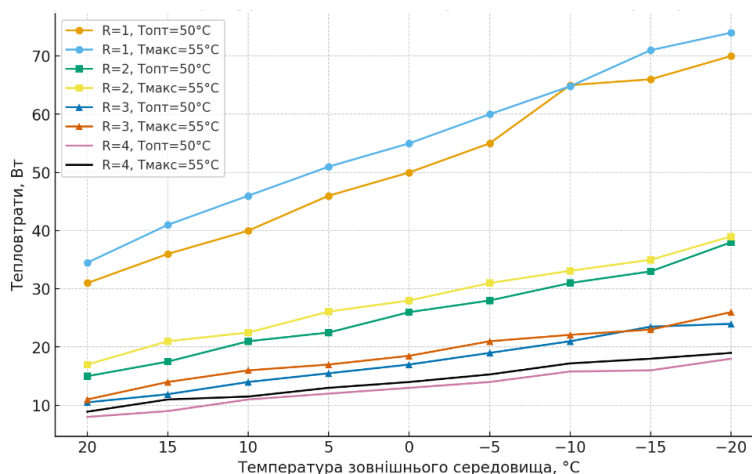


Рисунок 2.9 – Тепловтрати для термофільного інтервалу бродиння (T=45-55°C, T<sub>опт</sub>=48-51 °C)

Аналіз результатів досліджень дозволяє оцінити вплив температурного режиму та термічного опору конструкції на величину тепловтрат у біореакторі. Для мезофільного режиму анаеробного перероблення органічної сировини, за умови від'ємних температур зовнішнього середовища та термічного опору конструкції, що дорівнює одиниці, спостерігаються тепловтрати в межах 45–65 Вт. Це свідчить про значну залежність процесу від зовнішніх температурних умов та необхідність додаткових заходів для підтримання оптимальної температури всередині реактора.

У термофільному режимі, який характеризується вищими робочими температурами біореактора, тепловтрати при  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  можуть досягати 75 Вт. Такий рівень втрат підкреслює підвищені енергетичні потреби для підтримання стабільного режиму бродіння у несприятливих кліматичних умовах.

Дослідження показують, що зменшити тепловтрати можна шляхом збільшення термічного опору конструкції. Так, при  $R > 3\text{ (м}^2\cdot^{\circ}\text{C)/Вт}$  тепловтрати значно зменшуються, що дозволяє досягти більш ефективного теплового балансу у камері біореактора. Підвищення термічного опору захисної конструкції сприяє зменшенню витрат енергії на підтримку необхідного температурного режиму, що, у свою чергу, підвищує продуктивність біогазової установки та ефективність процесу зброджування.

Таким чином, проведені аналітичні дослідження дозволяють визначити оптимальні параметри теплоізоляції для різних робочих режимів біореактора. Це забезпечує мінімізацію тепловтрат і сприяє економії енергії при експлуатації установки, що особливо актуально за низьких температур зовнішнього середовища. Результати досліджень ілюструються на рис. 2.3 та 2.4.

## **Висновки**

1. У результаті дослідження проаналізовано та обґрунтовано мікробіологічні процеси, що відбуваються під час анаеробного зброджування органічної сировини в біогазових установках. Встановлено, що інтенсивність метаболічної діяльності та розмноження метаногенних бактерій безпосередньо

залежать від температури середовища. Підтримання необхідного теплового режиму потребує витрат 20–50 % від загального обсягу виробленого біогазу, що підкреслює важливість підвищення енергоефективності установки.

2. Запропоновано технологічну схему біогазової установки з удосконаленою системою теплообміну. Її особливістю є конструкція змішувального пристрою, який одночасно виконує функції перемішування субстрату та нагрівання реакційної маси, що підвищує рівномірність розподілу температури й ефективність процесу бродіння.

3. На основі аналітичних розрахунків отримано вирази для визначення термічного опору теплопередачі через стінку біореактора залежно від його геометричних характеристик. Це дозволяє оцінити вплив товщини стінки, діаметра та матеріалу на величину тепловтрат.

4. Розроблено математичну модель теплових процесів, що протікають у біореакторі, яка дає можливість проводити дослідження впливу зміни геометричних параметрів і режимів роботи на тепловий баланс біогазової установки. Застосування моделі забезпечує можливість оптимізації конструктивних параметрів для підвищення ефективності утилізації органічних відходів.

## 3 ОБГРУНТУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 3.1 Принципова схема та особливості роботи біогазової установки

Під час розробки біогазової установки було прийнято конструктивне рішення, яке забезпечує інтеграцію функцій перемішування та нагрівання субстрату в єдиному робочому вузлі. Такий підхід дозволяє підтримувати заданий температурний режим рівномірно в усьому об'ємі реакційної камери, що сприяє стабільності ферментаційного процесу. На рисунку 3.1 представлено технологічну схему розробленої лабораторної біогазової установки (БГУ).

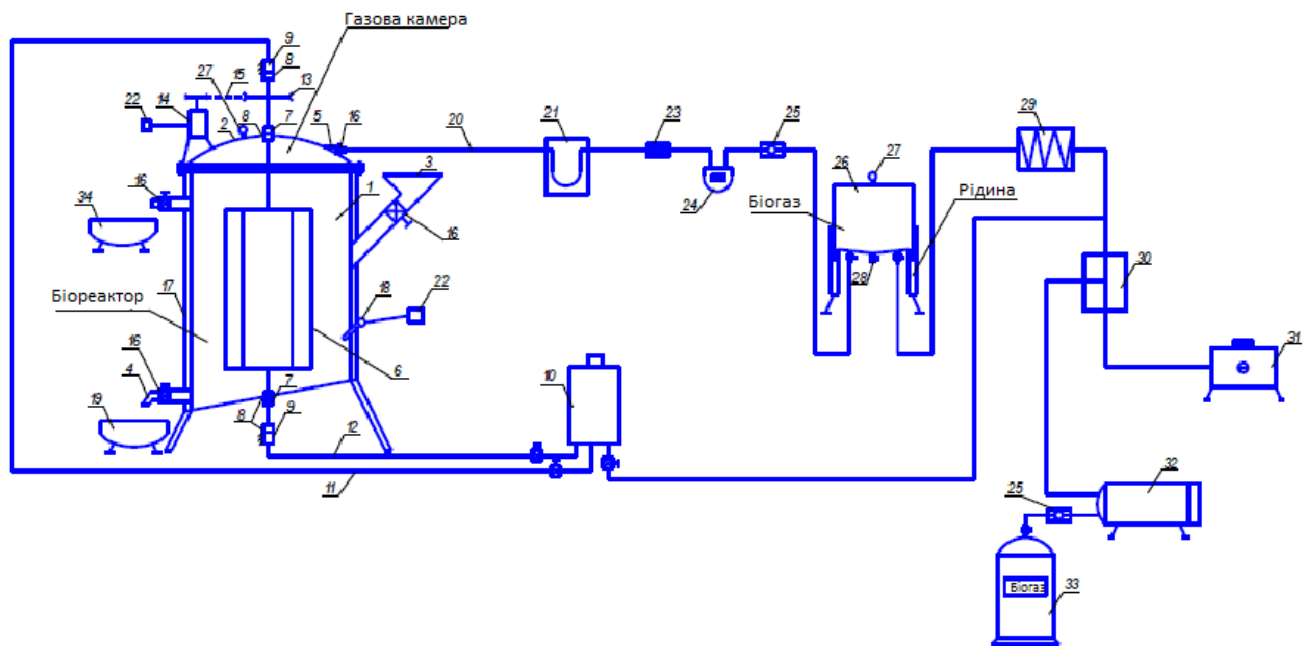


Рисунок 3.1 – Технологічна схема БГУ з теплообмінником-змішувачем (мішалка)

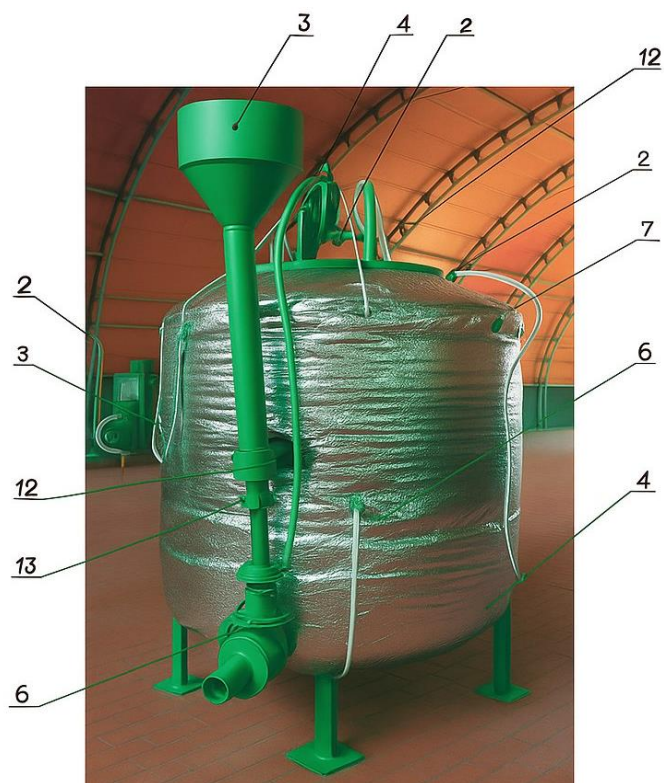
1 - корпус біореактора; 2 - кришка; 3 і 4 - завантажувальна і вивантажувальна горловини; 5 - вихід біогазу; 6 - теплообмінник-змішувач; 7 - підшипник; 8 - сальниковий ущільнювач; 9 - нерухомий циліндр; 10 - газовий котел; 11, 12 - подавальний та зворотний трубопровід; 13 - шків; 14 - електродвигун; 15 - приводний ремінь; 16 - вентиль; 17 - теплоізоляція; 18 - термодатчик; 19 і 34 - резервуар для відпрацьованої маси; 20 - газопровід; 21 - гідрозатвор; 22 - регулятор мікропроцесорний; 23 - фільтр; 24 - лічильник газовий; 25 - зворотний клапан; 26 - газгольдер; 27 - манометр; 28 - зливний штупцер; 29 - іскрогасник; 30 - автоматичний перемикач; 31 - споживач газу; 32 - компресорна установка; 33 - газований балон

Органічні відходи з резервуару подаються у верхню частину біореактора, де суміш перемішується, зволожується та проходить через теплообмінник-змішувач для передачі тепла від відпрацьованого субстрату свіжій масі. Біомаса

(пташиний послід) ферментується у бродильній камері в термофільному режимі (50–55 °С) без доступу повітря, завантаження здійснюється безперервно, а переброджена маса самопливом потрапляє у накопичувач. Накопичений біогаз очищується, збирається у газгольдері та подається на потреби установки і споживачів, при цьому температура біореактора підтримується газовим котлом та контролюється мікропроцесорно.

### 3.2 Оцінка теплових характеристик біореактора на основі експериментальних даних

Виходячи з результатів лабораторних досліджень, була виготовлена дослідна біогазова установка, стенд якої наведено на рисунку 3.2, що дозволяє проводити експерименти з відпрацювання технологічних параметрів та режимів роботи установки.



**Рисунок 3.2 – Комплекс лабораторної установки**

1 – корпус біореактора з теплоізоляцією, 2 - знімна кришка корпусу; 3 - завантажувальна горловина; 4 - вивантажувальна горловина; 5 - зливна горловина; 6 - вихід біогазу; 7 - трубопровід подачі і зворотний трубопровід теплоносія; 8 - електродвигун із редуктором; 9 - клиноремінна передача; 10 - вал теплообмінника-мішалки; 11 - термодатчик; 12 - вимірювач регулятор мікропроцесорний; 13 - програмне реле часу.

Добова доза подачі субстрату у біореактор становить 430 кг, а першочергове завантаження – 2160 кг. З цієї кількості 344 кг припадає на воду, а 86 кг – на курячий послід із вологістю 90 %. Такий режим забезпечує переробку посліду від приблизно 350 курей за підлоговою системою утримання.

Враховуючи, рівень вологості субстрату дорівнює 75 % для отримання 1 кг сухої речовини потрібно близько 4 кг свіжого посліду. Виходячи з цього, щоденна доза біомаси, що завантажується в біореактор, дорівнює 430 кг.

Коли установка виходить на стабільний робочий режим, обсяг виробленого біогазу досягає 15,5 м<sup>3</sup> на добу, що підтверджує ефективність переробки органічного субстрату та забезпечує оптимальні умови для проведення лабораторних експериментів (рис. 3.3).

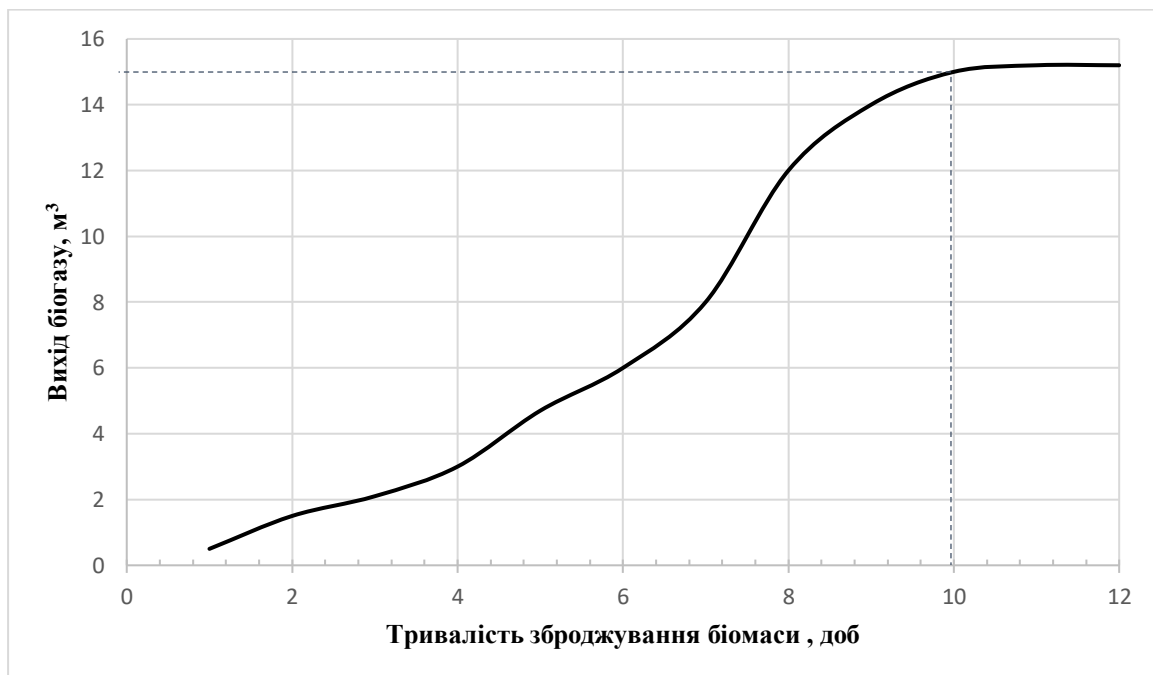


Рисунок 3.3 – Вихід біогазу з неперервною роботою БГУ

Отриманий добовий обсяг біогазу — 15,5 м<sup>3</sup> — характеризує фактичну продуктивність птахів за біогазом і відображає ефективність роботи біореактора при заданих умовах:

$$W = \frac{14,2}{300 \cdot 24} = 0,002 \text{ м}^3$$

Кількість біогазу, що утворюється з одиниці маси посліду, розраховується шляхом поділу загального об'єму отриманого біогазу на масу вихідного органічного матеріалу, завантаженого в біореактор.

$$W = \frac{14,2}{86} = 0,17 \text{ м}^3 / \text{кг посліду за добу}; W = \frac{14,2}{21,5} = 0,66 \text{ м}^3 / \text{кг СВ за добу}$$

Отримані дані відрізняються від експериментальних результатів не більш ніж на 1,5 %, що свідчить про достовірність проведених досліджень.

Для підвищення достовірності результатів кожен експеримент проводився кілька разів у відповідних режимах, оскільки під час досліджень можливе виникнення випадкових похибок. Динамічні властивості об'єкта доцільно вивчати шляхом реєстрації його характеристик у процесі функціонування. Для визначення оптимальних конструктивних параметрів та режимів роботи біогазової установки, що забезпечують максимальний вихід біогазу, був проведений багатофакторний експеримент. За даними проведених експериментів розроблено регресійні моделі, що дають змогу оцінити вплив досліджуваних параметрів на обсяг виробленого біогазу, який використовується для оптимізації роботи установки.

$$Y(Q_{\text{бг}}) = 15,3 - 0,68X_1 + 0,092X_2 - 0,29X_3 - 0,27X_1X_2 - 0,78X_1X_3 + 0,77X_2X_3 - 1,3X_1^2 - 1,05X_2^2 - 1,12X_3^2$$

Згідно з критерієм Фішера, проведена перевірка підтвердила, що побудоване рівняння регресії адекватно відображає вплив досліджуваних факторів на вихід біогазу. ( $F_{\text{розр}} = 0,765 < F_{\text{табл}} = 2,359$ ).

Регресійне рівняння з врахуванням початкових значень факторів:

$$Y(Q_{\text{бг}}) = 15,3 - 0,68 \frac{T_{\text{II}} - 57}{3} + 0,092 \frac{t_{\text{II}} - 17}{3} - 0,29 \frac{n_{\text{T}} - 7,5}{0,5} - 0,27 \left( \frac{T_{\text{II}} - 57}{3} \right) \left( \frac{t_{\text{II}} - 17}{3} \right) - 0,78 \left( \frac{T_{\text{II}} - 57}{3} \right) \left( \frac{n_{\text{T}} - 7,5}{0,5} \right) + 0,77 \left( \frac{t_{\text{II}} - 17}{3} \right) \left( \frac{n_{\text{T}} - 7,5}{0,5} \right) - 1,3 \left( \frac{T_{\text{II}} - 57}{3} \right)^2 - 1,05 \left( \frac{t_{\text{II}} - 17}{3} \right)^2 - 1,12 \left( \frac{n_{\text{T}} - 7,5}{0,5} \right)^2$$

Після здійснення необхідних перетворень рівняння приймає наступну форму:

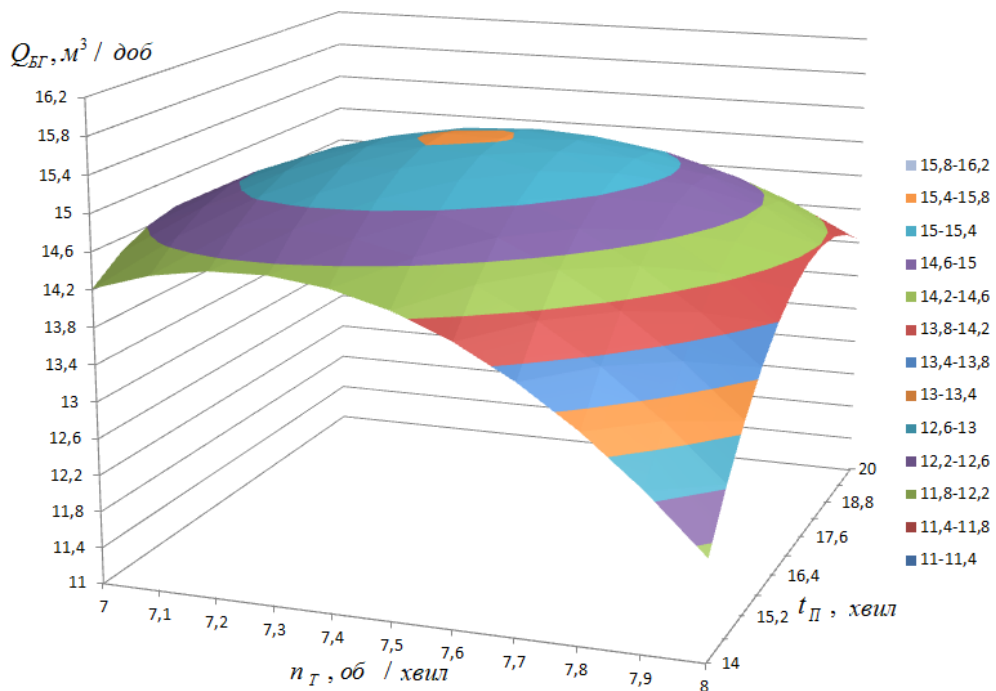
$$Q_{бг} = -906 + 21T_{II} + 1,82t_{II} + 87n_T - 0,03T_{II}t_{II} - 0,52T_{II}n_T + 0,52t_{II}n_T - 0,15T_{II}^2 - 0,12t_{II}^2 - 4,48n_T^2$$

Отже, параметри, при яких досягається максимальний вихід біогазу, представлені у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Результати багатofакторного експерименту

Температура зброджування	$X_1 = -0,2519$	$T_{II} = 56,2^{\circ}\text{C}$
Тривалість перемішування зброджуваної маси	$X_2 = 0,0014$	$t_{II} = 17 \text{ хвил}$
Число обертів теплообмінника-змішувача	$X_3 = -0,0381$	$n_T = 7,5 \text{ об/хв}$
Вихід біогазу	$Y(Q_{БГ}) = 15,5 \text{ м}^3/\text{доб}$	

На рисунку 3.4 показано поверхні відгуку залежно від тривалості перемішування та числа обертів теплообмінника-змішувача.



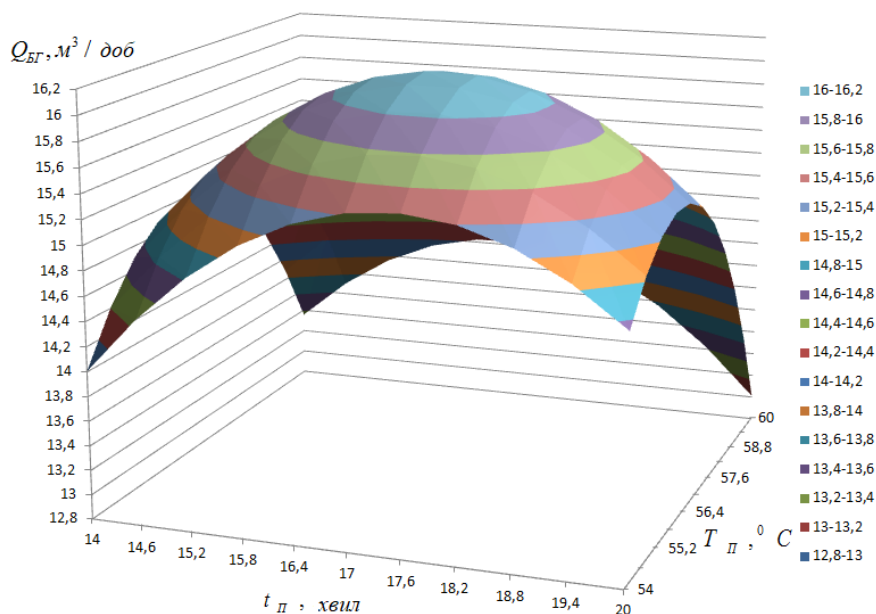
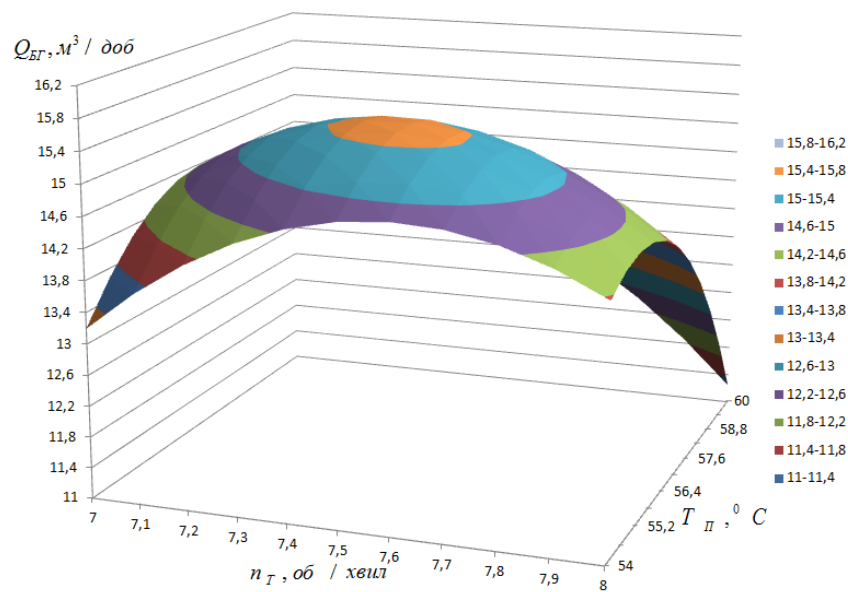


Рисунок 3.4 – Поверхня відгуку виходу біогазу

Величину опору теплопередачі всіх зон огорожувальних поверхонь біореактора розраховано для площі  $F = 9,75 \text{ м}^2$ . Товщина стінки біореактора складає 10 мм.

Для проведення розрахунку конструкції біогазової установки приймемо такі параметри:

Сталева циліндрична оболонка характеризується теплопровідністю  $\lambda = 74 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ , а її опір теплопередачі визначається наступним чином:

$$R = \sum_{i=1}^{i=m} \frac{\delta_i}{\lambda_i}, m^2 K / Bm$$

де  $\sum_{i=1}^{i=m} \frac{\delta_i}{\lambda_i}$  - сума термічного опору теплопровідності окремих шарів огороження товщиною  $\delta_{i,m}$ , виконаних з матеріалів теплопровідністю  $\lambda_i$ .

$$R_{cm} = \frac{0,005}{74} = 0,000067, \text{ м}^2 \text{ К} / \text{ Вт}$$

$$R_{i3} = \frac{0,05}{0,048} = 1,04, \text{ м}^2 \text{ К} / \text{ Вт}$$

$$R = R_{cm} + R_{i3} = 1,042 \text{ м}^2 \text{ К} / \text{ Вт}$$

Таблиця 3.2 – Основні показники дослідної установки

Параметр	Значення
Поголів`я	350
Загальний об`єм вихода посліду, кг/доб	86
Об`єм біореактора, м <sup>3</sup>	3,5
Температура бродіння, °С	54-55
Вологість зброджуваної біомаси, %	90
Добове завантаження, м <sup>3</sup> /доб	0,43
Тривалість зброджування, доб	11
Період виходу в експлуатаційний режим, доб	4-5
Добовий вихід біогазу, м <sup>3</sup> /доб	15,5
Кількість тепла, необхідного для нагріву вихідної біомаси, МДж	54,45
Кількість теплоти, що йде з виробленим газом, МДж/доб	0,02
Кількість теплоти, що втрачається в навколишнє середовище, МДж/доб	0,41
Кількість теплоти, що втрачається з переробленою біомасою, МДж/доб	0,05
Кількість теплоти, що витрачається на перемішування біомаси, МДж/доб	2,1
Кількість теплоти, що витрачається на власні потреби, МДж/доб	30,75
Кількість енергії, що міститься у виробленому газі, МДж/доб	85,2
Частина біогазу, необхідного для нагріву та підтримки температурного режиму, %	20
Вихід біодобрив, %	13

Потік тепла між внутрішньою та зовнішньою поверхнею за період опалення:

$$Q_{opr} = \frac{F}{R} (t_1 - t_2), \text{ кДж/доб}$$

де  $t_1=54$  °С – оптимальна температура зброджування;

$t_2=9,1$  °С – середньорічна температура.

$$Q_{огр} = \frac{7,9}{1,04} 44,9 = 341,1 \text{ кДж/доб}$$

Щоб забезпечити підтримку необхідного температурного режиму в біогазовій системі, потрібна енергетична потужність на рівні 341,1 кДж на добу. Для покриття цієї потреби доцільно застосовувати біогаз, який утворюється в установці і характеризується теплотворною здатністю 33,3 МДж/м<sup>3</sup>.

Для розрахунку споживання біогазу при ККД теплової установки 0,8 використовується наступний вираз:

$$V = \frac{Q_{огр}}{Q_{біог} \eta} = \frac{341,1}{33300 \cdot 0,8} = 0,0128 \text{ м}^3 / \text{доб} = 12,8 \text{ л} / \text{доб}$$

Величину втрат тепла визначають за таким виразом.

Добове завантаження біомаси визначається з урахуванням технічних характеристик біореактора об'ємом 3,5 м<sup>3</sup>. Об'ємна подача біомаси становить  $G_m = 0,43$  м<sup>3</sup>/добу. З урахуванням щільності та вологості субстрату це відповідає масі близько 430 кг на добу. Таке завантаження забезпечує ефективну роботу біореактора та підтримання необхідного обсягу органічного матеріалу для стабільного процесу зброджування.

$$Q_{посл} = \frac{G_m(t_1 - t_2)C_n}{\eta} = \frac{420 \cdot (54 - 20) \cdot 4,06}{0,8} = 74196,5 \text{ кДж} / \text{доб}$$

$\eta=0,8$  – ККД нагрівального приладу;

$C_n$  – питома теплоємність посліду.

В результаті проведених розрахунків отримано значення витрат тепла для виходу БГУ на термофільний режим і визначено обсяг біогазу, який забезпечує задану теплову потужність:

$$Q = Q_{огр} + Q_{посл} = 74196,5 + 341,1 = 74537,6 \text{ кДж} / \text{доб}$$

$$B = \frac{74537,6}{33300 \cdot 0,8} = 2,8 \text{ м}^3 / \text{доб}$$

Значення знаходяться у відповідності з характеристиками обраних джерел тепла.

### 3.3 Методичні підходи до визначення конструктивних характеристик біогазової установки

При організації безперервної роботи газового котла для нагріву біореактора враховується основне споживання газу на рівні 0,0199 м<sup>3</sup>/год, а також додаткові витрати газу для технологічних потреб, що становлять 0,29 м<sup>3</sup>/год протягом 9,8 годин роботи. На основі цих даних визначається загальна добова витрата газу:

$$G = 24 \cdot 0,023 + 0,3 \cdot 10 = 3,55 \text{ м}^3 / \text{доб}$$

Щоб забезпечити виробництво необхідного обсягу газу, розрахуємо місткість біореактора з урахуванням середніх показників виходу біогазу на тонну оброблюваного посліду:

$$V = K_3 \frac{G}{q} = 1,3 \frac{3,55}{1,32} = 3,5 \text{ м}^3$$

$K_3$  – коефіцієнт запасу.

Добова подача біомаси в біореактор:

$$M_{зав} = \frac{V}{t} = 0,29 \text{ м}^3 / \text{доб}$$

$t$  – 12 днів – тривалість зброджування.

Місткість газгольдера визначають відповідно до годинної потреби в біомасі:

$$V_{год} = G \frac{t}{24} = 0,177 \text{ м}^3$$

У результаті, загальна теплова потужність, яку забезпечує отриманий газ:

$$Q_{\text{заг}} = G \cdot Q_{\text{біог}} = 3,55 \cdot 24 = 85,2 \text{ МДж} = 23,7 \text{ кВт}$$

$Q_{\text{біог}}$  - теплотворна здатність біогазу.

Витрати теплової енергії на підвищення температури посліду з 15 °С до 54 °С (термофільний режим):

$$Q_{\text{нагр}} = \frac{M_{\text{заб}}(t_1 - t_2)c}{\eta} = 54,45 \text{ МДж} = 15,1 \text{ кВт}$$

Енергетичні витрати на власні потреби розраховуються за формулою:

$$Q = Q_{\text{заг}} - Q_{\text{нагр}} = 30,75 \text{ МДж} = 8,5 \text{ кВт}$$

Місткість контейнера для зберігання резерву посліду:

$$V_{\text{к. запас}} = V_{\text{біореак}} \cdot t \cdot \kappa = 5,25 \text{ м}^3$$

$t$  – час накопичення посліду за добу;

$\kappa=1.5$  – коефіцієнт, який враховує зміни густини посліду в залежності від вихідної вологості.

Для обґрунтування раціональної конструкції біореактора доцільно здійснити комплексний аналіз процесів теплообміну та теплопередачі, при якому розрахунки основних енергетичних параметрів установки повинні враховувати сезонні коливання зовнішніх умов, зокрема літній та зимовий періоди експлуатації БГУ, що дозволяє оцінити ефективність терморегуляції та оптимізувати параметри роботи системи.

Теплова потужність, необхідна для роботи БГУ влітку:

$$Q_{\text{л}} = \frac{(t_1 - t_{\text{л}})F}{\frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha}} = 170,2 \text{ Вт} = 0,6 \text{ МДж}$$

$t_{\text{л}} = 26$  °С – середнє значення температури повітря в літній період

$F=9,8$  м<sup>2</sup> – поверхнева площа всього біореактора

$\delta=0,99\text{м}$  – розмір стінки біореактора по товщині

$\lambda=0,049 \text{ Вт/(мК)}$  – коефіцієнт теплопровідності стінки біореактора з ізоляційним покриттям

$\alpha=23 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$  – коефіцієнт теплопередачі.

Коефіцієнт корисної дії біогазової установки у літній період

$$\eta_l = \frac{Q_{заг} - Q_l}{Q_{заг}} = \frac{85,2 - 0,6}{85,2} = 0,99$$

Потреба біореактора в теплоті у зимой період:

$$Q_{зим} = \frac{(t_1 - t_{зим})F}{\frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha}} = 250,2 \text{Вт} = 0,9 \text{Мдж}$$

$t_{зим}=0 \text{ }^{\circ}\text{C}$  – середня температура взимку.

ККД установки взимку:

$$\eta_l = \frac{Q_{заг} - Q_{зим}}{Q_{заг}} = \frac{85,2 - 0,9}{85,2} = 0,98$$

Втрати теплоти під час видалення із біореактора біомаси, що завершила процес зброджування.

$$Q_{нб} = c_{нб} M_{зав} t_2 = 4,06 \cdot 290 \cdot 55 = 64,76 \cdot 10^3 \text{кДж}$$

Стосовно початкової маси завантаження:

$$Q_{зб} = c_{нб} M_{зав} (t_1 - t_l) = 4,06 \cdot 290 \cdot (55 - 18) = 43,56 \cdot 10^3 \text{кДж}$$

Добові сумарні витрати теплоти на завантаження біореактора:

$$Q_{дзав} = Q_{нб} + Q_{зб} = 10,83 \cdot 10^3 \text{кДж}$$

Повна кількість теплоти, втраченої біореактором за добу через його поверхню:

$$Q_{\sum \text{доб}} = Q_{зим} t = 0,9 \cdot 24 = 21,6 \cdot 10^3 \text{кДж}$$

Добові теплові витрати біогазової установки:

$$Q_{заг.доб} = Q_{дзав} + Q_{\Sigma доб} = 12,99 \cdot 10^3 \text{ кДж}$$

Середньодобова величина експлуатаційної теплової потужності для зимової експлуатації БГУ:

$$Q_{сп.доб} = \frac{Q_{заг.доб}}{t} = \frac{12,99 \cdot 10^3 \cdot 1000}{24 \cdot 3600} = 1504 \text{ кДж}$$

Запропонований біореактор забезпечує переробку відходів пташника при поголів'ї до 350 голів, що дозволяє реалізувати сучасні вимоги щодо мінімізації експлуатаційних витрат та повної утилізації органічних залишків птахівництва.

Для біореактора об'ємом  $3,5 \text{ м}^3$  із вбудованим теплообмінником-змішувачем (рис. 3.5) проводяться розрахунки енергетичних характеристик відповідно до технологічної схеми, представлені на рисунку 2.1



Рисунок 3.5 – Загальний вигляд теплообмінника-змішувача

Загальна площа теплообмінної частини змішувача:

$$F = \frac{Q}{k(t_{cp} - t_p)} = \frac{410,5}{41,7(72,5 - 53)} = 0,505 \text{ м}^2$$

де  $t_{cp} = \frac{t_1' + t_2''}{2} = \frac{85 + 60}{2} = 72,5^\circ \text{ С}$  середня температура теплоносія.

Для труби з діаметром  $d_{тр} = 0,032 \text{ м}$  обчислимо довжину труби:

$$l = \frac{F}{\pi d} = \frac{0,505}{3,14 \cdot 0,032} = 5,2 \text{ м}$$

Для труби з діаметром  $d_{тр} = 0,025 \text{ м}$  обчислимо довжину труби:

$$l = \frac{F}{\pi d} = \frac{0,505}{3,14 \cdot 0,025} = 6,4 \text{ м}$$

Розрахунки енергетичних характеристик показують, що сумарна потреба в теплі для нагрівання та підтримки заданої температури при застосуванні комбінованого теплообмінника-змішувача зменшується на 25–30 % порівняно з традиційними методами.

### 3.4 Розрахунок режимів експлуатації БГУ з метою максимізації продуктивності біодобрива

Для визначення оптимальних конструктивних параметрів та режимів роботи біогазової установки, які забезпечують максимальний вихід біодобрива, було проведено багатофакторний експеримент. На основі отриманих експериментальних даних сформульовано рівняння регресії, що дозволяють кількісно оцінити вплив змінних факторів на обсяг виробленого біогазу. Вихід біогазу при цьому використовується як критерій оптимізації, а рівняння регресії мають наступний вигляд:

$$Y(Q_{\text{БД}}) = 0,26 - 0,0061X_1 - 0,002X_2 - 0,0124X_3 - 0,0015X_1X_2 - 0,001X_2X_3 - \\ - 0,024X_1^2 - 0,0152X_2^2 - 0,025X_3^2$$

Перевірка рівняння за критерієм Фішера показала його адекватність.

$$(F_{\text{розр}} = 0,765 < F_{\text{табл}} = 2,359).$$

Розкодоване регресійне рівняння має наступний вигляд:

$$Y(Q_{\text{БД}}) = 0,26 - 0,0061 \frac{T_{\text{II}} - 57}{3} + 0,002 \frac{t_{\text{II}} - 17}{3} - 0,012 \frac{n_{\text{T}} - 7,5}{0,5} - \\ - 0,0015 \left( \frac{T_{\text{II}} - 57}{3} \right) \left( \frac{t_{\text{II}} - 17}{3} \right) + 0,001 \left( \frac{t_{\text{II}} - 17}{3} \right) \left( \frac{n_{\text{T}} - 7,5}{0,5} \right) - \\ - 0,024 \left( \frac{T_{\text{II}} - 57}{3} \right)^2 - 0,0152 \left( \frac{t_{\text{II}} - 17}{3} \right)^2 - 0,0254 \left( \frac{n_{\text{T}} - 7,5}{0,5} \right)^2$$

Наступне:

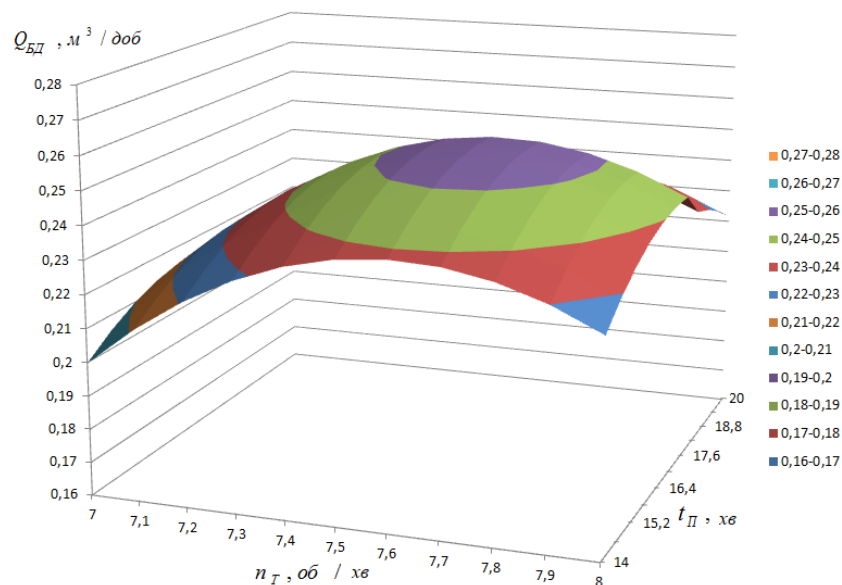
$$Q_{\text{БД}} = -8,79 + 0,1022T_{\text{П}} + 0,0474t_{\text{П}} + 1,5375n_{\text{T}} - 0,0001T_{\text{П}}t_{\text{П}} - 0,0007t_{\text{П}}n_{\text{T}} - 0,001T_{\text{П}}^2 - 0,0017t_{\text{П}}^2 - 0,101n_{\text{T}}^2$$

Параметри, що забезпечують найвищий вихід біодобрива, представлені в таблиці 3.3:

Таблиця 3.3 – Результати багатofакторного експерименту

Температура зброджування	$X_1 = -0,1217$	$T_{\text{П}} = 54,4^{\circ}\text{C}$
Тривалість перемішування зброджуваної маси	$X_2 = 0,06$	$t_{\text{П}} = 17,2 \text{ хвил}$
Число обертів теплообмінника-змішувача	$X_3 = 0,2422$	$n_{\text{T}} = 7,6 \text{ об/хв}$
Вихід біогазу	$Y(Q_{\text{БД}}) = 0,26 \text{ м}^3/\text{доб}$	

На рисунку 3.6 представлені графіки поверхні відгуку для перемішування збродженої маси протягом сімнадцяти хвилин, з урахуванням зміни температури процесу збродження та числа обертів теплообмінника-змішувача, яке становить сім цілих шість десятих об/хв.



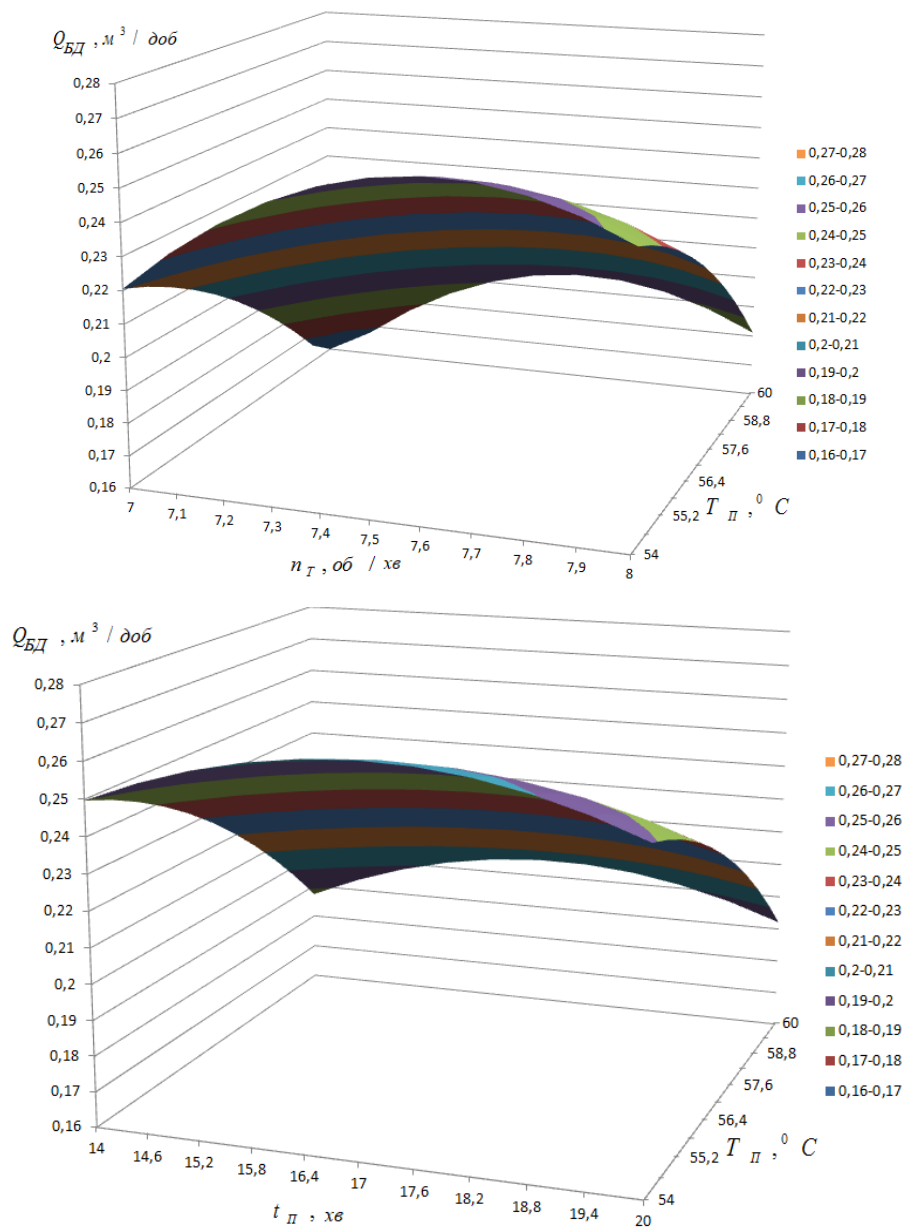


Рисунок 3.6 – Поверхня виходу біодобрива, сформована при оптимальних експлуатаційних режимах біореактора

Обґрунтування результатів багатofакторного експерименту дозволив встановити оптимальні умови роботи біогазової установки для досягнення максимального виходу біодобрива. Максимальний вихід біодобрива становить  $0,26 \text{ м}^3/\text{добу}$  і досягається при наступних параметрах: температура перемішування  $T_p = 54,4 \text{ }^\circ\text{C}$ , тривалість перемішування  $t_p = 17,2 \text{ хв}$  та частота обертання теплообмінника-змішувача  $n_t = 7,6 \text{ об/хв}$ .

На основі проведених досліджень визначено, що загальний обсяг біогазу, виробленого за весь період зброджування 1 т пташиного посліду, становить

80 м<sup>3</sup>. Початок стабільного виділення товарного біогазу настає через 11–12 днів від початку процесу. Для розрахунку роботи БГУ об'ємом 3,5 м<sup>3</sup> отриманий добовий обсяг біогазу становить 15,5 м<sup>3</sup>. При цьому частина виробленого газу, приблизно 20 % або 3,1 м<sup>3</sup>, витрачається на нагрів та підтримку термофільного режиму біомаси, а залишок у кількості 12,4 м<sup>3</sup> може бути використаний для виробництва електроенергії.

Вихід електроенергії розраховується з урахуванням продуктивності газогенератора, який здатен виробляти до 3 кВт електроенергії з 1 м<sup>3</sup> біогазу. Таким чином, максимальна добова продуктивність БГУ досягає 37,2 кВт·год, а річний обсяг виробленої електроенергії може становити близько 13,4 МВт·год.

Крім того, проведені розрахунки показують, що модернізована БГУ дозволяє знизити енергетичні витрати на 25–30 % порівняно з базовим варіантом. Це зменшення витрат виражається у скороченні обсягу біогазу, який використовується для власних потреб нагріву та підтримки термофільного режиму, до 14,03 % або 2,33 м<sup>3</sup>. Така оптимізація забезпечує більш ефективну роботу установки та підвищує загальну продуктивність біогазової системи.

### **Висновки**

1 Розроблений метод дозволяє проводити технічні розрахунки установки передбачає комплексне визначення ключових параметрів модернізованої БГУ та її теплообмінного пристрою. Вона включає оцінку теплових втрат, розрахунок максимальної витрати теплоносія, визначення обсягу тепла, необхідного для підтримки оптимальної температури біомаси, а також розрахунок потужності теплообмінника. Крім того, методика передбачає визначення коефіцієнта теплопередачі та площі теплообмінної поверхні, що дозволяє забезпечити ефективний теплообмін і стабільний термофільний режим у процесі анаеробного бродіння.

2. Розрахунки енергетичних характеристик показали, що загальна витрата теплової енергії на нагрів та підтримку необхідного температурного режиму при застосуванні комбінованого теплообмінника зі змішувачем зменшується до 30 % у порівнянні з традиційними методами.

3. Під час обґрунтування багатофакторного експерименту було визначено, що максимальний обсяг виробленого біогазу досягає 15,5 м<sup>3</sup>, проте приблизно 20% цього об'єму (3,1 м<sup>3</sup>) використовується для нагрівання та підтримки термофільного режиму біомаси.

4. Найвищий добовий вихід біодобрива становить 0,26 м<sup>3</sup>/добу і досягається при оптимальних параметрах: температура перемішування  $T = 54,4^{\circ}\text{C}$ , тривалість перемішування  $t = 17,2\text{хв}$  та частота обертання теплообмінника  $n = 7,6\text{ об / хв}$ .

#### 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

Експлуатація біогазової установки пов'язана з роботою з органічними відходами, біогазом, який містить метан, та технічним обладнанням, що функціонує під підвищеним тиском і температурою. Це обумовлює необхідність суворого дотримання правил охорони праці та санітарно-гігієнічних норм для забезпечення безпечного виробничого процесу. До роботи з установкою допускаються лише особи, які пройшли інструктаж та мають відповідну кваліфікацію. Працівники зобов'язані користуватися засобами індивідуального захисту, зокрема рукавицями, спецодягом, респіраторами та захисними окулярами, особливо при контакті із субстратом і біогазом. Забороняється палити та застосовувати відкритий вогонь у приміщенні, де працює установка, через високий ризик вибуху. Приміщення повинно бути обладнане системою примусової вентиляції для запобігання накопиченню газу, а робочі поверхні і територія навколо установки повинні залишатися чистими та сухими.

Під час підготовки та завантаження субстрату слід перевіряти герметичність біореактора та уникати контакту шкіри і слизових оболонок із органічними відходами, які можуть містити патогенні мікроорганізми. Використання механізованих засобів, таких як транспортери та насоси, зменшує ризик травмування персоналу, а рідкі відходи слід переміщувати у герметичних ємностях, запобігаючи розбризкуванню.

Постійний контроль температури, тиску і рівня газу у біореакторі є обов'язковим для уникнення аварійних ситуацій. Установка повинна бути обладнана автоматичними запобіжними клапанами та системами аварійного відключення. Регулярне технічне обслуговування теплообмінника, змішувача та газопроводів зменшує ризик поломок і аварій. Забороняється самостійне втручання у конструкцію без дозволу відповідального персоналу.

Біогаз є легкозаймистим і вибухонебезпечним, тому всі роботи з газовими магістралями проводяться з використанням герметичних з'єднань і спеціального обладнання. У разі витoku газу або підвищеного тиску необхідно

терміново провітрити приміщення та евакуювати персонал. Для безпеки в зоні роботи слід встановлювати датчики витоку газу та протипожежні засоби, а електрозварювальні та інші джерела іскріння слід використовувати лише поза приміщенням із газопроводами.

Дотримання санітарно-гігієнічних норм передбачає миття рук після роботи з біомасою, обробку спецодягу та зберігання субстрату і готового біодобрива у герметичних ємностях, щоб уникнути забруднення води і харчових продуктів. Регулярна дезінфекція обладнання та приміщень знижує ризик поширення патогенних мікроорганізмів. У випадку аварійного підвищення тиску або витоку газу необхідно негайно застосовувати аварійне відключення та слідувати плану евакуації персоналу, який має бути заздалегідь відомий усім працівникам. Регулярні навчання з використання протипожежних засобів, газових детекторів і заходів локалізації аварій є обов'язковими для забезпечення безпечного функціонування біогазової установки.

Експлуатація біогазової установки передбачає використання органічних відходів птахівництва та інших субстратів для виробництва біогазу і біодобрив, що має позитивний вплив на навколишнє середовище за умови дотримання правил екологічної безпеки. Біогазова установка дозволяє значно знизити обсяг органічних відходів, які могли б забруднювати ґрунт, поверхневі і підземні води, а також зменшити неприємні запахи на території птахоферми.

Процес анаеробного бродіння органічних відходів у закритому біореакторі зменшує виділення шкідливих газів, таких як аміак, сірководень та метан, у довкілля, оскільки значна частина газоподібних продуктів перетворюється на корисний енергоносій. Використання біогазу для виробництва тепла або електроенергії замінює традиційні джерела енергії, зменшуючи викиди CO<sub>2</sub> та інших шкідливих продуктів згоряння.

Використання готового біодобрива після ферментації субстрату сприяє покращенню структури ґрунту, підвищенню його родючості та зменшенню застосування хімічних добрив, що, у свою чергу, знижує ризик забруднення навколишнього середовища. Застосування герметичних резервуарів для

зберігання субстрату і готового біодобрива запобігає потраплянню відходів у водойми та ґрунт, мінімізуючи негативний екологічний вплив.

Постійний контроль температури, герметичності обладнання та витоку газів дозволяє уникнути аварійних ситуацій, що могли б призвести до забруднення довкілля. Крім того, відпрацьовані технологічні рідини та промивні води підлягають збору і утилізації відповідно до санітарних та екологічних норм, що забезпечує додатковий рівень захисту навколишнього середовища.

Таким чином, впровадження біогазових установок на птахофермах та агропідприємствах є ефективним способом одночасного зменшення обсягів органічних відходів, виробництва альтернативної енергії та мінімізації негативного впливу на навколишнє середовище.

Експлуатація біогазової установки на птахофермах і агропідприємствах дозволяє одночасно вирішувати проблему утилізації органічних відходів та виробництва альтернативної енергії, що має значний позитивний екологічний ефект. Анаеробне бродіння субстратів у герметичних біореакторах зменшує викиди шкідливих газів, таких як аміак, сірководень і метан, у навколишнє середовище, оскільки значна частина газоподібних продуктів перетворюється на біогаз, який використовується як енергоносіє.

Використання біогазу для виробництва тепла та електроенергії дозволяє замінити традиційні джерела енергії, що працюють на викопному паливі, і зменшити викиди вуглекислого газу ( $\text{CO}_2$ ) на 25–30 % у порівнянні з базовими варіантами опалення та електропостачання. За даними експериментальних досліджень, з 1 м<sup>3</sup> біогазу можна виробити до 3 кВт електроенергії, що забезпечує щорічну економію до 13,4 МВт енергії при роботі модернізованої біогазової установки об'ємом 3,5 м<sup>3</sup>.

Готове біодобриво після ферментації субстрату сприяє покращенню структури ґрунту, підвищенню його родючості та зменшенню потреби у мінеральних добривах. Це дозволяє знизити ризик забруднення ґрунту, поверхневих і підземних вод, що позитивно впливає на екологічний стан території ферми. Крім того, герметичне зберігання субстрату і готового добрива

виключає потрапляння органічних відходів у довкілля, запобігаючи появі неприємних запахів та забрудненню навколишнього середовища.

Систематичний контроль температури, герметичності обладнання та витоку газів дозволяє запобігти аварійним ситуаціям, що могли б призвести до забруднення навколишнього середовища. Встановлення датчиків витоку газу та протипожежних систем забезпечує додаткову безпеку та своєчасне реагування на потенційні небезпечні події.

Таким чином, впровадження біогазових установок не лише забезпечує ефективну утилізацію органічних відходів, а й сприяє виробництву енергії, зменшенню викидів шкідливих газів і поліпшенню якості ґрунту. Екологічний ефект від використання таких установок включає щорічне зменшення викидів CO<sub>2</sub>, скорочення обсягів метану, що потрапляє в атмосферу, та підвищення родючості ґрунтів, що створює сприятливі умови для сталого розвитку сільськогосподарського виробництва.

## **Висновки**

1. На виробництві, де здійснюється надходження колод та робота з біогазовими установками, необхідно дотримуватися комплексу заходів з охорони праці та захисту навколишнього середовища. Це передбачає організацію безпечного процесу завантаження і обробки сировини, контроль за станом обладнання, дотримання правил експлуатації біореакторів, а також використання спеціального захисного одягу та засобів індивідуального захисту, що запобігають впливу шкідливих факторів на працівників.
2. У разі необхідності проведення евакуаційних заходів забезпечення безпеки має бути всебічним. Воно включає використання протирадіаційних і протихімічних захисних засобів, надання медичної допомоги, матеріального та технічного забезпечення, організацію транспортного сполучення та охорону громадського порядку для безпечного виведення персоналу з потенційно небезпечної зони.

## 5. ТЕХНІЧНА ТА ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА БГУ

Для оцінки доцільності впровадження біогазової установки (БГУ) було проведено її енергетичний аналіз. На відміну від промислових підприємств, обсяг продукції визначається не масою використаних ефективністю їх впливу на перебіг біологічних процесів та можливістю контролю природних закономірностей, що сприяють накопиченню біомаси. Основна відмінність сільського господарства від промисловості з точки зору енергоспоживання полягає в різномірності джерел енергії: для промисловості використовується переважно однорідна штучна енергія, тоді як у сільському господарстві поєднуються природна та штучна енергія.

Ця різниця та кількісна неоднорідність споживаної енергії визначають специфіку виробництва біогазу в аграрних умовах. Основні виробничі фонди, що є потенційними носіями та споживачами енергії, а також енергетичні потужності установки, відображають лише частину витраченої енергії — її штучний компонент. Природна енергія, що накопичується в біомасі, формує основну частину потенціалу сировини, тоді як штучна енергія виступає допоміжним джерелом, необхідним для підтримання оптимальних умов ферментації. У промисловому виробництві ситуація протилежна: основна енергія є штучною та визначає весь процес виробництва.

Загальним ресурсом, що забезпечує можливість здійснення процесу одержання біогазу та біодобрих, є земля як основа сільськогосподарського виробництва, а координуючим елементом усіх складових виробничого циклу виступають енергетичні витрати. Вони поділяються на прямі та непрямі витрати енергії. До прямих витрат належить насамперед технологічна енергія, необхідна для роботи біореакторів, теплообмінників, змішувачів та іншого обладнання

Біогазова установка вважається економічно доцільною, якщо вартість одержуваного біогазу перевищує додаткові витрати на виготовлення і експлуатацію установки. Іншими словами, ефективність впровадження БГУ забезпечується, коли виконується умова:

$$\frac{B}{E} < \frac{B_1 + \Delta B}{E_1 + \Delta E}$$

де  $B$  - виробництво біогазу на існуючій установці (аналог),  $\text{м}^3$

$B_1$  – виробництво біогазу з теплообмінником-змішувачем (БГУ-ТЗ),  $\text{м}^3$

$\Delta B$  – виробництво додаткового біогазу на БГУ-ТЗ,  $\text{м}^3$

$E$  – енергетичні витрати на виробництво існуючої установки (аналог),  $\text{МДж}/\text{м}^3$

$E_1$  – енергетичні витрати на виробництво БГУ-ТЗ,  $\text{МДж}/\text{м}^3$

$\Delta E$  – додаткові енергетичні витрати на виробництво БГУ-ТЗ,  $\text{МДж}/\text{м}^3$

Енергетичні витрати на виробництво модернізованої біогазової установки розраховуються шляхом переведення металоємності конструктивних елементів у енергетичний еквівалент за допомогою спеціального коефіцієнта перерахунку. Це дозволяє кількісно оцінити витрати енергії на виготовлення всіх металевих частин установки, включаючи каркас, корпус, теплообмінник та змішувач, у вигляді одиниць енергетичного еквіваленту (МДж або кВт·год). Такий підхід дозволяє інтегрувати витрати на матеріали з іншими енергетичними показниками установки та забезпечує комплексну техніко-економічну оцінку ефективності БГУ.

$$E = M_{\text{пит.тепл}} K$$

$M_{\text{пит.тепл}}$  – питома металоємність конструкції БГУ,  $(\text{кг} \cdot \text{год})/\text{м}^3$

$K$  – енергетичний еквівалент БГУ,  $K=104 \text{ МДж}/\text{кг} \cdot \text{год}$ .

Оцінка модернізованої біогазової установки показує, що при коефіцієнті відтворення енергії, що перевищує одиницю, вона є ефективною. У нашому випадку  $K=1,22$ , що свідчить про доцільність та економічну обґрунтованість проектування БГУ для виробництва біогазу. Іншими словами, установка генерує більше енергії, ніж витрачається на її виробництво та підтримку, що підтверджує ефективність модернізованого проекту.

Ступінь інтенсифікації процесу оцінюють за показником продуктивності

$$A = \frac{(B_1 + \Delta B) / (E_1 + \Delta E)}{B / E} = \frac{E}{E_1}$$

При  $A > 1$  процес ефективний.

На основі експериментальних досліджень проведено порівняльну оцінку модернізованої БГУ-ТЗ та її аналога без інтегрованого змішувача.

Масу металу, використаного на одиницю об'єму або продуктивності установки:

$$M_{\text{мет.метл}} = M / B$$

$$M_{\text{мет.метл}}^1 = 1400 / 14,2 = 98,59 \text{ кг} \cdot \text{год} / \text{м}^3$$

$$M_{\text{мет.метл}}^2 = 1300 / 12 = 108,3 \text{ кг} \cdot \text{год} / \text{м}^3$$

Індекс 1;2 – модернізована і аналог БГУ відповідно.

$$E_1 = 98,59 \cdot 104 = 10253,36 \text{ МДж} / \text{м}^3$$

$$E_2 = 108,3 \cdot 104 = 11263,2 \text{ МДж} / \text{м}^3$$

$$\Delta E = E_2 - E_1 = 1009,84 \text{ МДж} / \text{м}^3$$

$$\Delta B = B_2 - B_1 = 2,2 \text{ м}^3 / \text{доб}$$

Інтенсивність процесу оцінюється на рівні  $A=1,1$ , що підтверджує енергетичну ефективність впровадження модернізованої установки.

Таблиця 5.1 – Результати розрахунків

Показник	Значення сучасної установки	Традиційна установка	Порівняння
Загальний об'єм виробленого біогазу	80	65	+23% до традиційної установки
Обсяг біогазу для підвищення теплопродуктивності	3,1	4,0	Менше на 22,5%, економія додаткового газу

Енергетична цінність отриманого газу	1555,2	1450	+7,3% завдяки оптимізації процесу
Середньодобове споживання електроенергії	3	3,5	Економія електроенергії на 14%
Відносна частка середньодобового споживання енергії від виробленого газу	41,6	35	Коефіцієнт використання газу вищий на 6,6%
Кратність використання виробленого газу для покриття середньодобового споживання енергії	2,4	1,8	На 33% більше ефективності використання
Річний обсяг виробленої теплової енергії	13,4	10,5	+27,6% річного виробництва
Тривалість експлуатації палива	205	210	Менше на 5 днів завдяки ефективнішому процесу
Обсяг капітальних інвестицій	148020	140000	+5,7%, але з вищим економічним ефектом
Економія природного газу	21176	17500	+21% економії природного газу
Вартість 1000 м <sup>3</sup> природного газу	7990	7990	Без змін
Вартість заощадженого природного газу	119808	139825	+14% додаткової економії
Термін окупності капіталовкладень	9,6	12	На 2,4 міс швидше окупається

## Висновки

1. Результати енергетичного аналізу дають змогу ідентифікувати фактори, що сприяють зростанню продуктивності.

2. Економічна оцінка ефективності функціонування біогазової установки є ключовим етапом для обґрунтування доцільності впровадження оптимізаційних заходів у роботі модернізованої БГУ, обладнаної системою перемішування під час процесу зброджування пташиного посліду, а також для мінімізації енергетичних і матеріальних витрат, пов'язаних із виробництвом біогазу.

3. Розрахований термін окупності капіталовкладень у модернізовану БГУ складає 9,6 місяців, що свідчить про високу економічну ефективність установки.

4. Проведені розрахунки підтверджують технічну та економічну доцільність застосування модернізованої біогазової установки на сільськогосподарському підприємстві.

## ВИСНОВКИ

1. Проаналізовано сучасні технології переробки та утилізації пташиного посліду, зокрема показано роль мікроорганізмів у контролі забруднення довкілля та забезпеченні безпечного процесу переробки.

2. Досліджено фізико-хімічні властивості біогазу та біодобрив, що підтверджує їх доцільність для використання як джерела енергії та органічного добрива у сільському господарстві.

3. Обґрунтовано мікробіологічні процеси, що відбуваються в біогазових установках, зокрема встановлено, що активність метаногенних бактерій залежить від температури. Для підтримання оптимального температурного режиму витрачається 20–50 % виробленого біогазу.

4. Розроблено технологічну схему та параметри модернізованої біогазової установки, де змішувальний пристрій одночасно виконує функцію нагрівального елемента, що підвищує ефективність процесу.

5. Отримано аналітичні формули для розрахунку термічного опору теплопередачі залежно від геометричних параметрів біореактора, що дозволяє оптимізувати конструкцію теплообмінника.

6. Експериментальні дослідження показали, що максимальний вихід біогазу складає 15,5 м<sup>3</sup>, із яких до 20 % (3,1 м<sup>3</sup>) витрачається на підтримку термофільного режиму біомаси.

7. Максимальний вихід біодобрива становить 0,26 м<sup>3</sup>/добу при оптимальних режимах: температура ферментації 54,4 °С, час перебування маси 17,2 хв, частота обертання змішувального пристрою 7,6 об/хв.

8. Економічна оцінка підтвердила доцільність оптимізації функціонування модернізованої БГУ з інтегрованою системою перемішування, що сприяє зменшенню енергетичних і матеріальних витрат, при цьому розрахунковий термін окупності капіталовкладень становить 9,6 місяців.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Редько А. О., Безродний М. К., Загорученко М. В. та ін. Низькопотенційна енергетика : навч. посіб. / під ред. акад. НАНУ А. А. Долинського. – Харків : Друкарня Мадрид, 2016. – 412 с.
2. 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.
3. Ратушняк Г. С., Анохіна К. В. Моделювання теплового режиму на початковій фазі бродіння в біогазовій установці з пропелерною мішалкою // Вісник ХНУ. – 2010. – № 4. – С. 19–22.
4. Скляр О. Г., Скляр Р. В. Аналіз існуючих багат шарових захисних конструкцій біогазових установок // Науковий вісник ТДАТУ. – Мелітополь, 2014. – Вип. 4. Т. 1. – С. 88–94. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://nauka.tsatu.edu.ua/e-journals-tdatu/pdf4t1/14.pdf>
5. Желих В. М., Дзерин О. І., Сподинюк Н. А. Енергоефективні системи теплозабезпечення виробничих приміщень // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. – 2012. – № 2. – С. 152–157.
6. Ратушняк Г. С., Анохіна К. В. Пат. 49746 Україна, МПК С 02 F 11/04. Біогазова установка. – № u200911674 ; заявл. 16.11.2009 ; опубл. 11.05.2010, Бюл. № 9.
7. Желих В. М., Фурдас Ю. В., Шепітчак В. Б. Теплозабезпечення побутового біореактора шляхом використання сонячної енергії // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. – 2013. – № 1. – С. 142–149.
8. Ратушняк Г. С., Ратушняк О. Г., Анохіна К. В. Управління технологічним процесом біоконверсії при перемішуванні субстрату // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. – 2010. – № 2. – С. 117–122.
9. Аксютов І. О., Бабкін Я. В. Пат. 27445 Україна, МПК С 02F 11/04. Установка для одержання біогазу і біодобрива з органічних відходів. – № u200708488 ; заявл. 24.07.2007 ; опубл. 25.10.2007.

10. Веденев А. Г., Веденева А. Т. Руководство по биогазовым технологиям. – Бишкек : ДЭМИ, 2011. – 84 с.
11. Ратушняк Г. С., Анохіна К. В. Енергоефективні технологічні процеси та обладнання біоконверсії : монографія. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 148 с.
12. Скляр О. Г., Скляр Р. В. Аналіз способів та засобів для перемішування субстрату в метантенках біогазових установок // Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. – Kyiv, Ukraine, 2019. – Vol. 10, No 4. – P. 19–26.
13. Кучерук П. П., Матвеев Ю. Б. Технологіх утилізації та переробки відходів птахівництва // Ефективне птахівництво. – 2007. – № 6. – С. 45–46.
14. Топілін Г. Е., Умінський С. М., Інютін С. В. Принцип одержання біогазу і добрив з органічних відходів з агровиробництва // Аграрний вісник Причорномор'я. – 2009. – № 49. – Режим доступу: [http://www.nbu.gov.ua/portal/chem\\_biol/avpch/Tn/2009\\_48/Topilin\\_Uminsky\\_I\\_njutin.pdf](http://www.nbu.gov.ua/portal/chem_biol/avpch/Tn/2009_48/Topilin_Uminsky_I_njutin.pdf)
15. Друкований М. Ф., Яремчик О. С., Бранський В. В. Вибір технологічного комплексу переробки біомаси в біогаз та органічні біологічні добрива // Збірник наукових праць ВНАУ. – 2011. – № 8. – С. 48–53.
16. Клименко В. Сільськогосподарські біогазові установки: закордонний досвід // Техніка АПК. – 2006. – № 6–7. – С. 20–24.
17. Косенко Д. П., Пінчук В. І. Використання біогазу для виробництва тепла й електроенергії методом когенерації // Зелена енергетика. – 2003. – № 2. – С. 1–11.
18. Крючков Є. М., Куріс Ю. В., Нестеренко А. В. та ін. Аналіз процесів біоконверсії та експериментальне визначення технологічних можливостей спалювання біогазу // Енергетика та електрифікація. – 2007. – № 1. – С. 57–62.
19. Лісничий В. М., Четверик Г. А. Гідродинамічний та тепловий режим біореактора біогазової установки // Альтернативна енергетика і екологія. – 2012. – № 8. – С. 56–59.
20. Гунько І. В., Спірін А. В., Холодюк О. В. Надійність систем та обґрунтування інженерних рішень. – Вінниця : ВДАУ, 2006. – 76 с.

21. Adani F., Tanbone F., Gotti A. Biostabilization of solidus // Waste Management. – 2004. – V. 24. – P. 775–783.
22. Скляр О. Г., Скляр Р. В., Григоренко С. М. Програма та методика експериментальних досліджень на лабораторній біогазовій установці // Вісник Харківського національного університету с. г. ім. П. Василенка. – Харків, 2019. – Вип. 199. – С. 267–275.
23. ДСТУ 7588:2014. Сільськогосподарська техніка. Установки біогазові. Методи випробування.
24. ДСТУ 4516:2006. Енергоощадність. Поновлювані джерела енергії. Установки біогазові. Загальні технічні вимоги.
25. Наказ МВС України від 05.11.2018 № 879 «Про затвердження Правил техногенної безпеки».