

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Львівський національний університет ветеринарної медицини
та біотехнологій імені С.З. Гжицького

Факультет харчових технологій та біотехнологій

(повна назва факультету)

Кафедра біотехнологій та радіології

(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня магістр

на тему: “Оптимізація складу поживного середовища базового
субстрату за анаеробного зброджування органічних відходів у
біогаз”

Виконав: студент 2 курсу, групи 1
спеціальності

G 21 «Біотехнологія та біоінженерія»

за ОПІ «Біотехнологія та біоенергетика»

Ішак Дмитро Ігорович

(прізвище та ініціали)

Керівники: проф. Буцяк В.І., проф. Музика В.П.

(прізвище та ініціали)

Рецензент: Філіппов С.І., директор ТзВ “БІТ”

(прізвище та ініціали)

Кваліфікаційну роботу магістра розглянуто на попередньому захисті,
протокол № від 2025 р. Допуск до захисту даної роботи в
Екзаменаційній комісії рекомендовано.

Завідувач кафедри, проф.

Василь БУЦЯК

Львів – 2025

Львівський національний університет ветеринарної медицини та
біотехнологій імені С.З. Гжицького
(повне найменування вищого навчального закладу)

Інститут, факультет, відділення факультет харчових технологій та
біотехнологій

Кафедра, циклова комісія кафедра біотехнологій та радіології

Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр

(шифр і назва)

Спеціальність G 21 «Біотехнології та біоінженерія»

ОПП Біотехнології та біоенергетика

ЗАТВЕРДЖУЮ

завідувач кафедри, голова

циклової комісії В.І.Буцяк

“ ” 2025 року

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ**

Іщака Дмитра Ігоровича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи “Оптимізація складу поживного середовища базового субстрату за анаеробного зброджування органічних відходів у біогаз”

Керівник магістерської роботи

Буцяк Василь Іванович, професор,

Музика Віктор Павлович, професор

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від 20 06 2025 року №497-4

2. Строк подання магістерської роботи 18.11.2025 року

3. Вихідні дані до магістерської роботи

Вихідні матеріали до виконання роботи: органічні відходи, анаеробна ферментація, оптимізація технологічного процесу, біогаз, аборигенні та селекційні популяції анаеробних метаногенів.

4. Зміст магістерської роботи (перелік питань, які потрібно розробити) вступ, огляд літератури, матеріал та методи досліджень, результати власних досліджень, висновки та пропозиції, додатки, список використаної літератури.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) графіки, діаграми, рисунки, технологічні схеми, технологічні лінії), рисунки: основні сировинні ресурси для одержання біогазу, логістичні рішення щодо

виробництва біогазу та його використання, основні етапи анаеробного зброджування органічних відходів, типовий механізм роботи біогазової установки, класифікація популяцій метаногенів залежно від температури ферментації, основні етапи анаеробного перетворення органічних відходів у біогаз, популяції мікроорганізмів, які беруть участь у процесі метаногенезу на різних його стадіях, пілотна БГУ, співвідношення основних гнойових субстратів для анаеробної ферментації з одержанням біогазу.

Схеми: схема БГУ для переробки органічних відходів в домашніх умовах, класична БГУ для невеликих фермерських господарств, характеристика БГУ різних об'ємів біореактора, технологічна схема біоконверсії органічних відходів у біогаз, схема експериментальних досліджень, доцільність переробки органічних відходів у біогаз, переваги та недоліки виробництва біогазу шляхом анаеробної ферментації органічних відходів АПК.

6. Консультанти розділів магістерської роботи

Розділ	Консультант ПІБ, посада	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1. Літературний огляд.	проф. Буцяк В.І.		
2. Методика експерименту та основні методи досліджень.	проф. Музика В.П.		
3. Експериментальна частина.	проф. Буцяк В.І.		
5. Висновки та пропозиції	проф. Буцяк В.І.		

7. Дата видачі завдання 10.09.2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання	примітка
1.	Літературний огляд.		
	I атестація:	06.10.25р.	30%
2.	Методика експерименту та основні методи досліджень.		20%
3.	Експериментальна частина.		35%
	II атестація:	07.11.25р.	55%
5.	Висновки та пропозиції		5%
	III атестація:	18.11.25р.	15%
	Допущено до захисту.	10.12.25р.	100%

Здобувач

_____ **Дмитро ІЩАК**
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник магістерської роботи

_____ **Василь БУЦЯК**
_____ **Віктор МУЗИКА**
(підпис) (прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ	5
АНОТАЦІЯ	6
ВСТУП	10
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ	12
1.1. Концепція безвідходної технології: світовий досвід	12
1.2. Класифікація органічних відходів як субстратів для анаеробного бродіння	15
1.2.1. Підготовка сировини до зброджування	18
1.2.2. Роль поживного середовища в анаеробному процесі	20
1.3. Біохімічні аспекти анаеробного зброджування	28
РОЗДІЛ 2. УМОВИ ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ	31
2.1. Опис технологічної схеми зброджування органічних відходів	31
2.2. Матеріал і методи дослідження	37
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ	42
3.1. Динаміка утворення біогазу залежно від співвідношення ко-субстратів у процесі їх анаеробної ферментації	42
3.1.1. Оптимізація технологічного процесу шляхом подрібнення ко-субстрату, додаванням мікроелементів та селекційних штамів-продуцентів біогазу	46
3.2. Екологічні та економічні аспекти оптимізації анаеробного перетворення органічних відходів у біогаз	50
3.2.1 Проблеми та перспективи анаеробного зброджування органічних відходів у біогаз	53
ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ	58
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	60
ДОДАТКИ	65

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АЗ – анаеробне зброджування;

АПК – агропромисловий комплекс;

БМ – біомаса;

ВДЕ – відновлювані джерела енергії;

ВРХ – велика рогата худоба;

ЗТ - «зелений» тариф;

КОВ – комунальні органічні відходи;

ЛЖК – леткі жирні кислоти;

ПГ – парникові гази;

СР – вміст сухої речовини;

ТПВ – тверді побутові відходи;

VOS – вміст летких органічних речовин.

АНОТАЦІЯ

Робота виконана на 67 сторінках. Структура кваліфікаційної роботи: вступу, огляду літератури, опис методів проведення досліджень, власні досліджень, висновків та пропозицій, списку використаної літератури та додатків. Опрацьовано 46 джерел, містить 27 рисунків, 5 таблиць та 3 додатки.

Ключові слова: органічні відходи, анаеробна ферментація, оптимізація технологічного процесу, біогаз, аборигенні та селекційні популяції анаеробних метаногенів.

Упродовж виконання кваліфікаційної роботи на тему: «Оптимізація складу поживного середовища базового субстрату анаеробного зброджування органічних відходів у біогаз» було проаналізовано широкий спектр наукових джерел, сучасних підходів і практичних рішень у сфері перетворення органічних відходів в енергоносії за допомогою мікробіологічних процесів. Здобуті результати дозволяють зробити низку ґрунтовних висновків, які мають як наукове, так й практичне значення.

Дослідження біохімічних аспектів процесу вказує на його складність та мультистадійність. Анаеробне зброджування охоплює гідроліз макромолекул, ацидогенез із утворенням летких жирних кислот, ацетогенез з трансформацією кислот у оцтову кислоту та водень, і, зрештою, метаногенез – фінальний етап, у якому утворюється метан як головний компонент біогазу. Кожен із цих етапів опосередкований специфічними мікроорганізмами, які потребують унікального поживного оточення. Тому оптимізація поживного середовища сприяє активації ключових ферментативних реакцій, підвищенню толерантності мікроорганізмів до токсичних речовин, стабільності рН та температурного режиму.

Об'єкт дослідження – технологічний процес анаеробного зброджування органічних відходів з утворенням біогазу.

Предмет дослідження – біохімічні параметри складу поживного середовища субстрату, що визначають ефективність анаеробної біоконверсії.

Метою роботи – наукове обґрунтування принципів оптимізації складу поживного середовища базового субстрату для забезпечення стабільної, ефективної та інтенсивної біоконверсії органічних відходів у біогаз із максимальним виходом метану.

Для вирішення контексту даної проблеми поставлені наступні **завдання:**

- проаналізувати наукові джерела щодо впливу складу поживного середовища на процес анаеробного зброджування;
- визначити критичні показники складу органічних відходів, що впливають на метаногенез.
- дослідити роль мікроелементів у стабілізації метаногенної активності.
- встановити оптимальні значення співвідношення C/N/P у субстраті для підтримання біохімічної рівноваги.
- розробити практичні рекомендації щодо модифікації складу субстрату шляхом додавання поживних компонентів або коферментації.
- обґрунтувати потенційну екологічну та енергетичну ефективність застосування оптимізованих субстратів у різних виробничих умовах.

Актуальність теми. Вичерпність традиційних енергетичних ресурсів, таких як нафта, вугілля та природний газ, а також постійне зростання рівня забруднення довкілля, зумовлюють необхідність впровадження альтернативних джерел енергії. Особливо актуальною стає потреба у розвитку відновлюваних, екологічно чистих та енергоефективних

технологій, що дозволяють одночасно вирішувати дві стратегічні задачі: утилізацію органічних відходів та виробництво енергії.

У цьому контексті анаеробне зброджування органічної біомаси виступає однією з найперспективніших технологій. Воно базується на природних біологічних процесах, які реалізуються завдяки діяльності консорціуму спеціалізованих мікроорганізмів у безкисневому середовищі, що призводить до утворення біогазу – суміші метану (CH_4), вуглекислого газу (CO_2), водню (H_2), сірководню (H_2S) та інших домішок. Важливо підкреслити, що біогаз є універсальним енергоносієм, який можна використовувати для виробництва електроенергії, тепла, або як моторне паливо після очищення (біометан).

Науковий внесок роботи. Запропоновано системний підхід до оптимізації поживного середовища шляхом врахування синергетичної дії елементів мікробного консорціуму. Обґрунтовано важливість адаптивного підходу до субстратного складу залежно від типу та походження відходів. Встановлено критичні рівні мікроелементів для підтримання ферментативної активності ключових метаногенних груп (Methanosaeta, Methanosarcina, Methanobacterium тощо). Показано можливість коферментації з побічними продуктами харчової промисловості для підвищення метанового виходу до 20-35 %.

Практична цінність роботи.

Результати дослідження можуть бути використані:

- у проектуванні та модернізації біогазових установок різного масштабу – від фермерських до муніципальних;
- у розробці стратегій управління відходами агропромислового комплексу, харчової та переробної промисловості;
- як науково-методичне підґрунтя для освітніх програм, курсів та практичних тренінгів з біоенергетики;

- у формуванні політики сталого розвитку енергетичного сектору, зокрема на локальному рівні громад.

ВСТУП

У ХХІ столітті питання енергетичної безпеки, раціонального природокористування та екологічної стабільності набули виняткового значення як в локальному, так й у глобальному контексті. Вископні джерела енергетичних корисних копалин із кожним роком різко зменшуються, а попит на енергоресурси постійно зростає. Тому, важливо розробляти і використовувати технології, які можуть забезпечити виробництво альтернативних джерел енергії, зокрема, біоконверсію органічних відходів у біогаз [1].

Досліджено, що органічні відходи – це високопотенційна, доступна і поновлювана сировина для виробництва біогазу. До таких відходів належать харчові рештки, сільськогосподарські залишки, стічні води, гній, силос, зелені добрива та побутові органічні компоненти. Але для ефективного анаеробного зброджування недостатньо лише правильно підібрати сировину – ключовим чинником виступає її якісна підготовка, зокрема збагачення поживним середовищем, яке забезпечує оптимальні умови для метаболізму мікроорганізмів-метаногенів.

Разом із тим, ефективність біогазового процесу значною мірою залежить не лише від технологічних умов (температури, гідравлічного часу утримування, рН), але й від біохімічного складу субстрату, який слугує джерелом енергії та поживних речовин для мікробних популяцій. Досвід показує, що використання неадаптованого чи незбалансованого за складом органічного матеріалу призводить до пригнічення активності мікроорганізмів, зниження швидкості зброджування, накопичення інгібіторів (аміаку, летких жирних кислот), коливань у виході біогазу і деградації системи в цілому [2].

Основні технологічні проблеми пов'язані з тим, що більшість органічних відходів (гній, пташиний послід, харчові залишки, рослинні рештки, жири та ін.) мають нерівномірний склад, дефіцит або надлишок окремих елементів, а також несприятливе співвідношення вуглецю до азоту

(C/N). Зокрема, надлишок азоту спричиняє накопичення амонійного азоту, який має токсичну дію на метаногени. Водночас, нестача макро- (P, S, Mg, Ca) або мікроелементів (Fe, Co, Ni, Se, Zn тощо) значно уповільнює метаногенез, оскільки багато ферментативних систем мікроорганізмів є металозалежними [3].

Тому ключовим напрямом підвищення ефективності анаеробного зброджування є оптимізація складу поживного середовища субстрату, зокрема [4]:

- балансування макро- та мікроелементного складу;
- корекція C/N/P співвідношення;
- коферментація відходів з додатковими компонентами (гліцерин, целюлоза, кукурудзяний силос, відходи спиртового виробництва тощо).

З урахуванням вищезазначеного, актуальність теми даного дослідження є очевидною, особливо в умовах:

- розвитку циркулярної економіки;
- переходу до вуглецево нейтральних джерел енергії;
- впровадження ресурсоефективних екобіотехнологій у сільське господарство, промисловість і ЖКГ.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1. Характеристика основних технологічних параметрів анаеробного зброджування органічних відходів

Анаеробне зброджування органічних відходів є однією з найбільш перспективних і екологічно безпечних біотехнологій для виробництва біогазу – поновлюваного джерела енергії, який складається переважно з метану (CH_4) і вуглекислого газу (CO_2). У сучасній науковій літературі велика увага приділяється як загальним аспектам процесу метаногенезу, так і деталям, зокрема, поживному складу субстратів, буферним системам, співвідношенню вуглецю та азоту (C:N), а також мікробіологічним параметрам.

Поживне середовище є критичним фактором, що безпосередньо впливає на швидкість, стабільність та ефективність анаеробного зброджування. За даними досліджень Angelidaki та Ellegaard (2003), успішне функціонування біореактора значною мірою залежить від балансу макро- і мікроелементів у субстраті. Основними елементами, які необхідні мікроорганізмам для біосинтезу клітинних компонентів, є вуглець, азот, фосфор, сірка, а також мікроелементи: залізо, кобальт, нікель, магній, марганець тощо [5].

Згідно з результатами досліджень Vintilă et al. (2010), дефіцит мікроелементів призводить до зниження метаногенезу, а надлишок – до токсичності для метаногенних бактерій. Це свідчить про необхідність точного регулювання складу поживного середовища.

Співвідношення вуглецю до азоту (C:N) є ключовим індикатором для оцінки потенційної метаногенності субстрату. Згідно з результатами досліджень Zeshan et al. (2012), оптимальне співвідношення C:N має становити 20-30:1. Якщо співвідношення менше, надлишковий азот утворює аміак, що інгібує метаногенез; якщо більше – виникає нестача азоту для побудови клітинної біомаси.

Дослідження проведені Shen et al. (2015) на основі ко-зброджування кухонних і рослинних відходів показали, що регулювання C:N

співвідношення шляхом додавання матеріалів з високим вмістом азоту (наприклад, гною) значно підвищує продуктивність біогазу [6].

Багато авторів (Mata-Alvarez et al., 2014; Zhang et al., 2013) вказують на переваги застосування ко-субстратів, тобто змішування різних типів органічних відходів. Такий підхід дозволяє збалансувати поживний склад, зокрема, вирівняти C:N співвідношення, підвищити вміст необхідних мікроелементів, знизити інгібування аміаком, сірководнем або довголанцюговими жирними кислотами.

Також відомі приклади успішного використання ко-субстратів: залишки пивоваріння + гній, фруктові відходи + пташиний послід тощо. Наприклад, у роботах Silvestre et al. (2011) зазначено, що при додаванні курячого посліду до силосу кукурудзи вихід біогазу зріс майже на 25%.

Стабільність рН є критичним фактором для підтримання активності мікробної консорції. Оптимальний діапазон рН для метаногенних архей становить 6.8-7.4 (Liu et al., 2008). Нестача буферних речовин у середовищі призводить до закислення (через накопичення летких жирних кислот), що викликає зниження активності метаногенів [7].

З цією метою рекомендується додавання бікарбонату натрію, золи або інших лужних речовин, які допомагають стабілізувати рН. У роботі Punal et al. (2000) зазначено, що навіть незначне зниження рН до 6.5 може зменшити вихід метану на 30-40%.

Хоча ці параметри не є складовою "поживного середовища", їх взаємодія з поживними факторами істотно впливає на метаболічну активність мікроорганізмів. Наприклад, при термофільному режимі (55°C) потреба в мікроелементах зростає, оскільки прискорюються всі біохімічні реакції. Як показано в роботах Bouallagui et al. (2005), одночасна оптимізація складу середовища і температурного режиму дозволяє досягти максимального виходу біогазу.

В українській науковій літературі значна увага приділяється питанням адаптації технологій анаеробного зброджування до місцевих умов. Зокрема,

дослідження проведені в Інституті біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН (Мороз О. І., 2019) та НУБіП (Коваленко С. Ю., 2020) акцентують увагу на використанні соломи, гною, харчових та агропромислових відходів, як потенційних джерел субстратів.

Також досліджується застосування біоактивних добавок, ферментів та попередньої обробки лігноцелюлозної біомаси для покращення біодоступності поживних речовин (Плахотнюк В. М., 2021).

Аналіз наукових джерел свідчить, що оптимізація складу поживного середовища є одним із найважливіших аспектів у процесі анаеробного зброджування органічних відходів. Від балансу макро- та мікроелементів, співвідношення C:N, буферних систем та ко-субстратної стратегії залежить продуктивність, стабільність та економічна доцільність біогазових установок. Подальші дослідження в цьому напрямку повинні базуватися на інтеграції хімічного складу субстратів, мікробіологічного аналізу та математичного моделювання для розробки універсальних схем оптимізації [8].

1.2. Класифікація органічних відходів як субстратів для анаеробного бродіння

Анаеробне зброджування (АЗ) є перспективною технологією перетворення органічної сировини на відновлювану енергію у вигляді біогазу. Однак ключовим фактором ефективності цього процесу є якісний і збалансований вибір сировини. Органічні відходи – це надзвичайно різномісна група матеріалів, що утворюються в результаті сільськогосподарської, харчової, комунальної, побутової, промислової та біотехнологічної діяльності. Вони містять значну кількість біоорганічних сполук – білків, вуглеводів, ліпідів, целюлози, геміцелюлози та лігніну, які можуть бути використані як поживна основа для мікроорганізмів, залучених до процесу метаногенезу (рис.1.1).

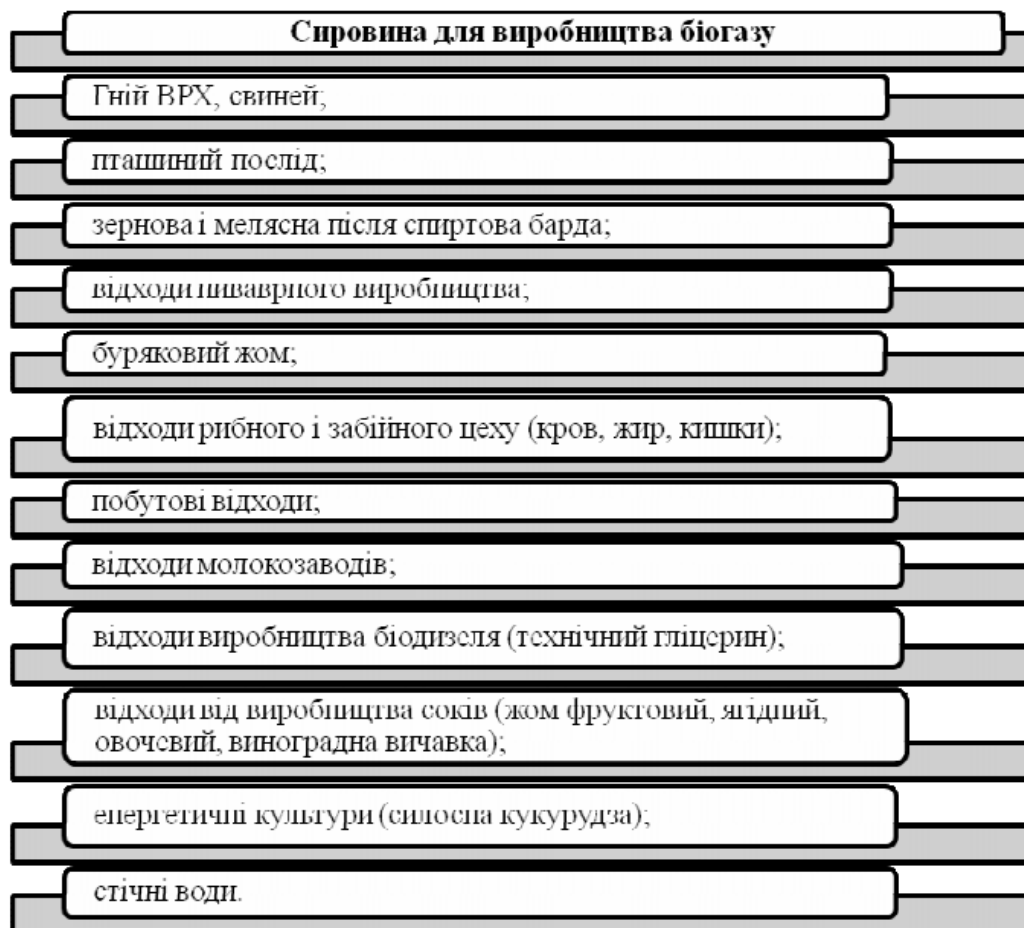


Рис. 1.1. Основні сировинні ресурси для одержання біогазу [9].

Сільськогосподарські відходи: сюди відносять гній та послід тварин, залишки кормів, соломку, ботву, лушпиння, відходи молочного та м'ясного виробництва. Вони є цінним джерелом азоту, фосфору та мікроелементів, але мають нерівномірне співвідношення C:N, що вимагає попереднього балансування або змішування з іншими субстратами.

Харчові та харчопереробні відходи: це – фрукти, овочі, м'ясні обрізки, хлібобулочні вироби, жири, олії, залишки напоїв. Їх перевага полягає у високій біодоступності вуглеводів та ліпідів, які швидко зброджуються, але при цьому можливе виникнення інгібіції через високі концентрації жирних кислот [10].

Комунальні органічні відходи (КОВ): біоорганічна фракція твердих побутових відходів (ТПВ) включає харчові рештки, папір, деревину, органічні тканини. Їх застосування у біогазових установках потребує ретельного сортування та попередньої обробки (подрібнення, гідролізу, пастеризація).

Відходи харчових та біотехнологічних виробництв: до них належать барда, меляса, фільтраційні шлами, відходи пивоваріння, відходи виробництва дріжджів, кисломолочних продуктів тощо. Ці матеріали можуть бути використані без значної попередньої обробки, але потребують контролю кислотності та іонного складу.

Відходи целюлозно-паперової промисловості та деревини: містять значні обсяги целюлози та лігніну. Висока стійкість лігноцелюлозних структур до ферментативного розкладу вимагає попередньої хімічної або фізико-хімічної підготовки (наприклад, лужного гідролізу або парового вибуху).

Ключовими показниками, які визначають ефективність використання відходів у біогазових системах, є [11]:

- співвідношення C:N – оптимальне значення становить 20:1 – 30:1. Надлишок азоту може призводити до утворення аміаку, що інгібує метаногенез; дефіцит – до зниження активності мікробної біомаси.

- вміст сухої речовини (СР) – відходи з вмістом СР до 15–20% придатні для «мочної» ферментації, тоді як при більшій концентрації застосовують «сухе» зброджування.
- вміст летких органічних речовин (VOS) – показник визначає потенціал газоутворення; чим більше VOS, тим вища вихідна енергетична цінність.
- зольність – надмірна мінералізація (особливо у відходах з великим вмістом піску чи ґрунту) може ускладнювати процес біоконверсії.

1.2.1. Підготовка базового субстрату до зброджування

Перед введенням у біореактор органічні відходи повинні пройти стадії попередньої підготовки: подрібнення – для збільшення площі поверхні впливу ферментів; гомогенізація – вирівнювання консистенції, зменшення відмінностей у рН та концентрації; гідроліз – особливо для лігноцелюлозних субстратів, де застосовують кислотний, лужний, ензиматичний або термохімічний гідроліз, а також регулювання С:N співвідношення – змішування високовуглецевої сировини (наприклад, солома) з азотовмісними компонентами (гній, барда) та стерилізація або пастеризація – у разі роботи з патогеновмісними відходами (біомаса м'ясної промисловості, фекалії) [12].

Застосування ко-зброджування, тобто змішування кількох видів сировини, дозволяє [13]:

- оптимізувати С:N співвідношення;
- стабілізувати рН середовища;
- підвищити газоутворення;
- зменшити ризик інгібування окремими токсичними

компонентами.

Наприклад, ефективне поєднання – гній ВРХ (джерело азоту) + кукурудзяний силос (вуглецева основа) + харчові відходи (висока швидкість зброджування).

Проблемою є сезонність деяких відходів (наприклад, фруктові жом, овочеві залишки), що потребує створення систем зберігання (силосування, сушіння) або контракування постачання з різних джерел. Крім того, важливими є транспортні витрати, ступінь водонасичення сировини (висока вологість ускладнює транспортування), та близькість джерела відходів до біогазової установки (рис. 1.2).

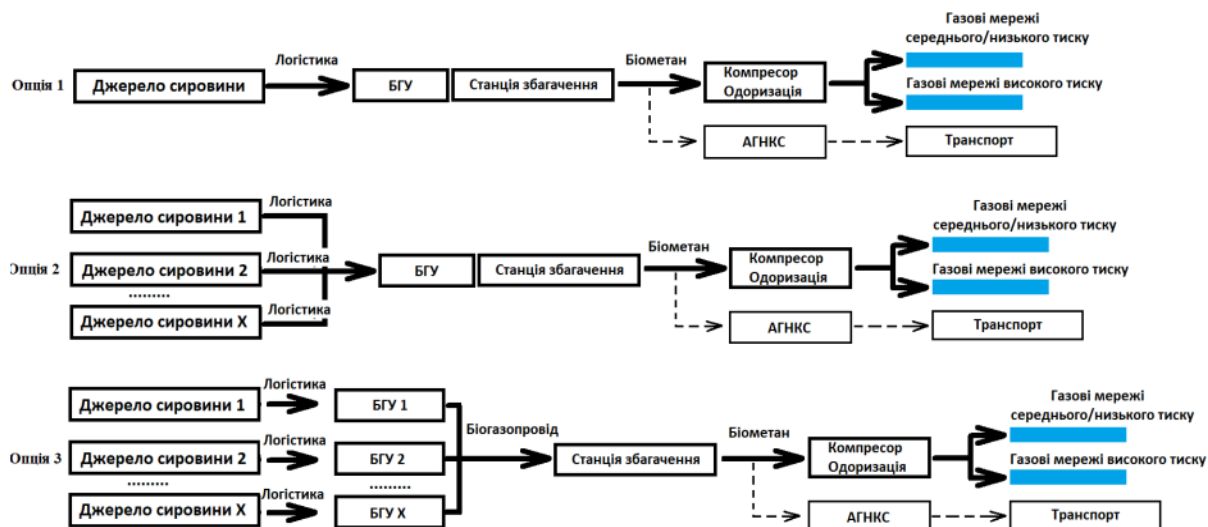


Рис. 1.2. Логістичні рішення щодо виробництва біогазу та його використання [14].

Органічні відходи є багатофункціональним і потенційно високоефективним джерелом для анаеробного зброджування. Проте для забезпечення стабільності процесу, максимізації біогазового виходу та попередження інгібіторних ефектів необхідне ретельне дослідження їх фізико-хімічних властивостей, правильне співвідношення субстратів та адаптація системи під конкретний тип відходів. Таким чином, вибір і підготовка сировини є першим ключовим етапом у напрямку оптимізації поживного середовища для мікробних консорціумів у процесі метаногенезу [15].

1.2.2. Роль поживного середовища в анаеробному процесі

Анаеробне зброджування – складний біохімічний процес, у якому за відсутності кисню мікроорганізми розкладають органічні речовини з утворенням біогазу (в основному метану й вуглекислого газу) та дигестату. Ефективність цього процесу залежить від великої кількості факторів, серед яких ключовим є якісний склад поживного середовища, що визначає активність та життєздатність мікробної спільноти [16].

Поживне середовище у контексті анаеробного зброджування – це сукупність органічних і неорганічних компонентів, які забезпечують енергетичні, структурні та метаболічні потреби мікроорганізмів-продуцентів біогазу. Воно має підтримувати належні умови для чотирьох основних етапів процесу: гідролізу; кислотогенезу; ацетогенезу та метаногенезу (рис. 1.3).

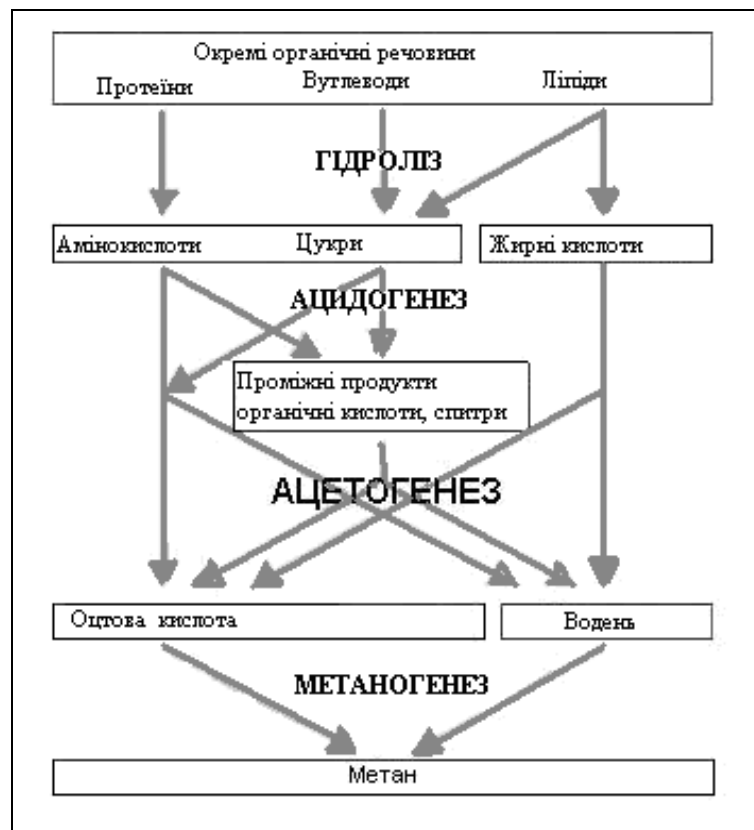


Рис. 1.3. Основні етапи анаеробного зброджування органічних відходів [17].

Кожен з етапів вимагає певного спектру поживних речовин, мікроелементів, буферних властивостей і стабільних фізико-хімічних параметрів (рН, температури, співвідношення С:N:P тощо).

До основних компонентів поживного середовища для метанового бродіння є [18]:

1. Макроелементи: Карбон (C) – основний енергетичний та структурний компонент, джерелом якого є органічні відходи; Нітроген (N) – необхідний для синтезу білків, амінокислот, ферментів. Його дефіцит або надлишок негативно впливає на рН і мікробну активність та Фосфат (P) – входить до складу нуклеїнових кислот, АТФ та фосфоліпідів.

2. Мікроелементи: метали, такі як залізо (Fe), нікель (Ni), кобальт (Co), молібден (Mo), цинк (Zn), мідь (Cu), є кофакторами ферментів, що беруть участь у метаногенезі та попередніх стадіях. Їх нестача може призвести до зниження швидкості біогазоутворення або повної зупинки процесу.

3. Буферні системи: важливу роль відіграє лужна ємність середовища, що дозволяє підтримувати рН у межах 6.8-7.4 – оптимального діапазону для метаногенних архей. Найчастіше використовують карбонатні та фосфатні буфери.

4. Співвідношення C:N:P: оптимальне співвідношення вуглецю до азоту до фосфору (C:N:P) є критичним для метаболічного балансу мікроорганізмів: ідеальне співвідношення: 100:5:1, надлишок Карбону – уповільнення зростання мікрофлори, а надлишок Нітрогену – утворення токсичного амоніаку. У разі надлишку азоту додають багаті на вуглець речовини: солому, тирсу, харчові відходи. Для корекції фосфору можна вносити фосфоритне борошно або суперфосфат.

Невідповідне співвідношення викликає ацидоз, інгібування мікрофлори, коливання рН, що порушує стабільність зброджування.

До складу органічних відходів можуть входити токсиканти, що інгібують мікробіоту: антибіотики, важкі метали, фенольні сполуки, пестициди. Поживне середовище повинно бути адаптоване до таких речовин або ж необхідна їхня попередня нейтралізація / детоксикація [20].

Ефективне анаеробне зброджування органічних відходів потребує збалансованого складу поживного середовища, що забезпечує належну активність мікроорганізмів на всіх етапах метаболічного циклу. Оптимізація складу цього середовища дозволяє покращити якість, кількість і швидкість утворення біогазу, мінімізувати ризики інгібування та підвищити стабільність процесу [21].

Для оптимізації ферментування поживного середовища рекомендують проводити змішування декількох типів відходів, що дозволяє вирівняти дисбаланс поживних елементів та компенсує дефіцит окремих компонентів (рис.1.4).



Рис.1.4. Типовий механізм роботи біогазової установки [22].

Наприклад, зброджування харчових відходів з гноєм або послідом забезпечує оптимальне співвідношення C:N, опале листя + гній = баланс C:N,

харчові відходи + кукурудзяний силос = покращена біодоступність Карбону,
стічні води + агропромислові відходи = розведення інгібіторів (рис. 1.5).

Косубстрат	Співвідношення	Основні параметр	V (CH ₄) на 1 г СР
кукурудзи			
Гній ВРХ/ солома пшениці	90:10	V=1,5 дм ³ T=35±1 °C	145±9
	80:20		159±19
	70:30		213±17
	60:40		188±19
Гній ВРХ/ячмінна солома	80:20 (об'ємне співвідношення)	V=100 дм ³ T=35 °C	160±5
Гній ВРХ/кормовий буряк	83:17	V=20 дм ³ T=35 °C	400±20
Гній ВРХ/відходи фруктів та овочів	80:20	V=18 дм ³ T=35±0,5 °C	380±19
	70:30		340±17
	60:40		380±19
	50:50		450±22,5
Органічні харчові відходи/ гній ВРХ	25:75	V=2 дм ³ T=30±8 °C	107±5,4
	50:50		128±6,4
	75:25		147±7,4
Донні водорості/відходи паперу	25:75	V=4 дм ³ T=35±1 °C	968±73
	50:50		1170±75
	75:25		317±114
Відходи деревини/гній ВРХ	67:33	V=1 дм ³ T=35±1 °C	388±19,4
	67:33		317±15,9
Гній ВРХ/відходи картоплі	75:25	V=0,25 дм ³ T=35±1 °C	277,7±11,4
Гній ВРХ/відпрацьована олія	75:25		360,6±18,0
Гній ВРХ/сироватка	75:25		252,4±12,6

Рис.1.5. Вихід біогазу залежно від співвідношення косубстратів [24].

Вводити мікроелементи, в основному Fe, Co, Ni, Mo, Zn, Se, у вигляді мікроелементних сумішей, часто з хелатованими формами металів. Вони є

кофакторами для ферментів метаногенезу, особливо для метил-коензим редуктази. Доза має бути точно підібрана, оскільки передозування викликає інгібування.

Необхідно регулювати рН (рН у межах 6.8-7.4 забезпечує стабільну роботу метаногенів) шляхом використання буферних речовин: використовувати вапнякове борошно, кальциновану соду, гідрокарбонати (наприклад, NaHCO_3), золу, яка одночасно є джерелом калію, кальцію, фосфору для корекції кислотності [23].

Попередньо обробляти субстрати шляхом фізико-хімічної або біологічної деструкція складних речовин (целюлози, лігніну), що полегшує доступ ферментів. На даний час використовують наступні методи обробки субстратів [25]:

- механічне подрібнення – зменшує розмір частинок, збільшуючи поверхню для мікробної дії;
- термічну обробку – руйнує складні структури, зокрема лігнін;
- хімічну обробку (лужна або кислотна) – підвищує гідроліз органіки;
- біологічна обробка – ферментативна деструкція з використанням специфічних ензимів або мікроорганізмів (наприклад, грибів роду *Trichoderma*).

Важливе значення також має регулювання вологості базового субстрату. Оптимальний рівень вологості: 60-85% (залежно від типу біореактора). Недостатня вологість уповільнює метаболізм мікроорганізмів. Надлишкова – може викликати розбавлення поживного середовища і зниження буферної ємності.

Температура зброджування впливає на швидкість метаболізму й розчинність поживних компонентів: мезофільний режим (35-38 °C) – стабільний, економічно вигідний; термофільний (50-55 °C) – пришвидшене зброджування, але потребує кращої стабілізації середовища (рис.1.6).

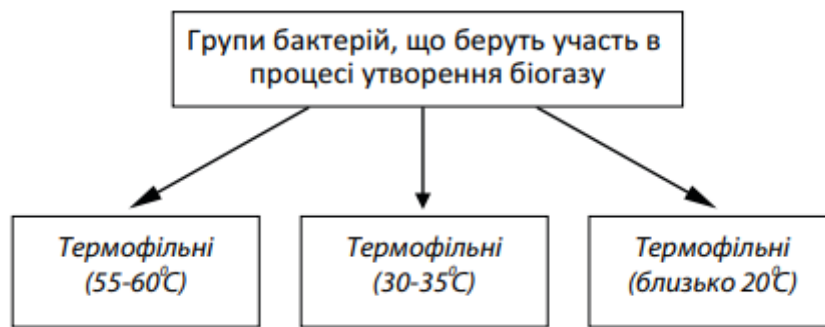


Рис.1.6. Класифікація популяцій метаногенів залежно від температури ферментації [26].

Для оптимізації технологічного процесу одержання біогазу використовують біодобавки (ензимні препарати, амінокислоти, гумати, які активують мікробіоту) та інокулятори (мікробні консорціуми (Methanobacterium, Methanococcus, Methanosarcina, Methanothrix, Methanocorpusculum, Methanobrevibacteria, Methanopyrus), які запускають процеси ферментації або підвищують ефективність існуючої мікрофлори.

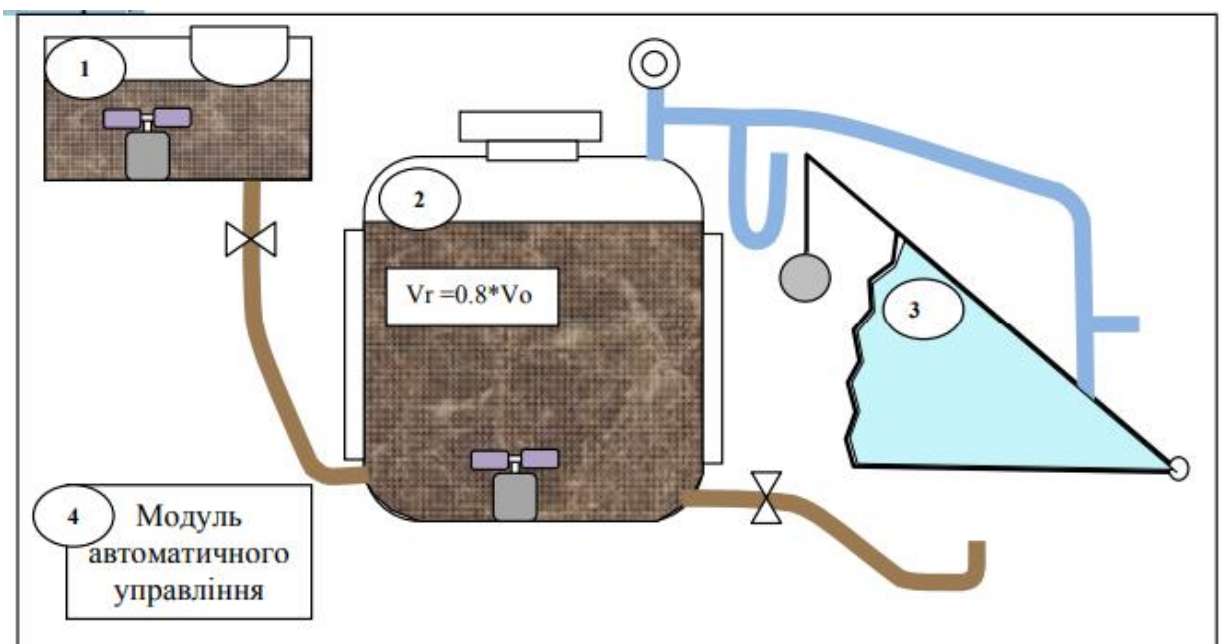


Рис. 1.7. Схема БГУ для переробки органічних відходів в домашніх умовах [27].

Важливе значення для підвищення ефективності анаеробного зброджування органічних відходів, в першу чергу, відходів сільського

господарства необхідно проводити вдосконалення біогазових установок як для приватного так й для промислового виробництва біогазу (рис. 1.7-1.9).

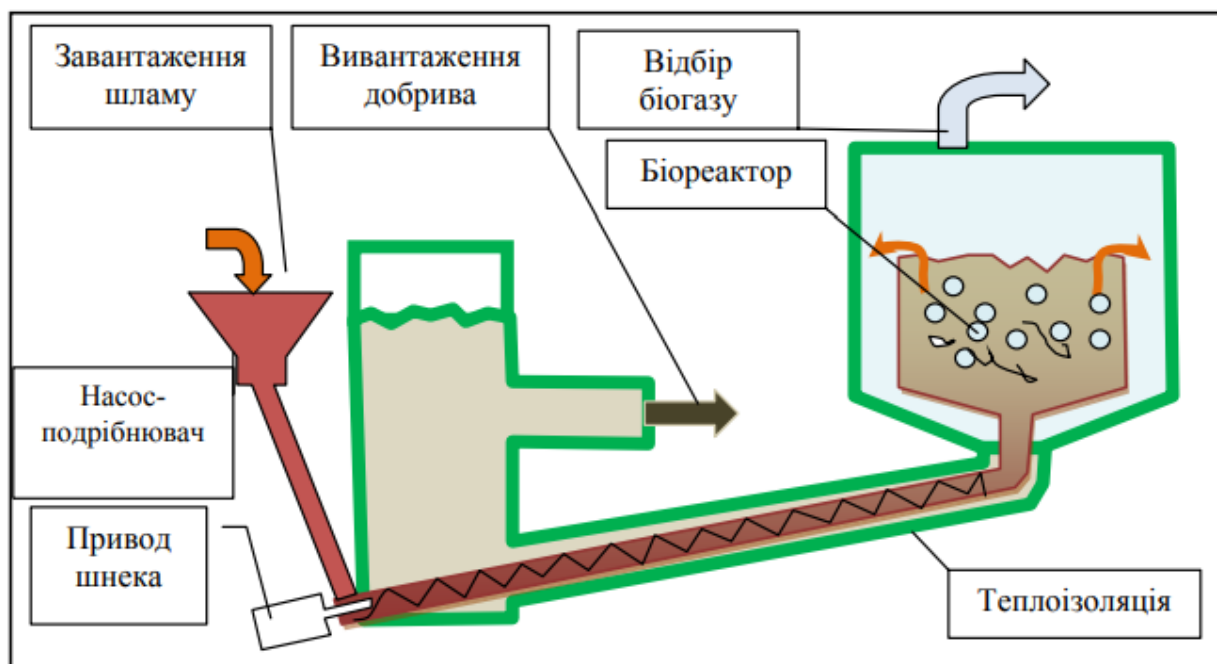


Рис. 1.8. Класична БГУ для невеликих фермерських господарств

Об'єм реактора, м ³	3	5	8
Висота, мм	1600	2075	2200
Діаметр, мм	1630	1830	2230
Виробництво газу, м ³ /сутки	3 – 6	5 – 10	8 – 16
Виробництво добрив, літрів /добу	120	200	320

Три схематичні рисунки біогазових установок різної ємності: 3 м³, 5 м³ та 8 м³. Кожен рисунок показує біореактор, насос, систему газопроводів та вивантаження.

Рис. 1.9. Характеристика БГУ різних об'ємів біореактора [27].

З метою контролю ефективності процесу метаногенезу використовують: газовий аналіз (вміст CH₄, CO₂, H₂S); аналіз хімічного складу субстрату (C:N:P, вміст летких жирних кислот); біохімічні індикатори

(pH, лужність, RedOx-потенціал); мікробіологічний моніторинг (кількість та активність ключових груп мікроорганізмів) [28].

Оптимізація складу поживного середовища є ключовим напрямом для підвищення ефективності анаеробної біоконверсії органічної біомаси. Комбінація науково обґрунтованих методів – від балансування елементів до застосування інокулятів – дозволяє не лише отримати більший вихід біогазу, а й забезпечити стабільність і економічну доцільність процесу.

Таким чином, поживне середовище – це не просто база для зростання мікроорганізмів, а регуляторний фактор, що визначає ефективність та стабільність процесу анаеробного зброджування. Його ретельна оптимізація є необхідною умовою високої продуктивності біогазової установки та якості кінцевого продукту – метану й дигестату [29].

В огляді літератури було встановлено, що органічні відходи – це високопотенційна, доступна і поновлювана сировина для виробництва біогазу. До таких відходів належать харчові рештки, сільськогосподарські залишки, стічні води, гній, силос, зелені добрива та побутові органічні компоненти. Але для ефективного анаеробного зброджування недостатньо лише правильно підібрати сировину – ключовим чинником виступає її якісна підготовка, зокрема збагачення поживним середовищем, яке забезпечує оптимальні умови для метаболізму мікроорганізмів-метаногенів.

1.3. Біохімічні аспекти анаеробного зброджування

Анаеробне зброджування – це складний біохімічний процес, у якому мікроорганізми за відсутності кисню розкладають органічні речовини з утворенням біогазу (переважно метану та вуглекислого газу) та залишкового матеріалу – дигестату. Цей процес є ключовим у біоконверсії органічних відходів у відновлюване джерело енергії. Для забезпечення ефективності цього процесу необхідно розуміти і контролювати біохімічні механізми, які лежать в його основі [30].

Процес анаеробного зброджування включає чотири основні біохімічні стадії (рис. 1.10):

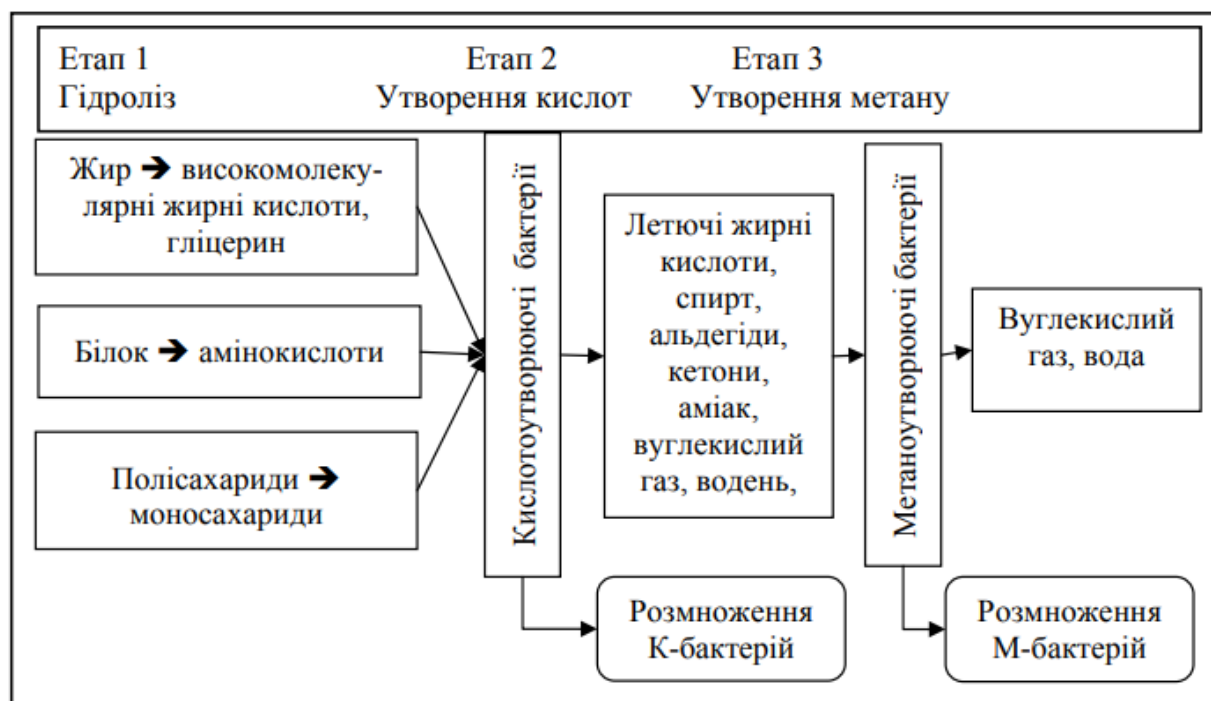


Рис. 1.10. Основні етапи анаеробного перетворення органічних відходів у біогаз [31].

1. Гідроліз – це початковий етап, під час якого складні біополімери, такі як вуглеводи (целюлоза, геміцелюлоза), білки та ліпіди, розкладаються до простіших мономерів (цукри, амінокислоти, жирні кислоти) за участю екзоферментів, що виділяються гідролітичними бактеріями. Це обов’язковий етап для біоконверсії складної сировини, зокрема лігноцелюлозної.

2. Ацидогенез (кислотоутворення) – гідролізовані продукти перетворюються в леткі жирні кислоти (ЛЖК), спирти, водень, аміак, сірководень. Цей процес відбувається завдяки діям кислотогенних бактерій. Водночас утворюються побічні метаболіти, які можуть пригнічувати наступні етапи, якщо їх концентрація надмірна ($\text{CH}_3\text{COOH} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{CO}_2$).

3. Ацетогенез – ЛЖК та спирти далі розщеплюються до оцтової кислоти, вуглекислого газу та водню за участю ацетогенних бактерій. Цей етап критично важливий, оскільки лише ацетат і водень є прямими субстратами для метаногенезу ($\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$).

4. Метаногенез – фінальна стадія, де метаногенні археї перетворюють мурашину кислоту, водень та вуглекислий газ у метан ($\text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$). Метаногенез є найбільш чутливим етапом до коливань рН, температури, токсичності середовища, нестачі поживних речовин.

Анаеробне зброджування є прикладом синтрофної взаємодії – кооперативної активності різних груп мікроорганізмів, що забезпечують взаємну утилізацію продуктів один одного. Наприклад, ацетогени створюють субстрати для метаногенів, а ті, у свою чергу, зменшують парціальний тиск водню, що забезпечує термодинамічну вигідність ацетогенезу (рис.1.11).

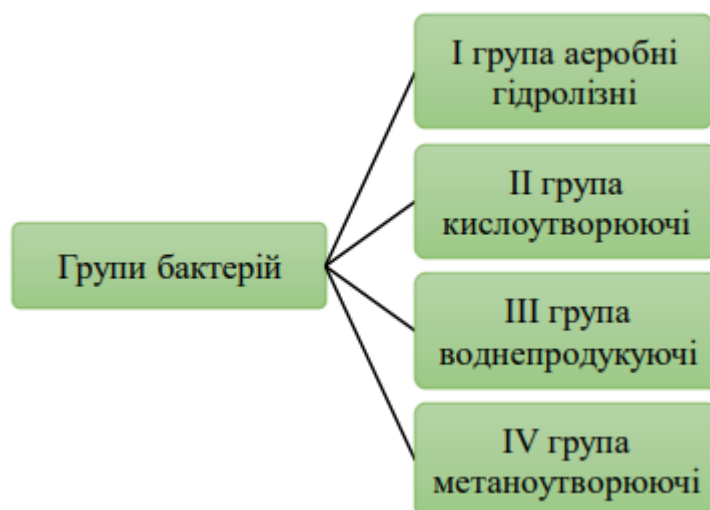


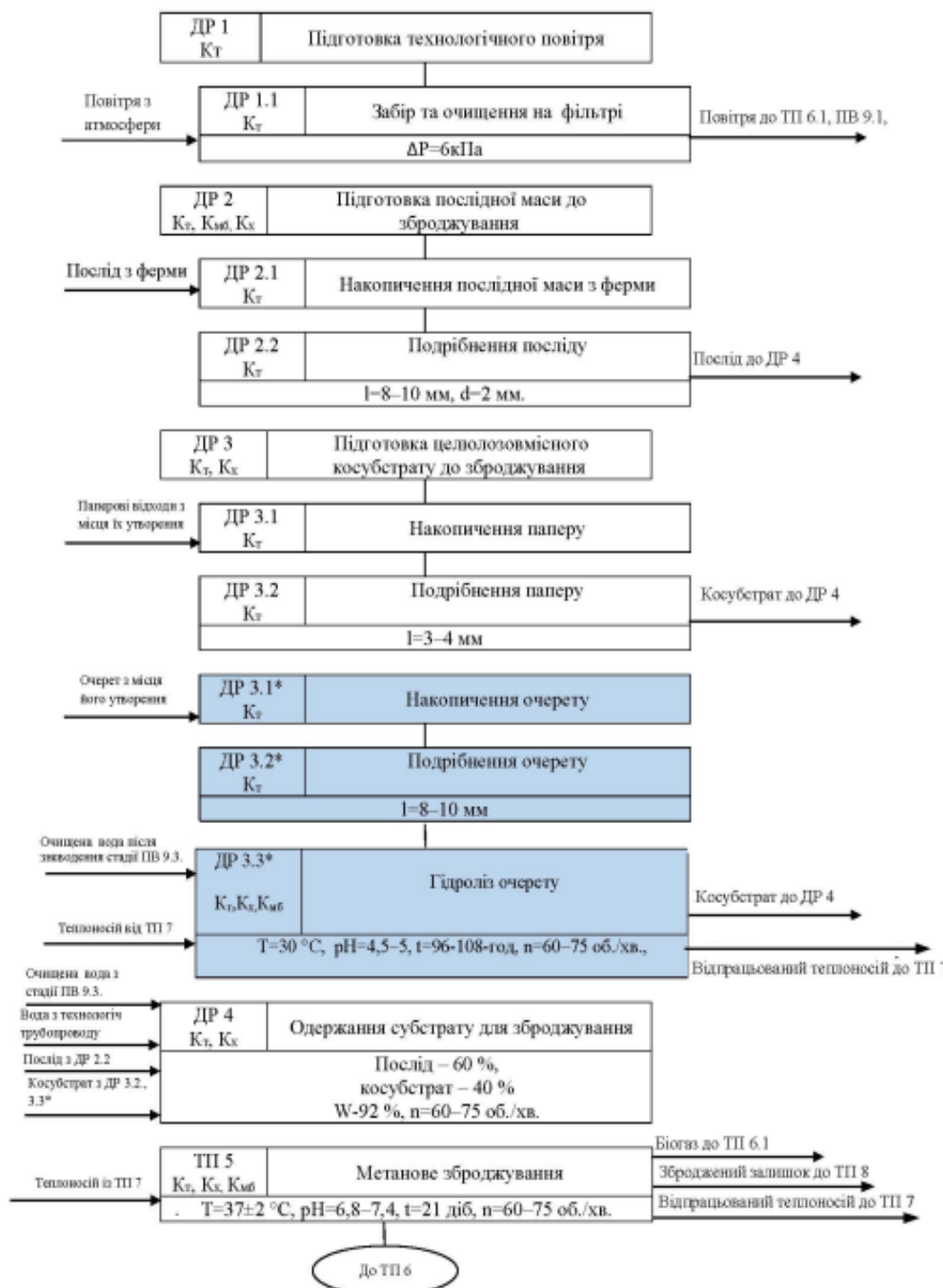
Рис. 1.11. Популяції мікроорганізмів, які беруть участь у процесі метаногенезу на різних його стадіях [32].

Для досягнення стабільності процесу часто використовують мікробні консорціуми – штучно сформовані або адаптовані спільноти мікроорганізмів, які мають високу здатність до гідролізу складних субстратів, утворення метану, детоксикації середовища тощо. Такі консорціуми можуть бути розроблені шляхом біоселекції або імобілізації клітин [34].

Узагальнюючи, біохімічні аспекти анаеробного зброджування є основою ефективного перетворення органічних відходів у біогаз. Розуміння ключових стадій, мікробного складу, метаболічних шляхів та умов функціонування дає змогу не лише оптимізувати процес, але й адаптувати його до широкого спектру органічної сировини, включаючи аграрні, харчові та побутові відходи.

РОЗДІЛ 2. УМОВИ ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Технологічна схема біоконверсії органічних відходів у біогаз



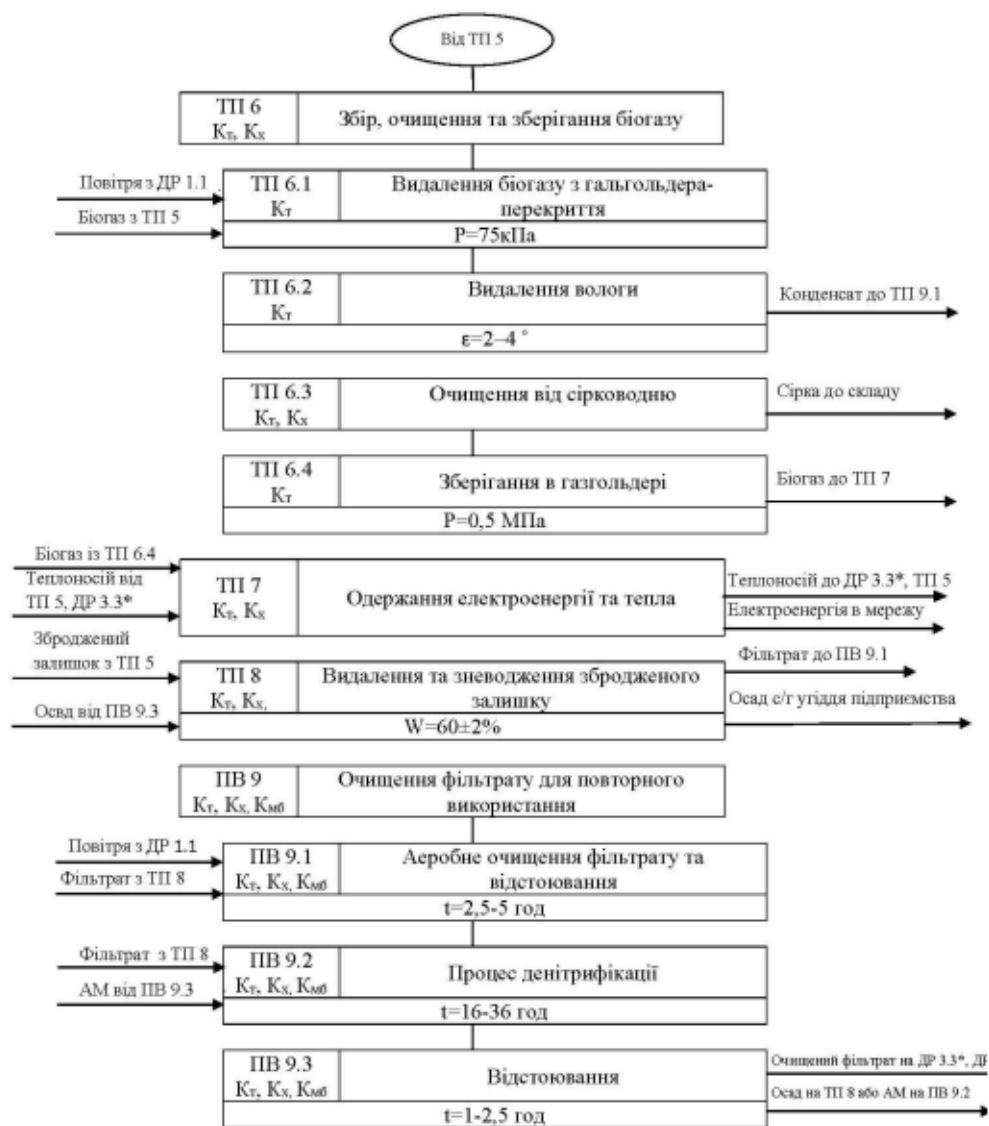


Рис. 2.1. Технологічна схема біоконверсії органічних відходів у біогаз [35].

Опис технологічного процесу [36].

ДР 1. Підготовка технологічного повітря. Очищення проводиться від пилу та механічних включень

ДР 1.1. Забір та очистка на фільтрі. Повітря, яке забирається з атмосфери за допомогою компресора, проходить через повітрозбірник і для попереднього очищення подається на фільтр попередньої очистки. На цьому фільтрі повітря очищується від механічних частинок та пилу. Заміну фільтрувального матеріалу проводять за перепаду тиску більше, ніж 6 кПа за показником електроконтактного манометра (контроль технологічний).

ДР 2. Підготовка біомаси посліду до метанового зброджування.

На даному етапі технологічного процесу відбувається підготовка відходів від птахофабрики для їх утилізації шляхом метанового зброджування.

ДР 2.1. Накопичення біомаси з ферми.

На даному етапі відбувається видалення посліду з ферми за допомогою стрічкового конвеєру та надходження до накопичувача. В збірнику автоматично контролюється рівень заповнення послідом.

ДР 2.2. Подрібнення посліду. Процес транспортування посліду зі збірника виконується за допомогою фронтального навантажувача. Подрібнення і гомогенізацію послідної маси проводять за використання подрібнювача гною. Після подрібнення послід містить грубих механічних включень не більше 5 %. Вміст часток з довжиною до 10 мм і товщиною не більш ніж 2 мм в подрібненому посліді не більше 2 %. Вологість посліду до 75 % при плюсовій температурі.

ДР 3. Підготовка целюлозовмісного косубстрату до метанового зброджування.

На даному етапі процесу відбувається підготовка сільськогосподарських або інших целюлозовмісних відходів шляхом подрібнення у разі використання сировини з низьким вмістом лігніну та подрібнення та гідролізу у разі використання сировини з вмістом лігніну вище 20 %.

ДР 3.1. Накопичення відходів паперу На даному етапі відбувається накопичення привезених відходів паперу у накопичувачу. В збірнику автоматично контролюється рівень заповнення.

ДР 3.2. Подрібнення відходів паперу. Транспортування сировини від збірника до дробарки відбувається за допомогою фронтального навантажувача. Подрібнення косубстрату здійснюють за допомогою дробарки. Розміри часток сировини на виході становлять 3-4 мм.

ДР 3.1*. Накопичення очерету. На даному етапі відбувається накопичення привезених відходів очерету. В збірнику автоматично контролюється рівень заповнення.

ДР 3.2*. Подрібнення відходів очерету. Транспортування сировини від збірника до дробарки відбувається за допомогою фронтального навантажувача. Подрібнення косубстрату здійснюють за допомогою дробарки. Розміри часток сировини на виході становлять 3–4 мм.

ДР 3.3* Гідроліз очерету. У разі використання очерету пропонується проводити попередній гідроліз за допомогою утворення мікроорганізмів або ферментними препаратами. Процес проходить у гідролізаторі при мезофільному режимі і інтенсивному перемішуванні.

ДР 4 Одержання субстрату для зброджування. Косубстрати, а саме послід, відходи паперу або очерету, подаються в ємність для приготування субстрату за допомогою шнекових транспортерів. Процес здійснюють у змішувачі, який обладнано мішалкою.

ТП 5. Метанове зброджування. Анаеробне зброджування відбувається у реакторі (метантенку), в якому контролюється рівень заповнення, за анаеробних умов та фіксованої температури процесу 37 ± 2 °C, перемішування проводиться двома мішалками (погружною та бічною), накопичування газу відбувається в газгольдері перекритті.

ТП 6. Збір, очистка і зберігання біогазу. На даному етапі відбувається відведення біогазу, що утворився в метантенках і його підготовка до використання у когенераційних установках.

ТП 6.1. Видалення біогазу з газгольдера перекриття. Відведення біогазу відбувається за допомогою надлишкового тиску в об'ємі газгольдера. Далі газ поступає на видалення вологи до конденсатора.

ТП 6.2. Видалення вологи. Біогаз, що надходить з газгольдера проходить через систему труб, які знаходяться на глибині 1 м під землею. За рахунок різниці температур між біогазом та трубою, волога конденсується на стінках трубки і відводиться у резервуар збору відпрацьованого субстрату. Головною умовою цього процесу є те, щоб труби були нахилені під строгим кутом 2...4°, інакше сконденсована рідина не буде надходити до збірника.

ТП 6.3. Очищення від сірководню. Найбільш простим і економічним способом очищення біогазу від сірководню є суха очистка в спеціальному фільтрі за стандартною технологією [42, 43].

ТП 6.4. Зберігання у газгольдері. Газгольдер виконано у вигляді мішка. Він виконаний з високоміцного PVC стійкого до перепаду температур. Тиск газу всередині газгольдера становить 0,5 МПа, контроль якого проводиться за рахунок манометра.

ТП 7. Одержання електроенергії та тепла. У робочому режимі комплекс біогаз спалюють у блочній теплоелектростанції. Пара (теплоносіє), що утворюється, через розподільний колектор надходить у теплообмінники реактора, нагріваючи реакційну суміш метантенка та гідролізатор до режимної температури $+37 \pm 2$ °C, або на побутові потреби.

ТП 8. Видалення та зневоднення збродженого залишку. Відбір збродженої маси відбувається за допомогою фекального насосу для гною, який подає її на декантер для зневоднення. Шлам, що утворився в процесі зневоднення, складається в ємності або його частина повертається до метантенка (вологість шламу становить 60 ± 2 %), а фільтрат надходить на очищення від азотовмісних сполук.

ПВ 9. Очищення фільтрату для повторного використання. На даному етапі використовується декілька стадій біологічного очищення фільтрату від сполук азоту з метою його повторного використання в технологічному процесі.

ПВ 9.1. Аеробне очищення фільтрату та відстоювання. 2/3 фільтрату, що утворився в процесі зневоднення (стадія ТП 8) перекачується за допомогою насосу в усереднювач. З усереднювача вода після зневоднення збродженої біомаси надходить в аероакселератор, куди подається повітря зі стадії ДР 1 для аерації.

ПВ 9.2. Процес денітрифікації. 1/3 фільтрату після декантування перекачується насосом на анаеробну стадію в денітрифікатор, туди ж перекачуються вода з стадії аеробного очищення (нітрифікації), Інокулят у денітрифікаторі збагачено апаттох-бактеріями. На цій стадії амонійний азот з фільтрату взаємодіє з нітритами після аеробної обробки з утворенням молекулярного азоту.

ПВ 9.3. Відстоювання. На цій стадії відбувається видалення з фільтрату після очищення зважених частинок. Видалення відбувається за допомогою двоярусного відстійника. Осад подається на стадію зневоднення збродженої біомаси ТП 8.

2.2. Методи досліджень

Дослідження процесу анаеробного зброджування неможливе без накопичення експериментальних даних із застосування сучасних методів аналізу. Експерименти дозволяють встановити оптимальні умови, визначити кінетичні параметри та реакції мікробіологічної активності, що дають можливість прогнозування поведінки біосистеми при зміні параметрів, масштабування процесу і вдосконалення конструкцій біореакторів.

Таблиця 2.1.

Лабораторне обладнання для експериментального дослідження [37].

Показник	Обладнання
1	2
Об'ємна концентрація CO ₂ у біогазі	Хімічний газоаналізатор «ГХЛ-1»
Об'ємна концентрація CO ₂ та CH ₄ у біогазі	Портативний цифровий газоаналізатор «Landtec Gem-500»
Вміст сухої речовини у субстраті	Шафа сушильна «ШСУ-М», t _{max} =130 °С. Ваги лабораторні цифрові «HE-100»: діапазон вимірювання 0–100 г, дискретність 0,01 г.
Вміст золи у сухому залишку	Піч муфельна «ГМ-8»: діапазон 100–900 °С. Ваги лабораторні цифрові «HE-100»: діапазон вимірювання 0–100 г, дискретність 0,01 г.
Температура в термостаті	Термометр цифровий «РТ-10/ПО1»: діапазон вимірювання 0–120 °С, ціна поділки 0,1 °С
Температура в приміщенні	Термометр ртутний лабораторний: діапазон вимірювання 0–100 °С, ціна поділки 0,1 °С
Атмосферний тиск в приміщенні	Барометр aneroid лабораторний: діапазон вимірювання 600–800 мм. рт. ст, ціна поділки 0,5 мм. рт. ст
Значення рН у субстраті	рН-метр «РН-009(І)»: діапазон вимірювання 0–14 рН, ціна поділки 0,1 рН

На початкових етапах наших досліджень проводили підбір компонентів субстрату (сировини), де визначали вміст сухого залишку

шляхом зважування її перед та після витримування зразку в сушильній шафі за температури 110°C упродовж 2-ох годин та органічної сухої речовини у досліджуваному зразку шляхом спалювання його у муфельній печі за 600°C до утворення однорідної золи. Після цього одержану масу золи віднімали від маси висушеного зразка та вміст органічної сухої речовини (табл. 2.1).

За табличними даними (табл.2.2) компонентів базового субстрату визначали C/N співвідношення, та візуально досліджували на наявність інгібіторів. Попередньо базовий субстрат піддавали механічній (подрібнювали компоненти субстрату механічним способом до одержання однорідної консистенції) термічній (обробляли базовий субстрат водяною парою під тиском) обробці.

Таблиця 2.2.

Карбон-Нітрогенове співвідношення окремих компонентів субстрату для метанового зброджування [38].

Сировина для біогазу	Азот, %	Відношення вуглецю до азоту, C/N
Тваринний гній		
Крупна рогата худоба	1.7; 1.8	16-25
Курачий	4-6	7-10
Кінський	2	25
Свинячий	4	6-12
Овечий	4	33
Відходи господарства		
Фекалії	6-7	6-10
Кухонні відходи	2	29
Шкірки картоплі	1.5	25
Капуста	4	13
Помідори	3	13
Відходи рослинності		
Кукурудзяні качани	1	57
Солома зернових	1.0	50
Пшенична солома	0.5	100-150
Кукурудзяна солома	0.7	51
Вівсяна солома	ІД	50
Соя	1.3	33
Люцерна	2.8	16-17
Буряковий жом	0.3-0.4	140-150
Інші		
Трава	4	13
Тирса	0.1	200-500
Опале листя	1.0	50

В процесі анаеробної ферментації органічних відходів у біореакторі постійно контролювали температурний режим, час ферментації,

завантаження реактора за вмістом сухої речовини, параметри перемішування та визначали потенціал утвореного біогазу за ВМР-тестом.

Експериментальні дослідження проводили як на лабораторній установці (рис.2.2), так й на пілотній біогазовій установці кафедри біотехнологій та радіології (рис.2.3) за наступною технологічною схемою (рис. 2.4).

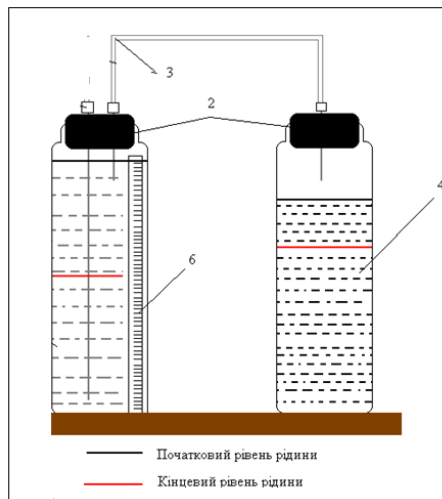


Рис. 2.2. Лабораторна БГУ

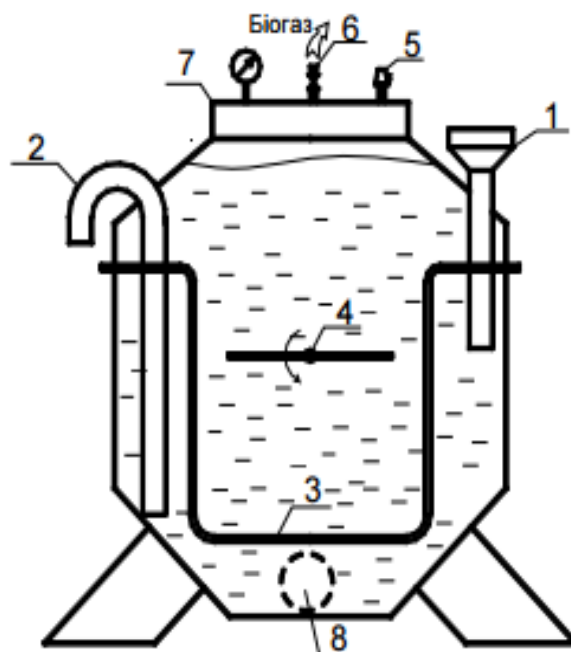


Рис. 2.3. Пілотна БГУ

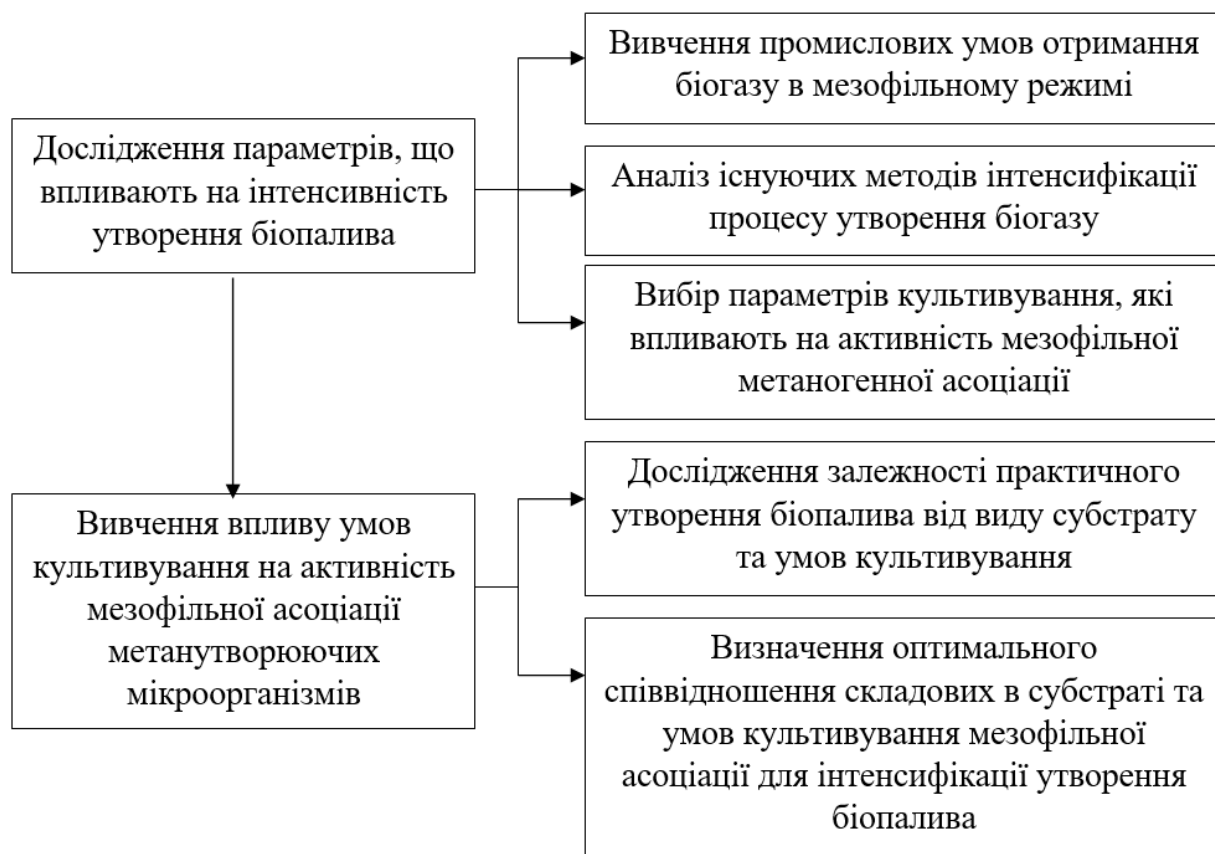


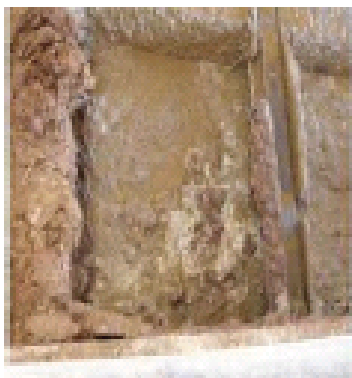
Рис. 2.4. Схема експериментальних досліджень

Ко-субстрат готували, використовуючи гній ВРХ та силос кукурудзяний у різних співвідношеннях (табл. 2.3). Підготовку базового ко-субстрату (гній ВРХ + солома пшенична у різних співвідношеннях) проводили шляхом його гомогенізації (рис. 2.5). Вологість приготовленого ко-субстрату доводили до 90% розрахунковим методом шляхом додавання необхідної кількості води. Одержані експериментальні дані опрацьовували статистично [40].

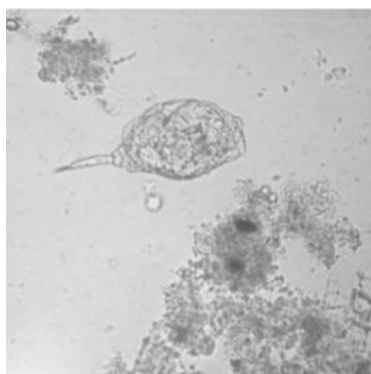
Таблиця 2.3.

Схема дослідю

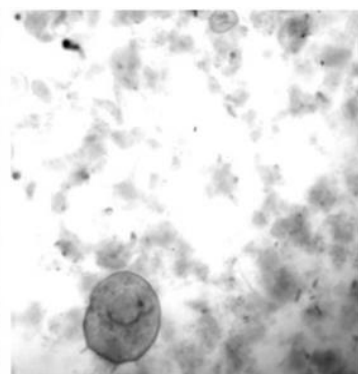
Дослідні зразки	Компоненти сировини		
	Солома пшенична, г	Гній ВРХ, мл	Вода, мл
1 зразок	300	700	200
2 зразок	550	450	350
3 зразок	600	300	500
4 зразок	100	900	-



А



Б



В

Рис. 2.5. Світлини гомогенізованого ко-субстрату: А – візуальний вигляд; вигляд під мікроскопом Б – не гомогенізований; В – гомогенізований.

Отже, поєднання експериментальних даних із їх статистичною обробкою забезпечить глибоке розуміння анаеробного процесу, сприяє його оптимізації та масштабуванню в умовах реального виробництва.

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Динаміка утворення біогазу залежно від співвідношення ко-субстратів у процесі їх анаеробної ферментації

З метою підвищення утворення біогазу в процесі зброджування органічних відходів, на першому етапі наших експериментальних досліджень, був пошук оптимальних співвідношень компонентів ко-субстрату для ферментації, яка відбувається за класичною схемою (рис.3.1).

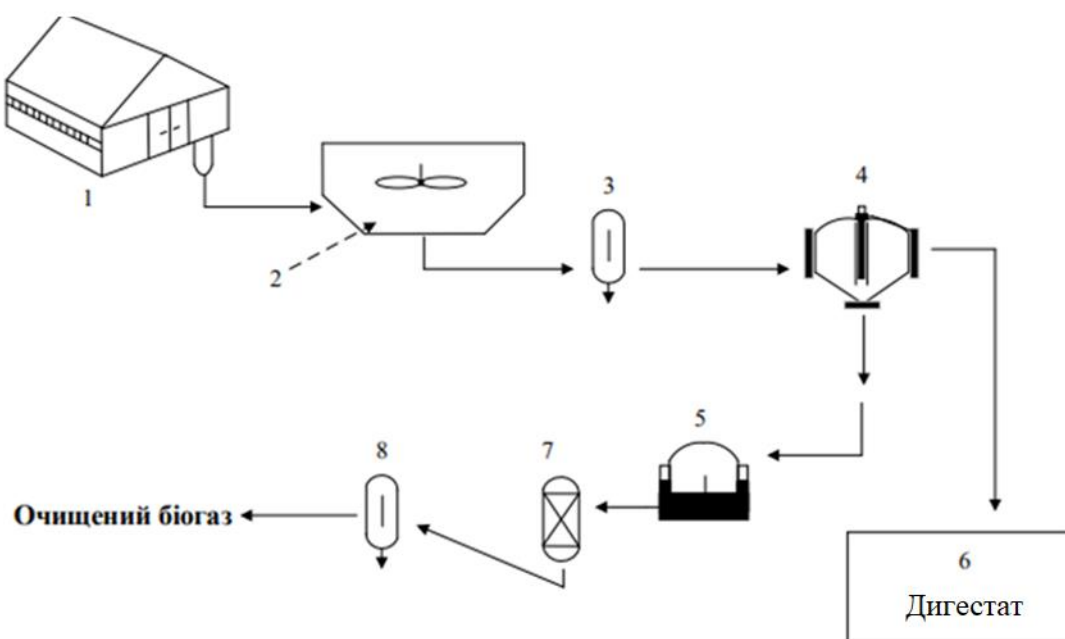


Рис. 3.1. Апаратурна схема виробництва та очистки біогазу:

1. Ферма; 2. Резервуар (мішалка); 3. Сепаратор; 4. Метантенк; 5. Газгольдер; 6. резервуар для зберігання рідких добрив; 7. Десульфуризація; 8. Сепаратор.

Компоненти базового субстрату були підібрані в різному співвідношенні: гній ВРХ: солома пшенична: водопровідна вода, згідно даних табл. 2.3. Вище наведені компоненти ко-субстрату підбирали із урахуванням їх доступності, дешевизни та широкого їх використання в технологічному процесі виробництва біогазу (рис. 3.2). Окрім цього, біоконверсійні технології утилізації органічних відходів АПК, нами розглядалися як маловідходні чи безвідходні технології, які мають значні переваги над існуючими, не тільки в економічному, але й екологічному плані.

ВИРОБНИЦТВО БІОГАЗУ З ГНОЙОВИХ ВІДХОДІВ

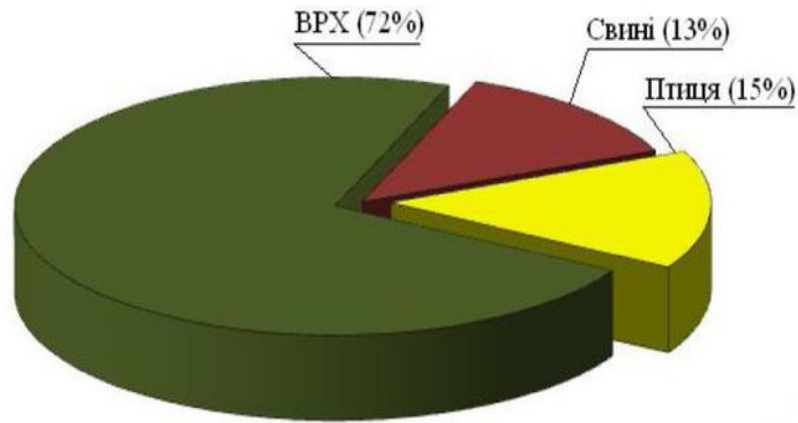


Рис. 3.2. Співвідношення основних гнойових субстратів для анаеробної ферментації з одержанням біогазу [41].

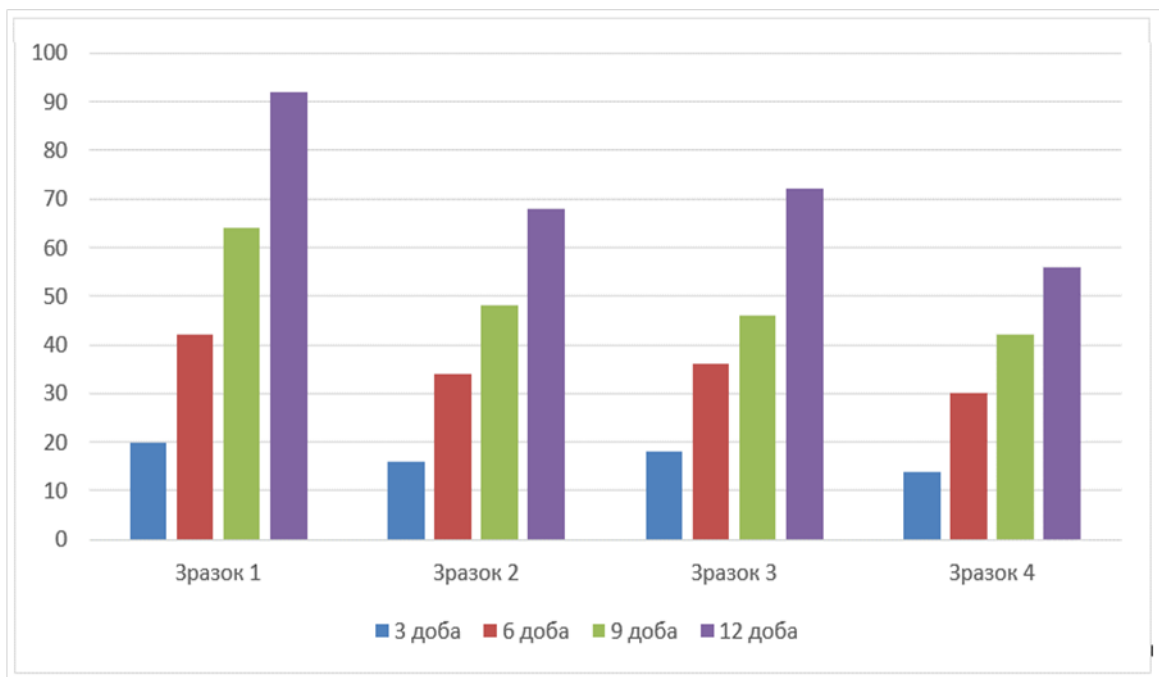


Рис. 3.3. Вихід біогазу залежно від часу ферментації зразків ко-субстратів, дм^3

Динаміку одержання біогазу, в лабораторних умовах, у процесі ферментації ко-субстрату із різним співвідношенням їх компонентів досліджували упродовж 12 днів, вміст біогазу визначали кожні три доби (3, 6, 9 та 12-ту) (рис. 3.3). Як видно із наведеного рисунку, здебільшого, у всіх

ферментованих зразках спостерігався приріст утвореного біогазу впродовж зазначеного часу ферментації.

Найкращими показниками щодо приросту біогазу характеризувався перший зразок, до складу якого входили 300 г подрібненої соломи пшеничної, 700 мл гною ВРХ та 200 мл води. Кількість одержаного біогазу на 12 добу ферментації при використанні ко-субстрату першого зразка складало 92 дм³, що відповідно на 22,1, 21,8 та 39,1% перевищувало інші зразки ко-субстратів (2, 3 та 4 зразка) (рис. 3.4).

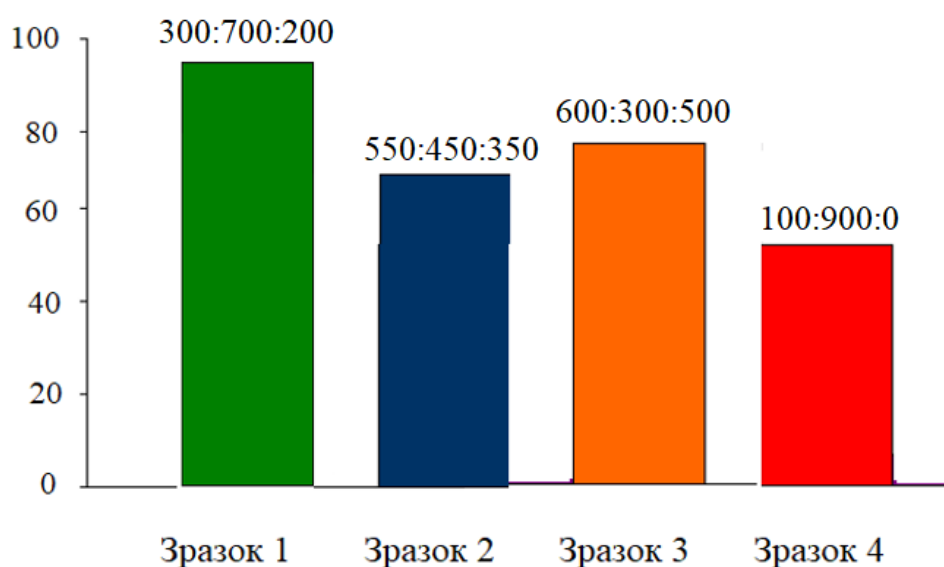


Рис. 3.4. Динаміка виходу біогазу залежно від співвідношення компонентів базового ко-субстрату (солома: гній ВРХ: вода) на 12 добу ферментації, дм³

Враховуючи попередні дослідження щодо підбору найбільш оптимальнішого співвідношення компонентів ко-субстрату, нами, для подальших досліджень вибрано перший зразок із співвідношенням 300 г подрібненої соломи: 700 мл гною ВРХ та 200 мл води.

Наступна серія дослідження була спрямована на вивчення динаміки утворення біогазу залежно від часу ферментації (рис. 3.5). За умов наших експериментальних досліджень найвищу кількість утвореного біогазу спостерігалось на 12 добу анаеробної ферментації.

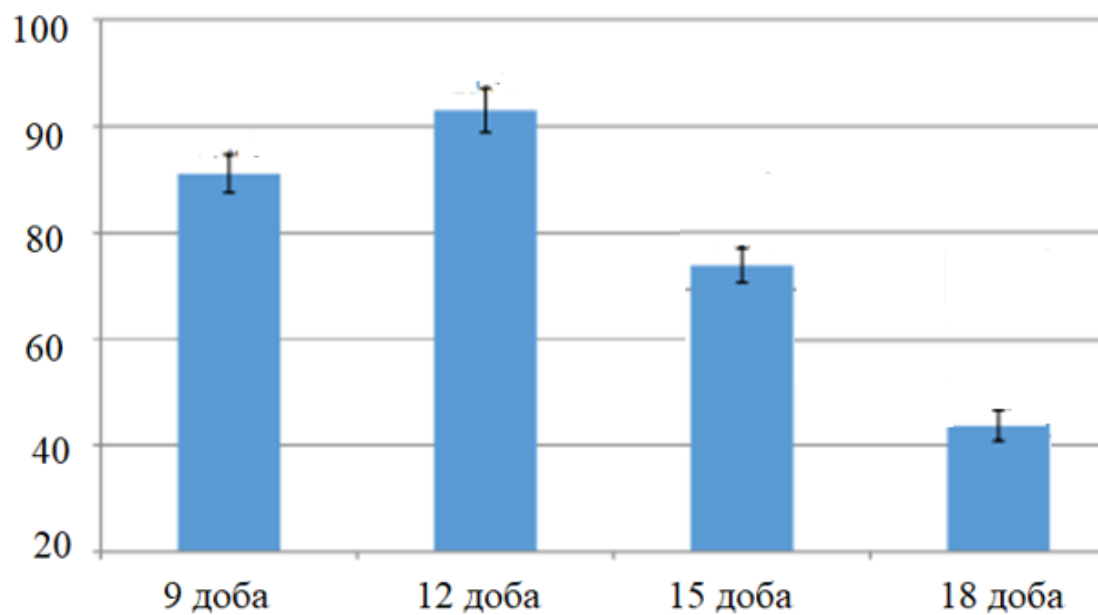


Рис. 3.5. Динаміка утворення біогазу залежно від часу ферментації, дм³

Продовження часу ферментації на 3 та 6 діб супроводжувалось із зменшенням відповідно на 26,1 та 54,4% утворення біогазу. Враховуючи наведене вище, економічно доцільно анаеробну ферментацію в умовах лабораторних досліджень проводити 12-15 діб.

3.1.1. Оптимізація технологічного процесу шляхом подрібнення ко-субстрату, додаванням мікроелементів та селекційних штамів-продуцентів біогазу

Від ступеню подрібнення ко-субстрату залежить активність біохімічних процесів перетворення органічних відходів у кінцевий цільовий продукт – біогаз (рис. 3.6).

Так, використання базового субстрату, який був подрібнений до розміру частинок 8,0x2,5 мм забезпечив підвищення активності синтетичних процесів анаеробних асоціацій мікроорганізмів, що забезпечило зростання утворення біогазу впродовж ферментації. Використання гомогенізованого ко-субстрату до розмірів, що було наведено вище, сприяло підвищенню продукції біогазу за весь період ферментації відповідно на 12,9, 32,6, 14,7 та 23,8%.

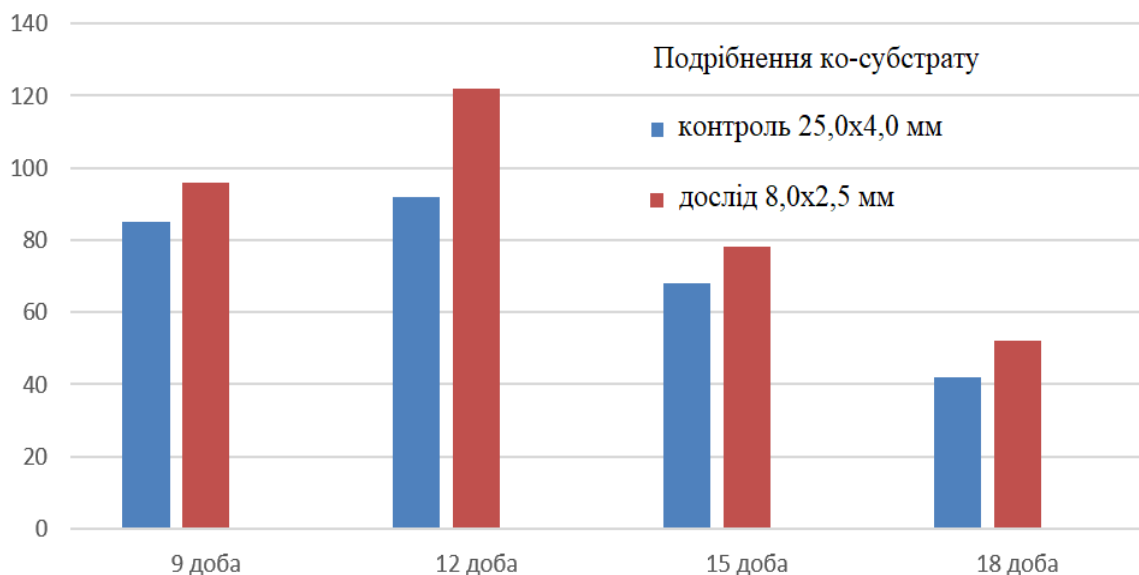


Рис. 3.6. Динаміка утворення біогазу анаеробними бактеріями в процесі ферментації залежно від гомогенізації ко-субстрату, дм³.

Додаткове внесення мікроелементів до ко-субстрату активують процеси ферментації через їх участь у біохімічних перетвореннях, що забезпечує ефективну ферментацію органічних відходів у біогаз. (рис. 3.7).

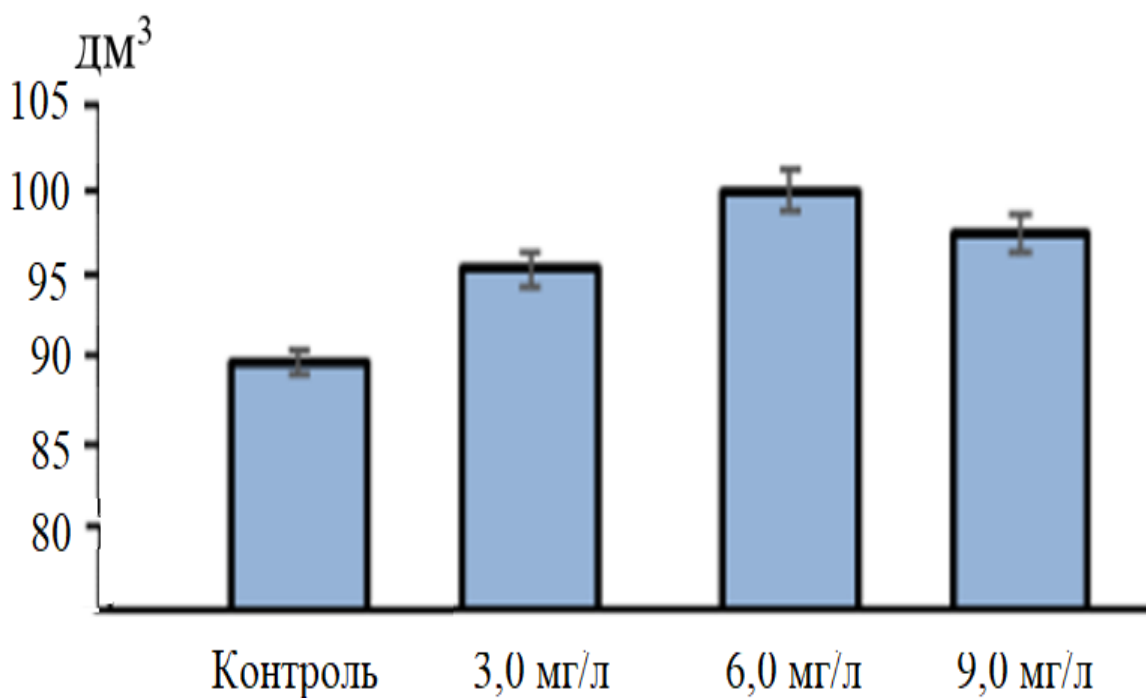


Рис. 3.7. Динаміка виходу біогазу залежно від внесення в базовий ко-субстрат для анаеробної ферментації хлориду цинку в концентраціях 3,0, 6,0 та 9,0 мг/л, дм³.

Із рис. 3.7 видно, що найбільш ефективною концентрацією цинку хлориду, яку додавали до базового субстрату для анаеробного зброджування є концентрація 6,0 мг/л. За такої концентрації відбувається активація ферментних процесів у середовищі культивування, а це сприяє підвищенню утворення біогазу на 11,2%. При використанні інших концентрацій хлориду цинку (3,0 та 9,0 мг/л) в поживному середовищі, приріст біогазу був нижчим на 5,7 та 3,1% порівняно до зразку, де використовували хлорид цинку в концентрації 6,0 мг/л.

Для оптимізації технологічного процесу біоконверсії органічних відходів АПК у біогаз анаеробними популяціями метан-синтезуючих

бактерій ми використовували селекційні штами метаногенів та порівнювали їх із аборигенними (рис. 3.8).

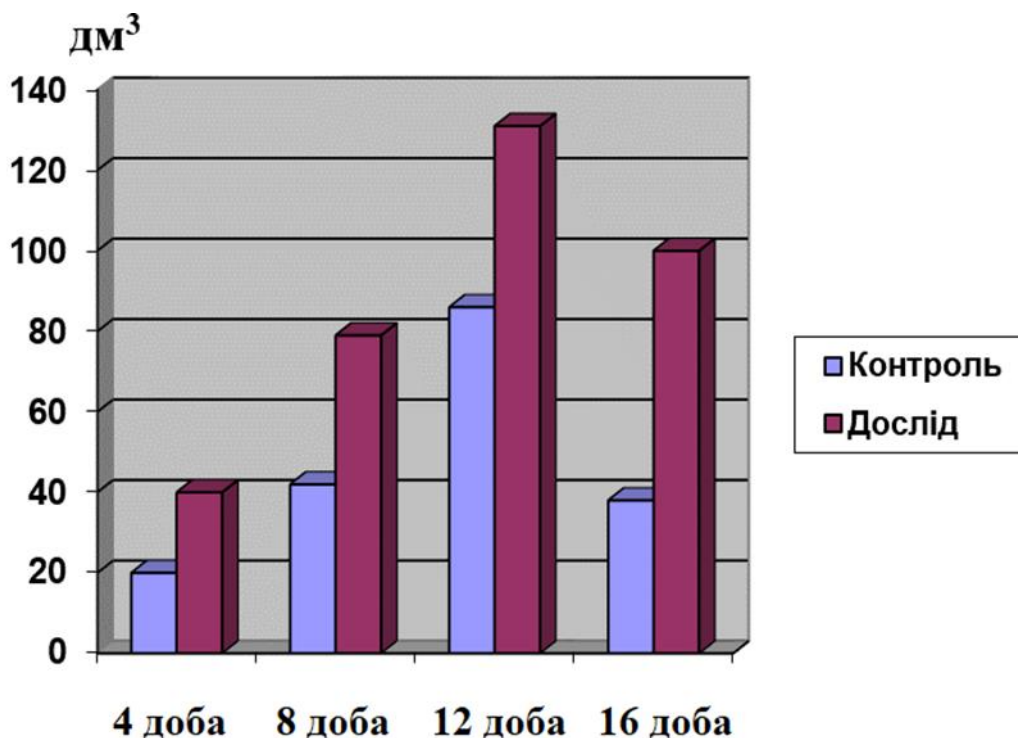


Рис. 3.8. Динаміка утворення біогазу залежно від часу ферментації та використанні аборигенних та селекційних штамів-метаногенів

Аборигенні метан-синтезуючі популяції мікроорганізмів безпосередньо знаходяться на компонентах базового субстрату, особливо на гомогенізованому гною ВРХ, а селекційні популяції метан-синтезуючих мікроорганізмів нам надала місцева фірма “БІТ”, яка займається біоконверсією органічних відходів різного походження в біогаз та дигестат.

Використання селекційних популяції метан-синтезуючих мікроорганізмів поряд із аборигенними популяціями мікроорганізмів сприяло активному зростанню приросту біогазу впродовж анаеробної ферментації. Так, на 4, 8, 12 та 16 добу анаеробної ферментації приріст біогазу відповідно зріс на 49,4, 48,9, 33,8 та 60,4%.

Таким чином, оптимізація поживного середовища – це не просто додатковий технологічний захід, а стратегічний напрям розвитку біоенергетики, що дозволяє перейти від експериментальних лабораторних

систем до промислових високоефективних рішень, здатних забезпечити сталу енергетику майбутнього.

Одержаний нами біогаз, шляхом анаеробної ферментації органічних відходів агропромислового комплексу повинен відповідати вимогам та стандартам щодо його вмісту (табл. 3.1).

Таблиця 3.1

Законодавчі вимоги щодо складу біогазу [42].

Параметр	Значення
Вміст метану (C_1), мол. %	≥ 90
Вміст етану (C_2), мол. %	≤ 7
Вміст пропану (C_3), мол. %	≤ 3
Вміст бутану (C_4), мол. %	≤ 2
Вміст пентану та більш важких вуглеводнів ($C_5 +$), мол. %	≤ 1
Вміст азоту (N_2), мол. %	≤ 5
Вміст вуглецю (CO_2), мол. %	≤ 2
Вміст кисню (O_2) [48], мол. %	$\leq 0,2$ [49] (1,0) [50]
Вища теплота згоряння (25 °C/20 °C)	$\geq 36,20$ МДж/м ³ (10,06 кВт·год/м ³) $\leq 38,30$ МДж/м ³ (10,64 кВт·год/м ³)
Вища теплота згоряння (25 °C/0 °C)	$\geq 38,85$ МДж/м ³ (10,80 кВт·год/м ³) $\leq 41,10$ МДж/м ³ (11,42 кВт·год/м ³)
Нижча теплота згоряння (25 °C/20 °C)	$\geq 32,66$ МДж/м ³ (9,07 кВт·год/м ³) $\leq 34,54$ МДж/м ³ (9,59 кВт·год/м ³)
Температура точки роси за вологою °C при абсолютному тиску газу 3,92 МПа	$\leq$ мінус 8 (-8)
Температура точки роси за вуглеводнями при температурі газу не нижче 0 °C	$\leq 0^\circ\text{C}$
Вміст механічних домішок:	Відсутні
Вміст сірководню, г/м ³	$\leq 0,006$
Вміст меркаптанової сірки, г/м ³	$\leq 0,02$

3.2. Екологічні та економічні аспекти оптимізації анаеробного перетворення органічних відходів у біогаз

Оптимізація процесу анаеробного зброджування органічної біомаси має критичне значення не лише з техніко-біотехнологічного боку, а й з точки зору екологічної безпеки та економічної ефективності. Удосконалення цього процесу сприяє зменшенню негативного впливу на довкілля, підвищенню енергоефективності виробництва біогазу, а також забезпечує раціональне використання ресурсів з потенційною фінансовою вигодою для аграрного та комунального секторів (рис. 3.9).

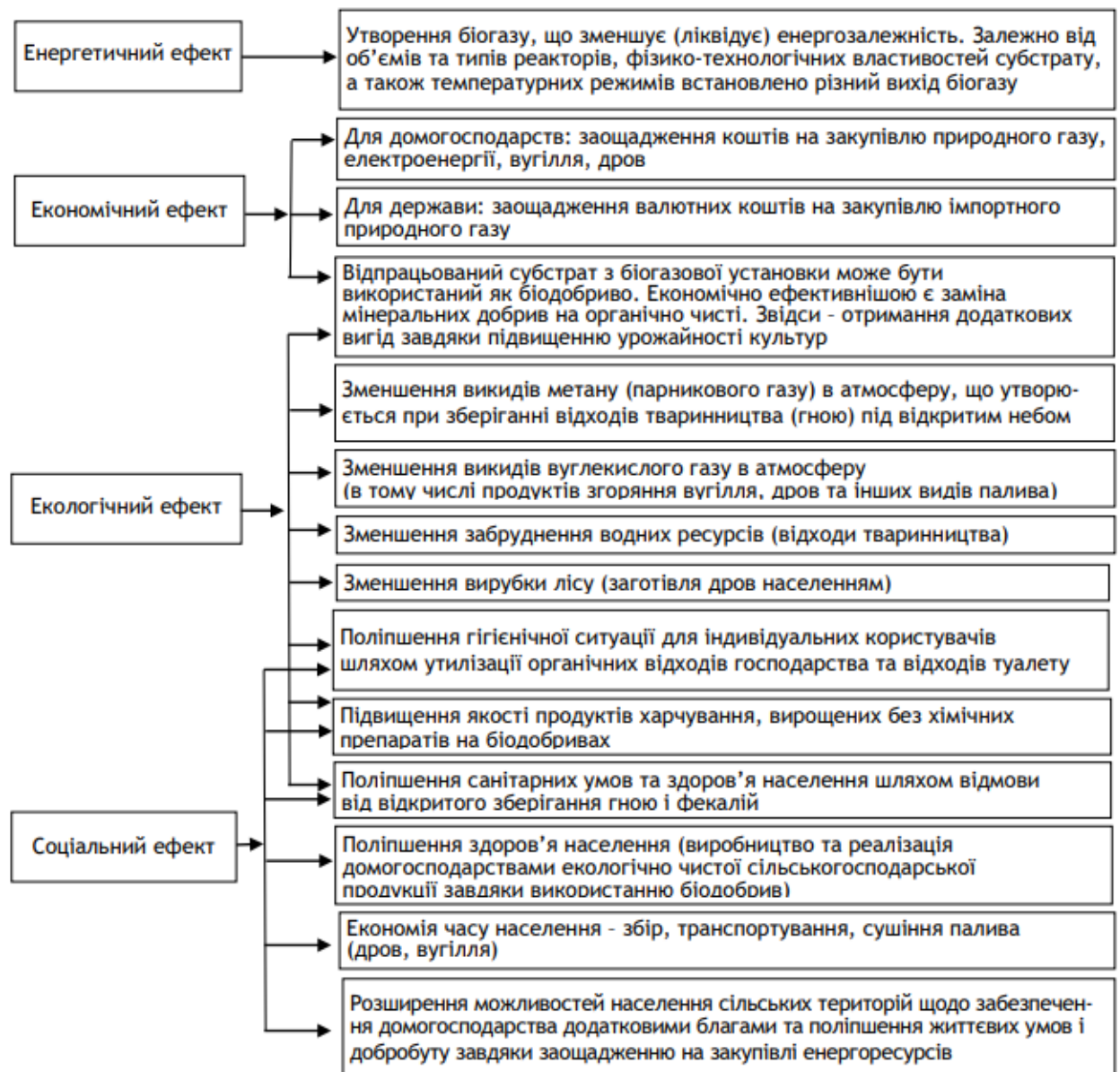


Рис. 3.9. Доцільність переробки органічних відходів у біогаз [45].

Заміна викопного палива біогазом дозволяє скоротити викиди CO₂. Утилізація метану, який має в 28–36 разів більший парниковий потенціал, ніж CO₂, із гною, харчових та сільськогосподарських відходів. За даними Європейського агентства з довкілля, один біогазовий реактор середнього розміру (~500 кВт) здатен зменшити парникові гази на 500-800 тонн CO₂-еквіваленту на рік.

Утилізація органічних залишків (гною, харчових і зелених відходів) знижує навантаження на сміттєзвалища та зменшує інфільтрацію ґрунтових вод. Процес зброджування знижує наявність патогенів у сировині (санітарна безпека).

Стабілізований дигестат може бути використаний як органічне добриво, зменшуючи потребу в хімічних добривах, які часто викликають евтрофікацію водойм. Це не лише знижує витрати, але й покращує структуру ґрунту і підвищує його родючість.

Біогазова технологія є основним інструментом переходу до економіки замкненого циклу, де відходи стають ресурсами. Використання залишків після зброджування дозволяє мінімізувати обсяги відходів та повернути поживні речовини в ґрунт.

Біогаз замінює природний газ або інші види палива для виробництва електроенергії та тепла. Власне виробництво енергії знижує залежність фермерських господарств від цін на енергоносії. Один м³ біогазу $\approx$ 6,0–6,5 кВт·год теплової енергії або $\approx$ 2,0–2,5 кВт·год електроенергії.

Для виробництва біогазу на біогазових установках необхідно створювати додаткові робочі місця на етапах будівництва, експлуатації та обслуговування. Вироблена енергія та добрива можуть використовуватись локально, підвищуючи енергетичну незалежність громад (табл.3.2).

Типова окупність біогазового проекту в Україні: 4–7 років (залежно від масштабу, вартості сировини, субсидій та тарифів). Наявність програм фінансової підтримки (гранти ЄС, кредитування від GEF, ЄБРР, USAID) знижує стартові бар'єри.

Таблиця 3.2

Фактори, що впливають на екологічну та економічну ефективність анаеробного зброджування органічних відходів [43].

Фактор	Вплив
Вибір сировини	Визначає потенціал утворення біогазу та якість дигестату
Температурний режим	Впливає на швидкість зброджування та енергоспоживання
Система переробки дигестату	Визначає можливість його використання чи утилізації
Місцева інфраструктура	Доступ до електромереж, ринки збуту добрив
Регуляторна політика	Тарифи на енергію, податкові пільги, «зелений» тариф

Екологічна та економічна оптимізація процесу анаеробного зброджування – це ключовий фактор для його широкого впровадження. Зменшення негативного впливу на довкілля, досягнення енергетичної самодостатності, створення додаткових джерел доходу – усе це робить біогазові технології важливою частиною стратегії сталого розвитку. Раціональна оптимізація технічних, екологічних і економічних параметрів дозволяє забезпечити ефективне використання ресурсів з користю для людини та природи.

3.2.1 Проблеми та перспективи анаеробного зброджування органічних відходів у біогаз

Анаеробне зброджування органічних відходів для виробництва біогазу з оптимізованим складом поживного середовища є перспективним напрямом у сфері відновлюваної енергетики та управління органічними відходами. Проте реалізація цього процесу в промислових масштабах стикається з рядом наукових, технічних, економічних і регуляторних викликів, які потребують глибокого аналізу й усунення. Нижче розглянуто основні проблеми, що обмежують ефективність впровадження технологій анаеробного зброджування, а також окреслено перспективи їх подальшого розвитку.

До основних проблем використання анаеробної ферментації органічних відходів відноситься (рис. 3.10):

1. Нестабільність складу органічної сировини. Органічні відходи мають різноманітне походження та змінний хімічний склад (вміст вуглецю, азоту, лігніну, целюлози, жиру тощо). Ця варіативність ускладнює створення універсального поживного середовища для стабільного анаеробного зброджування.

2. Неврегульований вміст мікро- та макроелементів. Брак або надлишок таких елементів, як амоній, калій, натрій, залізо, сірка, магній та ін., негативно впливає на життєздатність мікроорганізмів, які беруть участь у процесі. Дозування має бути чітко контрольованим, що потребує високоточного хімічного моніторингу.

3. Інгібітори процесу. У відходах можуть бути присутні сполуки, що гальмують метаногенез: важкі метали, феноли, сірководень, аміак. Їх наявність призводить до зниження активності консорціуму мікроорганізмів і, відповідно, зменшення виходу біогазу.

4. Висока собівартість попередньої підготовки. Додаткові кроки з підготовки субстрату – подрібнення, гідроліз, хімічна або біологічна обробка

– підвищують загальні витрати на виробництво біогазу, знижуючи економічну доцільність проекту.

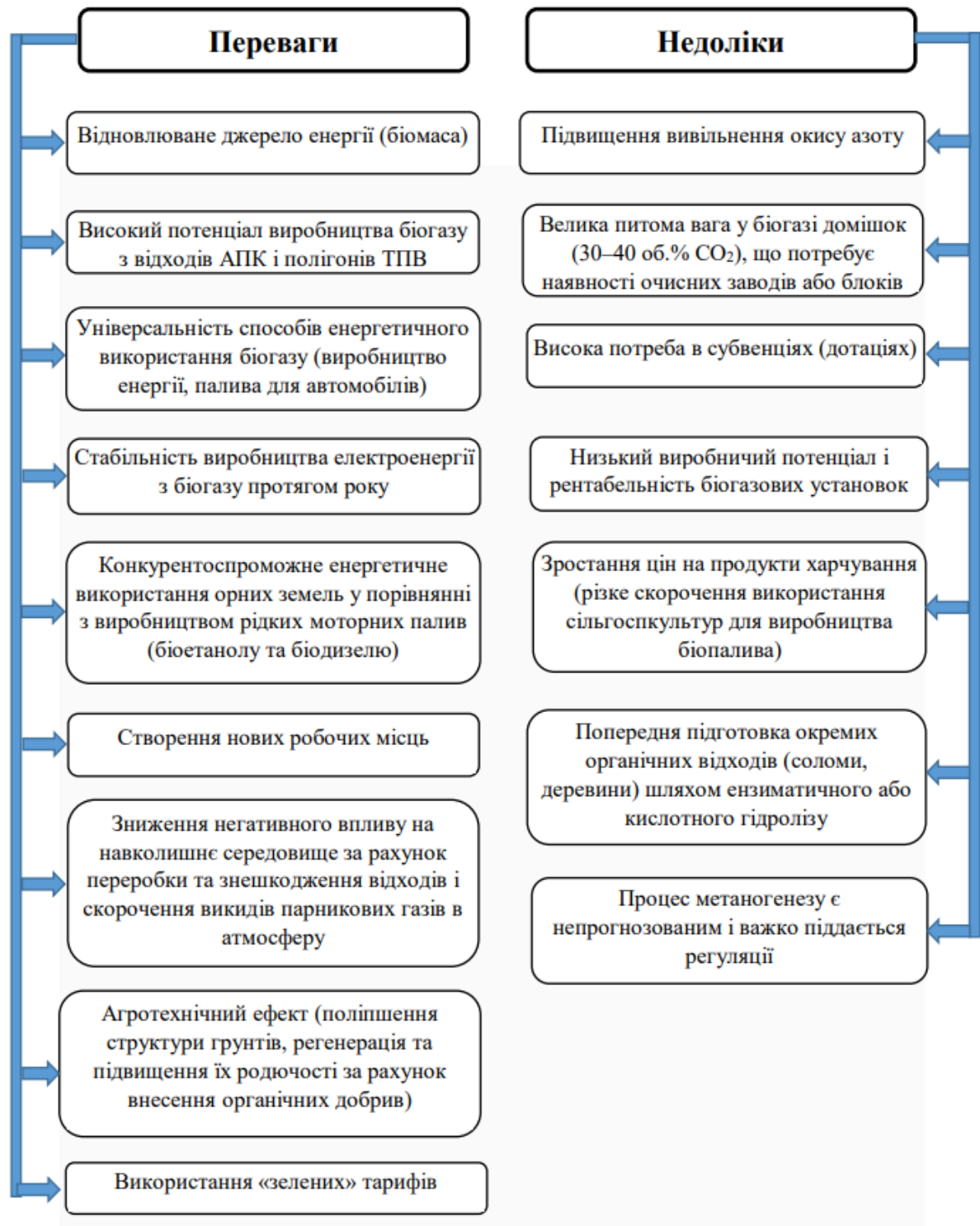


Рис. 3.10. Переваги та недоліки виробництва біогазу шляхом анаеробної ферментації органічних відходів АПК [46].

5. Недостатня інтеграція технологій. Багато установок не мають системи для рекуперації тепла, переробки дигестату чи очищення біогазу до стандартів біометану, що знижує їхню енергоефективність і рентабельність.

6. Брак сучасних систем моніторингу та управління. Автоматизація процесу оптимізації поживного середовища вимагає інтеграції сенсорних систем та математичних моделей. Проте багато виробників не мають доступу до таких технологій.

7. Регуляторні бар'єри. У ряді країн, зокрема в Україні, відсутня комплексна законодавча база для підтримки виробництва біогазу з відходів, що стримує залучення інвестицій.

До перспектив використання анаеробної ферментації органічних відходів відноситься:

1. Розробка інтелектуальних систем управління. Застосування IoT, big data та алгоритмів машинного навчання дозволить у режимі реального часу коригувати параметри зброджування та склад поживного середовища для досягнення максимального виходу біогазу.

2. Генетична інженерія мікроорганізмів. Використання генетично модифікованих штамів може підвищити ефективність перетворення складних органічних сполук у метан, забезпечити стійкість до інгібіторів і підвищену активність в широкому діапазоні умов.

3. Біоенергетичні кластери. Створення кластерів, що поєднують ферми, харчові підприємства, очисні споруди, дозволить організувати замкнені цикли виробництва енергії, органічних добрив та переробки відходів.

4. Інтеграція з аграрною біоекономікою. Синергія між біогазовими установками та сільським господарством дозволяє використовувати дигестат як високоякісне добриво, зменшуючи потребу в мінеральних добривах.

5. Застосування нових біологічних агентів. Розробка біологічно активних добавок – ензимів, буферів, коферментів – може суттєво покращити біохімічну ефективність процесу зброджування.

6. Масштабування малих модульних установок. Мікробіогазові установки, оптимізовані під конкретні субстрати та середовища, можуть бути впроваджені на фермах, підприємствах громадського харчування, у школах тощо – зменшуючи локальні обсяги відходів.

7. Підтримка відновлюваної енергетики. Розвиток зелених тарифів, систем сертифікації походження біогазу, доступу до екологічного фінансування стане стимулом для інвестицій у галузь (рис.3.11).

SWOT-аналіз виробництва індивідуальних біогазових установок в Україні	
Сильні сторони (Strengths)	Слабкі сторони (Weaknesses)
1. Потенціал сировини: Україна має великий обсяг органічних відходів, таких як гній, сільськогосподарські залишки та кухонні відходи, які можна використовувати для виробництва біогазу. 2. Екологічні переваги: Виробництво біогазу сприяє зменшенню викидів парникових газів та забруднення навколишнього середовища. 3. Зменшення енергетичної залежності: Біогаз може служити альтернативним джерелом енергії, що допомагає зменшити залежність від імпортованих джерел енергії. 4. Регіональний розвиток: Виробництво біогазу може створити робочі місця та сприяти розвитку регіональних господарств.	1. Високі початкові витрати: Встановлення біогазових установок може бути витратним процесом, що може зупинити багатьох фермерів та господарств. 2. Низька освіченість: Багато фермерів і господарств можуть не мати необхідного рівня знань та навичок для виробництва біогазу. 3. Бюрократичність та регулювання: Складність бюрократичних процедур та регулятивних обмежень може ускладнити процес отримання дозволів та фінансування.
Можливості (Opportunities)	Загрози (Threats)
1. Державна підтримка: Уряд може надавати фінансову підтримку та стимулювати розвиток галузі шляхом субсидій та податкових льгот. 2. Зростання попиту: Зі зростанням свідомості про екологічні проблеми та зміну споживчих практик може збільшитися попит на біогазові установки. 3. Технологічний розвиток: Постійний розвиток технологій у галузі біогазу може полегшити і підвищити ефективність виробництва.	1. Конкуренція з іншими джерелами енергії: Запровадження біогазових установок може конкурувати з іншими джерелами енергії, такими як вугілля або газ. 2. Варіабельність сировини: Подання органічних відходів може змінюватися в залежності від сезону та географічного розташування, що може вплинути на стабільність виробництва біогазу. 3. Економічна нестабільність: Економічні коливання та зміни цін на енергоресурси можуть вплинути на фінансову вигоду виробництва біогазу.

Рис. 3.11. Сильні та слабкі сторони, можливості та загрози виробництва біогазу шляхом анаеробної ферментації органічних відходів [44].

Таким чином, хоча оптимізація складу поживного середовища для анаеробного зброджування має суттєві наукові й практичні труднощі, існує широкий спектр перспектив розвитку цієї сфери.

Інноваційні підходи до моніторингу, управління, біотехнологічного вдосконалення мікрофлори, інтеграції у біоекономіку та вдосконалення

нормативної бази здатні забезпечити прорив у ефективності виробництва біогазу. Це відкриває шлях до створення сталих енергетичних систем та екологічно безпечного поводження з органічними відходами.

З екологічної точки зору, впровадження таких технологій дозволяє значно зменшити викиди парникових газів, знизити навантаження на полігони твердих побутових відходів, запобігти забрудненню ґрунтів і вод.

З економічного погляду, підвищення ефективності процесу дозволяє збільшити вихід метану, знизити витрати на утилізацію органічних решток, генерувати додаткові прибутки від продажу біогазу або електроенергії, а також використання стабілізованого дигестату як якісного органічного добрива.

ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ

1. Ретельне вивчення наукової літератури дозволило з'ясувати, що склад поживного середовища відіграє вирішальну роль у забезпеченні стабільного перебігу анаеробного процесу. Поживне середовище є критичним чинником стабільного та продуктивного анаеробного зброджування має містити збалансовані джерела Карбону, Нітрогену, Фосфату, а також необхідні мікроелементи:

2. Важливим аспектом дослідження стало висвітлення експериментальних підходів до оптимізації складу поживного середовища шляхом підбору компонентів ко-субстрату. Найбільш перспективним був ко-субстрат до складу якого входили 300 г подрібненої соломи пшеничної, 700 мл гною ВРХ. Кількість одержаного біогазу на 12 добу ферментації при використанні даного ко-субстрату складало 92 дм³, що відповідно на 22,1, 21,8 та 39,1% перевищувало інші ко-субстрати.

3. Використання гомогенізованого субстрату до розміру частинок 8,0x2,5 мм забезпечив підвищення активності синтетичних процесів анаеробних асоціацій мікроорганізмів, що забезпечило зростання утворення біогазу в середньому на 24,8%.

4. Збалансованість макро- і мікроелементів сприяє максимізації виходу біогазу та стабільності роботи біореакторів. Внесення хлориду цинку в концентрації 6,0 мг/л в середовище культивування сприяє підвищенню утворення біогазу на 11,2%.

5. Використання селекційних популяції метан-синтезуючих мікроорганізмів поряд із аборигенними популяціями – сприяло активному зростанню приросту біогазу в середньому на 42% весь період анаеробного зброджування

6. Важливим аспектом дослідження було приділено екологічним і економічним вигодам оптимізованого біогазового виробництва. Попри успіхи, були окреслені і наявні проблеми галузі: висока чутливість мікроорганізмів до змін у складі поживного середовища, ризик накопичення

інгібіторів, недосконалість систем моніторингу процесу, а також недостатня кількість пілотних проєктів.

ПРОПОЗИЦІЇ

У перспективі важливо розвивати комплексний підхід до створення адаптивних біогазових установок, які самостійно визначають потреби мікробної популяції в поживних речовинах на основі даних сенсорів та аналізів у режимі реального часу. Крім того, інтеграція біогазових систем у циркулярну економіку дозволить ефективно замикати потоки відходів і перетворювати їх у продукти з доданою вартістю.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ключ В.П. Сумісне анаеробне бродіння гнойових відходів та конденсату газогенераторної установки / В.П. Ключ, Г.О. Четверик // Відроджена енергетика. 2017. № 3. С. 80 – 86
2. Бойко, А. Л. (2020). *Біоенергетика: сучасний стан та перспективи розвитку в Україні*. Київ: Наукова думка.
3. Продуктування біогазу та органічних добрив в агровиробництві / Альтернативні джерела енергії. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://pidruchniki.com/73010/ekologiya/produktuvannya_biogazu_organichnih_dobriv_virobnitstvi
4. Скасків, О. І. (2018). *Альтернативні джерела енергії: навчальний посібник*. Львів: ЛНУ ім. І. Франка.
5. Яценко, О. В., & Приймак, М. Д. (2019). Анаеробна переробка відходів: проблеми та рішення. *Екологічний вісник*, (2), 45–50.
6. Четверик Г.О., Ключ В.П. Утилізація шкідливих органічних відходів термічної газифікації біомаси у біогазовій установці // Міжнародна науково-практична конференція «Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні», тези доповідей. – м. Львів. 2017. С. 126-128.
7. Мірошніченко, В. В. (2021). *Технології отримання біогазу з органічних відходів*. Харків: Техніка.
8. Кравченко, Т. О. (2017). Перспективи виробництва біогазу з агровідходів. *Вісник аграрної науки*, (11), 68–73.
9. Коваленко, С. І., & Павленко, В. Ю. (2020). Вплив мікроелементів на процеси метаногенезу. *Біоенергетика та економіка*, 12(3), 23–29.
10. Беляєв, О. П. (2019). *Поживні середовища у біотехнології: підручник*. Суми: СумДУ.
11. Шевчук, В. Я., & Козак, Н. П. (2020). Створення ефективних рецептур субстратів для біогазових установок. *Екологія довкілля та безпека життєдіяльності*, (4), 55–60.

12. Angelidaki, I., Treu, L., Tsapekos, P., Luo, G., Campanaro, S., Wenzel, H., & Kougias, P. G. (2018). Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives. *Biotechnology Advances*, 36(2), 452–466.
13. Weiland, P. (2010). Biogas production: current state and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 85(4), 849–860.
14. Kusch, S., Pradel, M., & Wellinger, A. (2016). Biogas from waste and renewable resources: An introduction. *Wiley-VCH*.
15. Batstone, D. J., & Virdis, B. (2014). The role of anaerobic digestion in the emerging energy economy. *Current Opinion in Biotechnology*, 27, 142–149.
16. Кучерук П.П. Дослідження кінетичних параметрів при періодичному метановому бродінні суміші гнойових відходів та силосу кукурудзи // Відновл. енергетика. 2016. №1. С.73-78.
17. Шворов С. А. Система керування процесом завантаження біомаси та спеціальних домішок в біореактор для отримання максимальних об'ємів біогазу та органічних добрив / С. А. Шворов, П. Г. Охріменко, Д. В. Чирченко // Енергетика і автоматика. – 2014. – № 3. – С. 155–161.
18. El-Mashad, H. M., & Zhang, R. (2010). Biogas production from co-digestion of dairy manure and food waste. *Bioresource Technology*, 101(11), 4021–4028.
19. Li, Y., Park, S. Y., & Zhu, J. (2011). Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 821–826.
20. Кузнєцов, С. Г. (2018). Субстрати для біогазових установок: агротехнічні аспекти. *Науковий журнал «Агробіоенергетика»*, (1), 14–20.
21. Струк, Т. А. (2020). Перспективи інтеграції біогазових технологій у сільському господарстві. *Сільське господарство і біоенергетика*, 9(2), 29–33.
22. Іващенко, І. О., & Кравець, Л. С. (2021). Порівняльний аналіз складу поживного середовища для анаеробного зброджування. *Біоекономіка та природокористування*, (5), 39–44.

23. Андрущенко, І. М. (2022). Модифікація субстрату для підвищення біогазового виходу. *Біотехнологія*, 15(2), 37–41.
24. Бабич О.С., Кухаренко П.М., Улексін В.О. Біогаз як місцевий енергоресурс для сільськогосподарських підприємств: Матеріали науково-технічної конференції. Дніпропетровськ. 2010. С. 88-90.
25. Токарчук Д.М. Виробництво і використання біогазу в Україні: економічні і соціальні перспективи // Д.М. Токарчук, О.В. Яремчук // Збірник наукових праць Таврійського державного агротехнологічного університету 2013. – Збірник 22. Том 3. С. 338-346 9.
26. Відкриття біогазової установки на Теофіпольщині / Офіційний сайт Теофіпольської районної державної адміністрації. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://rdatf.gov.ua/news/id/2931>.
27. Mussoline, W., Esposito, G., Lens, P. N. L., et al. (2013). Enhanced methane production from co-digestion of pig manure and olive mill wastewater. *Bioresource Technology*, 104, 216–222.
28. Деркач, П. І. (2016). Особливості ферментативного розщеплення органіки у процесі зброджування. *Вісник ХНАУ*, (3), 22–27.
29. Гуменюк, В. О. (2021). Біохімія анаеробного зброджування: монографія. Київ: КНУБА.
30. Левченко, Н. В., & Тимошенко, С. М. (2020). Оцінка ефективності використання різних типів поживних добавок. *Технічна біохімія*, 6(1), 12–18.
31. Zhang, C., Su, H., Baeyens, J., & Tan, T. (2014). Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 383–392.
32. Kougias, P. G., & Angelidaki, I. (2018). Biogas and its upgrading technologies. *Handbook of Biofuels Production*, 3rd ed., Elsevier.
33. Nasir, I. M., Ghazi, T. I. M., & Omar, R. (2012). Anaerobic digestion technology in livestock manure treatment for biogas production: A review. *Engineering in Life Sciences*, 12(3), 258–269.

34. Нікіфорова І. О. Вплив складу сировини на вихід біогазу // *Вісник аграрної науки*. 2018. № 6. С. 47–52.
35. Пархоменко В. О. Стабільність анаеробних процесів у залежності від складу субстрату // *Технологія і техніка АПК*. 2019. № 9. С. 34–39.
36. Зінченко В. М. Економіка виробництва біогазу: сучасний стан // *Аграрна економіка*. 2020. № 2. С. 12–17.
37. Гринчук М. А. Можливості застосування дигестату як добрива // *Екобіотехнології*. 2021. № 3. С. 41–46.
38. Шацький В.В. Вплив структури субстрату на вихід біогазу при метановому зброджуванні/ В.В. Шацький, О.Г. Скляр, Р.В. Скляр, О.О. Солодка // *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. Мелітополь: ТДАТУ, 2013. Вип. 13, том 3. С. 3-12.
39. Ткачук К. К., Ополінський І.О. Методи експериментальних досліджень отримання біогазу з органічних відходів. Актуальні питання енергозбереження як вимога безпеки життєдіяльності: матеріали Міжнародної науково-технічної конференції (7-8 червня 2018 р). Київ, 2018, С. 82-88.
40. Голуб, Н. Б., Потапова, М. В. Вплив співвідношення косубстратів на вихід біогазу при утилізації післяспиртової барди. *Відновлювана енергетика* 2017, 49(2). С 90–97.
41. Четверик Г.О., Ключ В.П. Утилізація шкідливих органічних відходів термічної газифікації біомаси у біогазовій установці // *Міжнародна науково-практична конференція «Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні»*, тези доповідей. м. Львів. 2017. С. 126-128
42. Калетнік Г.М., Пришляк Н.В. Efficiency of state support as the basis of sustainable agriculture. *Економіка, фінанси, менеджмент: актуальні проблеми науки і практики*. 2016. № 5. С. 7-23.

43. Кухарець С. М. Підвищення енергетичної автономності агроєкосистем. Механіко-технологічні основи : монографія / С.М. Кухарець. Житомир : ЖНАЕУ, 2016. 192 с

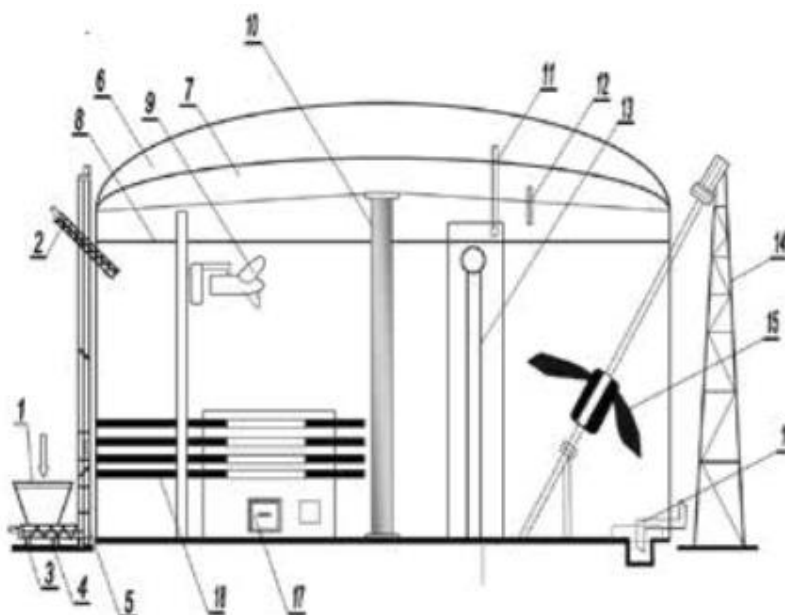
44. Findeisen C. Biogas – trends on the German and the international market / German Biogas Association. 2019. URL: https://www.eclareon.com/sites/default/files/clemens_findeisen-biogas-_trends_on_the_german_and_international_market.pdf

45. Пришляк Н. В. Оцінка ефективності використання індивідуальних біогазових установок для переробки біовідходів селянських господарств. Економіка АПК. 2021. № 3. С. 50-60. <https://doi.org/10.32317/2221-1055.202103050>

46. Коваленко В. Л. Визначення економічної ефективності використання біогазу в умовах промислових підприємств / В. Л. Коваленко, В. В. Кузнецов // Теорія і практика металургії. Науково-технічний журнал. НМАУ. Дніпро. №3. 2019. С. 43-48

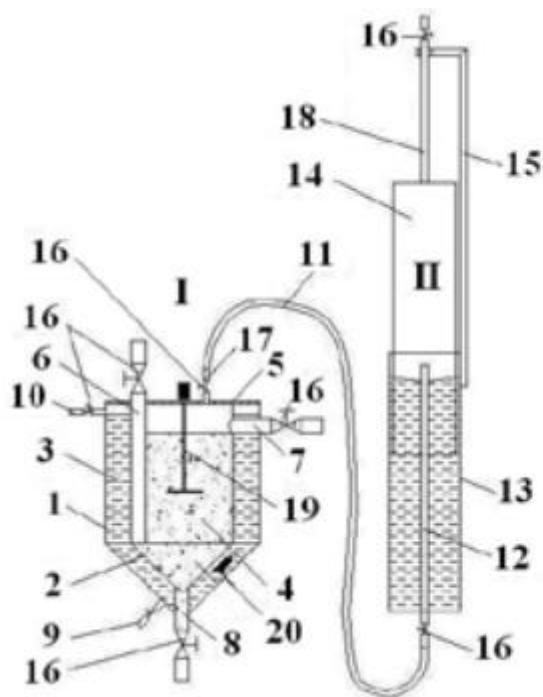
ДОДАТКИ

Додаток А



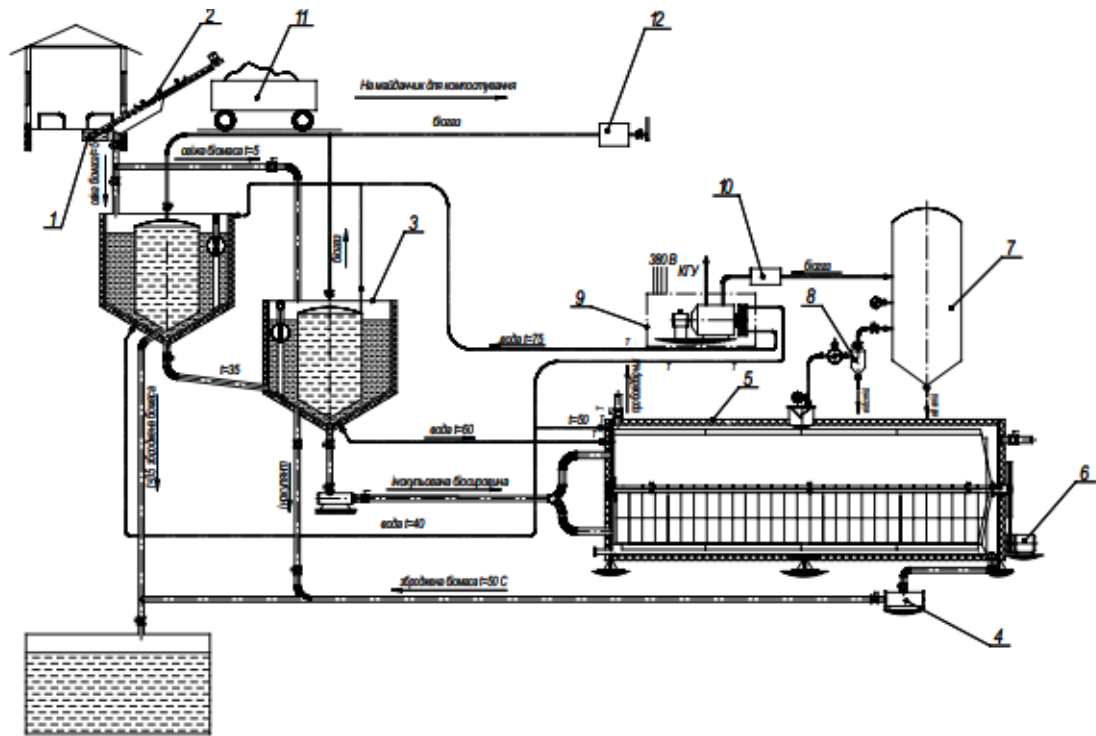
1 – бункер для сипкого субстрату; 2 – подавальний гвинтовий транспортер; 3 – вагова платформа; 4 – гвинтовий нижній транспортер; 5 – піднімаючий гвинтовий транспортер; 6 – повітряний купол; 7 – біогазовий купол; 8 – рівень наповнення; 9 – вертикальна рухома мішалка; 10 – центральна опора; 11 – труба для подачі повітря; 12 – патрубок для біогазу; 13 – труба для подачі рідкого гною; 14 – опора для мішалки; 15 – похила мішалка; 16 – патрубок для відведення біомаси; 17 – система регулювання температури; 18 – система підігріву біомаси.

Схема будови (в перерізі) рідкофазної БГУ



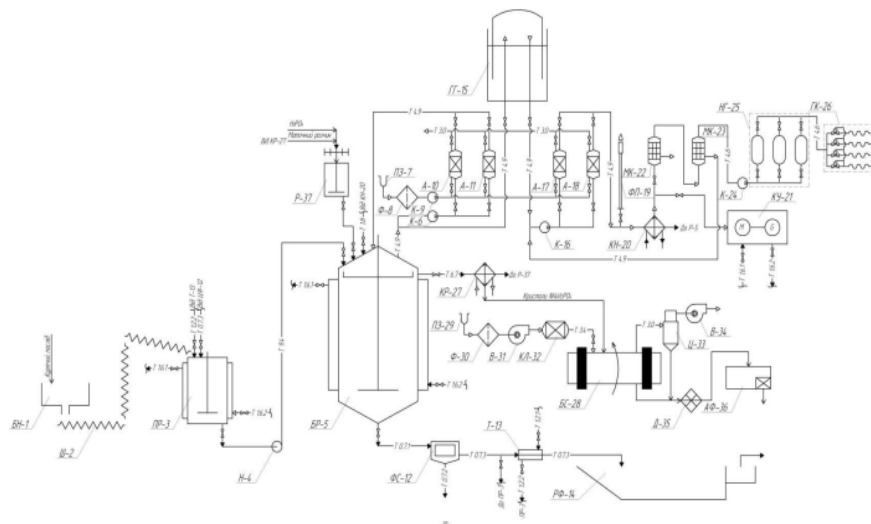
I – метантенк; II – газгольдер; 1 – зовнішній корпус метантенка; 2 – внутрішній корпус метантенка; 3 – водяна рубашка; 4 – активна зона метантенка; 5 – кришка; 6 – труба для подачі біомаси; 7 – труба для зливання шламу; 8 – труба для видалення шламу; 9 – труба для подачі води; 10 – труба для встановлення рівня води у водяній рубашці; 11 – газопровід; 12 – трубка для подачі біогазу; 13 – корпус газгольдера; 14 – циліндр-рівнемір; 15 – направляюча; 16 – кран; 17 – трубка для відведення біогазу з активної зони метантенка; 18 – трубка для відбору газу із газгольдера; 19 – мішалка; 20 – нагрівач

Принципова схема біогазової установки
[41]



1 – накопичувач гною; 2 – похилий транспортер-розділювач; 3 – підігрівач; 4 – гвинтовий насос; 5 – метантенк; 6 – привід; 7 – газгольдер; 8 – відділювач вологи; 9 – когенераційна установка; 10 – редуктор; 11 – тверда фракція гною; 12 – котел для обігріву

БГУ із удосконаленими технологічними модулями



Апаратурна схема анаеробної переробки курячого посліду, що дозволяє зменшити інгібування метаногенезу за високих концентрацій сухих речовин: *БН-1* – бункер-накопичувач; *Ш-2* – шнек; *ПР-3* – приймальний резервуар; *Н-4* – насос відцентровий; *БР-5* – біореактор; *К-6, 9, 16, 24* – компресори; *ПЗ-7, 29* – повітрязабірники; *Ф-8, 30* – фільтри; *А-10, 11, 17, 18* – адсорбери сірководню; *ФС-12* – фільтр-сепаратор; *Т-13* – теплообмінник; *РФ-14* – резервуар фільтрату; *ГТ-15* – газгольдер; *ФП-19* – факельний пальник; *КН-20* – конденсатор; *КВ-21* – когенераційна установка; *МК-22, 23* – мембранні контактори; *НГ-25* – накопичувач стиснутого газу; *ГК-26* – газозаправні колонки; *КР-27* – кристалізатор; *БС-28* – барабанна сушарка; *В-31, 34* – вентилятори; *КЛ-32* – калорифер; *Ц-33* – циклон; *Д-35* – дробарка; *АФ-36* – апарат фасувальний; *Р-37* – реактор; *Т 0.7.1* – органічно-мінеральне добриво; *Т 0.7.2* – тверде органічно-мінеральне добриво; *Т 0.7.3* – рідке органічно-мінеральне добриво; *Т 1.2.1* – вода технічна холодна; *Т 1.2.2* – вода технічна гаряча; *Т 1.6.1* – вода оборотна холодна; *Т 1.6.2* – вода оборотна гаряча; *Т 1.8* – конденсат; *Т 3.0* – повітря відпрацьоване; *Т 3.4* – повітря гаряче; *Т 4.6* – метан; *Т 4.9* – біогаз; *Т 6.7* – розчин $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$; *Т 9.4* – суспензія курячого посліду