

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерії та енергетики
Кафедра агроінженерії та технічного сервісу

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

ОВСІЙЧУК ОЛЕКСАНДР ЛЕОНІДОВИЧ

УДК 662.63

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ ТЕПЛОМАСООБМІНУ В БІОГАЗОВІЙ УСТАНОВЦІ

(тема роботи)

208 «Агроінженерія»

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр
кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень.
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на
відповідне джерело _____

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи
Сукманюк Олена Миколаївна

(прізвище, ім'я, по батькові)

к.і.н., доцент

(науковий ступінь, вчене звання)

АНОТАЦІЯ

Овсійчук О.Л. Підвищення ефективності процесу тепломасообміну в біогазовій установці. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 208 – Агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2024.

В даній кваліфікаційній роботі проведені дослідження ефективності установок для отримання біогазу. Проаналізовані типи біогазових установок та наведені біохімічні процеси розкладання біомаси при утворенні біогазу, а також способи інтенсифікації теплообміну в метантенку.

Обґрунтовано процес теплообміну в метантенку між зовнішніми поверхнями та навколишнім середовищем та описано тепловіддачу від біогазу і маси, що зброджується до внутрішніх поверхонь метантенка.

Описано будову та принцип дії запропонованої установки та наведено економічну ефективність розробленого метантенку.

Ключові слова: біогаз, установка, процес, ефективність, тепломасообмін.

ABSTRACT

Ovsiychuk O. Increasing the efficiency of the heat and mass transfer process in a biogas plant. Qualification for the advanced master's degree in specialty 208 – Agricultural Engineering. – Polissia National University, Zhytomyr, 2024.

This qualification work has conducted studies of the efficiency of biogas plants. Types of biogas plants have been analyzed and biochemical processes of biomass decomposition during biogas formation, as well as methods of intensifying heat exchange in the methane tank, have been presented.

The process of heat exchange in the methane tank between the external surfaces and the environment has been substantiated and the heat transfer from biogas and the mass being fermented to the internal surfaces of the methane tank has been described.

The structure and principle of operation of the proposed plant have been described and the economic efficiency of the developed methane tank has been presented.

Key words: biogas, plant, process, efficiency, heat and mass exchange.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ УСТАНОВОК ДЛЯ ОТРИМАННЯ БІОГАЗУ	7
1.1. Проблема негативного впливу відходів тваринництва на довкілля	7
1.2. Типи біогазових установок	
1.3. Біохімічні процеси розкладання біомаси при утворені біогазу	15
1.4. Способи інтенсифікації теплообміну в біореакторі	
1.5. Висновки по розділу 1	21
РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОСНОВНИХ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛОМАСООБМІНУ	23
2.1. Процес теплообміну в біореакторі	23
2.2. Тепловіддача від біогазу і маси, що зброджується до внутрішніх поверхонь біореактора	27
2.3. Теплообмін між зовнішніми поверхнями біореактора та навколишнім середовищем	28
2.3. Висновки по розділу 2	29
РОЗДІЛ 3. УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ БІОГАЗОВОЇ УСТАНОВКИ	30
3.1. Опис запропонованої установки	30
3.2. Економічна ефективність розробленого біореактора	32
3.3. Висновки по розділу 3	38
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	39
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	40

ВСТУП

В останні роки увагу суспільства все більше привертає питання запобігання виснаженню природних ресурсів та охорони навколишнього середовища від антропогенного забруднення. Швидке витрачання запасів природного палива, обмежене будівництво гідро- та атомних електростанцій викликали інтерес до застосування поновлюваних джерел енергії, у тому числі величезних мас органічних відходів, що утворюються в промисловості, сільському, міському та комунальному господарстві. У зв'язку з цим використання методів біологічної конверсії органічних відходів з отриманням біогазу та високоякісних органічних добрив при одночасному вирішенні низки питань охорони навколишнього середовища від забруднення є досить перспективним.

Розвиток ресурсозберігаючих технологій є одним із шляхів економічного розвитку суспільства. Раціональне вживання відходів від сільського господарства – глобальна та важлива проблема у нашому світі. З одного боку вона пов'язана, з можливістю утилізації енергії біомаси та отриманням з неї рідкого та газоподібного палива (біогазу), з іншого боку сприяє запобіганню забруднення водойм та ґрунтового покриву землі патогенними мікроорганізмами та гельмінтами, які перебувають у гнійних стоках тваринницьких ферм.

Щороку на фермах накопичуються тонни гною. У багатьох господарств відсутні установки для очищення стічних вод – усе це згубно впливає на стан навколишнього середовища. Для того, щоб запобігти нітратному та мікробному забрудненню ґрунтів, повітря, навколишньої рослинності, поверхневих та ґрунтових вод, потрібно дотримуватись технологій переробки та складування тваринницьких відходів. Гній містить багато хвороботворних бактерій. При накопиченні відходів без переробки – вони можуть бути джерелами негативного впливу на людину і тварин і призводити до різних захворювань.

Великі збитки навколишньому середовищу можливі від великих тваринницьких виробництв. Щоб слідувати сучасним тенденціям дані виробництва мають модернізувати. Деякі підприємства будують біогазові установки для отримання біогазу та біодобрив. Отримання біогазу з тваринницьких відходів запобігає викидам метану в навколишнє середовище.

Загалом ферментація органічних відходів може задовольнити чималу частину енергетичних потреб населення та сприяти ресурсозбереженню. Біоенергетичні установки дозволяють заощаджувати ресурси та знімають частину енергетичного дефіциту в сільськогосподарських районах, у сфері

дрібної промислової діяльності, у побуті, і можуть стати істотним елементом у системі регіональної енергетичної та екологічної стратегії.

Актуальність теми Розробка питань застосування та ефективного використання альтернативних та відновлюваних джерел енергії є актуальною. У зв'язку з цим актуальною є і переробка органічних відходів на біогаз. Традиційна конструкція біогазового реактора представляє собою цільну ємність, в якій процес зброджування відбувається в єдиному режимі, при дотриманні певних температурно-вологісних режимів в залежності від типу бродіння

Однією з основних параметрів роботи біогазового реактора є температура зброджування. Необхідність підтримки регламенту температурного режиму в реакторі накладає певні вимоги щодо вибору матеріалу теплоізоляції для корпусу біогазового реактора.

Мета роботи: підвищення ефективності роботи біогазової установки шляхом підтримання необхідного температурного режиму.

Об'єктами дослідження є: біогазова установка для отримання біогазу шляхом анаеробного зброджування відходів тваринництва.

Предмет дослідження: інтенсивність процесу тепломасообміну в біогазовій установці.

Методологія і методи дослідження. У процесі виконання роботи був застосований системний підхід до вивчення тепломасообмінних процесів у біогазовій установці.

З урахуванням сформульованої мети необхідно вирішити такі завдання дослідження:

- провести аналіз існуючих технологій та установок переробки відходів тваринництва та способів отримання з них біогазу;
- розробити математичну модель процесу тепломасообміну в біогазовій установці для переробки відходів тваринництва;
- розрахувати еколого-економічну ефективність розроблюваної біогазової установки.

Публікації:

Овсійчук О. Л. Способи інтенсифікації теплообміну в метантенку. Наукові читання–2024: матеріали науково-практичної конференції науковопедагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики. 20 травня 2024 р. Житомир: Поліський національний університет, 2024. С. 125-127.

Сукманюк О. М., Овсійчук О. Л. Види та ефективність використання біогазових установок. Студентські читання–2024: матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів,

аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики. 31 жовтня 2024 р. Житомир: Поліський національний університет, 2024 С. 142-145.

Сукманюк О. М., Овсійчук О. Л. Процес теплообміну в метантенку. Матеріали VIII міжнародної науковопрактичної конференції «Біоенергетичні системи». 12-14 листопада 2024 р. Житомир: Поліський національний університет, 2024. С. 44-48.

Обсяг та структура роботи. Робота складається із вступу, трьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел. Робота викладена на 41 сторінках машинописного тексту, містить 3 таблиці, 18 рисунків, списку використаних джерел з 17 найменувань.

РОЗДІЛ 1. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ УСТАНОВОК ДЛЯ ОТРИМАННЯ БІОГАЗУ

1.1. Проблема негативного впливу відходів тваринництва на довкілля

В даний час гостро стоїть питання утилізації відходів, що накопичуються на тваринницьких підприємствах. Основними джерелами забруднення навколишнього середовища (повітря, ґрунт, вода) від тваринницьких комплексів та ферм є забруднене випаровування та рідкі стоки.

Повітряні випари тваринницьких ферм надають суттєвий вплив як на атмосферу так і на поверхневі води.

На тваринницьких комплексах, особливо свинарських, основним джерелом забруднення навколишньої атмосфери є приміщення для утримання тварин.

Запах від тварин діє на людей подразливо. Неприємні запахи поширюються в радіусі 5-17 км.

Як правило, екологічний моніторинг стану атмосферного повітря в зонах розміщення тваринницьких об'єктів не проводиться, тим не менше, вплив на навколишнє природне середовище токсичних газів від тваринницьких комплексів можна оцінити за допомогою біологічних об'єктів зокрема рослин, які ростуть поблизу них [5].

Таблиця 1.1 – Стан атмосферного повітря у зонах впливу тваринницьких об'єктів (зміст NH_3 у повітрі)

Показники	Свинокомплекс на 8 тис. гол.
Вміст NH_3 в повітрі: на відстані 2,5 км від комплексу	0,34 мг/м ³
На відстані 3,5 км від комплексу	0,21 мг/м ³
На відстані 5,0 км від комплексу	0,16 мг/м ³

Отже, негативний вплив сільськогосподарських об'єктів тваринництва на довкілля відбувається не тільки на ґрунти, води (поверхневі вододжерела у зонах забруднення сільськогосподарськими відходами), але й атмосферне повітря. Необхідно розвивати технології знешкодження відходів тваринництва та їх переробки з отриманням корисної енергії та нових продуктів.

1.2. Типи біогазових установок

Поширені у світі типи біогазових установок класифікуються за розмірами та розташуванням реактора, методу завантаження сировини, методам збору біогазу, що використовуються для них спорудження матеріалів, використання додаткових пристроїв.

Залежно від їх відносного розміру, функції та розташування, сільськогосподарські біогазові установки класифікуються як:

- сімейні установки (з обсягами реакторів до 15 м³);
- фермерські установки (з обсягами реакторів до 250 м³);
- промислові установки (з об'ємами реакторів від 250 м³).

Сімейні біогазові установки. У таких країнах як Непал, Індія та Китай працюють мільйони маленьких сімейних установок, які використовують дуже прості технології переробки сировини. У якості сировини в таких установках використовуються відходи присадибного господарства і будинки, що виробляється біогаз – для приготування їжі та освітлення будинку, а біодобрива – для городу.

Такі установки дешеві і можуть бути побудовані з місцевих матеріалів, але не оснащені контрольними приладами і тому можуть використовуватися в теплому кліматі при відповідних зовнішніх температурах.

Установки китайського типу (рис. 1.1) складаються з підземного реактора об'ємом 6-8 м³ і переробляють гній, фекалії та кухонні відходи господарства. Використовується метод напів-безперервного або порційного завантаження, сировина в реакторі не переміщується, і 2-3 рази на рік реактор чистять від твердих частинок, що осідають на дно.

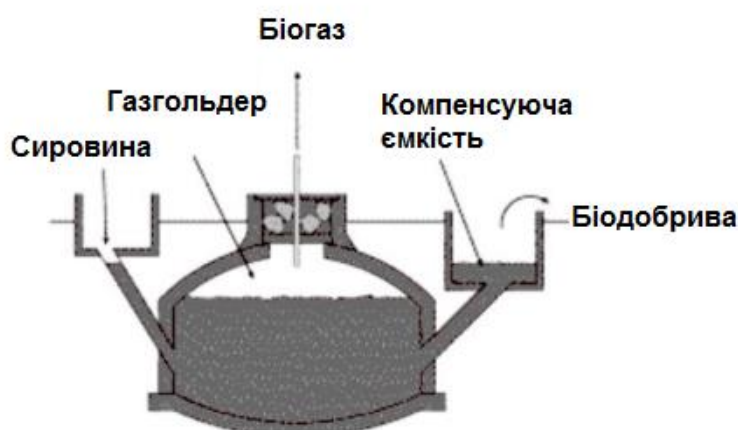


Рисунок 1.1 – Китайський тип установки з фіксованим куполом

Індійські установки (рис. 1.2) дуже схожі з китайськими і складаються з простого підземного реактора для домашніх відходів або відходів невеликого селянського господарства.

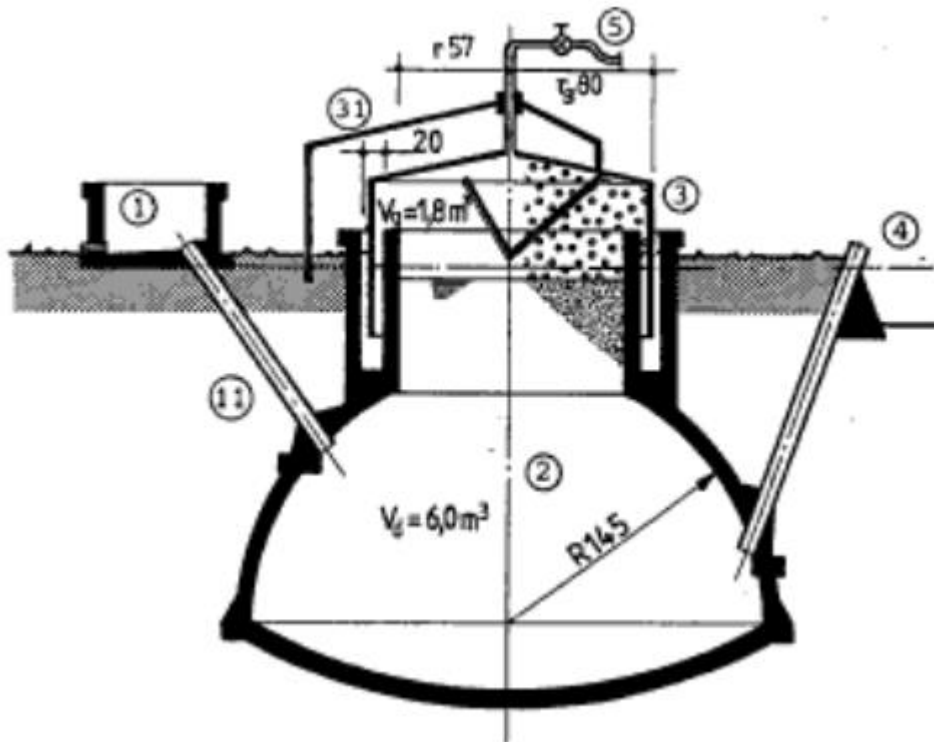


Рис.1.2 – Індійський стандарт на спорудження установки з плаваючим куполом

Відмінність від китайського типу установки полягає в тому, що реактор оснащений плаваючим куполом для збору біогазу, який дозволяє регулювати його тиск.

Фермерські біогазові установки

Фермерські установки переробляють гній, який виробляється на фермі, а також дуже часто додатково переробляють невеликі кількості інших відходів - частіше рослинних, для збільшення виходу біогазу. Часто такі установки збирають гній із 2-3 ферм, розташованих недалеко від ферми, де збудовано установку.

Можна виділити наступні 4 стадії процесу експлуатації фермерської когенераційної установки (рис. 1.3):

- перша стадія процесу (зберігання, підготовка, транспортування та завантаження сировини) здійснюється за допомогою гноєприймачів 2, баки для зберігання 3, санаційний бак 4, в'їзні приймачі 5 система завантаження сухої сировини 6;
- друга стадія полягає у виробництві біогазу в реакторі 7;

- третя стадія представлена сховищем для переробленої сировини 10 та використання біодобрив на полях 11;

- четверта стадія процесу відноситься до збору, очищення та використання біогазу та представлена газгольдером 8 та когенераційною установкою 9.

Усі чотири стадії тісно пов'язані між собою, наприклад, тепло, що утворюється на стадії 4 використовується на стадії 2 для підігріву реактора.

Фермерські установки бувають різного розміру, дизайну та використовують різні види технологічних процесів. Деякі з них маленькі та прості, а інші – дуже схожі на великі установки централізованої переробки.

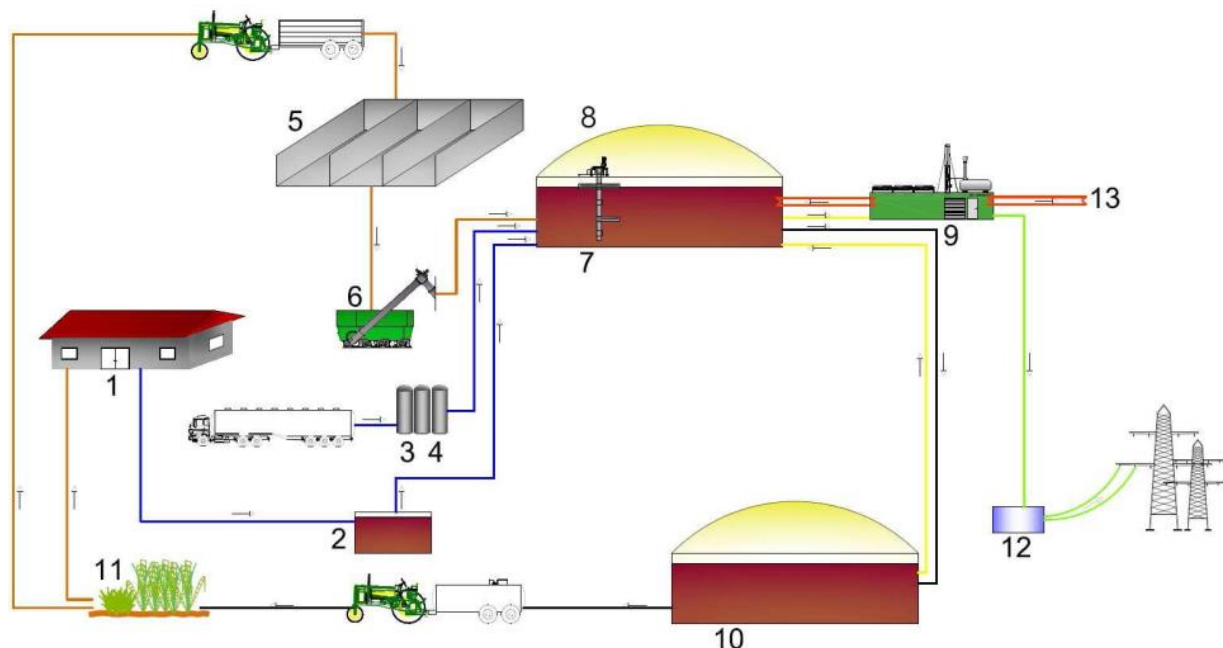


Рисунок 1.3 - Фермерська когенераційна установка: 1 – стійла, 2 – приймальники рідкого гною, 3 - ємності для збору біовідходів для спільної переробки, 4 – санаційний бак, 5 – в'їзні приймачі відходів, 6 – система завантаження сухої сировини, 7 – реактор, 8 – газгольдер, 9 – когенераційна установка, 10 – сховище біодобрив, 11- поля, 12 – трансформатор для подачі електрики у мережу, 13 – використання тепла.

Установка (рис. 1.4) для компостування містить пристрій вивантаження, джерело подачі повітря та повітропровід, відрізняється тим, що пристрій вивантаження виконано у вигляді паралельно розташованих і обертаються назустріч один одному валів. Установка відрізняється тим, що містить як мінімум один пристрій зниження ущільнення компостованої маси у вигляді валів з тросами та ріжучими елементами. Переваги даної установки є наявність біофільтра у верхній частині установки, повністю виключає забруднення атмосфери шкідливими газами та хвороботворними

мікроорганізмами. Недоліки – великі енерговитрати на роботу приводів, валів та датчик.

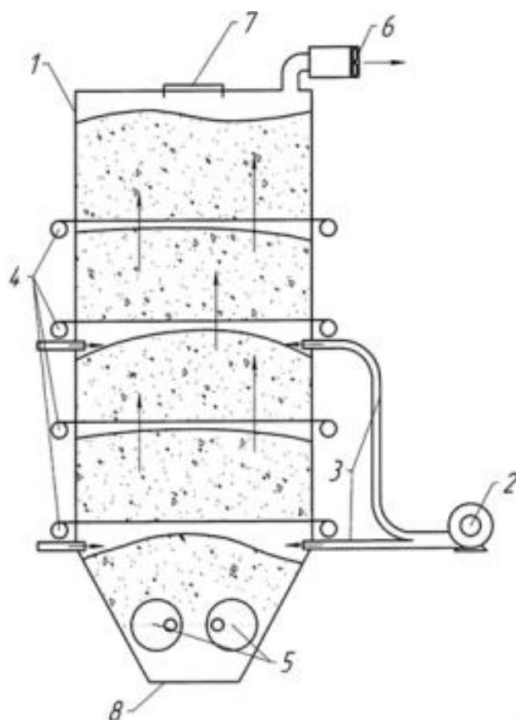


Рисунок 1.4 – Установка для компостування тваринницьких відходів

Біоенергетична установка (рис. 1.5.) для компостування органічних відходів, що містить біореактор для розкладання твердої фракції з теплоізолюваним корпусом, усередині якого змонтовано повітропроникні решітки, система подачі та нагрівання повітря, а також механізми приводу подачі вихідної маси та вивантаження готового продукту, також вона забезпечена анаеробним реактором метанового зброджування рідкої фракції, що складається з двох порожнистих герметичних циліндричних ємностей-роторів з крилами-лопатками, встановленими рухомо щодо нерухомих валів, що представляють собою порожнисті циліндри, розділені на осі поздовжньою перегородкою, з утворенням двох порожнин з відвідними патрубками, одна з яких призначена для рідкої фракції, а інша – для газоподібної, при цьому повітропроникна решітка виконана розсувною, поєднана з системою повітророзподілу та ділить корпус реактора на дві частини, у верхній частині під вікном завантаження встановлено пристрій, що розрівнює, а в нижній частині встановлено анаеробний реактор.

До переваг даної біоенергетичної установки можна віднести: скорочення часу аеробного процесу компостування, а також вона універсальна для переробки будь-яких видів відходів. До недоліків: складність конструктивної будови пристрою та енергозатрати на роботу.

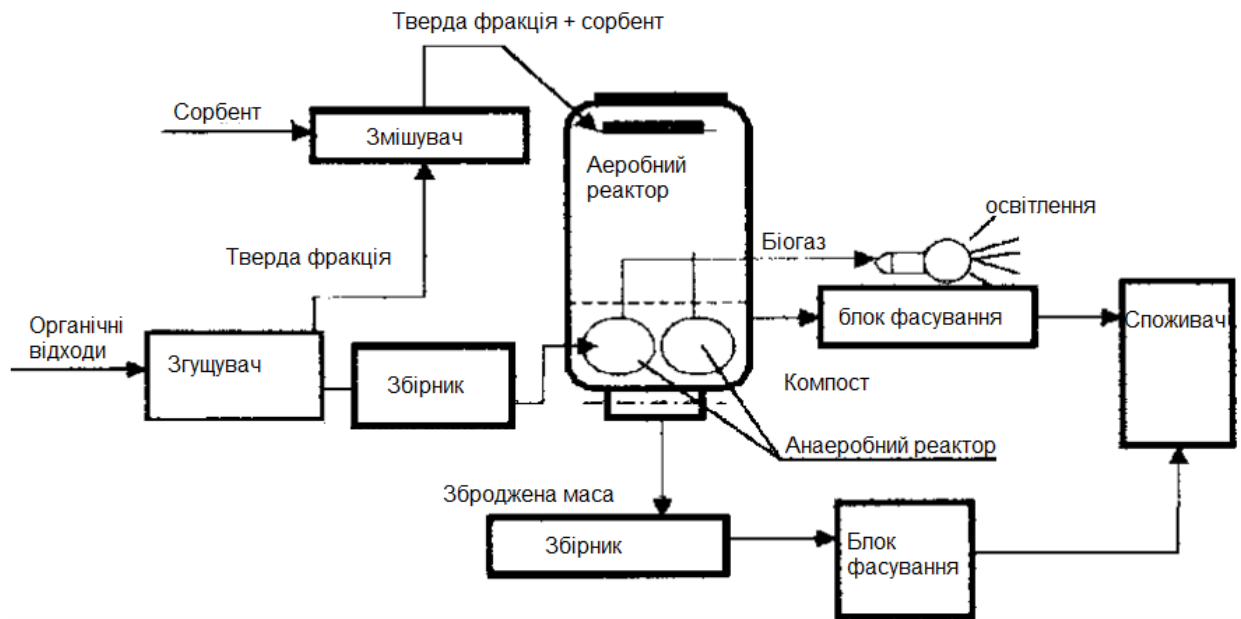


Рисунок 1.5 – Біоенергетична установка

Необхідність енергозбереження та зниження забруднення навколишнього середовища змушує раціональніше використовувати традиційні енергоресурси, а також шукати інші, відновлювані та недорогі джерела енергії.

Ефективне перемішування відіграє важливу роль в процесі збродження. За рахунок ефективного перемішування створюються сприятливі умови для розвитку метаноутворюючих мікроорганізмів, зокрема, рівномірно розподіляються поживні речовини по всьому об'єму апарату, відбувається відведення тепла, що утворюється в результаті зростання та розвитку мікроорганізмів, і навіть видаляється токсичний вуглекислий газ та інші продукти обміну [1].

Для перемішування субстрату в біогазових установках в даний час використовуються переважно механічні пристрої, що перемішують, основні представлені на рис. 1.6.

Застосування механічних пристроїв для перемішування висувають високі вимоги до форми реактора, які повинні забезпечувати необхідні умови для зменшення утворення осаду та плаваючої кірки, швидкість перемішування та потрібну турбулентність у всіх зонах реактора для інтенсивного перемішування субстрату [2].

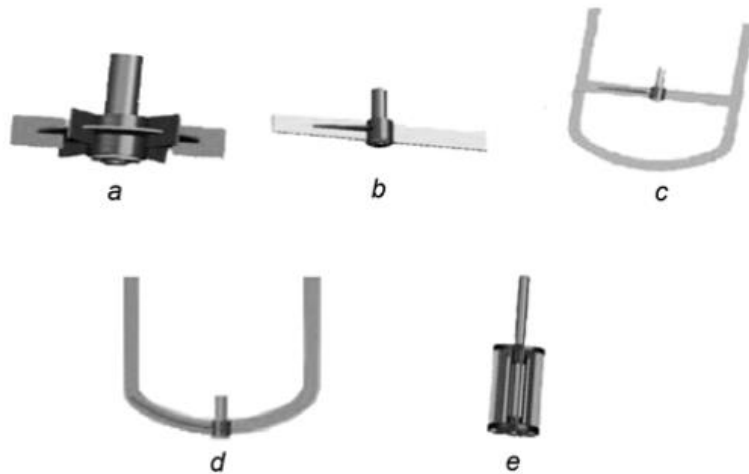


Рисунок 1.6. Механічні пристрої для перемішування: а – турбінний; б - лопатевий; с – рамний; d - якорний; е – спеціальний

Наявність ефективного джерела тепла для підтримки температури процесу зброджування є необхідною умовою для продуктивної роботи всієї біогазової установки.

Зазвичай в біогазових установках використовуються системи водяного підігріву. Існує безліч різних теплообмінних апаратів для подібних систем підігріву, основні наведені на рис. 1.7.

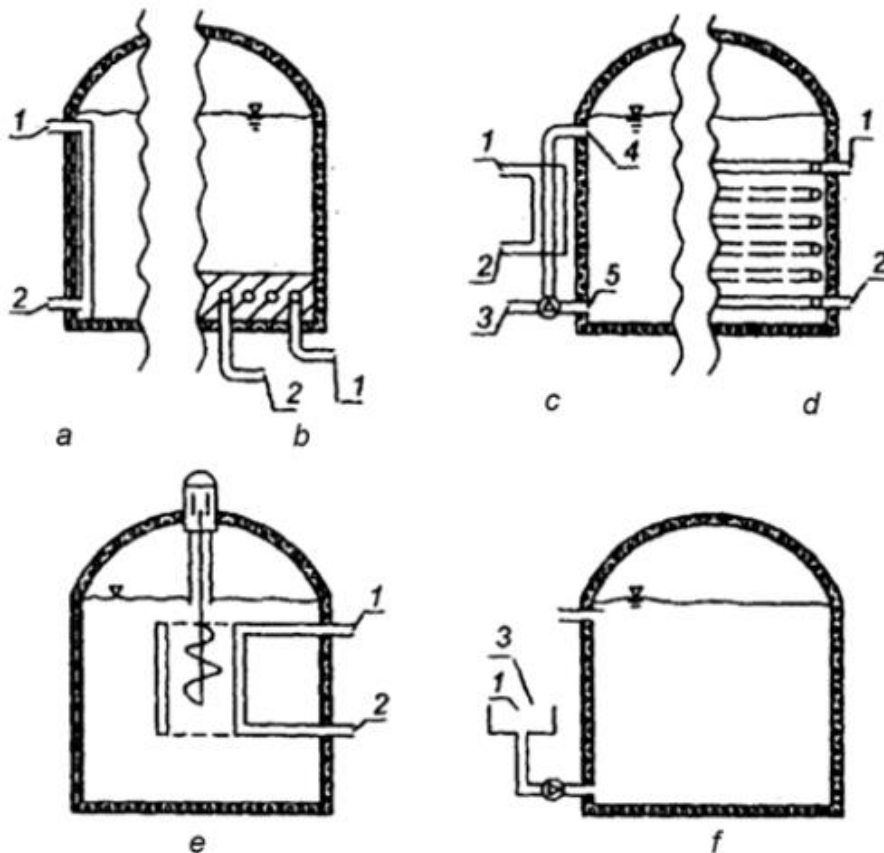


Рисунок 1.7. Теплообмінні апарати для систем водяного опалення: а – трубчастий теплообмінник з реєстром із вертикальних труб; б – змійовик, вбудований у днище; с – зовнішній теплообмінник типу труба в трубі; d, е –

теплообмінник у вигляді спіралі, розташованої по периферії резервуара та у центральній частині; f – пристрій обігріву парою

Для функціонування таких систем опалення необхідно створити додаткові системи циркуляції та обігріву проміжного теплоносія, що встановлюються в їх конструкції та пов'язані з додатковими витратами під час створення біогазових установок.

Як джерела тепла в системах опалення біогазових установок переважно використовуються:

- газові котли, що споживають до 10% біогазу;
- електричні котли, які є дорогими в експлуатації через високу ціну електроенергії;
- інші джерела тепла (вторинні енергоресурси та місцеві джерела енергії), ефективність використання яких залежить від доступності джерела у цьому районі.

Основними тенденціями розвитку біогазових технологій в даний час є:

- підвищення енергоефективності;
- зниження собівартості вироблення біогазу;
- підвищення ефективності процесів зброджування;
- розробка та впровадження нових способів зброджування.

Розглянемо з погляду вищезазначених тенденцій пристроїв, що застосовуються в існуючих біогазових установках.

1.3. Біохімічні процеси розкладання біомаси при утворенні біогазу

Основним вузлом біогазової установки є метантенк, у якому відбувається анаеробне зброджування біомаси, знезараження її та утворення біогазу.

Розкладання органічної речовини в метантенку є складним анаеробним процесом. У процесі зброджування складні органічні речовини розкладаються на більш прості. В результаті зброджування утворюється біогаз та органічна маса. Зброджена біомаса є якісним органічним добривом.

Анаеробна переробка вважається перспективним методом і представляє великий практичний інтерес з переробки органічних відходів тваринництва, оскільки прискорює його розкладання у 10 разів та більше в порівнянні з традиційним перепріванням в буртах. В результаті процесу зброджування розпаду піддаються органічні речовини, що містяться в гною, з утворенням газоподібних продуктів у вигляді суміші 50 ÷ 70 % метану та 30 ÷ 50 % вуглекислого газу (біогазу) з теплотворною здатністю 21 - 25 МДж /м.

При цьому вони частково або повністю знезаражується, дегельмінтизується та дезодорується.

Для забезпечення процесу необхідно підтримувати температурний режим, витрати на який можна заповнити шляхом утилізації біогазу, що виділився [3].

Метанове зброджування призводить до мінералізації біогенних речовин (азот, фосфор, калій), і практично до повної утилізації без попадання в довкілля. Отримувана енергія у вигляді біогазу зручна для користувача, так як її можна перетворити на теплову, електричну та механічну. Зброджений шлам, отриманий у процесі переробки, позбавлений неприємного запаху і готовий до безпосереднього внесення у ґрунт.

Технологію анаеробної переробки гною застосовують і для очищення стічних вод підприємств і міст, так як вона має ряд переваг у порівнянні з поширеним хімічним способом, наприклад, біологічне очищення споживає у 2 рази менше енергії та у 6 разів дешевше [8].

Анаеробна переробка відходів тваринництва дає можливість знизити витрати електроенергії на проведення даного процесу. Процес анаеробної обробки гною включає чотири взаємопов'язані стадії, що здійснюються різними групами бактерій [5]:

1. Стадія ферментативного гідролізу здійснюється швидкозростаючими факультативними анаеробами, що виділяють екзоферменти, за участю яких здійснюється гідроліз нерозчинених складних органічних сполук з утворенням більш простіших розчинених речовин. Оптимальне значення рН для розвитку даної групи бактерій знаходиться в інтервалі 6,5-7,5.

2. Стадія кислотоутворення (кислотогенна) супроводжується виділенням летких жирних кислот, амінокислот, спиртів, а також водню та вуглекислого газу. Стадія здійснюється швидкозростаючими, дуже стійкими до несприятливих умов середовища гетерогенними бактеріями.

3. Ацетатогенна стадія перетворення летких жирних кислот, амінокислот та спиртів в оцтову кислоту здійснюється двома групами ацетатогенних бактерій. Перша група, що утворює ацетати з виділенням водню з продуктів попередніх стадій, називається ацетатогенами, які утворюють водень.

4. Метаногенна стадія, що здійснюється повільно зростаючими бактеріями, які є дуже чутливими до змін умов середовища, особливо до зниження рН менше 7,0 - 7,5 та температури.

Схема зображення біохімічних реакцій показана на рис. 1.8.

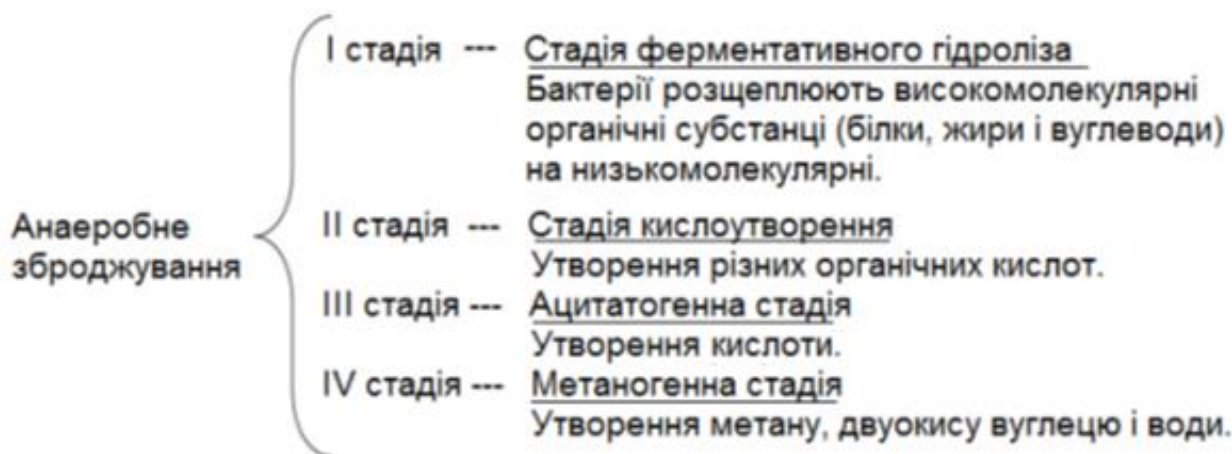


Рисунок 1.8. Біохімічні реакції процесу розкладання біомаси

Дані реакції протікають одночасно, причому метаноутворюючі бактерії пред'являють вищі вимоги до умов свого існування, ніж кислотоутворюючі. Вони потребують анаеробних умов і вимагають більше значного періоду часу їхнього відтворення. Швидкість і масштаби розвитку та життєдіяльності метаноутворюючих бактерій залежать від їх метаноболічної активності.

У переробці беруть участь 5 груп бактерій. В основному належать ферментативні бактерії - Bacillus, Micrococcus, Pseudomonas, Clostridium, вони виконують етапи ферментативного гідролізу та кислотоутворення. Всі бактерії мають швидке зростання.

Мікроорганізми виділяють екзоферменти, які здійснюють гідроліз, розкладання складних з'єднань на прості. Розмноження бактерій відбувається за наявності живильного середовища, в яке входять вуглець і кисень [4].

Результати досліджень ряду вчених показують, що для успішного процесу метаногенезу важлива стабільна температура зброджування, а зміна температури впливає не тільки на швидкість процесу, але і на кількісний склад продуктів, що утворюються. Найбільше практичне застосування отримав термофільний режим (50-55 ° C) зброджування, через його максимальний енергетичний ефект. Однак, до перепадів температури, особливо до співвідношення та взаємодія різних груп мікроорганізмів зумовлюють стабільність процесу переробки. Для нормального перебігу процесу повинні забезпечуватись оптимальні умови життєдіяльності бактерій. Для створення даних умов необхідно дотримуватися наступних факторів: певні властивості сировини, температура процесу зброджування, концентрація поживних речовин, вологість субстрату, рН середовища, анаеробні умови, тиск у метантенку, тривалість зброджування, інтенсивність перемішування субстрату, конструкція та ін. [3, 9].

Таким чином, до роботи метантенку висуваються високі вимоги, основні з яких гідравлічні, технологічні, теплотехнічні та ін.

1.4. Способи інтенсифікації теплообміну в біореакторі

Для інтенсифікації процесу утворення біогазу велике значення має теплообмін у біореакторі між нагрівальним елементом та зброджувальною масою, розподіл температур по всьому об'єму завантажувальної маси при перемішуванні, а також теплообмін між зовнішніми поверхнями біореактора та навколишнім середовищем.

У сучасному світі безліч продуктів і речовин виготовляється за допомогою мікроорганізмів. Звичайно, це відбувається не саме собою, а у спеціальних мікробіологічних лабораторіях. Процес, який здійснюють у мікроорганізми, називається ферментацією, а прилад, у якому вони перебувають у даний час, називається ферментер (рис. 1.9) або біореактор.

Біореактори обладнанні паровою сорочкою, мішалками, стерилізуючими повітряними фільтрами, відбійниками, що забезпечують необхідні температурний та газовий режим в біореакторі (тобто процеси масо- та теплообміну).

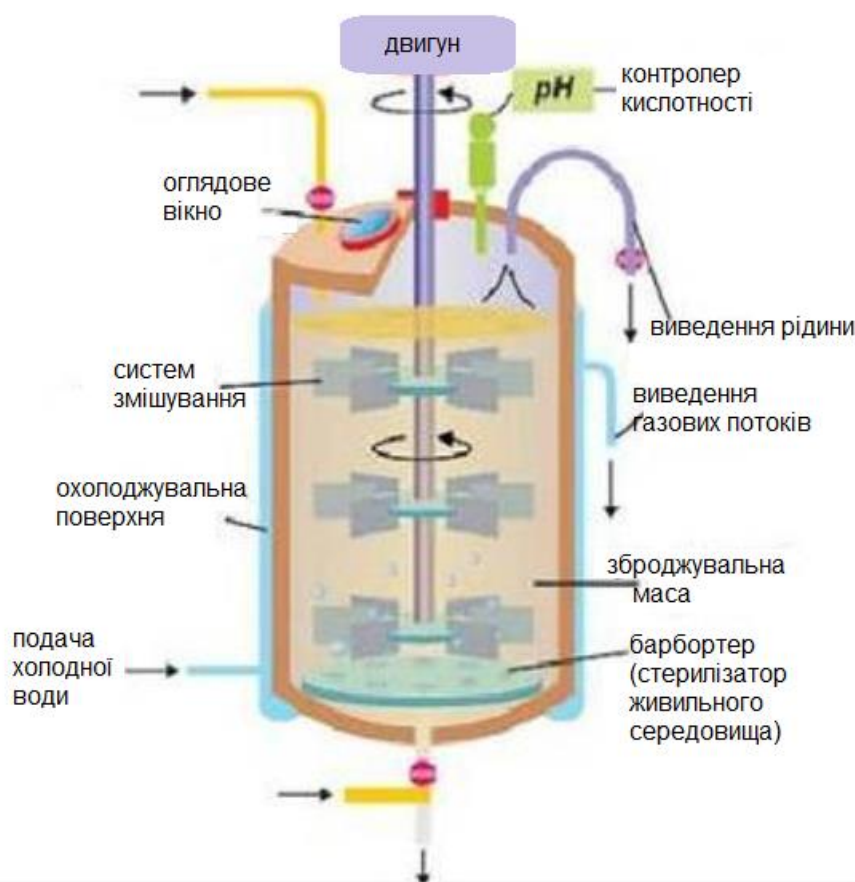


Рисунок 1.9. Загальна схема реактора

Конструкції біореакторів. У мікробіологічних виробництвах залежно від особливостей процесу застосовують різноманітні біореактори. Апарати для аеробної поверхневої ферментації широко застосовуються для виробництва органічних кислот.

Конструктивні відмінності біореакторів визначаються здебільшого способами підведення енергії та аерації середовища (рис. 1.10) [16].

Біореактори із підведенням енергії до газової фази. В апаратах даного типу аерація та перемішування зброджу вальної рідини здійснюються стисненим повітрям, яке подається в біореактор під певним тиском. До таких біореакторів відносять [16]:

- барботажні біореактори, повітря подається через барботажні пристрої, які розміщені в нижній частині апарату [16];

- апарати з дифузором, в середній частині якого розміщений внутрішній циліндр-дифузор, що забезпечує перемішування субстрату та повітря, яке надходить розподільними трубами в нижню частину апарату [16];

- трубчасті біореактори (газліфтні), в яких рідина потоком повітря переміщається у верхній частині апарату, далі надходить в сепаратор і повертається знову в реактор, де знову захоплюється повітрям [16];

- біореактори з форсунковим розподілом повітря, подача повітря відбувається через форсунки, що встановлені в нижній частині апарату і дифузором, який забезпечує внутрішню циркуляцію рідини [16];

- біореактори колонного типу, мають вигляд циліндричної колони, яка розділена горизонтальними перегородками; перемішування рідини здійснюється через кільцеву щілину забезпечуючи протиточний рух рідкої та газової фаз [16].

Біореактори з підведенням енергії до рідкої фази. До даних типів апаратів відносять:

- апарат з самовсмоктувальною турбіною, має циліндричний дифузор і мішалку з лопатями які встановлені на валу. При обертанні мішалки створюється розрідження та здійснюється всмоктування повітря, завдяки чому піднімається рідина в кільцевому зазорі між дифузором і стінками апарату з наступним її поверненням у дифузор [16];

- біореактор з турбоежекторними перемішувачами – це апарат, всередині розділений вертикальними перегородками на відповідні секції, в кожній розміщена мішалка турбінного типу (ежектор) та дифузор; що використовується для переміщення рідини з секції у секцію через перегородки [16].

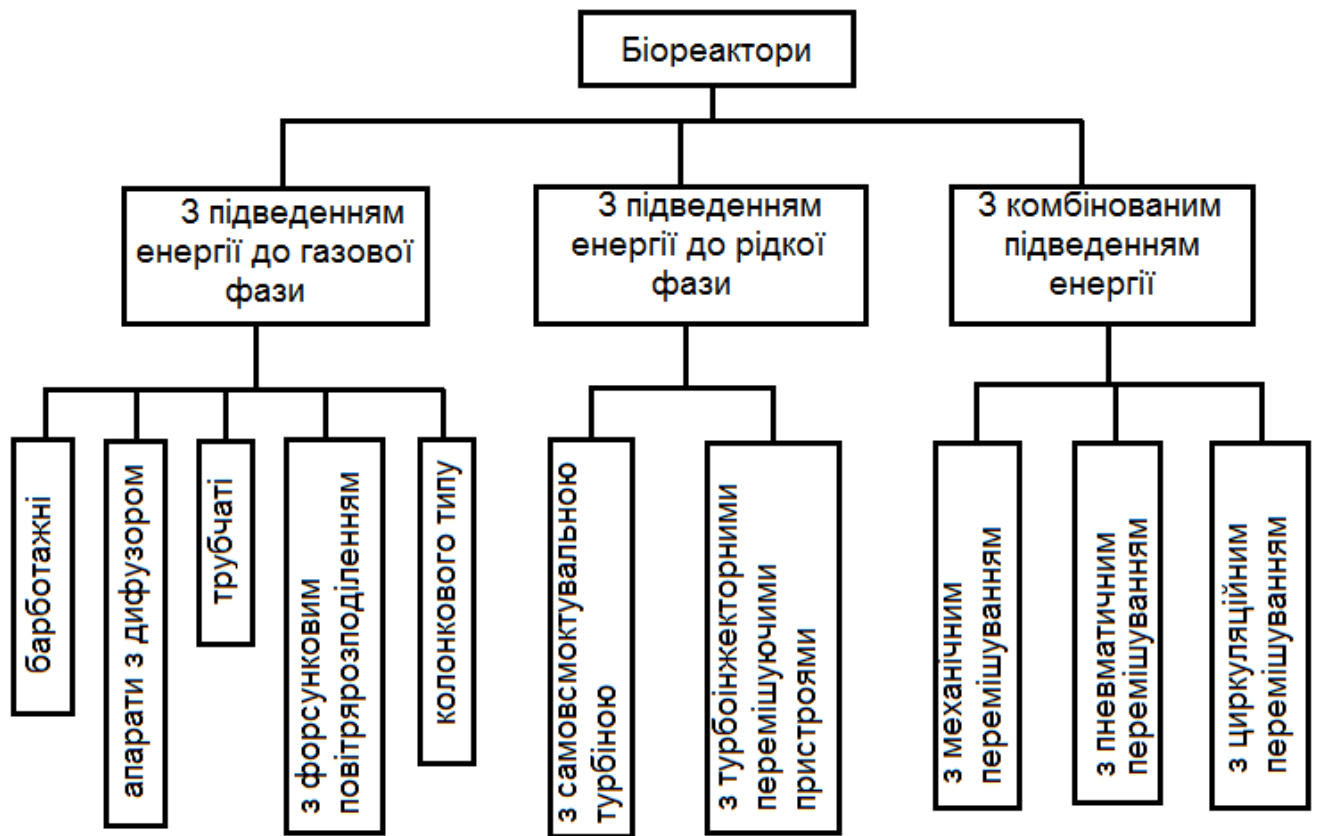


Рисунок 1.10 . Класифікація біореакторів

Біореактори з комбінованим підведенням енергії. У даних апаратах здійснено підведення енергії до газової фази аерації та до рідкої фази для перемішування. Біореактор представляє собою циліндричний посуд, з механічною мішалкою та барботером, який розміщується внизу мішалки. Використовується також класифікація біореакторів за способом перемішування, відповідно до якої використовуються апарати з механічним, пневматичним та циркуляційним перемішуванням [4].

Апарати з механічним перемішуванням складаються з центрального валу та лопатей різної форми.

Аерація може здійснюватись шляхом барботажу. Розбризуванню повітря в вигляді дрібних бульбашок сприяє механічний вібратор, встановлений поруч із барботером [6].

Апарати із пневматичним перемішуванням. Перемішування та аерація посилюються за допомогою обертових дисків з отворами, встановлені поблизу барботера, або за допомогою придонних пропелерів.

Класичний ерліфтний апарат доповнений дифузором, нижня частина якого перебуває над барботером. Можливі варіанти подачі повітря як у внутрішній, і у зовнішній простір середовища дифузору.

Апарати з циркуляційним перемішуванням містять пристрої (насоси, ежектори), що створюють спрямований струм рідини замкненим контуром. Насос для циркуляції зброжу вальної маси може межувати з барботером (поєднання пневматичного та циркуляційного перемішування). Існують різні варіанти такого типу апаратів:

- апарати типу «падаючого струменя», типу «зануреного струменя», перемішування за допомогою ежектора. Апарати циркуляційного типу часто заповнюють твердими частинками (насадкою).

Біореактори зазвичай є герметичні, циліндричні ємності, висота яких у 2-2,5 рази перевищує діаметр.

Найчастіше їх виготовляють із нержавіючої сталі. Для підтримання температурного режиму в апараті встановлюється кожух або теплообмінник.

Основна вимога до апаратів – це збереження стерильності, тому вони мають бути герметичними, всі лінії трубопроводів мають бути доступні для обробки гарячою парю. Робочий об'єм біореактора зазвичай не перевищує 7/10 загального обсягу.

У період нагрівання завантажувальної маси температура в центральній частині біореактора збільшується до 55°C і підтримується постійною у заданому режимі, далі відбувається конвективне нагрівання із сусідніми секціями метантенку. Розподіл тепла відбувається рівномірно по всьому об'єму реактора.

Нагрівання в межах температур 40 ... 55°C здійснюється в центральній секції метантенку індукційним нагрівачем із частотою струму 50 Гц, що відповідає термофільного режиму зброджування. Задана температура підтримується постійно забезпечення безперервного режиму роботи реактора. При підтримці заданого максимуму температури відбувається теплообмін біомаси, при якому повинен досягатися мезофільний та психрофільний режим зброджування в середній та зовнішній секціях МТ. Теплообміну сприяють масообмінний процес при завантаженні та вивантаженні сировини, а також циклічне перемішування субстрату. Мезофільний режим зброджування відбувається у середній частині метантенку, де за рахунок конвективного нагріву досягається температура 25...40°C. Нижній частині реактора відповідає психрофільний режим, де температура зброджування знаходиться в межах 8 ... 25°C.

У роботі [12] описано горизонтальний мобільний метантенк для переробки відходів та отримання біогазу. Бродіння в ньому відбувається поетапно у дві стадії, кожна з яких протікає в окремій секції пристрою.

У реакторах з поділами на секції з різними температурними режимами зброджування технологічно проблематично підтримувати розрахункові

температури у кожній зоні. Також з огляду на те, що бактерії сильно схильні до температури, різка зміна її може призвести до пригнічення життєдіяльності бактерій. На практиці більшість установок працюють у одному заданому температурному режимі зброджування, тому що при цьому спостерігається стабільний вихід біогазу.

У роботі [12] розглядається циліндричний метантенк, у якому нагрівання здійснюється через сорочку. Дана конструкція є не ефективною з погляду енергозбереження. Так як тепловий потік буде спрямовуватися як у бік зброджувальної маси та і у бік довкілля. При цьому площа внутрішніх стінок матиме підвищену температуру, що призведе до налипання зброджувальної маси на внутрішні стінки, а також до пригнічення життєдіяльності бактерій, що буде супроводжуватися зменшенням виходу біогазу. Через зовнішні поверхні сорочки, що гріє, збільшаться тепловтрати в навколишнє середовище. Враховуючи даний факт, можна зробити висновок, що доцільніше розташовувати нагрівальний елемент усередині метантенку.

Вертикальні циліндричні апарати є найбільш поширеним видом апаратів, що застосовуються у хімічній промисловості [13]. Корпус апарата виготовлений із листової сталі.

Конструкція з цього матеріалу з'єднується болтами або зварюється з листів заліза, згорнутих у рулон. Оболонка реактора розміщується на фундаменті з бетону. Для підтримання температурного режиму апарат ізолюється. У конструкції передбачені отвори для завантаження та розвантаження реактора, а також доступ до його внутрішнього простору для обслуговування. У конструкції передбачений змієвик для нагрівання речовини та мішалка для його перемішування.

Свіжа кількість речовин завантажується у реактор через патрубок, а відпрацьована видаляється знизу через технологічний отвір.

Оскільки елементи готуються заздалегідь, то залізні резервуари виготовляються технологічніше ніж резервуари з монолітного бетону.

На місці установки, виготовлені з листового заліза, товщиною 4-6 мм, зовні захищені від корозії розміщуються на стрічковому фундаменті.

Аналізуючи теплофізичні властивості завантажувальної маси, можна зробити припущення, що на нагрівальній поверхні, відбуватимуться відкладення твердої фракції. Внаслідок аналітичних досліджень опублікованих матеріалів з виробництва біогазу, визначено, що вплив шару відкладень на інтенсивність теплообміну між нагрівальним елементом і масою не вивчалось.

Розробка конструкції метантенку, який дозволить підтримувати всі технологічні параметри процесу анаеробного зброджування, а також бути

простим у виготовленні, експлуатації та бути енергоефективним, є актуальним науковим напрямом.

1.5. Висновки по розділу 1

В даному розділі проведено класифікацію типів біогазових установок. Аналіз існуючих метантенків показав, що вони складні у виготовленні та важкі в експлуатації. При аналізі технологічних процесів анаеробного зброджування було виявлено, що одним із основних факторів, що впливають на підвищення ефективності роботи є температурний режим зброджування, дослідження якого показало необхідність вдосконалення математичної моделі процесів тепломасообміну в метантенці

Виконані аналітичні дослідження дозволяють зробити висновок, що облік впливу відкладень твердих частинок на поверхні змішувача мало вивчені. Тому необхідно дослідити вплив відкладень на поверхнях нагрівальних елементів на інтенсивність теплообміну між нагрівальним теплоносієм і зброджувальною масою.

РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОСНОВНИХ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛОМАСООБМІНУ

2.1. Процес теплообміну в біореакторі

Технологія отримання біогазу та його подальше використання є складним процесом, на який впливає велика кількість факторів, кожен з яких неможливо оцінити окремо. З даних причини необхідно розглядати, як сукупність елементів, що перебувають у взаємозв'язку один з одним і утворюють певну цілісну систему. Для формування системи необхідно забезпечити налагодженість зв'язку.

Технологічний процес біогазових установок заснований на технічних, біологічних, хімічних, організаційних та інших елементах системи, що у безперервному зв'язку друг з одним.

До технічних відносяться конструктивні особливості деталей та вузлів біогазової установки. Яка повинна мати необхідні частини: ємність гомогенізації; завантажувач твердої (рідкої) сировини; реактор; мішалка; газгольдер; систему змішування води та опалення; газопроводи; насосну станцію; сепаратор; прилади контролю; систему безпеки.

Біомаса періодично подається за допомогою насосної станції або завантажувача у реактор, який обладнаний міксерами та підігривається.

Для підтримання життєдіяльності бактерій необхідна подача органічних матеріалів, підігрів до необхідної температури та періодичне перемішування. Біогаз, що утворюється, накопичується в сховищі (газгольдері), потім проходить систему очищення та подається до споживачів (котел або електрогенератор). Реактор працює без доступу повітря, герметичний та пожегобезпечний.

Фізичні елементи системи виробництва біогазу, що впливають на процес бродіння [12], включають: температуру зброджування; тиск у біогазовій установці; гідравлічний режим; вологість середовища; площу поверхні частинок сировини; частоту подачі субстрату; сповільнювальні речовини; стимулюючі добавки.

Метанові бактерії виявляють свою життєдіяльність у межах температури 0-70 °С. Якщо температура вища, вони починають гинути, крім кількох штамів, які можуть жити за температури середовища до 90°С. При мінусовій температурі вони виживають, але припиняють свою життєдіяльність.

Організаційні елементи системи включають: кількість та періодичність завантаження та вивантаження збродженого матеріалу; можливість реалізації отриманої продукції (газ, добрива, електроенергію та ін..) та якісний склад завантажувальної маси.

Ефективність роботи біогазової установки залежить від підтримки необхідної температури протягом усього часу бродіння субстрату [3, 5-7]. Кількість теплоти для нагріву вхідної маси розраховується за наступною залежністю [1]:

$$Q = l(t_{\text{бр}} - t_{\text{поч}}) \frac{c_{\text{сб}}}{\eta}, \quad (2.1)$$

де: η – коефіцієнт корисної дії нагрівача; l – добовий вихід субстрату; $c_{\text{сб}}$ – теплоємність субстрату; $t_{\text{бр}}$ – температура бродіння; $t_{\text{поч}}$ – початкова температура субстрату.

Залежність (2.1) дозволяє визначити лише кількість теплоти, необхідне для підігріву субстрату в біореакторі, але при цьому залишається невідомим розподіл температури за обсягом біореактора. Як відомо, допустимі значення температур при яких процес метанового анаеробного бродіння проходить оптимально: мезофільний – температура субстрату становить 33 °C (± 3 °C), термотолерантний – температура субстрату становить 40 °C (± 2 °C), термофільний – температура субстрату становить 53 °C (± 1 °C) [2, 3]. Тому необхідно здійснити підігрів субстрату в біореакторі таким чином, щоб досягти рівномірного розподілу температури в біореакторі. У зв'язку з цим виникає необхідність визначення температурних полів у біореакторі під час підігріву субстрату.

Розглянемо просторове завдання теплопровідності для області у формі циліндра, накритого зверху куполом (газгольдер біореактора). Як модель біореактора біогазової установки візьмемо порожнистий циліндр у циліндричних координатах r, φ, z (рис. 2.1). Нехай h_p – висота біореактора; R_1 – внутрішній радіус біореактора; R_3 – зовнішній радіус біореактора. Стінка біореактора виготовляється із залізобетону та покривається ізоляційним шаром [10].

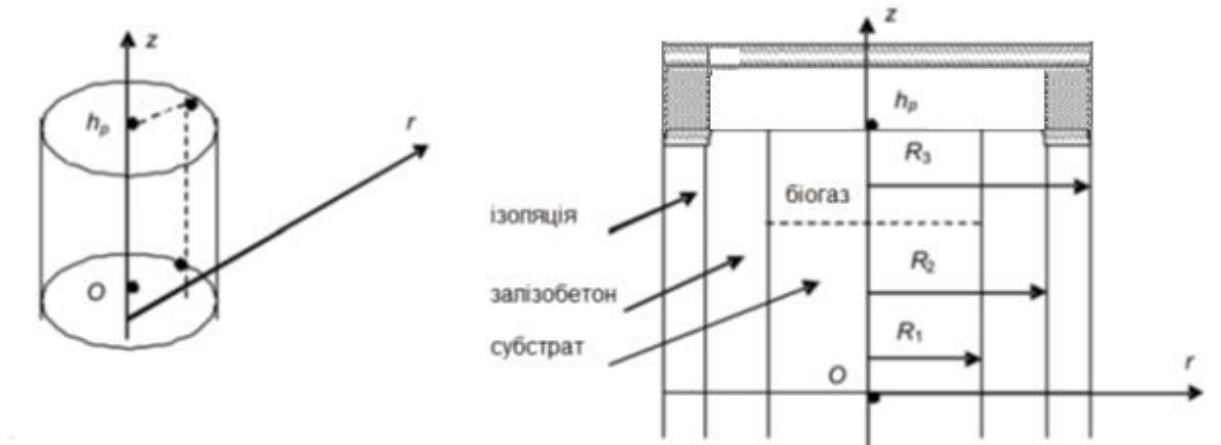


Рисунок 2.1. Модель біореактора. Переріз біореактора площиною $\varphi = \text{const}$

Математична модель температурного поля в біореакторі біогазової установки представляє собою систему диференціальних рівнянь з початковими та граничними умовами (крайове завдання). Розподіл тепла в області описується рівняннями теплопровідності для кожного матеріалу (повітря, субстрату, залізобетону, ізоляційного шару) [10]:

$$c_{сб}\rho_{сб} \frac{dT_{сб}}{dt} = \lambda_{сб} \left(\frac{d^2T_{сб}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT_{сб}}{dr} + \frac{1}{r^2} \frac{d^2T_{сб}}{d\varphi^2} + \frac{d^2T_{сб}}{dz^2} \right), \quad (2.2)$$

$$c_{п}\rho_{п} \frac{dT_{п}}{dt} = \lambda_{п} \left(\frac{d^2T_{п}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT_{п}}{dr} + \frac{1}{r^2} \frac{d^2T_{п}}{d\varphi^2} + \frac{d^2T_{п}}{dz^2} \right), \quad (2.3)$$

$$c_{зб}\rho_{зб} \frac{dT_{зб}}{dt} = \lambda_{зб} \left(\frac{d^2T_{зб}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT_{зб}}{dr} + \frac{1}{r^2} \frac{d^2T_{зб}}{d\varphi^2} + \frac{d^2T_{зб}}{dz^2} \right), \quad (2.4)$$

$$c_{із.ш}\rho_{із.ш} \frac{dT_{із.ш}}{dt} = \lambda_{із.ш} \left(\frac{d^2T_{із.ш}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT_{із.ш}}{dr} + \frac{1}{r^2} \frac{d^2T_{із.ш}}{d\varphi^2} + \frac{d^2T_{із.ш}}{dz^2} \right), \quad (2.5)$$

де: $c_{п}$ – теплоємність повітря; $\rho_{п}$ – щільність повітря; $T_{п}$ – температура повітря; $\lambda_{п}$ – коефіцієнт теплопровідності повітря; $c_{сб}$ – теплоємність субстрату; $\rho_{сб}$ – щільність субстрату; $T_{сб}$ – температура субстрату; $\lambda_{сб}$ – коефіцієнт теплопровідності субстрату; $c_{зб}$ – теплоємність залізобетону; $\rho_{зб}$ – щільність залізобетону; $T_{зб}$ – температура залізобетону; $\lambda_{зб}$ – коефіцієнт теплопровідності залізобетону; $c_{із.ш}$ – теплоємність ізоляції; $\rho_{із.ш}$ – щільність ізоляції; $T_{із.ш}$ – температура ізоляції; $\lambda_{із.ш}$ – коефіцієнт теплопровідності ізоляції; $T_{вх}$ – температура на вході в теплообмінник біореактора; $T_{вих}$ – температура на виході із теплообмінника біореактора; d_T – діаметр трубки теплообмінника; $T_{куп}$ – температура кришки біореактора; a – висота над дном

біореактора, на якій розміщено змійовик; $T_{\text{навк.сер}}$ – температура навколишнього середовища; K – крок змійовика; α – коефіцієнт теплообміну; β – кут сектора кришки біореактора.

На всіх ділянках області моделювання, де відбувається поєднання матеріалів з різними теплофізичними властивостями, а саме субстрату та повітря, субстрату та залізобетону, повітря та залізобетону, залізобетону та ізоляційного шару, задані граничні умови [10]:

$$T_{\text{п}} = T_{\text{сб}}, z = \frac{2}{3}h_p, 0 \leq r \leq R_1; \quad (2.6)$$

де $T_{\text{п}}$ – температура повітря; $T_{\text{сб}}$ – температура субстрату; h_p – висота біореактора; R_1 – внутрішній радіус біореактора.

$$-\lambda_{\text{п}} \frac{dT_{\text{п}}}{dz} = \lambda_{\text{сб}} \frac{dT_{\text{сб}}}{dz}; \quad (2.7)$$

де $\lambda_{\text{п}}$ – коефіцієнт теплопровідності повітря; $\lambda_{\text{сб}}$ – коефіцієнт теплопровідності субстрату.

$$T_{\text{п}} = T_{\text{зб}}, r = R_1, \frac{2}{3}h_p \leq z \leq R_1, \quad (2.8)$$

де $T_{\text{зб}}$ – температура залізобетону.

$$-\lambda_{\text{п}} \frac{dT_{\text{п}}}{dz} = \lambda_{\text{зб}} \frac{dT_{\text{зб}}}{dz}; \quad (2.9)$$

де $\lambda_{\text{зб}}$ – коефіцієнт теплопровідності залізобетону.

$$T_{\text{сб}} = T_{\text{зб}}, r = R_1, 0 \leq z \leq \frac{2}{3}h_p, \quad (2.10)$$

$$T_{\text{зб}} = T_{\text{із.ш}}, r = R_2, \quad (2.11)$$

де $T_{\text{із.ш}}$ – температура ізоляції;

$$-\lambda_{\text{зб}} \frac{dT_{\text{зб}}}{dz} = \lambda_{\text{із.ш}} \frac{dT_{\text{із.ш}}}{dz}; \quad (2.12)$$

де $\lambda_{\text{із.ш}}$ – коефіцієнт теплопровідності ізоляції.

Рівняння для локально-середньоточкового джерела тепла, розміщений вздовж зовнішньої стінки біореактора [10]:

$$T(t, r, \varphi, z) = \frac{\varphi}{2\pi n} (T_{\text{вих}} - T_{\text{вх}}) + T_{\text{вх}}, \\ R_1 - \frac{d_m}{2} \leq r \leq R_1, \quad 0 \leq \varphi \leq 2\pi n, \quad a \leq z \leq a + k \frac{\varphi}{2\pi}, \quad (2.13)$$

Ідеальним вважається таке перемішування субстрату, при якому концентрації та органічних речовин і популяцій мікроорганізмів однакові у всіх точках біореактора.

Слід зазначити, що вищі значення температури будуть спостерігатися в точках поблизу джерела тепла. Перемішування субстрату сприяє рівномірному розподілу температури в біореакторі. Для вивчення впливу перемішування субстрату (тип мішалки, час та інтенсивність перемішування) на температурне поле в біореакторі необхідно провести експерименти з визначення значень температури при перемішуванні субстрату та порівняти їх з теоретичними розрахунками температурного поля за запропонованою математичною моделі (без перемішування). Це дозволить підібрати оптимальний час та режим перемішування субстрату.

2.2. Тепловіддача від біогазу і маси, що зброджується до внутрішніх поверхонь метантенка

Між зброджувальною масою та кришкою біореактора знаходиться газова фаза товщиною δ , швидкість руху біогазу в якій незначна. Тому процес теплообміну в даному випадку було розглянуто як вільну конвекцію біогазу в замкнутому об'ємі [6].

Коефіцієнт тепловіддачі ε_1^k від біогазу до кришки біореактора може бути розрахований з виразу [8]:

$$\varepsilon_1^k = \frac{\delta_b \cdot \sigma_k}{l}, \quad (2.14)$$

де δ_b – коефіцієнт теплопровідності біогазу, Вт/(м·К);

σ_k – коефіцієнт конвенції;

l – відстань від поверхні зброджувальної маси до кришки метантенку, м;

Біогаз складається в основному з двох газів: метану CH_4 та діоксиду вуглецю CO_2 . Кількість інших складових не перевищує 5% та практично не впливає на теплофізичні характеристики суміші. Тому можна вважати, що біогаз складається з метану та діоксиду вуглецю.

Технологія роботи біореактора передбачає періодичне часткове вивантаження зброженого субстрату та завантаження свіжої маси в реактор. В даний час у біореакторі відбувається перемішування біомаси, що зброджується, і додатковий підігрів для стабілізації та підтримки постійної температури.

2.3. Теплообмін між зовнішніми поверхнями метантенку та навколишнім середовищем

Процес передачі теплоти від субстрату через стінки біореактора до навколишнього середовища.

При проведенні аналізу теплообміну необхідно врахувати тепловіддачу від кришки до повітря, циліндричної частини біореактора та днища повітрям, що рухається зі швидкістю $v_{\text{п}}$ і температурою $t_{\text{п}}$.

Передача теплоти від кришки до повітря відповідає особливостям конвективного теплообміну [10]. Розмір поверхні $l_{\text{п}}$ дорівнює:

$$l_{\text{п}} = \frac{2 \cdot D_{\text{кр}}}{\pi}, \text{ м} \quad (2.15)$$

де $D_{\text{кр}}$ – діаметр кришки біореактора, м.

Теплофізичні характеристики повітря для зовнішньої температури наведено у роботі [14].

За значенням числа Рейнольдса визначається режим проходження процесу [14].

$$Re = \frac{v_{\text{п}} \cdot l_{\text{п}}}{\varphi_{\text{кв}}}, \quad (2.16)$$

де $\varphi_{\text{кв}}$ – коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря, $\text{м}^2/\text{с}$.

Коефіцієнт теплопередачі через кришку біореактора визначали з рівняння [14]:

$$K_{\text{т}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1^k} + \frac{\delta_{\text{кр}}}{\lambda_{\text{кр}}} + \frac{1}{\varepsilon_2^k}}, \quad (2.17)$$

Тепловий потік через кришку, біореактора рівний:

$$Q_{\text{к}} = \frac{K_{\text{т}} \cdot \pi \cdot D_{\text{к}}^2 \cdot (t_{\text{зб}} - t_{\text{п}})}{4}. \quad (2.18)$$

Коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої поверхні біореактора до повітря визначається:

$$\varepsilon_{\text{ц}} = \frac{Nu_{\text{ц}} \cdot \lambda_{\text{п}}}{D_3}, \quad (2.19)$$

де D_3 – зовнішній діаметр циліндричної частини, м.

Оскільки відношення внутрішнього і зовнішнього діаметрів $n = D_3 / D_{\text{вн}} < 1.4$ для розрахунку коефіцієнта теплопередачі циліндричної частини, прийняли рівняння (2.17), що приймається для плоскої стінки [14].

Тепловий потік через циліндричну стінку визначено з рівняння:

$$Q_{\text{ц}} = K_{\text{ст}} \cdot \pi \cdot D_3 \cdot (t_{\text{зб}} - t_{\text{п}}). \quad (2.20)$$

Бокова поверхня циліндричного сегмента $F_{\text{д}}$ дорівнює:

$$F_{\text{д}} = \pi \left[\left(\frac{D_{\text{д}}}{2} \right) + h_{\text{д}}^2 \right], \quad (2.21)$$

де $\frac{D_d}{2}$ і h_d – хорда і стріла шарового сегменту, м.

Тепловий потік днища до повітря може бути розрахований за допомогою рівняння:

$$Q_d = K_d \cdot (t_{зб} - t_p) \cdot \frac{F_d}{F_k} \quad (2.22)$$

де F_k – площа поверхні кулі, м².

Отже, тепловий потік через зовнішні поверхні розглядаємого біореактора має вигляд:

$$Q_p = Q_k + Q_c + Q_d, \quad (2.23)$$

З рівняння (2.23) кількість теплоти, яка потрібна для підтримання температури в біореакторі витрачається на компенсацію втрат тепла у навколишнє середовище та нагрівання свіжої порції біомаси. Тривалість нагрівання відповідатиме тривалості роботи механічної мішалки $\tau_{нагр} = \tau_{зм}$.

2.4. Висновок по розділу 2

В результаті аналітичного огляду складено тепловий баланс потоків теплоти в біореакторі, згідно з яким теплота, що підводиться до субстрату витрачається на компенсацію тепловтрат і нагрівання свіжої біомаси.

РОЗДІЛ 3. УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ БІОГАЗОВОЇ УСТАНОВКИ

3.1. Опис запропонованої установки

Для забезпечення безперервності процесу отримання біогазу запропонована багатокамерна конструкція установки анаеробної переробки органічних відходів, що складається з ємності, розділеної на 4 камери; систему обігріву біомаси до потрібної температури у кожній камері та удосконалену систему перемішування в кожній камері (рис. 3.1).

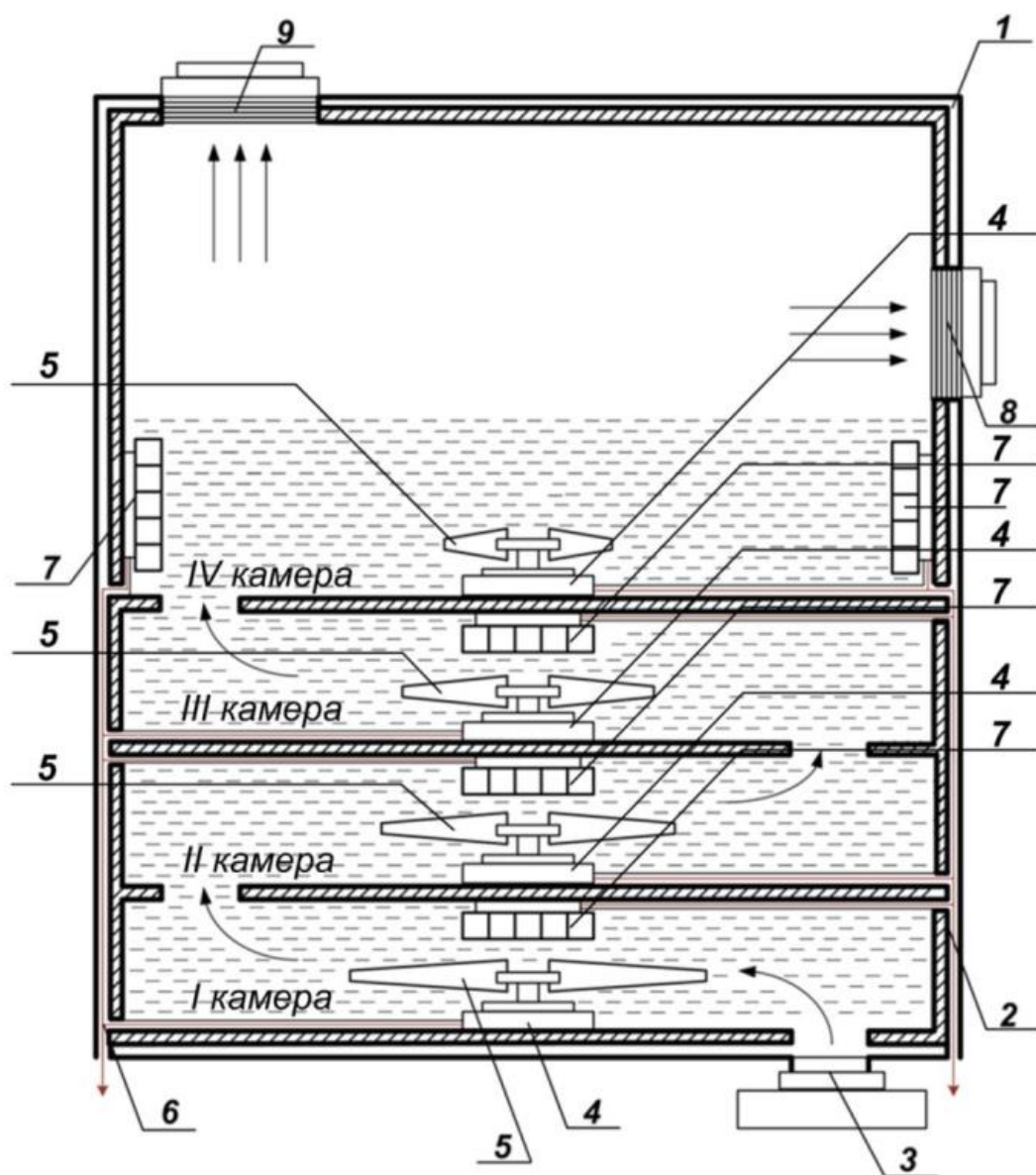


Рисунок 3.1. Схема біогазової установки безперервного завантаження сировини: 1 – ємність реактора; 2 – теплоізоляційний захист; 3 – компресор завантаження сировини; 4 – регульований електропривод; 5 – дволопатева

мішалка; 6 – силові та інформаційні кабелі комутації; 7 – нагрівальний елемент; 8 – компресор для видачування відпрацьованої сировини; 9 – компресор для видачування біогазу в газгольдер

Особливістю конструкції є те, що довжини лопатей-мішалок у системі перемішування пропорційно зменшуються від нижньої камери до верхньої камери. Біогазова установка працює в такий спосіб. З нижнього отвору 3 біомаса рухається вгору камери. У кожній камері біомаса перемішується дволопатевиими мішалками 5, що обертаються електроприводом 4 і підігрівається нагрівальними елементами 7. Після закінчення циклу зброджування, відпрацьований субстрат видачується в отвір для зливу відпрацьованої сировини 8. Вихід біогазу здійснюється у спеціальний отвір 9. У біогазовому реакторі безперервного завантаження сировини передбачені: теплоізоляційний захист 2, що забезпечує підтримання температури та кабельні канали 6 для комутації силових та інформаційних кабелів.

У запропонованій конструкції біогазової установки забезпечується безперервний цикл анаеробного зброджування, підвищується ефективність переробки відходів тваринницького та рослинницького субстрату за рахунок зменшення довжин мішалок від ранньої фази до пізнішої та покамерного поділу реактора, що сприяє забезпеченню індивідуального температурного режиму для кожної фази зброджування. Крім того використання установки економить енерговитрати на обігрів маси, а також підвищує ефективність виходу біогазу за рахунок відсутності розриву зв'язку між бактеріями, що беруть участь у процесі анаеробного зброджування.

Відомо, що при виробництві біогазу з органічної сировини важливо враховувати його склад та особливості технологічних режимів процесу бродіння. Незважаючи на різноманітність складу сировини та мікроорганізмів, що визначають процес газоутворення на даний час виділяють три основні температурні режими зброджування: психрофільний (20...25 °С), мезофільний (25...40 °С) та термофільний (понад 40 °С). При цьому рекомендується, крім підтримки середніх температур, забезпечувати також обмеження щодо допустимих коливань температури протягом певного часу. Коливання температури можуть становити від $\pm 0,5$ °С/год (за термофільного режиму) до ± 2 °С/год (при психрофільному режимі) [2, 5].

Необхідність підтримки регламенту температурного режиму в реакторі накладає певні вимоги щодо вибору матеріалу теплоізоляції для корпусу біогазової установки. Надійна теплоізоляція установки дозволяє заощаджувати значну кількість енергії, що витрачається в зимовий час на обігрів.

Нині ринок насичений різними штучними теплоізолюючими матеріалами. Використання високотехнологічних якісних теплоізоляційних матеріалів дозволяє зменшити товщину огорожувальної конструкцій, що дає можливість збільшити корисну площу приміщень і зменшити навантаження на основу. Основними властивостями теплоізоляційних матеріалів є вологість, водопоглинання, пористість, паропроникність, щільність, теплоємність, максимальна температура експлуатації та ін.

3.2. Економічна ефективність розробленого метантенку

Однак для забезпечення температурних режимів визначальними є такі параметри, як коефіцієнт теплопровідності (для стаціонарного режиму) і коефіцієнт температуропровідності a (для нестационарних умов):

- коефіцієнт теплопровідності λ , параметр визначається кількістю теплоти (Вт), що отримано з 1 м² площі;

- коефіцієнт температуропровідності a , що залежить від коефіцієнта теплопровідності λ , щільності ρ та теплоємності зі стінки та внутрішнього середовища:

$$a = \lambda / \rho c. \quad (3.1)$$

Згідно з отриманими в роботі [11] результатами можна відзначити, що для стаціонарних умов коефіцієнт теплопровідності λ для більшості застосовуваних теплоізоляційних матеріалів становить 0,03...0,05 Вт/м², а для нестационарних умов з теплоізоляційних матеріалів найменший коефіцієнт температуропровідності мають матеріали на дерев'яній основі, а зі штучних матеріалів – пінополіуретану. Отже, їх найбільш доцільно включати теплоізоляційні покриття для умов різкої зміни температури навколишнього середовища.

У ході хімічних реакцій, що відбуваються в біореакторі, відбувається виділення певної кількості теплоти. У той же час, при нестачі теплоти для забезпечення температурного режиму використовують підігрів маси за допомогою додаткових (сторонніх) джерел теплоти [12-13]. Як засоби додаткового підігріву можна використовувати різні теплообмінні апарати або електричні нагрівачі (ТЕНи). Тому завдання полягає в оптимальному виборі встановленої потужності додаткових джерел теплоти.

Згідно з теоретичним аналізом на основі рішень рівняння теплопровідності Фур'є, наведеному у роботі [14] у першому наближенні фізичну модель біореактора можна визначити у вигляді суцільного циліндра

радіусом $R1$ (робочий об'єм реактора) та висотою H , оточеного циліндричною оболонкою (стілкою) з товщиною Δ . При цьому зовнішній радіус конструкції дорівнює $R2 = R1 + \Delta$.

Розподіл температурного поля всередині конструкції залежатиме від встановленої потужності додаткових (сторонніх) джерел теплоти, які можна розташувати всередині робочого об'єму реактора та умов теплообміну зовні об'єкта.

Можливо-допустимий технологічний діапазон зміни температури при зброджуванні можна визначити так: як різницю значень температурного поля між центром біореактора $T_1(0)$ і біля внутрішньої стінки біореактора $T_1(R)$:

$$\Delta T_1 = T_1(0) - T_1(R), \quad (3.2)$$

або як різницю значень температурного поля між температурою на осі біореактора $T_{кр} = T_1(0)$ і температурою зовнішнього середовища T_c :

$$\Delta T = T_1(0) - T_c. \quad (3.3)$$

Розрахунок проводився для середньомісячної зовнішньої температури повітря [10].

Результати розрахунків зведені у таблиці 3.1 та 3.2.

Таблиця 3.1 - Варіант 1. Температура не регулюється

Місяць	Середньомісячна температура зовнішнього повітря, °C	Температура нагрівального елемента, °C	Середня температура всередині біореактора, °C	Місячний об'єм біогазу, м ³ /місяць	Кількість спалюваного біогазу, м ³ /місяць
січень	-7,2	60	35,9	5477,82	2005,50
лютий	-6,4	60	36,3	5902,2	2005,50
березень	0,7	60	38,9	6468,71	2005,50
квітень	10,5	60	43,3	6387,7	2005,50
травень	19,4	60	46,3	6924,16	2005,50
червень	24,5	60	48,1	7554	2005,50
липень	25,2	60	49,2	7551,3	2005,50
серпень	23,8	60	48,5	7360,4	2005,50
вересень	14,9	60	46,1	6807,5	2005,50
жовтень	8	60	42,6	6447,09	2005,50
листопад	1,8	60	39,5	5439,6	2005,50
грудень	-2,9	60	37,1	5961,73	2005,50
				$\Sigma 78282,21$	$\Sigma 24066$

Таблиця 3.2 - Варіант 2. Температура регулюється в залежності від температури зовнішнього повітря

Місяць	Середньомісячна температура зовнішнього повітря, °С	Температура нагрівального елемента, °С	Середня температура всередині біореактора, °С	Місячний об'єм біогазу, м ³ /місяць	Кількість спалюваного біогазу, м ³ /місяць
січень	-7,2	66,0	41,38	8968,48	2547,2
лютий	-6,4	65,6	41,36	8946,56	2541,8
березень	0,7	64,2	41,34	8941,21	2245,0
квітень	10,5	58,2	41,24	8658,24	2025,5
травень	19,4	56,0	40,68	8623,96	2004,3
червень	24,5	52,2	40,54	8625,74	1754,3
липень	25,2	50,2	40,44	8908,68	1468,2
серпень	23,8	52,0	40,56	8914,42	1256,1
вересень	14,9	58,2	40,62	8837,4	1436,4
жовтень	8	60,0	40,66	8942,22	1635,2
листопад	1,8	61,6	41,18	86471,89	1832,6
грудень	-2,9	65,2	42,16	8956,34	2087,2
				Σ105971,14	Σ22833,8

На рис. 3.2 та 3.3 показані графіки середньої температури нагрівального елемента та середньої температури всередині біореактора в залежності від місяців року.

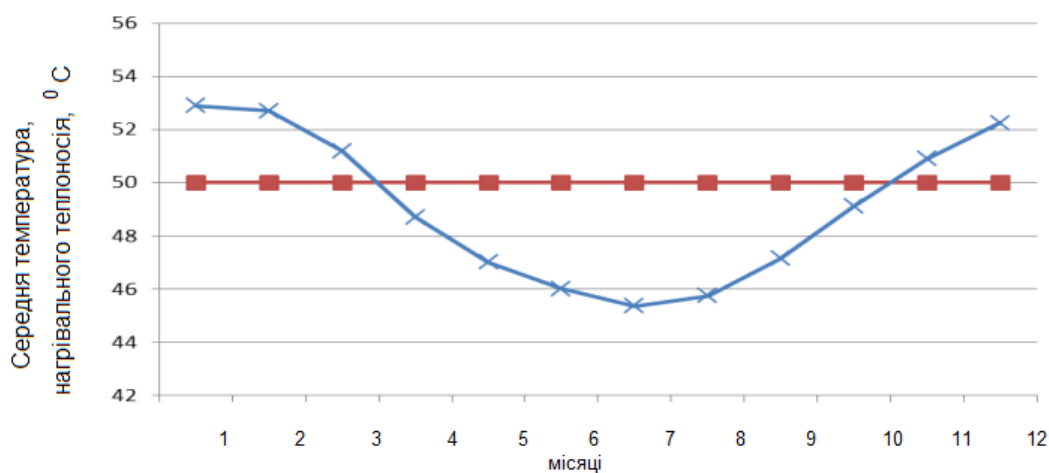


Рисунок 3.2 – Середня температура нагрівального елемента від місяців року:

- x— - з регулюванням температури;
- - без регулювання температури.

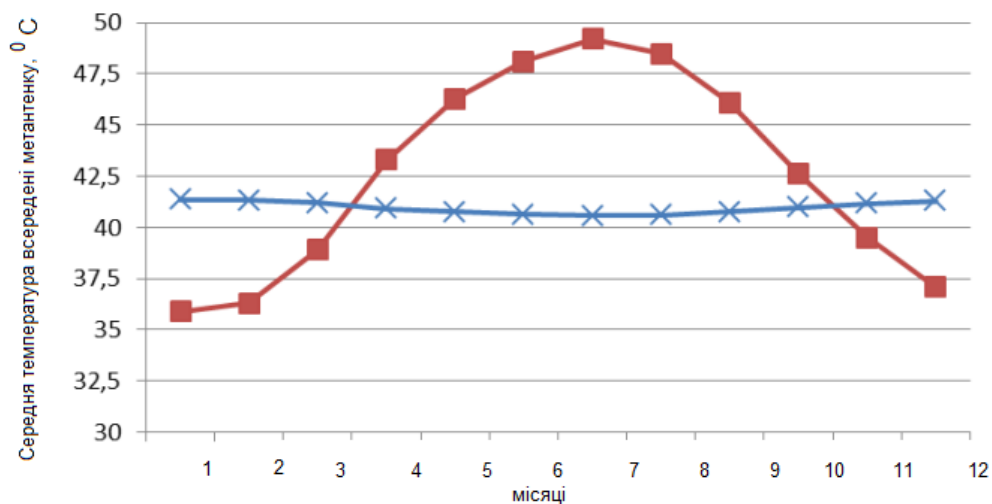


Рисунок 3.3 – Середня температури всередині біореактора від місяців року:

- x - з регулюванням температури;
- - без регулювання температури.

З графіку, що наведений на рис. 3.3 можемо побачити, що у варіанті 2 температура в біореакторі коливається на 1-2 ° C вздовж усього року, що забезпечується стабільна продуктивність життєдіяльності метаногенних бактерій та стабільний вихід біогазу. У варіанті 1 бачимо, що середня температури в біореакторі коливається від 27 до 41 ° C вздовж року. Дані коливання температури сприяють нестабільному об'єму одержуваного біогазу.

На рис. 3.4 та 3.5 наведені графіки середньодобового об'єму та середньомісячного об'єму отриманого біогазу в залежності від середньої температури вздовж усього року.

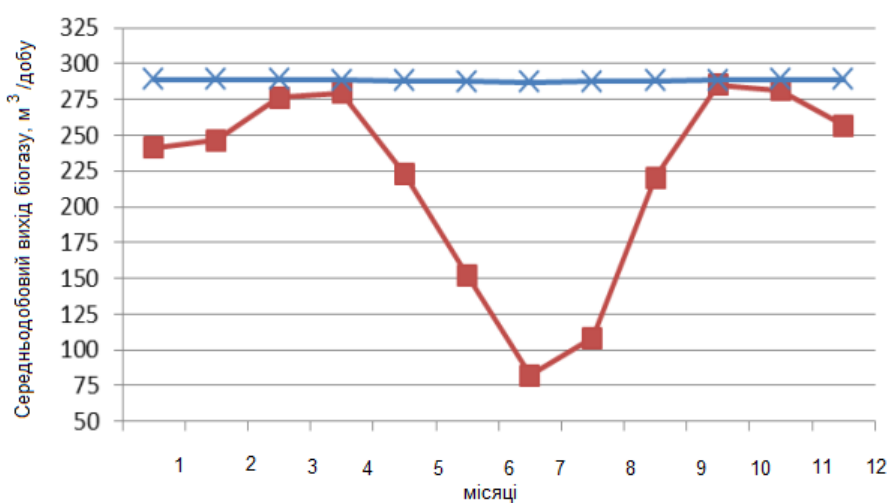


Рисунок 3.4 – Середньодобовий об'єм біогазу в залежності від місяця року:

- x - з регулюванням температури;

—■— - без регулювання температури.

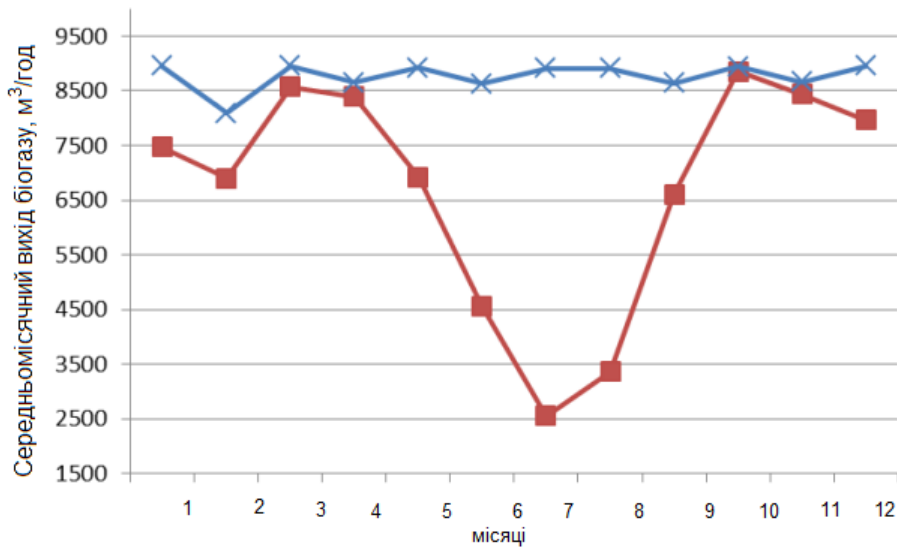


Рисунок 3.5 – Середньомісячний об'єм біогазу в залежності від місяців року:

—×— - з регулюванням температури;

—■— - без регулювання температури.

З графіків рис. 3.4. та рис. 3.5 показано, що у варіанті з регулюванням температури нагрівачого елемента забезпечується стабільне утворення біогазу упродовж всього річного циклу експлуатації.

На рис. 3.6 наведений графік теплової потужності нагріву в залежності від місяців року. У першому варіанті забезпечується постійна підтримка температури нагрівального елемента, що супроводжується постійною тепловою потужністю нагріву, що складе 12,9 кВт. Регулювання температури нагрівального елемента у варіанті 2 спричиняє збільшенню теплової потужності нагріву в весняно-осінній та зимовий періоди року.

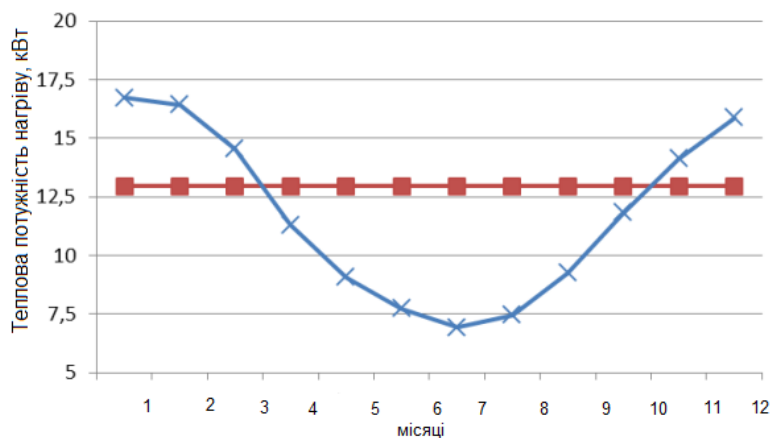


Рисунок 3.6 – Залежність теплової потужності нагріву від місяця року:

—×— - з регулюванням температури;

—■— - без регулювання температури.

Результати розрахунків встановленої потужності додаткових (сторонніх) джерел теплоти при зміні теплопровідності теплоізоляції (стінки) і зовнішньої температури повітря наведені на рис. 3.7. Розрахунки проводилися при наступних значеннях параметрів: λ_1 – коефіцієнт теплопровідності біогазового середовища, $\lambda_1=0,6$ Вт/(м·К), Δ – товщина стінки, $\Delta=0,5$ м; λ_c – коефіцієнт теплопровідності навколишнього середовища, $\lambda_c=0,022$ Вт/(м·К), H – висота реактора, $H=5$ м; R_1 – внутрішній радіус реактора, $R_1=5$ м; N_u – безрозмірний критерій Нусельта для умов теплообміну, $N_u=2$; T_1 – температурне поле всередині реактора, $T_1(0) = 45^\circ\text{C}$.

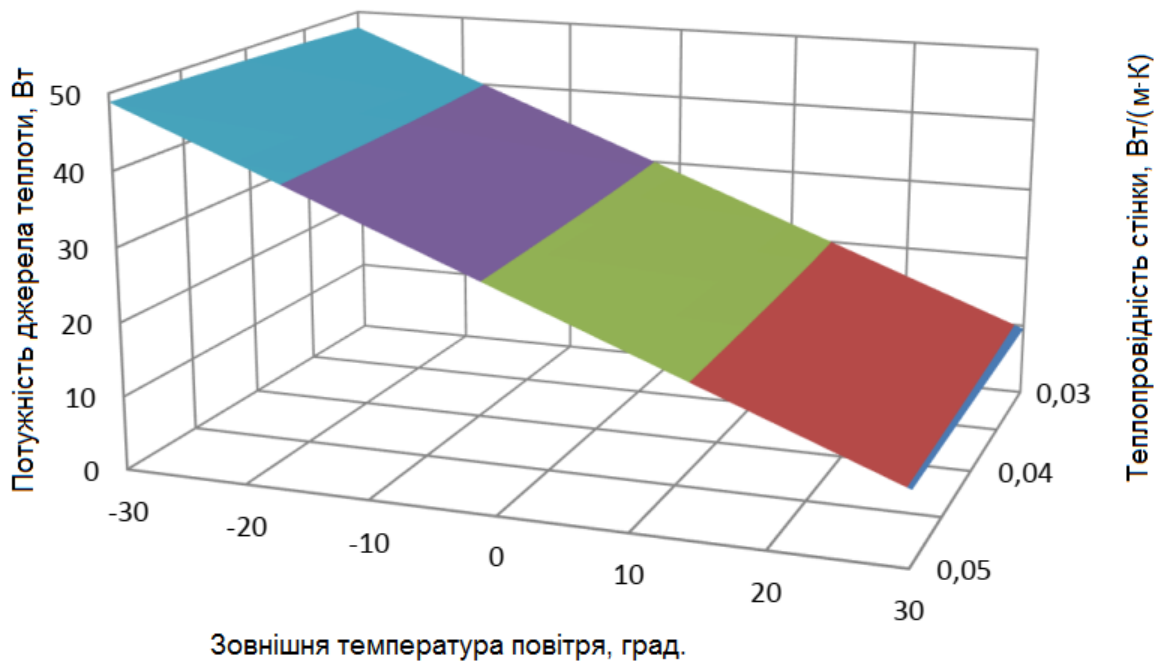


Рисунок 3.7 – Встановлена потужність додаткових джерел теплоти за зміни коефіцієнта теплопровідності стінки λ_2 та зовнішньої температури повітря T_c при $\Delta=0,5$ м.

Для визначення економічного ефекту від запропонованої інтенсифікації нагрівального елемента, визначена різниця між річним об'ємом одержуваного біогазу та річною витратою біогазу на вироблення теплоти за двома варіантами.

Таким чином, товарний об'єм біогазу по кожному з варіантів складе:

- варіант без регулювання температури:

$$V_{\text{бг1}}^T = V_{\text{бг}} - V_{\text{бг1}} = 78282,21 - 24066 = 54216,21 \text{ м}^3/\text{год};$$

- варіант з регулюванням температури:

$$V_{\text{бг2}}^T = V_{\text{бг}} - V_{\text{бг2}} = 105971,14 - 22833,8 = 83137,34 \text{ м}^3/\text{год};$$

Різниця між товарними обсягами біогазу за двома варіантами складає:

$$V_{\text{бг}}^T = V_{\text{бг2}}^T - V_{\text{бг1}}^T = 83137,34 - 54216,21 = 28921,13 \text{ м}^3/\text{год}.$$

Збільшення об'єму товарного біогазу за другим варіантом становитиме:

$$\frac{V_{\text{бг}}^T}{V_{\text{бг2}}^T} \cdot 100\% = \frac{28921,13}{83137,34} \cdot 100\% = 34,7\%. \quad (3.4)$$

Економічний ефект другого варіанта із запропонованим регулюванням температури становить:

$$E = V_{\text{бг2}}^T \cdot \left(\frac{Q_{\text{тз}}}{29,3} \right) = 83137,34 \cdot \frac{17,5}{29,3} = 49655,4 \text{ грн.}$$

Можна зробити висновок, що запропонований метод інтенсифікації температури гріючого елемента збільшує об'єм біогазу 34,7% на рік та становить 83137,34 м³/рік.

3.3. Висновки по розділу 3

Отримуваний біогаз акумулюється в газгольдері для вирівнювання коливань об'єму виходу біогазу. Запропонована методика регулювання температури гріючого елемента дозволяє досягти стабільності утворення біогазу ще на стадії проектування біогазової установки та визначити необхідний об'єм газгольдера.

ВИСНОВКИ

Запропоновано конструкцію біогазового реактора, що забезпечує безперервність процесу одержання біогазу, що підвищує ефективність переробки відходів у біогаз.

Необхідність підтримки температурного режиму в біореакторі ставить певні вимоги щодо вибору матеріалу теплоізоляції для корпусу біогазового реактора.

Для забезпечення температурного режиму визначальним є такий параметр, як коефіцієнт теплопровідності λ . Який для більшості застосовуваних теплоізоляційних матеріалів становить 0,03...0,05 Вт/м². Перепад температур між центром та внутрішньою стінкою реактора не перевищує 1°C. Однак із збільшенням товщини теплоізоляції (стінки) біореактора абсолютна температура всередині нього, хоч і несуттєво, але підвищується.

У ході хімічних реакцій, що відбуваються у біореакторі, відбувається виділення певної кількості теплоти. У той же час, при нестачі теплоти для забезпечення температурного режиму використовують підігрів маси за допомогою додаткових джерел теплоти. Як засоби додаткового підігріву можна використовувати різні теплообмінні елементи або електричні нагрівачі (ТЕНи).

Наведено результати аналізу впливу товщини Δ та теплофізичних характеристик теплоізоляції на вибір встановленої потужності рівномірно розподілених усередині робочого об'єму біореактора додаткових джерел теплоти та розподіл температури всередині біореактора. При аналізі враховувалися теплофізичні параметри теплоізоляційних матеріалів, властивих матеріалам на дерев'яній основі та пінополіуретану.

Встановлено, що при використанні методу регулювання температури нагріючого елемента вихід товарного біогазу підвищується на 34,7% для фермерського господарства. Економічний ефект із запропонованим регулюванням температури становить 49655,4 грн.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Біогазові технології. Енергетичні та екологічні аспекти [Текст]: Монографія / Ю. В. Куріс, І. Ф. Червоний. – Запоріжжя, ЗДІА, 2010. – 488 с.
2. Гелетуха Г. Г. Стан та перспективи розвитку біоенергетики в Україні / Г. Г. Гелетуха, Т. А. Железна, Ю. Б. Матвеев, М. М. Жовнір [Текст]: Науковий вісник Національного аграрного університету України. - 2004. - № 73. 131-138 с.
3. Огляд технології анаеробного перероблення органічних відходів [Текст]: Й. Мисак, Я. Гнатишин, Т. Шумський // Вісн. Нац. Ун-ту «Львів. політехніка». – 2004. - № 506: Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація. 62-67 с.
4. Рубан Б. О. Основні проблеми створення біогазових установок [Текст] / Б. О. Рубан, Г. А. Голуб, С. В. Драгнєв, О. В. Дубровіна // Науковий вісник Національного аграрного університету України. 2004. № 73. 195 -201 с.
5. Біопаливо. [Текст]. Рубан Б. О. Основні проблеми створення біогазових установок / Б. О. Рубан, Г. А. Голуб, С. В. Драгнєв, О. В. Дубровіна / / Науковий вісник Національного аграрного університету України. 2004. № 73. С. 195-201. (Технології, машини і обладнання) / [В.О. Дубровін, М.О.Корчемний, І.П. Масло та ін.]. – К. : ЦТІ «Енергетика і електрифікація», 2004.– 256 с.: іл.. 157.
6. Титаренко М.В. Енергозабезпечення підприємств АПК. К.: Кондор, 2004. 248 с.
7. Термодинамічна ефективність та ресурси рідкого біопалива України / [Г.М. Забарний, С.О. Кудря, Г.О. Четверик, Г.Г. Кондратюк.]. – К.: ІВЕ НАНУ, 2006. – 226 с.
8. Четверик Г.О. Математична модель метанового анаеробного зброджування органічних речовин при періодичному типі культивування мікроорганізмів / Г.О. Четверик // Відновлювана енергетика. – 2008. – № 1. – С. 62 – 74.
9. Кучерук П.П. Підвищення ефективності виробництва біогазу шляхом сумісного метанового бродіння гнойових відходів та силосу кукурудзи: дисертація канд. техн. наук: спец. 05.14.08. «Перетворювання відновлюваних видів енергії» / П.П. Кучерук. – К.: Інститут технічної теплофізики НАН України, 2016. – 164 с.

10. Hydrodynamic and thermal mode of bioreactor of biogas plant. *V.N. Lesnitchiy, H.A. Chetveryk*. International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology № 08 (112) 2012 PP.56-59.
11. Кудря С.О. Конструювання енергоустановок з відновлюваними джерелами енергії (курс лекцій) / С.О. Кудря, В.М. Головка. – Ніжин: Аспект-поліграф, 2005. 132 с.
12. Скляр О.Г. Основи біогазових технологій та параметри оптимізації процесу зброджування / О.Г. Скляр, Р.В. Скляр // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. – Мелітополь: ТДАТУ, 2009. – Вип. 9. – Т. 1. – С. 20 - 30.
13. Мазур К.В., Гонтарук Я.В. Перспективи розвитку виробництва біопалива в особистих селянських господарствах. Підприємство та інновації. 2022. Випуск 23. С. 32–36. DOI: <https://doi.org/10.37320/2415-3583/23.6>
14. Відновлювані джерела енергії / За заг. ред. С.О. Кудрі. Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАНУ. 2020. 392 с.
15. Відновлювані та альтернативні джерела енергії. Навчальний посібник/ І.О. Сінчук, С.М. Бойко, О.Є. Мельник,. Під ред. Д-ра техн. Наук, професора Сінчука О.М. Кременчук. 2015. 270 с.
16. <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/40815/17834.pdf?sequence=3>
17. Офіційний сайт Біоенергетичної асоціації України [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.uabio.org>