

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

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

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 безвідходного анаеробного процесу
біоконверсії органічних відходів у біогаз та дигестат”

Виконав: студент 2 курсу, групи 1
спеціальності

G 21 «Біотехнологія та біоінженерія»
за ОПІ «Біотехнологія та біоенергетика»

Козачок Вадим Сергійович

(прізвище та ініціали)

Керівник: **проф. Буцяк В.І.**

(прізвище та ініціали)

Рецензент: **Філіппов С. І.**

(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**

Козачоку Вадиму Сергійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи “Оптимізація безвідходного анаеробного процесу біоконверсії органічних відходів у біогаз та дигестат”

Керівник магістерської роботи

Буцяк Василь Іванович, 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: субстрати та температурні режими анаеробної ферментації, проекти і технології безвідходного біоконверсії органічних відходів у біогаз та дигестат, оптимізація технологічного процесу.

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: оптимізований безвідходний підхід щодо виробництва біогазу та дигестату як побічного продукту, метаболічні процеси ферментації субстрату в процесі анаеробного зброджування органічних відходів, Хімізм біоконверсії органічних

відходів у біогаз та дигестат, вплив розміру подрібненої соломи у базовому субстраті гній ВРХ: солома (60:40) на динаміку виходу біогазу, вплив рН середовища на динаміку утворення біогазу на 6 добу дослідження, технологічний процес одержання та використання біогазу та дигестату за анаеробної ферментації відходів тваринницьких ферм,

Схеми: принципова схема підготовчого етапу біоконверсії органічних відходів у біогаз та дигестат, опис регламентної схеми одержання біогазу та дигестату шляхом біоконверсії органічних відходів, принципова схема експериментальної біогазової установки, технологічна схема одержання біогазу та дигестату, принципова технологічна схема безвідходної технології утилізації органічних відходів,

6. Консультанти розділів магістерської роботи

Розділ	Консультант ПБ, посада	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1.Літературний огляд.	проф. Буцяк В.І.		
2.Методика експерименту та основні методи досліджень.	проф. Буцяк В.І.		
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

_____ **Вадим КОЗАЧОК**
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник магістерської роботи

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

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ	5
АНОТАЦІЯ	6
ВСТУП	10
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ	13
1.1. Концепція безвідходної технології: світовий досвід	13
1.2. Органічні відходи як сировина для анаеробної біоконверсії	16
1.2.1. Загальні характеристики органічних відходів	16
1.3. Анаеробне зброджування як біотехнологічний процес	20
1.4. Оптимізація параметрів процесу анаеробного зброджування	23
1.5. Отримання та використання біогазу	26
1.6. Дигестат як кінцевий продукт 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	36
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ	39
3.1. Теоретичні основи безвідходної концепції одержання біогазу та дигестату шляхом біоконверсії органічних відходів	39
3.2. Оптимізація окремих ланок технологічного процесу одержання біогазу та дигестату за анаеробного зброджування органічних відходів	41
3.3. Використання дигестату – побічного продукту анаеробного зброджування як якісного органічного добрива	47
3.4. Проблеми та перспективи розвитку безвідходної технології біоконверсії органічних відходів у біогаз та дигестат	53
ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ	57
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	59
ДОДАТКИ	64

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

AЗ – анаеробне зброджування;

ВРХ – велика рогата худоба;

СР – суха речовина;

ТЕС – теплова електрична станція;

ФСА – функціональна система автоматизації;

online monitoring – аналіз в реальному часі;

CHP (Combined Heat and Power) – когенераційні установки перетворюють біогаз у електричну енергію та тепло;

(Z-WAD) – концепція zero-waste anaerobic digestion: біогазові комплекси поєднують у собі не тільки виробництво енергії, а й повну утилізацію залишкових фракцій.

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота обсягом 66 сторінок. Складається із трьох розділів (огляду літератури, умов та методики проведення досліджень, результатів досліджень), вступу, висновків та пропозицій, додатків, списку використаної літератури, що містить 50 джерел. Містить 18 рисунків, 9 таблиць та 3 додатки.

Ключові слова: субстрати та температурні режими анаеробної ферментації, проєкти і технології безвідходного біоконверсії органічних відходів у біогаз та дигестат, оптимізація технологічного процесу.

Кваліфікаційна робота на тему: “Оптимізація безвідходного анаеробного процесу біоконверсії органічних відходів у біогаз та дигестат” сконцентрована на питаннях інтегрованого підходу до використання всіх компонентів органічних відходів, при якому не лише біогаз, а й рідкий та твердий залишок (дигестат) стають об’єктами подальшої переробки або використання у сільському господарстві, комунальному господарстві або енергетичному секторі.

Дана кваліфікаційна робота має на меті всебічно розкрити сучасний стан, теоретичні основи, експериментальні підходи, технологічні рішення та перспективи розвитку оптимізованої безвідходної анаеробної біоконверсії органічних відходів, яка здатна не лише забезпечити виробництво відновлюваної енергії, а й значною мірою вирішити екологічні проблеми поводження з органікою, зробивши крок до сталого майбутнього.

Суттєвим викликом у функціонуванні анаеробних біореакторів є забезпечення максимального енергетичного виходу при одночасному мінімальному утворенні побічних або токсичних продуктів. Це зумовлює необхідність глибокого вивчення процесів, що відбуваються на різних стадіях зброджування – від гідролізу до метаногенезу, а також оптимізації фізико-хімічних параметрів середовища (температура, рН, вологість, C/N

співвідношення, наявність інгібіторів тощо). Крім того, ефективність і безвідходність цього процесу значною мірою залежить від якісної підготовки сировини, балансування мікробіологічних консорціумів, автоматизованого моніторингу процесів у реакторі та раціонального використання дигестату.

Об'єкт дослідження – субстрати для анаеробного зброджування, популяції аборигенних та селекційних метаногенів та технологічні особливості безвідходної технології біоконверсії відходів.

Предмет дослідження – безвідходний анаеробного процесу біоконверсії органічних відходів у біогаз та дигестат

Метою роботи – оптимізація параметрів технологічного процесу безвідходного анаеробного зброджування органічних сільськогосподарських відходів у біогаз та дигестат.

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

- на основі доступних джерел охарактеризувати сучасний стан світових та національних безвідходних технологій щодо біоконверсії органічних відходів у біогаз та дигестат;
- оцінити ефективність щодо одержання біогазу та дигестату різних типів органічної сировини у біогазових установках;
- визначити оптимальні фізико-хімічні та мікробіологічні умови процесу процесу ферментації та запропонувати технологічні параметри щодо повної утилізації продуктів біоконверсії;
- проаналізувати економічну та екологічну ефективність біоконверсійних систем на основі безвідходних технологій;
- розробити практичні рекомендації щодо впровадження безвідходної моделі у різних секторах економіки.

Актуальність теми. В умовах України, де значні обсяги органічних відходів сільськогосподарського та харчового походження залишаються неутилізованими або утилізуються із значними втратами, впровадження безвідходних біоконверсійних технологій є надзвичайно важливим. Це дозволить зменшити залежність від викопного палива, знизити викиди метану та CO₂, покращити якість ґрунтів і сприяти розвитку зеленої енергетики та екологічного підприємництва.

Таким чином, дослідження можливостей оптимізації безвідходного анаеробного процесу перетворення органічних залишків у біогаз та дигестат має не лише наукове, але й чітко виражене практичне, економічне та екологічне значення. Актуальність теми обумовлена необхідністю інтеграції біотехнологічних підходів у комплексну систему управління відходами, що відповідає викликам XXI століття та пріоритетам стратегії сталого розвитку України й міжнародної спільноти.

Науковий внесок роботи. За вмістом одержаний дигестат складається із залишків проферментованого субстрату, мертвих та активних популяцій мікроорганізмів до 10¹⁴ колоній, основних елементів живлення для рослин (макро- та мікроелементи N, P, K, S, Co, Mo, Zn, Fe, Mn), значний вміст доступного на 60-80% Нітрогену для рослин, рН на рівні 6,5-8,0, співвідношення між Карбоном та Нітрогену в межах 20-30 та незначну кількість патогенної мікрофлори і насіння бур'янів.

Практична цінність роботи. Розробка та впровадження систем моніторингу і автоматичного регулювання параметрів процесу дозволяють підвищити його продуктивність та стабільність, що особливо важливо при масштабних комерційних установках. За внесенням зазначеної вище дози дигестату двох фракцій (рідкої – 2,0 т/га та твердої – 8,0 т/га), приріст проростків кукурудзи на 12 добу експерименту відповідно складав: для рідкої

фракції – 26,2 мм та для твердої фракції – 24,2 мм. Одержані дані безпосередньо вказують, що побічний продукт анаеробної ферментації – дигестат здійснює сприятливий вплив на ріст та розвиток рослин і його можна активно використовувати у землеробстві, знижуючи або, навіть, повністю відмовитися від використання мінеральних добрив.

ВСТУП

У контексті глобальної екологічної кризи та загроз вичерпання традиційних джерел енергії питання раціонального використання органічних відходів набуває особливої актуальності. Сучасна світова економіка переживає трансформацію в напрямі екологізації виробничих процесів та переходу до моделі циркулярної економіки, в якій відходи розглядаються не як баласт, а як вторинний ресурс [1].

Водночас збільшення обсягів біологічно розкладних відходів, особливо харчових, сільськогосподарських і стічних, потребує ефективних методів їх утилізації з мінімальним негативним впливом на довкілля. Одним із перспективних підходів до вирішення цієї проблеми є застосування анаеробної біоконверсії, яка дозволяє перетворити органічну біомасу на висококалорійний біогаз і поживний дигестат – цінний органічний залишок.

Анаеробне зброджування – це біотехнологічний процес, в основі якого лежить синтрофна діяльність групи мікроорганізмів у безкисневому середовищі. Цей процес не лише забезпечує енергетичну утилізацію органіки, а й дає можливість реалізувати безвідходну модель біотехнології, в якій всі продукти процесу мають економічне і екологічне значення [2].

Важливо підкреслити, що в умовах стрімкого зростання попиту на альтернативні джерела енергії та вимог до сталого розвитку, створення ефективних, стабільних та оптимізованих систем анаеробної переробки органічних залишків є одним із пріоритетів сучасної біоенергетики.

Водночас, слід зазначити, що незважаючи на численні наукові публікації, практичні кейси та наявність усталених технологій, питання повної безвідходності анаеробної біоконверсії лишається відкритим. Багато процесів вимагають додаткового енергоспоживання (наприклад, на сушіння або очистку газу), а також дослідження впливу використання дигестату на якість ґрунтів і екосистеми загалом.

У сучасному світі проблема поводження з органічними відходами набула масштабів глобальної екологічної та економічної кризи. Щорічно у світі

утворюються сотні мільйонів тонн органічних залишків – відходів сільського господарства, харчової промисловості, комунального сектору та очисних споруд. Згідно з даними ООН та Продовольчої та сільськогосподарської організації (FAO), понад 30% усіх харчових продуктів у світі втрачаються або перетворюються на відходи [3, 4].

Водночас більшість цих біологічно активних решток потрапляє на сміттєзвалища, що спричиняє потужне навантаження на навколишнє середовище: виділення парникових газів, забруднення ґрунтів і вод, а також втрату потенційно корисної сировини.

Особливої уваги заслуговує анаеробна біоконверсія як одна з найбільш перспективних біотехнологій у сфері поводження з органічними відходами. У порівнянні з традиційними методами, такими як спалювання чи компостування, анаеробне зброджування дозволяє не лише зменшити об'єм відходів, але й одержати цінний вторинний енергетичний ресурс – біогаз, який може бути використаний для виробництва теплової та електричної енергії.

У свою чергу, побічний продукт зброджування – дигестат – є джерелом органічних і мінеральних сполук, що можуть бути ефективно застосовані як добриво або ґрунтополіпшувач у сільському господарстві.

Однак, найбільш інноваційною і стратегічною є концепція безвідходної біоконверсії, яка передбачає повне або майже повне використання всіх компонентів відходів, що надходять до біореактора. Такий підхід не лише забезпечує зменшення навантаження на екосистеми, а й створює умови для замкненого циклу речовин, наближеного до природних біоценозів, що відповідає сучасним вимогам циркулярної економіки та сталого розвитку [5].

У зв'язку з цим зростає потреба в науково обґрунтованому підході до оптимізації параметрів анаеробного зброджування, які б дозволяли досягти високої енергоефективності, стабільності процесу, повної утилізації сировини та мінімізації екологічних ризиків. Зокрема, особливого значення набуває дослідження впливу температурного режиму, рН-середовища, співвідношення

C:N, наявності інгібіторів, часу гідравлічного утримання та мікробіологічного складу біомаси на загальний вихід біогазу та якість дигестату.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1. Концепція безвідходної технології: світовий досвід

Проблема енергетичної залежності, зростання обсягів органічних відходів та деградація довкілля стимулюють пошук новітніх технологій з перетворення біомаси на корисні продукти. Однією з найбільш ефективних і перспективних технологій у цьому контексті вважається анаеробна біоконверсія, яка забезпечує отримання біогазу як відновлюваного джерела енергії, а також дигестату як органічного добрива.

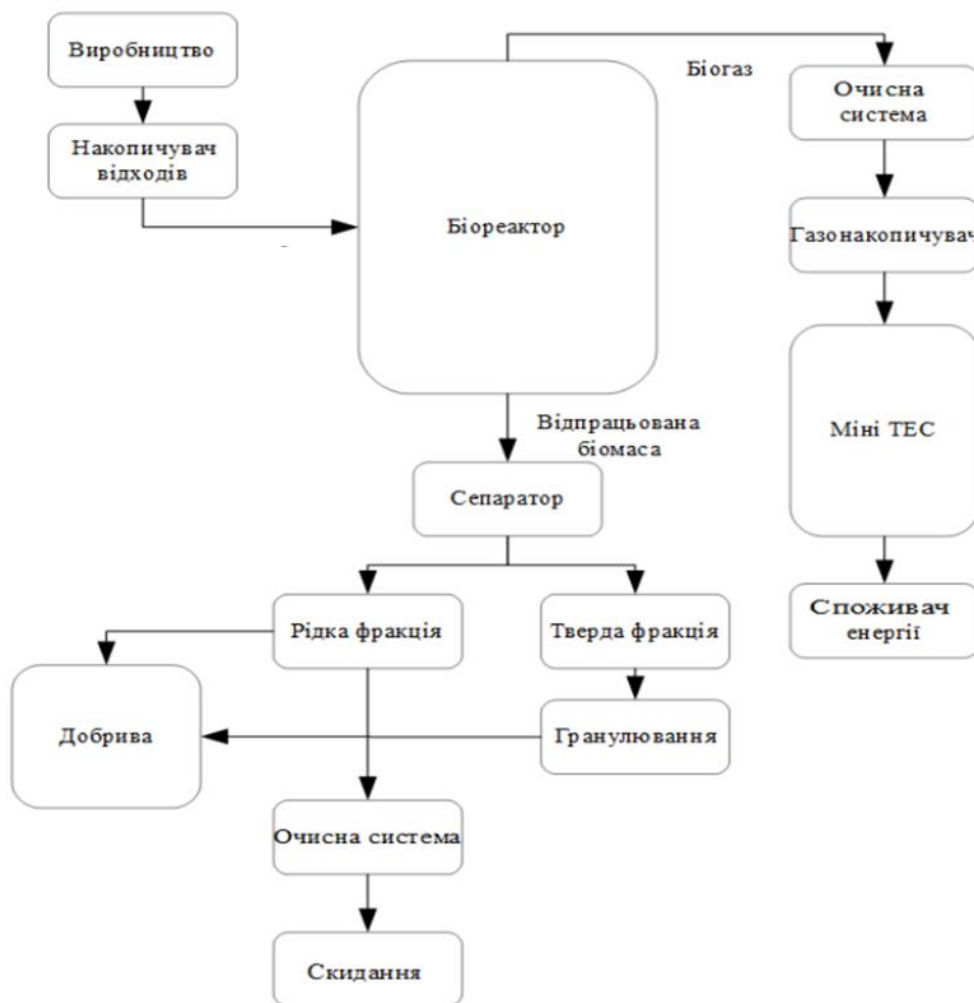


Рис.1.1. Оптимізований безвідходний підхід щодо виробництва біогазу та дигестату як побічного продукту [6].

Однак стандартні технології часто супроводжуються утворенням надлишків відходів, непродуктивних побічних речовин і нестабільністю процесів. Тому з'являється нова концепція – оптимізований безвідходний

підхід, що базується на принципах кругової біоекономіки, екобіотехнології та сталого розвитку (рис. 1.1).

Концепція zero-waste anaerobic digestion (Z-WAD) активно розвивається в Німеччині, Данії, Австрії та Нідерландах, де біогазові комплекси поєднують у собі не тільки виробництво енергії, а й повну утилізацію залишкових фракцій (Weiland, 2010). У таких системах передбачене: компостування або сушіння дигестату для виробництва органічного добрива; знешкодження газоподібних відходів (H_2S , NH_3 , CO_2); використання CO_2 в тепличному господарстві чи для культивування мікроводоростей; рекуперація тепла; очищення біогазу до рівня біометану [8].

У публікаціях Holm-Nielsen et al. (2009) зазначено, що сучасні біогазові установки дедалі частіше інтегруються з аграрними, промисловими або муніципальними інфраструктурами, що дозволяє створювати локальні енерго-біоцикли без генерації вторинного забруднення.

Дигестат, як побічний продукт анаеробного зброджування, за своєю структурою є цінним матеріалом, багатим на азот, фосфор, калій, макро- та мікроелементи (Möller & Müller, 2012). Проте через високий вміст амонійного азоту, неприємний запах та потенційне накопичення важких металів, його використання у сільському господарстві потребує ретельного регламентування.

Згідно з дослідженнями Tambone et al. (2010), попередня стабілізація та дозування дигестату в агросистемах підвищують урожайність, покращують структуру ґрунту і зменшують залежність від мінеральних добрив. Крім того, при анаеробному компостуванні або вермікультивуванні дигестату утворюється біогумус – високоякісний органічний матеріал [7].

Світовий науковий прогрес зосереджений на розробці технологічних рішень, що дозволяють оптимізувати всі етапи зброджування та утилізації залишків.

До таких інновацій належать: термо-хімічна або лужна деструкція перед подачею на ферментацію (Carrere et al., 2010); електропереробка субстрату – подача низької напруги для стимуляції мікробного метаболізму; іммобілізація

мікроорганізмів на носіях (наприклад, біовугілля); інтеграція з водоочисними спорудами та фітотехнологіями; аналіз у реальному часі (online monitoring) з використанням сенсорів для pH, CH₄, CO₂, TSS та NH₄⁺.

У дослідженнях Luo et al. (2016) було доведено, що ко-ферментація гною та харчових відходів забезпечує більш стабільне середовище для метаногенних архей та дозволяє досягти вищих показників зброджування.

Національна практика виробництва біогазу в Україні перебуває на стадії розвитку. Основні бар'єри, згідно з дослідженнями Українського центру енергоефективності (2022), включають: нестачу інвестицій у високотехнологічні біогазові установки; низький рівень сортування біовідходів; відсутність державної підтримки використання дигестату; обмежений доступ до сучасного обладнання та сервісного обслуговування; низьку культуру поводження з органічними відходами [18].

Однак перспективи є значними: аналітики Програми розвитку ООН прогнозують, що потенціал біомаси в Україні дозволяє щороку генерувати біогаз, еквівалентний 8-9 млрд м³ природного газу.

Проведений літературний аналіз свідчить про високий потенціал безвідходної анаеробної переробки в умовах сучасної біоекономіки. Тенденції до інтеграції біогазових установок із іншими секторами (аграрним, промисловим, муніципальним) відкривають нові шляхи для комплексної утилізації органіки [11].

Ключ до оптимізації – в управлінні мікробним консорціумом, використанні попередньої обробки та моніторингу процесів у реальному часі. Україна має необхідну сировинну базу, однак потребує інституційної, фінансової та освітньої підтримки для впровадження безвідходних технологій біоконверсії.

1.2. Органічні відходи як сировина для анаеробної біоконверсії

У літературі останніх десятиліть анаеробне зброджування розглядається як поетапний мікробіологічний процес, який включає чотири основні стадії: гідроліз, ацидогенез, ацетогенез та метаногенез (Angelidaki & Sanders, 2004). На кожному з етапів задіяні окремі групи мікроорганізмів, які перебувають у делікатній метаболічній рівновазі. Будь-які порушення у температурному режимі, рН, вмісті інгібіторів або співвідношенні C/N можуть викликати гальмування або повну зупинку процесу (Chen et al., 2008).

Роботи Vavilin et al. (2005) описують математичні моделі динаміки анаеробного зброджування, що є основою для оптимізації процесів і прогнозування метанопродукції. Згідно з публікаціями Ahring (2003), різні субстрати (гній, харчові відходи, силос, стічні води) мають неоднакову біогазову потенцію і потребують індивідуального підходу до попередньої обробки. Наприклад, целюлозовмісні матеріали потребують термічної або лужної деструкції для покращення гідролізу [10].

1.2.1. Загальні характеристики органічних відходів

Органічні відходи становлять одну з найважливіших сировинних баз для виробництва біогазу в умовах сталого розвитку та зеленої енергетики. Ці відходи утворюються у всіх секторах економіки – сільському господарстві, харчовій промисловості, житлово-комунальному господарстві, закладах громадського харчування, побуті тощо. Вони складаються переважно з біорозкладної фракції: вуглеводів, білків, ліпідів, целюлози, геміцелюлози, пектинів та інших органічних полімерів [9].

До основних категорій органічних відходів, що використовуються як сировина для анаеробного зброджування, належать: сільськогосподарські

відходи: гній, підстилка, солома, силос, кукурудзяні стебла, післяжнивні залишки; харчові відходи: обрізки овочів і фруктів, залишки готової їжі, залишки виробництва молока, м'яса, риби, олії, пива; біоорганіка зі сміття: кухонні органічні відходи, лушпиння, кістки; промислові органічні стоки: стічні води харчової, целюлозно-паперової та м'ясопереробної промисловості; біологічні залишки з очисних споруд: осади стічних вод, біологічний мул [12, 13].

Усі ці типи відходів мають спільну властивість – високу концентрацію органічної речовини, здатної до анаеробного розкладу із утворенням метану та інших супутніх продуктів.

Для ефективного біогазового виробництва важливо враховувати біохімічний склад органічних відходів, адже саме він визначає швидкість та обсяг утворення біогазу. Основними параметрами, що враховуються при підборі сировини, є: вміст сухої речовини (Dry Matter, DM); органічна суха речовина (Volatile Solids, VS); співвідношення вуглецю до азоту (C:N) тощо (табл.1.1).

Таблиця 1.1

Склад органічних відходів і їх придатність до ферментації [15].

Тип сировини	Сухі речовини (%)	Органічна речовина (%)	BMP (м ³ CH ₄ /т)
Гній ВРХ	8–12	75–80	20–30
Харчові відходи	15–25	90–95	100–200
Обрізки овочів	10–15	85–90	80–150
Осад стічних вод	3–6	60–70	10–20
Кукурудзяний силос	25–30	90–95	180–220

Органічні відходи з високим вмістом жирів та білків мають вищу енергетичну цінність, однак потребують ретельного контролю для запобігання утворенню токсичних сполук (амоніаку, сульфідів тощо) [14].

Вихід біогазу значною мірою залежить від структури та доступності субстрату для мікроорганізмів. Для покращення ферментативного розщеплення макромолекул застосовуються такі методи попередньої обробки: механічна деструкція (подрібнення до 5-10 мм); термічна обробка (60-120°C) – покращує гідроліз білків і клітковини; хімічна деструкція (лужне або кислотне оброблення); біологічна обробка (ферменти, активні мікроорганізми); соноліз та електроліз – інноваційні способи розриву клітинних стінок (рис.1.2).

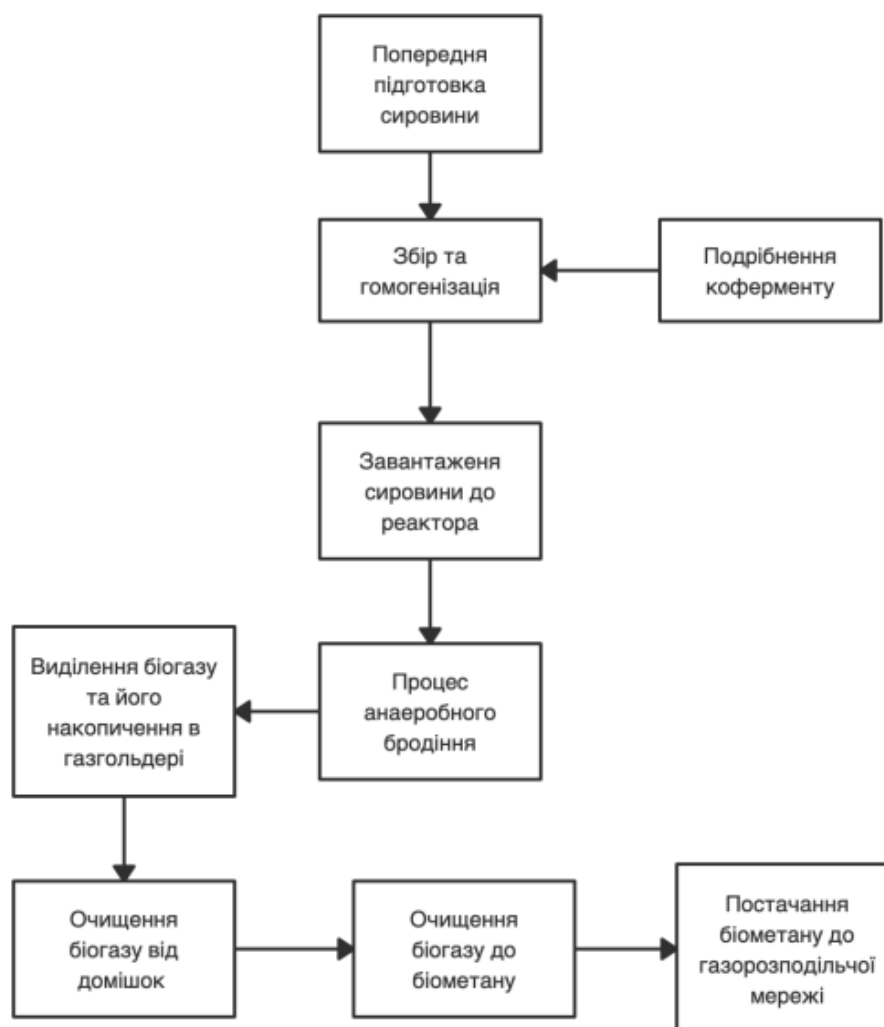


Рис. 1.2. Принципова схема підготовчого етапу біоконверсії органічних відходів у біогаз та дигестат [16].

Такі методи не лише збільшують доступність субстрату, але й скорочують час гідролізу, що особливо важливо в умовах промислової ферментації.

Коферментація – це змішування кількох видів органічних відходів для досягнення оптимального балансу поживних елементів, буферної здатності та C:N. Наприклад: додавання кухонних відходів до гною підвищує вміст швидко ферментованої речовини; комбінація залишків стічних вод із харчовими відходами покращує метаногенез; суміш соломи (високий вміст Карбону) з гноєм (високий вміст Нітрогену) вирівнює співвідношення C:N $\approx$ 25:1 [17].

Дослідження показали, що коферментація дозволяє збільшити виробництво метану на 30–50%, покращує стабільність процесу і зменшує ризик закислення середовища.

За даними Міністерства енергетики України в країні щорічно утворюється: понад 20 млн тонн гною; близько 8 млн тонн харчових відходів; понад 5 млн тонн осадів стічних вод.

Ці ресурси, при належній організації збирання, сортування та підготовки, можуть забезпечити стабільне джерело сировини для біогазових установок.

Таким чином: органічні відходи – це потужна та недооцінена ресурсна база для виробництва біогазу. Характеристики сировини мають визначальний вплив на ефективність ферментації та якість дигестату. Попередня обробка та коферментація є ключовими методами для покращення зброджування. В Україні наявний значний потенціал органічної біомаси, однак реалізація цього потенціалу вимагає інфраструктурних та нормативних зрушень [19].

1.3. Анаеробне зброджування як біотехнологічний процес

Анаеробне зброджування – це багатофазовий мікробіологічний процес розкладання органічних речовин у безкисневому середовищі з утворенням метану (CH_4), вуглекислого газу (CO_2), сірководню (H_2S), а також залишкових мінералів, що залишаються у вигляді дигестату. Цей процес є основою для перетворення різноманітних органічних відходів у біогаз і використовується у біоенергетиці, екології, агротехнологіях та переробці стічних вод.

У відсутності кисню, метаболізм мікроорганізмів переходить на альтернативні шляхи енергетичного забезпечення, при яких кінцевими продуктами стають коротколанцюгові леткі жирні кислоти (VFA), водень (H_2), CO_2 , і в кінцевому підсумку – метан. Процес є природним аналогом біологічного кругообігу речовин і водночас одним з найстаріших біотехнологічних методів, що використовує мікроорганізми для утилізації органіки з користю для людини [20].

Стадії анаеробного зброджування

Процес відбувається у чотири основні фази [21]:

- гідроліз – на цьому етапі складні органічні полімери – вуглеводи (крохмаль, целюлоза), білки та жири – розщеплюються на мономери (цукри, амінокислоти, жирні кислоти) за допомогою екзоферментів, що виділяються гідролітичними бактеріями;
- ацидогенез – мономери, отримані в процесі гідролізу, метаболізуються бактеріями-ацидогенами з утворенням летких жирних кислот (оцтова, масляна, пропіонова), спиртів, CO_2 , NH_3 і H_2 ;
- ацетогенез – вторинні продукти, такі як пропіонова та масляна кислоти, перетворюються в оцтову кислоту, CO_2 і водень під впливом облігатних ацетогенів – бактерій, що синтезують оцтову кислоту;
- метаногенез – на завершальному етапі метаногенні археї (архебактерії) використовують оцтову кислоту, водень і CO_2 для синтезу метану. Цей етап визначає кінцевий вихід біогазу, де частка CH_4 може сягати 50–70% (рис. 1.3).

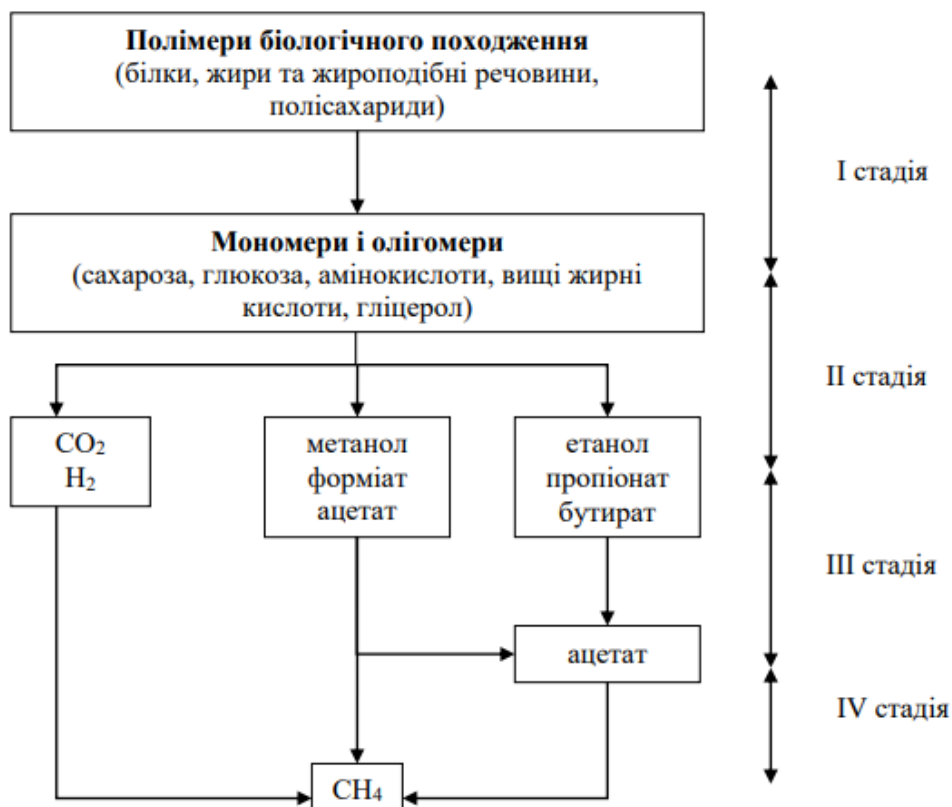


Рис. 1.3. Метаболічні процеси ферментації субстрату в процесі анаеробного зброджування органічних відходів [22].

Система анаеробного зброджування є високоспеціалізованим консорціумом бактерій та архей, що перебувають у складних симбіотичних зв'язках. Кожна група мікроорганізмів строго залежить від продуктів життєдіяльності попередньої: гідролітичні бактерії (*Bacillus*, *Clostridium*); ацидогенні бактерії (*Enterobacter*, *Streptococcus*); ацетогенні бактерії (*Syntrophomonas*, *Syntrophobacter*); метаногенні археї (*Methanosaeta*, *Methanosarcina*) [23].

Оптимізація процесу неможлива без розуміння їхніх потреб: температури, рН, концентрації субстрату, токсичності середовища тощо.

Для досягнення стабільного метаногенезу критично важливо дотримуватись низки параметрів (табл. 1.2)

Таблиця 1.2

Оптимальні параметри для біоконверсії органічних відходів

Параметр	Оптимальні значення
Температура	35–40 °C (мезофільна) або 50–55 °C (термофільна)
pH середовища	6.8–7.4
C:N співвідношення	20:1 – 30:1
Гідравлічний час витримки	15–30 днів
Вміст сухої речовини	8–12%

Зміщення від оптимальних умов може призвести до інгібування або повного зупинення процесу.

Залежно від властивостей сировини та масштабів застосування, обирають типи реакторів: CSTR (continuous stirred tank reactor) – найпоширеніший тип; UASB (upflow anaerobic sludge blanket) – для рідких відходів; Plug-flow реактори – для густих фракцій; псевдозріджені системи – для біоенергетичних комплексів [24].

Інженерне проектування реактора базується на рівновазі між швидкістю генерації метану та розкладання субстрату.

Продукти анаеробного зброджування: біогаз – суміш (~55–70% CH₄, ~30–45% CO₂, сліди H₂S, NH₃, H₂), використовується як паливо; дигестат – залишок збродженого субстрату з високим агрономічним потенціалом (органічне добриво, покращувач ґрунту); тепло та електроенергія – в разі комбінованого виробництва (CHP – combined heat and power).

Анаеробне зброджування – це високоефективний, адаптивний та екологічно безпечний біотехнологічний процес. Його успішне впровадження залежить не лише від технічної бази, а й від розуміння складних взаємозв'язків у мікробіологічних системах, оптимізації умов ферментації та грамотної переробки побічних продуктів. У контексті переходу до сталої біоекономіки, АЗ посідає центральне місце серед сучасних біотехнологій переробки органічних відходів [25].

1.4. Оптимізація параметрів процесу анаеробного зброджування

Процес анаеробного зброджування є складним багатофакторним біотехнологічним механізмом, ефективність якого значною мірою залежить від оптимальних фізико-хімічних та біологічних параметрів середовища. Його оптимізація полягає в такому налаштуванні умов, при якому забезпечується максимальне утворення метану з мінімальним ризиком інгібування метаболічної активності мікроорганізмів. У цьому контексті ключовими є такі параметри, як температура, рН, співвідношення C:N, гідравлічний час витримки, концентрація сухої речовини, а також попередня обробка субстрату [26].

Температура суттєво впливає на активність мікроорганізмів, тому її підтримка в оптимальному діапазоні є вирішальною: мезофільний режим (35-40 °C): найбільш стабільний, адаптований до широкого спектра відходів, економічно вигідний для довготривалого процесу; термофільний режим (50-60 °C): забезпечує вищу швидкість деградації та більший вихід біогазу, однак потребує ретельнішого контролю умов і є енергозатратним.

Метаногенні археї є надзвичайно чутливими до кислотності середовища. Для їх активності оптимальний рівень рН – 6.8-7.4. Коливання рН можуть спричинити накопичення летких жирних кислот (VFA), що призводить до ацидозу й пригнічення метаногенезу. Для стабілізації середовища використовують буферні системи – бікарбонати, фосфати, а також дозування карбонату кальцію (CaCO_3) [27].

Оптимальне співвідношення C:N у субстраті має становити 20:1 – 30:1. Надлишок вуглецю може спричинити дефіцит азоту й зниження синтезу білкових структур у мікробів, а надлишок азоту призводить до накопичення аміаку (NH_3), який інгібує ферментативну активність. У практиці досягнення потрібного співвідношення часто досягається шляхом співферментації різних видів органічних відходів (наприклад, харчові відходи + гній + солома) [28].

Механічне подрібнення, термічна, хімічна або біологічна підготовка (наприклад, лужна гідролізація або ферментативне розщеплення) підвищують

доступність полімерних субстратів для гідролітичних ферментів. Це особливо важливо для лігноцелюлозних відходів, які характеризуються низькою біодоступністю органічного Карбону (табл.1.3).

Таблиця 1.3

Вплив методів підготовки субстрату на його активність
щодо зброджування

Метод підготовки	Вплив на ефективність зброджування
Подрібнення	Збільшує площу поверхні, зменшує час гідролізу
Термічна обробка	Деструкція клітинні стінки, знижує в'язкість
Хімічна обробка	Полегшує руйнування лігніну
Ферментативна обробка	Селективно розщеплює полімери до мономерів

Важливим показником є також гідравлічний час витримки – це середній час перебування субстрату в реакторі, що залежить від температури, типу сировини та типу реактора. Для мезофільних умов зазвичай він становить 20–30 днів, для термофільних – 12–20 днів. Зменшення HRT без компенсації активності мікробів призводить до втрати метану й накопичення летких кислот.

Процеси високосухої ферментації (20-30% CP) дозволяють обробляти густі субстрати, але потребують специфічних конструкцій реакторів (наприклад, плаг-флоу або шнекові системи). Оптимальний рівень CP – 8-12% для традиційних CSTR-реакторів. Вища концентрація може перешкоджати перемішуванню, утворенню біоплівки і зменшенню ефективної біоконверсії [29].

Перемішування та анаеробність сприяють інтенсивному перемішуванню, що покращує контакт між мікробами й субстратом, але надмірне – може пошкодити мікробні флокули або біоплівки, а також сприяє забезпеченню повної анаеробності (відсутність кисню) є критичним: навіть короткочасне проникнення повітря призводить до загибелі метаногенів.

Середовищні токсиканти – важкі метали, сірководень, аміак, антибіотики – повинні бути під контролем або видалені попередньо. Наприклад, $\text{NH}_3 > 1.5$ г/л уже негативно впливає на мікробіоту.

Сучасні біогазові установки використовують системи SCADA, які в реальному часі відстежують: температуру, рН, редокс-потенціал, концентрацію CH_4/CO_2 у біогазі, рівень летких жирних кислот та аміаку.

Це дозволяє моделювати та оперативно регулювати параметри ферментації, зменшуючи ризики аварійних зупинок.

Оптимізація параметрів процесу анаеробного зброджування – це критичний напрям біотехнологічного управління, який дозволяє підвищити вихід біогазу, покращити якість дигестату, стабілізувати мікробіологічну систему та мінімізувати негативні екологічні впливи. Інтеграція технологічної гнучкості з науково обґрунтованими підходами до управління мікробним консорціумом дозволяє досягти максимального потенціалу біоконверсії органічних відходів [30].

1.5. Отримання та використання біогазу

Біогаз – це газоподібний продукт анаеробного (безкисневого) розкладу органічних речовин мікроорганізмами. Основними компонентами біогазу є: метан (CH_4) – 50–75%, вуглекислий газ (CO_2) – 25–45%, сірководень (H_2S) – до 1%, водяна пара (H_2O), сліди: амоніаку (NH_3), азоту (N_2), водню (H_2).

Високий вміст метану забезпечує високу енергетичну цінність біогазу (нижча теплота згоряння $\sim 20\text{--}25 \text{ МДж/м}^3$), що робить його ефективним відновлюваним паливом (рис.1.4).

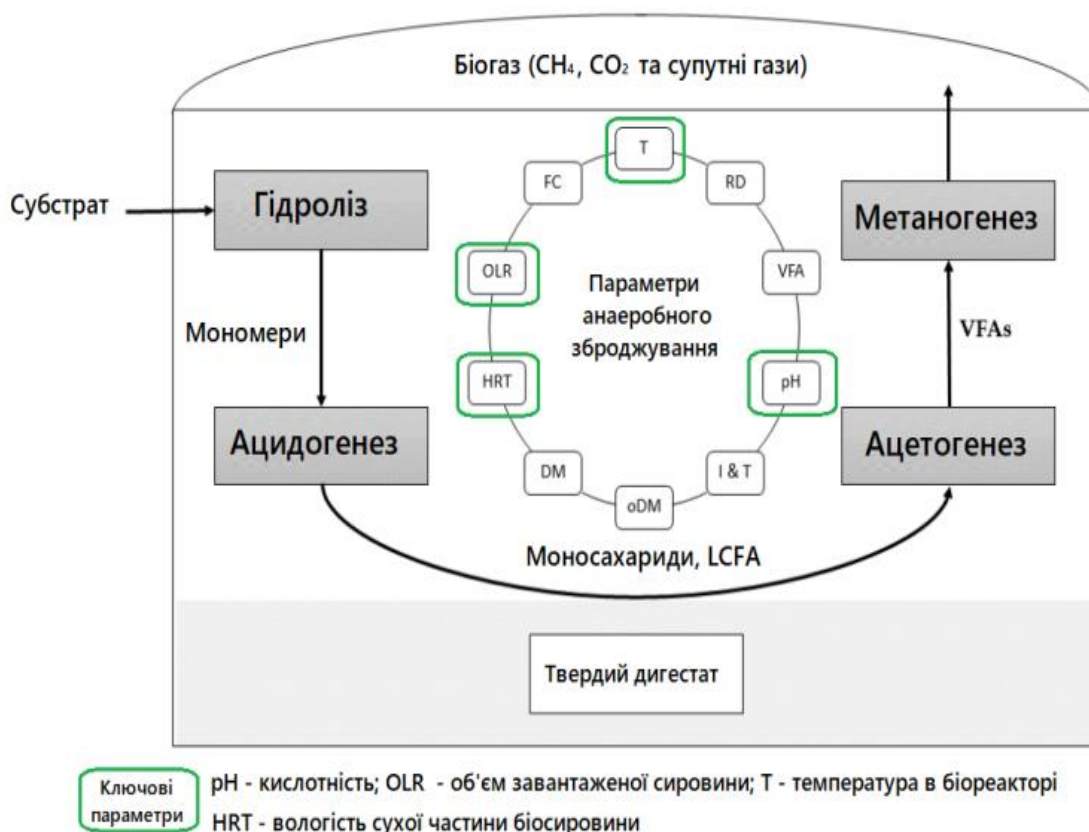


Рис. 1.4. Хімізм біоконверсії органічних відходів у біогаз та дигестат

Процес отримання біогазу охоплює кілька основних етапів, а саме [31]:

- підготовка сировини – подрібнення органічних відходів, попередня термо-, хімічна або ферментативна обробка, корекція вологості та співвідношення C:

- завантаження в реактор – субстрат подається в герметичний анаеробний біореактор, що забезпечує постійний температурний режим, перемішування та ізоляцію від кисню;

- фази зброджування – біоконверсія проходить чотири етапи – гідроліз, ацидогенез, ацетогенез, метаногенез;

- збір і очищення біогазу – біогаз накопичується у газгольдері та далі піддається очищенню від: сірководню (H_2S) – за допомогою адсорбентів (залізооксидні фільтри, активоване вугілля), CO_2 – у разі виробництва біометану, вологості – охолодженням або осушувачами.

Біогаз є універсальним джерелом енергії: спалювання у котлах – для отримання тепла; CHP (Combined Heat and Power) – когенераційні установки перетворюють біогаз у електричну енергію та тепло; теплогенератори для сушіння продукції, обігріву теплиць, ферм.

Після ретельного очищення від CO_2 біогаз перетворюється у біометан (95–98% CH_4), який: відповідає параметрам природного газу; може закачуватись у газорозподільні мережі; використовується як паливо для транспорту (BioCNG; зберігається в балонах під тиском).

На сільськогосподарських підприємствах біогаз використовується для: заміщення природного газу та електроенергії, автономного забезпечення ферм та елеваторів, обігріву приміщень для тварин, живлення теплиць або сушарок для зерна [34].

Економічні та екологічні переваги: зменшення витрат на традиційні енергоносії; можливість продажу надлишкової електроенергії в енергосистему за “зеленим тарифом”; зниження викидів парникових газів та неприємних запахів; утилізація органічних відходів без шкоди довкіллю; отримання дигестату, який можна використовувати як добриво.

Отримання та використання біогазу є ключовою частиною циркулярної економіки та біоенергетики. Цей процес дозволяє не тільки ефективно утилізувати органічні відходи, а й виробляти відновлювану енергію, що знижує залежність від викопного палива. Біогазова технологія – це не лише енергія, а й

екологія, агрономія, сталий розвиток. Її впровадження – шлях до економічної вигоди, енергетичної безпеки та екологічної рівноваги [35].

1.6. Дигестат як кінцевий продукт анаеробного зброджування

Дигестат – це залишковий продукт анаеробного зброджування органічних речовин після вилучення біогазу. Його склад залежить від типу сировини, технологічного режиму зброджування, тривалості процесу та параметрів ферментації [36-39].

Дигестат поділяється на дві фракції: тверда фракція – містить недеградовану органіку, целюлозу, лігнін, органо-мінеральні комплекси; рідка фракція – багата на розчинні азотні сполуки (аміак), фосфати, калій, гумусові речовини.

Дигестат є високоцінним органічним добривом з властивостями, які роблять його привабливою альтернативою мінеральним добривам (табл.1.4).

Таблиця 1.4

Хімічний профіль дигестату	
Компонент	Середнє значення (на прикладі гною/пожнивних решток)
Сухі речовини	6-12%
Органічна речовина	50-80% сухої маси
Азот (загальний)	3-8 г/л
Фосфор (P_2O_5)	1-4 г/л
Калій (K_2O)	4-10 г/л
pH	7.5-8.5
C:N співвідношення	10-14 (оптимальне для ґрунтів)

Окрім поживних елементів, дигестат містить такі мікроелементи як (Fe, Zn, Cu, Mn), ферменти та залишки мікробних біомас.

Як добриво дигестат сприяє підвищенню родючості ґрунтів завдяки вмісту азоту, фосфору, калію; поліпшення структури ґрунту (завдяки органічним залишкам). Мікробіологічна активність сприяє формуванню гумусу, а також забезпечує регулювання рН завдяки буферним властивостям дигестату (табл.1.5).

Біологічний вплив супроводжується: підвищення вмісту гумінових речовин; пригніченням патогенів (завдяки високій температурі ферментації) та поліпшенням вологозатримуючої здатності ґрунтів.

Таблиця 1.5

Способи застосування дигестату		
Форма	Спосіб використання	Пояснення
Рідкий дигестат	Через краплинне зрошення, внесення під корінь, ферментація	Миттєва доступність поживних речовин
Тверда фракція	Компостування, внесення в міжряддя, мульчування	Довготривала дія, поліпшення структури ґрунту
Гранулювання	Сушіння і пресування для отримання гранульованих добрив	Зручно для транспорту і зберігання

Екологічні переваги використання дигестату зводяться до наступного: заміна мінеральних добрив і зменшення антропогенного навантаження на ґрунти; рециклінг поживних речовин у межах замкнених біоциклів; зменшення емісій N_2O (парникового газу), що утворюється при розкладі необроблених органічних відходів; утилізація надлишкових поживних речовин у регіонах з перенасиченням агрохімікатами [40].

Однак існують потенційні ризики та обмеження використання дигестату, а саме: засолення ґрунтів при надмірному внесенні; акумуляція важких металів (залежно від сировини); потреба у нормативному регулюванні якості дигестату;

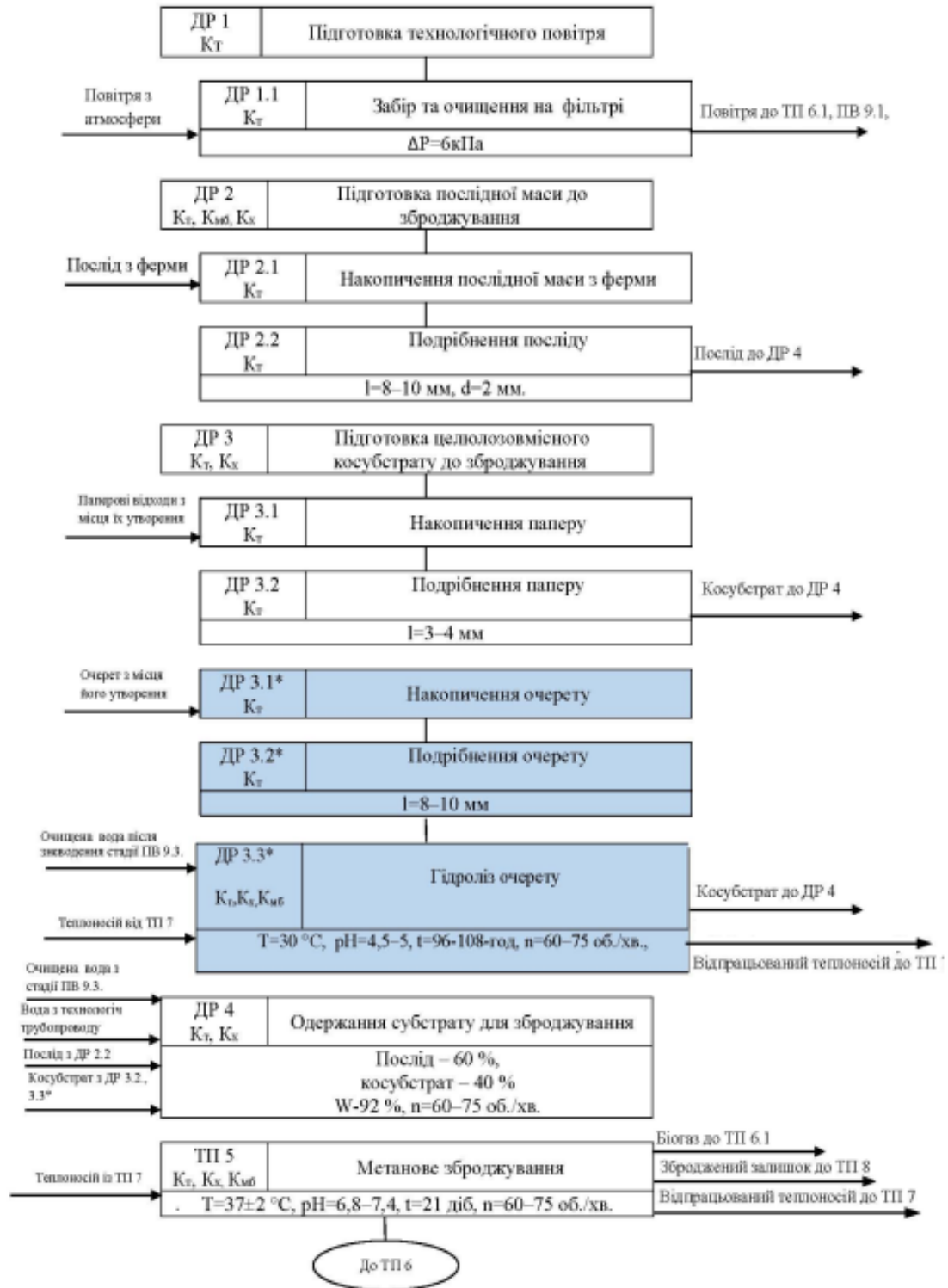
необхідність аналітичного контролю на вміст патогенів і залишкових хімічних речовин.

Можна навести приклади успішного використання дигестату в аграрній сфері: у Німеччині фермерські господарства активно застосовують дигестат для органічного землеробства; в Україні – біогазові установки при птахофабриках та цукрових заводах постачають дигестат до фермерських господарств, а у Данії та Австрії використання дигестату інтегроване у стратегії агроекологічного переходу [41].

Дигестат є цінним побічним продуктом біогазового виробництва, який перетворює відходи у ресурс. Його ефективне використання забезпечує подвійний екологічний ефект – утилізацію органіки та покращення властивостей ґрунтів, що відповідає принципам сталого сільського господарства. Оптимізація його хімічного складу, вдосконалення способів внесення та нормативна стандартизація – ключ до розвитку безвідходної моделі біоекономіки [42].

РОЗДІЛ 2. УМОВИ ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Опис технологічної схеми зброджування органічних відходів



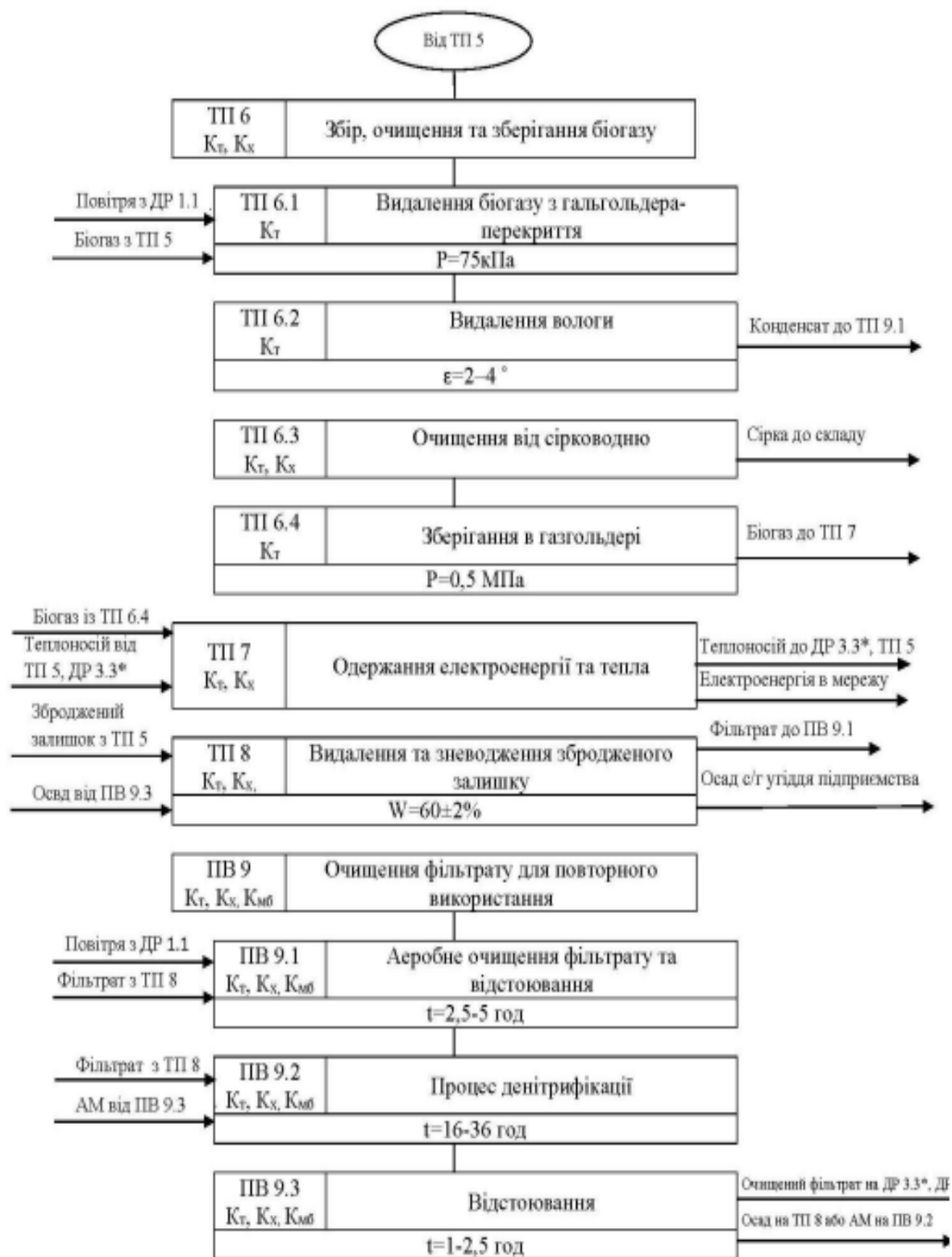


Рис. 2.1. Опис регламентної схеми одержання біогазу та дигестату шляхом біоконверсії органічних відходів [43].

Опис технологічної схеми [44].

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 угруповання 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 температурі 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 $2...4^{\circ}$, 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 комплексу біогаз спалюють у блочній теплоелектростанції. Пара (теплоносії), що утворюється, через розподільний колектор надходить у теплообмінники реактора, нагріваючи реакційну суміш метантенка та гідролізатор до режимної температури $+37 \pm 2^{\circ}\text{C}$, або на побутові потреби.

ТП 8. Видалення та зневоднення збродженого залишку. Відбір збродженої маси відбувається за допомогою фекального насоса 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 $60 \pm 2\%$), 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. Матеріал і методи дослідження

Дослідження проводилися згідно тематики кваліфікаційної роботи щодо оптимізації технологічних параметрів анаеробної ферментації відходів у дигестат та біогаз. З цією метою, проводили дослідження щодо оптимізації складу базового субстрату та основних технологічних параметрів (температуру, рН, перемішування культурального середовища).

Як базовий субстрат використовували гній ВРХ та солом у різних співвідношеннях та води до вмісту СР в межах 8-10%. Ферментацію проводили за участі аборигенної метаносинтезуючої мікрофлори, яка безпосередньо була присутня на гною ВРХ. Анаеробний процес зброджування проходив у біореакторі – експериментальній біогазовій установці, яка функціонує на кафедрі біотехнології та радіології нашого університету (рис.2.2).

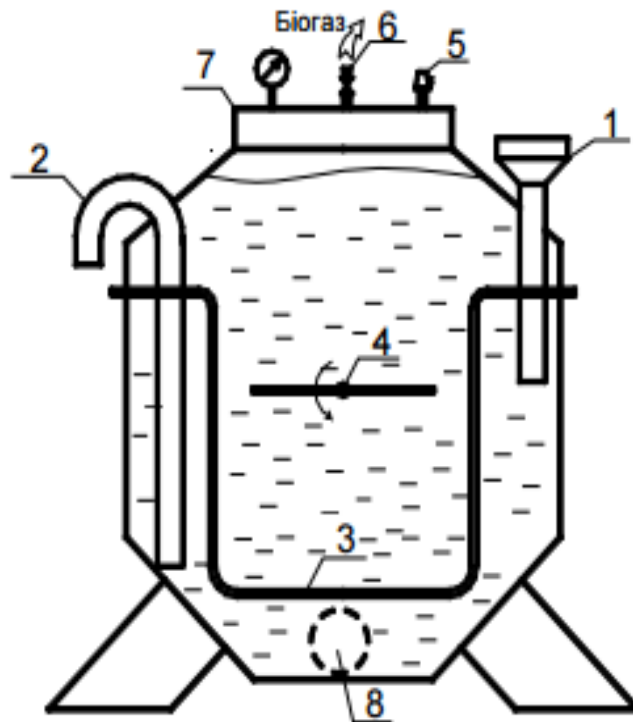


Рис. 2.2. Принципова схема експериментальної установки:

1 – патрубок завантаження; 2 – патрубок розвантаження; 3 – система підігріву; 4 – міксер; 5 – скидний клапан; 6 – патрубок виходу біогазу; 7, 8 – верхній та нижній люки обслуговування

Це герметичний металічний резервуар, у який невеликими порціями подається базовий субстрат (суспензія гною ВРХ та подрібненої соломи) через патрубок 1, який активно перемішується механічною мішалкою 4, з метою покращення контакту між субстратом та популяціями мікроорганізмів.

Одержаний біогаз відбирали через відповідний патрубок 6. За інтенсивного нагромадження біогазу, останній скидним клапаном 5 автоматично скидався в атмосферу. Через люки 7, 8, в основному 8 одержували рідку та густу фракції дигестату.

Окрім, експериментальної біогазової установки, для швидкого аналізу динаміки одержання біогазу використовували лабораторну біогазову установку (рис.2.3). Запропонована модельна конструкція дозволяла проводити дослідження інтенсивності утворення біогазу впродовж кількох днів.



Рис. 2.3. Лабораторна установка анаеробного зброджування

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Теоретичні основи безвідходної концепції одержання біогазу та дигестату шляхом біоконверсії органічних відходів

Безвідходна концепція біоконверсії органічних відходів у біогаз та дигестат є ключовою ідеєю сучасної екобіотехнології, спрямованою на максимальне використання біоресурсів з мінімізацією негативного впливу на довкілля. Вона базується на принципах циркулярної економіки, екологічної стійкості та раціонального використання природних ресурсів.

Безвідходність передбачає, що всі компоненти сировини після завершення процесу біоконверсії знаходять своє застосування або нейтралізуються без створення шкідливих відходів. В анаеробному зброджуванні це означає, що: органічні відходи повністю перетворюються на біогаз і дигестат; біогаз використовується як відновлювальне джерело енергії; дигестат застосовується як органо-мінеральне добриво, сприяючи збереженню і відновленню родючості ґрунтів (рис 3.1).

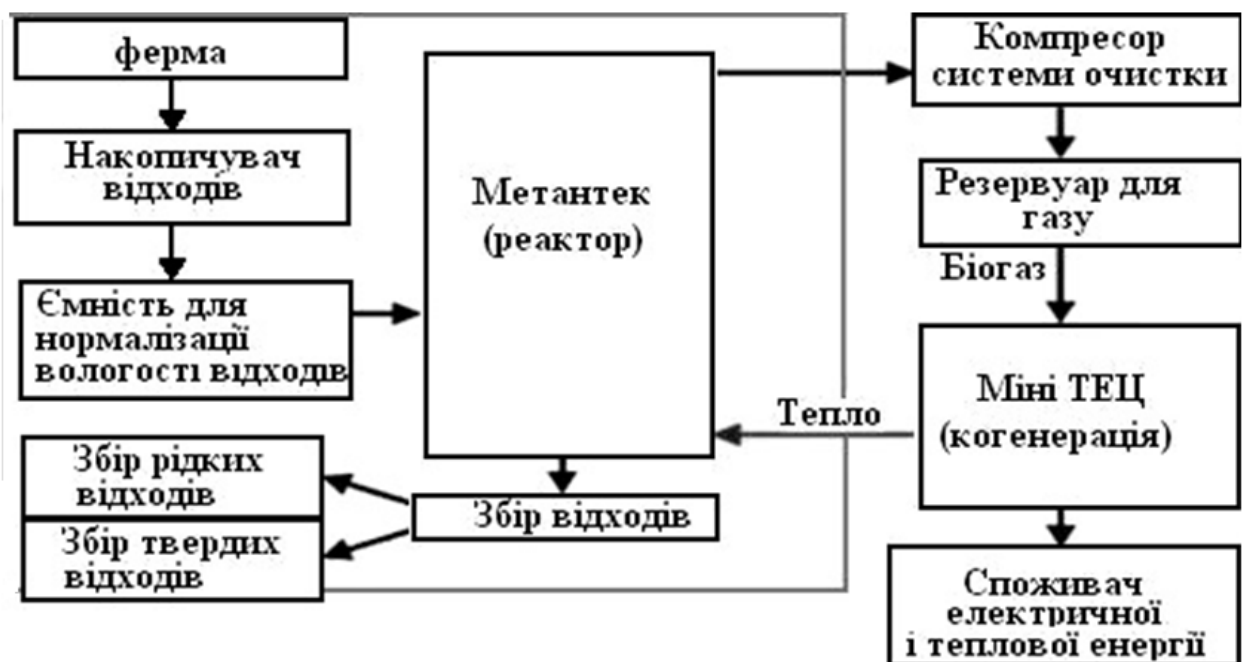


Рис.3.1. Технологічна схема одержання біогазу та дигестату [46].

Таким чином, процес реалізує замкнений цикл переробки, що запобігає накопиченню відходів та забрудненню.

Практична реалізація безвідходності у біогазових технологіях зводиться до [47]:

- максимальна утилізація сировини – сучасні технології передбачають підготовку сировини (подрібнення, попередня ферментація), що дозволяє підвищити її біодеградабельність і вивільнення максимального обсягу біогазу;
- використання побічних продуктів – дигестат не вважається відходом, а цінним продуктом з добривними властивостями.

Рідка та тверда фракції дигестату застосовуються в сільському господарстві. Можливе компостування твердих залишків для підвищення стабільності органіки.

Системи очищення біогазу від домішок (H_2S , CO_2) та конденсату забезпечують високоякісне паливо, що знижує забруднення і підвищує ефективність використання.

Екологічні переваги безвідходної біоконверсії зводиться до: зменшення обсягів твердих і рідких відходів, що потребують утилізації або захоронення; зниження викидів парникових газів за рахунок контролю метану і CO_2 ; відсутність неприємних запахів та забруднень ґрунтів і водойм; збереження водних ресурсів завдяки рециркуляції рідких фаз.

Безвідходна модель дозволяє знизити витрати на утилізацію відходів, мінімізувати екологічні штрафи, отримати додатковий прибуток від продажу біогазу та дигестату. Це стимулює розвиток сталих бізнес-моделей на основі циркулярної економіки.

Безвідходна концепція біоконверсії органічних відходів у біогаз та дигестат є перспективною стратегією для забезпечення екологічної безпеки, економічної вигоди та сталого розвитку агропромислових і муніципальних систем. Вона поєднує екологічну відповідальність з інноваційними біотехнологічними рішеннями, утворюючи основу для «зеленого» майбутнього.

3.2. Оптимізація окремих ланок технологічного процесу одержання біогазу та дигестату за анаеробного зброджування органічних відходів

Безвідходний анаеробний процес сприяє суттєвому зниженню негативного впливу на навколишнє середовище шляхом (рис 3.2): утилізації органічних відходів, які інакше потрапляють на сміттєзвалища або у водні об'єкти, що призводить до забруднення ґрунтів, поверхневих і підземних вод; зниження емісії парникових газів (метан і діоксид вуглецю) у атмосферу шляхом їх використання як джерела енергії.

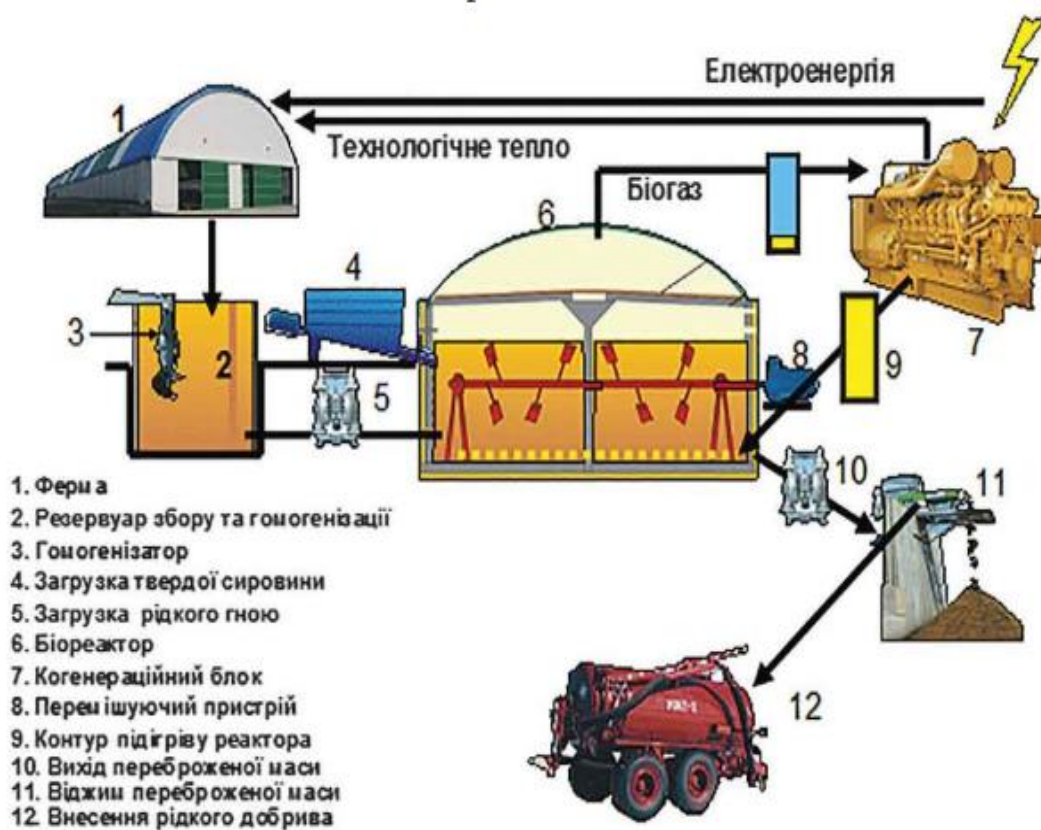


Рис.3.2. Принципова технологічна схема безвідходної технології утилізації органічних відходів

Біогаз як відновлювальне джерело енергії сприяє зниженню залежності від викопних палив, що є вагомим внеском у боротьбу зі зміною клімату. Використання біогазу знижує викиди CO_2 в атмосферу, зменшує забруднення довкілля, пов'язане з видобутком і спалюванням традиційних видів палива та

сприяє енергетичній незалежності. У процесі анаеробного зброджування значно зменшується кількість патогенних мікроорганізмів, зникає неприємний запах вихідного субстрату, а використання побічного продукту – дигестату як органічного добрива підвищує родючість ґрунтів і зменшує потребу в хімічних добривах.

Як відомо, що швидкість довільної реакції, в тому числі й ферментної, в значній мірі залежить від взаємодії між собою реагуючих компонентів (субстрату та ферменту), а значить активність анаеробної ферментації також залежить від розміру частинок базового субстрату.

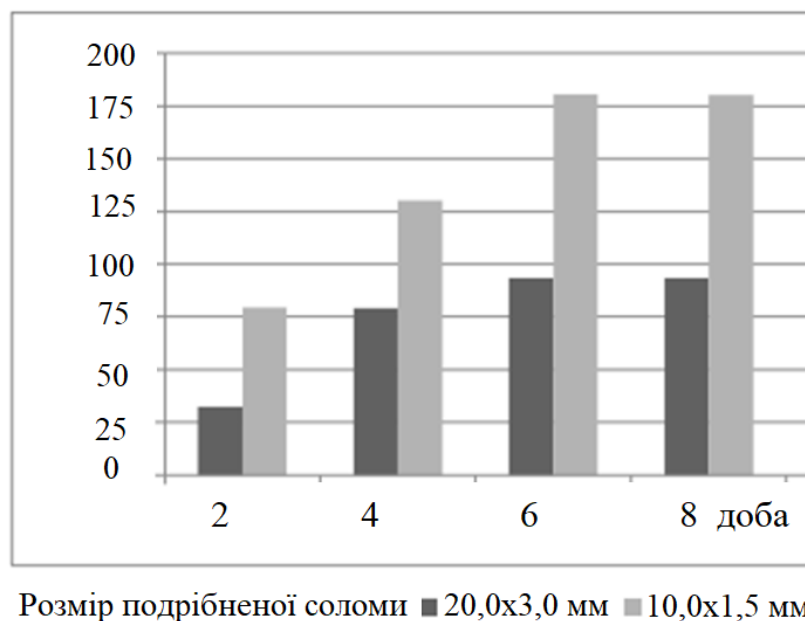


Рис. 3.3. Вплив розміру подрібненої соломи у базовому субстраті гній ВРХ: солома (60:40) на динаміку виходу біогазу (дм³/кг)

На рис. 3.3, нами наведені експериментальні лабораторні дані щодо динаміки утворення біогазу залежно від розміру подрібненої соломи як одного із основних компонентів базового субстрату для анаеробного зброджування. Як видно із наведеного вище рисунку, використання подрібненої соломи до розміру 10,0x1,5 мм як компоненту субстрату метанового бродіння сприяє більш активному біосинтезу біогазу порівняно із використання подрібненої соломи до розміру 20,0x3,0 мм.

Так, на шосту добу експерименту, в лабораторних умовах, кількість утвореного біогазу за використання подрібненої соломи до розміру 10,0х1,5 мм для приготування основного, базового субстрату склало 178 дм³/кг, що на 86 дм³/кг перевищував аналогічний показник до зразку, де використовували подрібнену соломку до розміру 20,0х3,0 мм.

Отже, для активного одержання біогазу необхідно забезпечити однорідну, гомогенну структуру базового субстрату із розміром частинок, які не перевищують 10,0х1,5 мм.

Як було описано вище, важливим показником для оптимізації анаеробного зброджування є рН культивування базового субстрату.

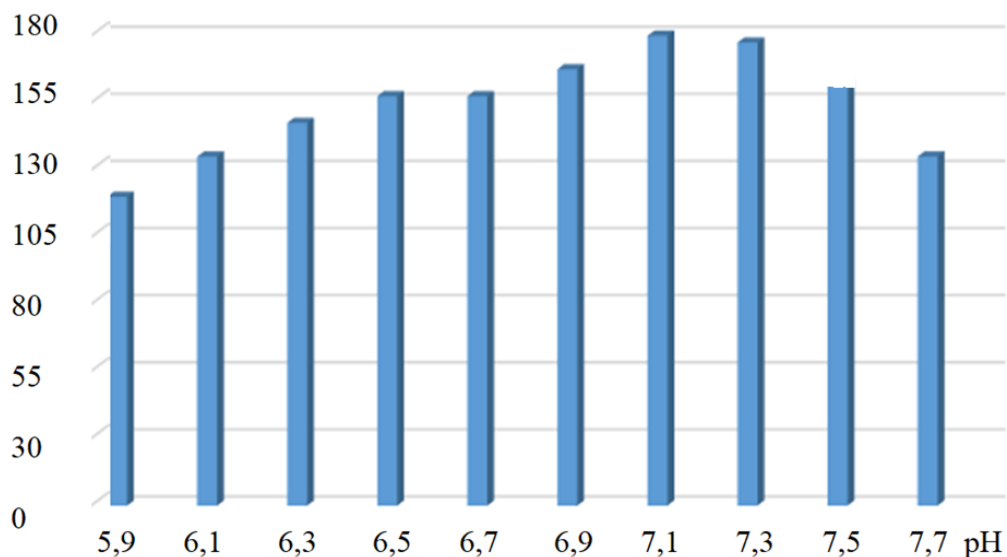


Рис. 3.4. Вплив рН середовища на динаміку утворення біогазу на 6 добу дослідження

У лабораторних умовах, рис.3.4, було вивчено динаміку утворення біогазу залежно від зміни рН культурального середовища в межах від 5,9 до 7,7. Як видно із наведеного рисунку, за умов наших досліджень, найбільш оптимальним рН ферментації було в межах від 6,9 до 7,3. Однак, найвищу продукцію біогазу (178 дм³/кг) на 6 добу експерименту, нами спостерігалось за рН, що було рівним 7,1.

Згідно літературних даних [45], відомо, що тип живлення тварин, коли як базовий субстрат використовують відходи тваринницької галузі, має значний вплив на динаміку синтезу біогазу. Тому, ми, в лабораторних умовах, провели дослідження щодо активності динаміки утворення біогазу залежно від типу живлення тварин (рис. 3.5).



Рис. 3.5. Динаміка утворення біогазу за анаеробного зброджування від типу живлення тварин

Як видно, із наведеного рисунку, тип живлення тварин, екскременти, яких на 60% входять до базового субстрату анаеробного зброджування для одержання біогазу впливає на динаміку утворення біогазу. За концентратного типу живлення (в складі кормів раціону міститься більша кількість ліпідних та білкових компонентів), які, можливо, не повністю асимілюються організмом та виводяться із каловими масами, синтез біогазу має приріст на 23,3%.

Таким чином, на нашу думку, було б доцільно використовувати як базові субстрати для анаеробного зброджування відходи тваринницьких ферм із концентрованим типом живлення або, як в основному на виробництві відбувається – змішаним типом живлення тварин.

Одним із важливих факторів, які оптимізують технологічний процес одержання біогазу є – коферментація, тобто зброджування органічних відходів

із додаванням різних компонентів органічної та неорганічної природи, що критично важливо для нормального метаболізму метаногенних бактерій (рис.3.6).

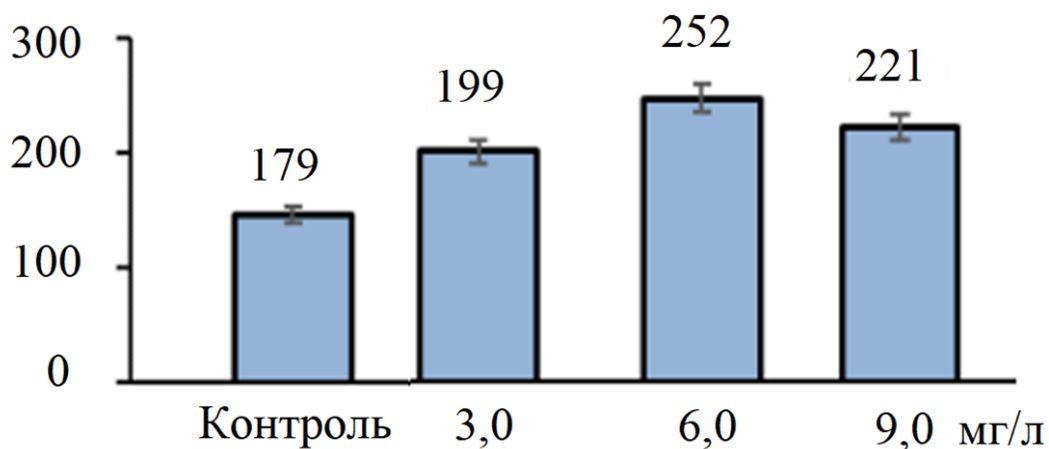


Рис. 3.6. Вплив йонів Купруму на динаміку утворення біогазу за використанням субстрату із гною ВРХ та соломи (60:40) за анаеробного зброджування на 6 добу ферментації (дм³/кг)

Коферментація – це один із напрямків оптимізації технологічного процесу, зокрема одержання біогазу на вище згаданому базовому субстраті із використанням в процесі ферментації мінеральної добавки, зокрема, йонів Купруму у вигляді хлориду міді у концентрації 3,0-9,0 мг/л поживного середовища.

Як видно із наведеного рисунку, внесений хлорид міді в культуральне середовище у кількості 6,0 мг/л, є найбільш оптимальним, за умов лабораторних досліджень. За такої концентрації мікроелементу, активність утворення біогазу, на 6 добу експерименту, зросла у 1,41 рази та була на рівні 252 дм³/кг.

Одержання біогазу за безвідходного анаеробного процесу біоконверсії органічних відходів є ключовим чинником, що визначає актуальність і перспективність цієї технології у контексті сучасних вимог до сталого розвитку, енергетичної безпеки та охорони навколишнього середовища.

Впровадження таких технологій сприяє досягненню збалансованого співвідношення між екологічними потребами і економічною вигодою, що є основою для переходу до циркулярної економіки та зеленої енергетики.

Оптимізація технологічних параметрів і безвідходність процесу дозволяють підвищити загальну продуктивність біогазових установок, знизити собівартість одиниці продукції, а також створити конкурентні переваги для підприємств.

Економічний аспект безвідходної технології є двояким: з одного боку, високі початкові інвестиції та складність логістики можуть стримувати широке впровадження, з іншого – отримання додаткових продуктів (біогаз, електроенергія, тепло, добрива) створює нові джерела доходу та підвищує рентабельність проектів. Розробка модульних, мобільних та енергоефективних установок відкриває можливості для адаптації технології до потреб різних секторів – від великих агрохолдингів до локальних громад.

На державному та регіональному рівнях важливим є формування сприятливого нормативного середовища, стимулів для інвестицій і науково-технічної підтримки проектів, що дозволить максимально ефективно використати потенціал анаеробної біоконверсії для сталого розвитку енергетики та агросектора.

3.3. Використання дигестату – побічного продукту анаеробного зброджування як якісного органічного добрива

Враховуючи літературні дані щодо одержання якісного дигестату за безвідходної технології (рис.3.8), ферментацію ми проводили за мезофільного температурного режиму (35-40°C) [33], який найбільш поширений завдяки енергоефективності та стабільності.



Рис. 3.8. Технологічний процес одержання та використання біогазу та дигестату за анаеробної ферментації відходів тваринницьких ферм

Одержаний нами дигестат – це однорідна суспензія темно-сірого кольору, за консистенцією – розрізняють рідку та тверду фракції, які мають значну кількість органічних, гумінових та фульвових сполук, а також доступних для рослин елементів живлення.

За складом дигестат складається із залишків проферментованого субстрату, мертвих та активних популяцій мікроорганізмів до 10^{14} колоній, основних елементів живлення для рослин (макро- та мікроелементи N, P, K, S, Co, Mo, Zn, Fe, Mn), значний вміст доступного на 60-80% Нітрогену для

рослин, рН на рівні 6,5-8,0, співвідношення між Карбоном та Нітрогену в межах 20-30 та незначну кількість патогенної мікрофлори і насіння бур'янів (рис. 3.9).



Рис. 3.9. Рідка фракція одержаного дигестату за анаеробної ферментації базового субстрату (60% гною ВРХ та 40% подрібненої соломи)

Фракції дигестату мають свою відмінність за основними елементами живлення для рослин (табл.3.1). Так, вміст сухої речовини у рідкій фракції дигестату був на рівні 4,8%; Нітроген загальний легкодоступний для асиміляції рослинами – 5,2%; Фосфор та Калій у вигляді оксидів відповідно складав 1,6 та 4,0 кг/м³.

Таблиця 3.1

Вміст основних елементів живлення для рослин у одержаних фракціях дигестату

Фракція	Вміст СР, %	Вміст елементів живлення кг/м ³		
		Нітроген загальний	P ₂ O ₅	K ₂ O
Рідка	4,8	5,2	1,6	4,0
Тверда	22,1	9,6	11,2	7,4

Вміст аналогічних досліджуваних показників у твердій фракції дигестату відповідно 4,6; 1,8; 7,0 та 1,9 рази був вищим, однак його структура була неоднорідною із багатьма волокнистими частинами, які, на нашу думку могли належати лігніновим та іншим структурам, які важко піддаються ферментації.

З метою дослідження впливу дигестату як побічного продукту ферментації, якого часто відносять до органо-мінеральної добавки (збагачене органічне добриво) на активність проростання кукурудзи вносили його в ґрунт у дозах, що наведено в табл.3.2.

Таблиця 3.2

Динаміка проростання проростків кукурудзи залежно від фракції та дози дигестату на 12 добу експерименту

Фракція	Концентрація	Динаміка росту проростків, мм	± до контролю, мм
Контроль	0 т/га	172,4±6,24	-
Рідка	1,5 т/га	182,6±6,88	+10,2
	2,0 т/га	198,6±7,12	+26,2
	2,5 т/га	196,8±8,22	+24,4
Тверда	6,0 т/га	184,8±6,76	+12,4
	8,0 т/га	196,6±7,44	+24,2
	10,0 т/га	195,8±8,42	+23,4

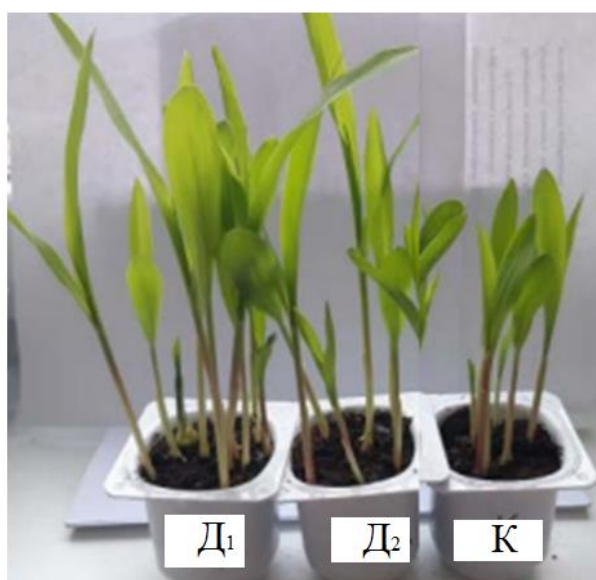


Рис. 3.10. Динаміка проростання насіння кукурудзи залежно від фракції та дози дигестату в лабораторних умовах на 12 добу дослідження

Як видно із табл.3.2 та рис. 3.10 використання дигестату як органічного добрива сприятливо впливало на динаміку росту проростків кукурудзи в лабораторних умовах. Найбільш оптимальною дозою виявилась доза: для рідкої фракції – 2,0 т/га, а для твердої фракції – 8,0 т/га, що відповідає результатам дослідження інших авторів [32].

За внесенням зазначеної вище дози дигестату двох фракцій, приріст проростків кукурудзи на 12 добу експерименту відповідно складав: для рідкої фракції – 26,2 мм та для твердої фракції – 24,2 мм. Одержані дані безпосередньо вказують, що побічний продукт анаеробної ферментації – дигестат здійснює сприятливий вплив на ріст та розвиток рослин і його можна активно використовувати у землеробстві, знижуючи або, навіть, повністю відмовитися від використання мінеральних добрив.

Враховуючи вище наведені результати досліджень, ми вивчали зміну агрохімічного складу ґрунту залежно від дози внесеного дигестату (табл.3.3). З даних таблиці видно динаміку зміни рН, Нітрогену загального, основних макро- та мікроелементів залежно від внесеного в ґрунт, у лабораторних умовах, рідкої фракції дигестату у дозі 2,0 т/га.

Таблиця 3.3

Агрохімічний склад ґрунту залежно від внесеного дигестату одержаного за анаеробної ферментації базового субстрату (мг/кг)

Фракція	рН	N заг.	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca	Mg	S	Zn	Cu
Контроль	5,82	16,4	78,2	105,6	886,4	65,4	8,4	2,46	0,16
Рідка (2,0 т/г)	6,46	108,4	142,4	210,3	1010	98,2	17,2	4,4	0,32
± з контролем	+0,64	+92,0	+64,2	+104,7	+123,6	+32,8	+8,8	+1,94	+0,16

Під дією органо-мінеральної добавки агрохімічний склад ґрунту порівняно до контролю позитивно змінився: рН та основні елементи живлення

рослин (N, P, K) зросли відповідно на 0,64 одиниць та 92,0; 64,2 та 104,7 мг/кг. Окрім того, також зріс рівень макроелементів (Ca на 123,6 та Mg на 32,8 мг/кг) та мікроелементів (Сульфуру, Цинку та Купруму відповідно на 8,8; 1,94 та 0,16 мг/кг).

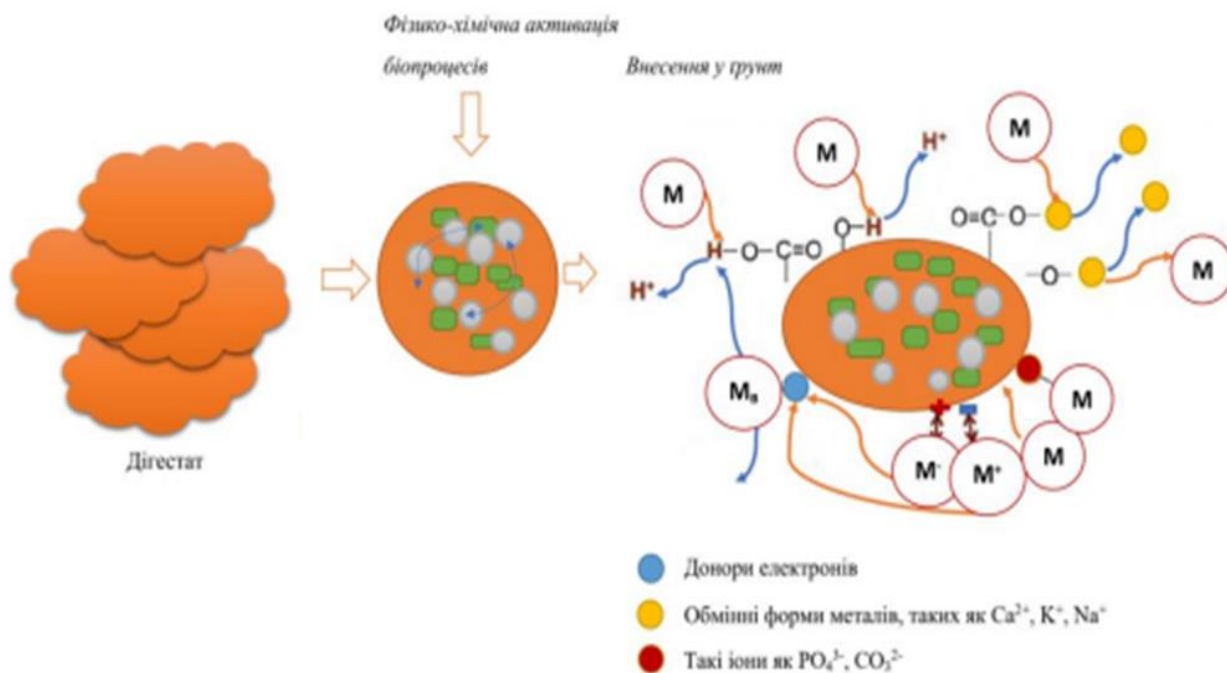


Рис. 3.11. Ймовірні адсорбційні процеси дигестату, які забезпечують ґрунти основними елементами живлення [48].

Екологічна ефективність анаеробного зброджування полягає у значному зниженні викидів парникових газів у порівнянні з традиційними методами утилізації відходів, а також у створенні замкнутого циклу використання біоресурсів. Використання дигестату як добрива сприяє покращенню родючості ґрунтів, водночас мінімізуючи потребу в мінеральних добривах і пов'язані з ними негативні екологічні наслідки.

Анаеробне зброджування органічних відходів є одним із найперспективніших біотехнологічних процесів сучасності, що дозволяє не лише ефективно утилізувати значні обсяги біомаси, але й отримувати відновлюване джерело енергії – біогаз, а також цінний продукт – дигестат, який

може використовуватись як органічне добриво. У рамках досліджень, присвячених оптимізації цього процесу, були виявлені ключові фактори, які суттєво впливають на ефективність біоконверсії, а також визначені проблеми і перспективи подальшого розвитку технології.

3.4. Проблеми та перспективи розвитку безвідходної технології біоконверсії органічних відходів у біогаз та дигестат

Попри очевидні переваги анаеробного зброджування як ефективного і екологічного методу утилізації органічних відходів, його впровадження та масштабування стикаються з низкою технічних, економічних та екологічних проблем.

Технічні виклики: Одна з основних проблем полягає у складності підтримання стабільних умов процесу. Анаеробне зброджування є чутливим до параметрів середовища – температури, рН, концентрації токсичних речовин. Порушення технологічних параметрів може призвести до інгібування метаногенних бактерій і зниження продуктивності біогазу. Нестабільна якість та склад сировини також створюють додаткові труднощі, зокрема при переробці змішаних відходів.

Економічні бар'єри: Високі капітальні витрати на будівництво та обладнання біогазових установок є суттєвим стримуючим фактором, особливо для малих і середніх господарств. Відсутність державної підтримки або стимулів у багатьох країнах ускладнює економічну доцільність проектів. Крім того, складність логістики збору та транспортування органічних відходів призводить до додаткових витрат.

Екологічні проблеми: Незважаючи на зниження викидів парникових газів у порівнянні з традиційним захороненням відходів, деякі біогазові установки можуть бути джерелами метану через витоки або недостатній контроль процесів. Утилізація та використання дигестату також викликають питання щодо можливого накопичення важких металів та інших забруднювачів, якщо сировина була забрудненою.

Для подолання зазначених проблем ведуться активні дослідження у декількох напрямках:

Оптимізація процесів: Інтенсивне впровадження систем автоматичного контролю та моніторингу параметрів реакторів (температури, рН, концентрації

газів) дозволяє забезпечувати стабільність біотехнологічного процесу. Використання біологічних інокулянтів, штамів метаногенних бактерій із підвищеною стійкістю до стресів і токсинів сприяє підвищенню ефективності виробництва біогазу.

Розробка нових конструкцій реакторів: Інновації у проектуванні анаеробних реакторів, таких як багатофазні системи, реактори із покращеним перемішуванням та газовідділенням, дозволяють збільшити продуктивність і зменшити час перебування субстрату. Модульні та мобільні установки роблять технологію доступнішою для різних категорій користувачів.

Інтеграція з іншими технологіями: Застосування анаеробного зброджування у поєднанні з іншими процесами (компостуванням, фотокаталізом, мембранними технологіями для очищення біогазу) відкриває можливості для повного циклу безвідходного виробництва. Використання біогазу не лише для електроенергії, а й як транспортного палива або сировини для хімічних процесів створює додаткові джерела доходу.

Перспективним є використання анаеробного зброджування у комплексних екосистемах, де відбувається синергетична взаємодія між агропромисловими, міськими та природними системами. Зниження викидів парникових газів та раціональне використання біоресурсів дозволяє досягти екологічної рівноваги [49].

Однак, запровадження безвідходних технологій біоконверсії органічних відходів у частині використання дигестату як компоненту органічного добрива має певні нормативно-правові, фінансові та інші перепони. Тому, необхідна подальша співпраця між виробниками та державою в контексті фінансової підтримки маловідходних та безвідходних технологій утилізації органічних відходів у енергетичну компоненту – біогаз та екологічно безпечне органічне добриво.

Сильні та слабкі сторони, а також загрози та можливості одержання та використання дигестату наведені в табл. 3. 4

SWOT – аналіз виробництва та використання дигестату як кінцевого продукту
анаеробного зброджування органічних відходів

Сильні сторони	Слабкі сторони
Містить органічний Карбон у складі гумінових речовин (1-3% по масі) та необхідні для рослин макро- та мікроелементів (N, P, K, Mg, S тощо). Підвищує врожайність с.-г. культур, порівняно з мінеральними добривами за рахунок доступного для рослин Нітрогену. Забезпечує оптимальне для ґрунту співвідношення C/N 20-30 та pH 6,8-7,5. Немає насіння бур'янів та патогенної мікрофлори, кількість синергічних популяцій мікроорганізмів достатньо висока, яка сприяє активному росту рослин і відновлення родючості деградованих ґрунтів. Сприяє зниженню щільності та підвищенню вологостійкості ґрунтів	Більшість біогазових підприємств в Україні, орієнтовані на продаж електроенергії за «зеленим» тарифом, а дигестат на ринку як органічного добрива не розглядається. Відсутність державних норм та вимог щодо виробництва та використання органічних добрив загалом, і дигестату зокрема. Відсутність системи сертифікації та забезпечення якості дигестату, що гальмує створення ринку органічних добрив з дигестату. Відсутність можливості створення іміджу якісного органічного добрива, відсутність довіри серед потенційних споживачів та, відповідно, попиту.
Можливості	Загрози
Як альтернатива дорогим імпортованим добривам; Для реабілітації деградованих ґрунтів у зонах військових дій; Для створення замкнутих агроєкосистем на базі ферм, комбінатів, агропідприємств; Для біоорганічного землеробства – особливо у сегменті органічного виробництва. Як потенціал для скорочення викидів парникових газів (до 6 кг CO₂ на 1 кг заміщених азотних добрив)	Можливе перенасичення ґрунту азотом – потребує агрономічного розрахунку доз. Наявність патогенів або залишкових мікрополітантів – особливо якщо сировиною є харчові та побутові відходи. Неприємний запах – при поверхневому внесенні (вирішується закладенням у ґрунт або компостуванням). Потреба в спеціалізованій техніці для зберігання та внесення.

Зростаючий світовий попит на відновлювані джерела енергії та прагнення до зменшення викидів CO₂ створюють сприятливі умови для розвитку біогазових технологій. Державні програми підтримки, субсидії,

пільгове оподаткування, створення «зелених» тарифів стимулюють інвестування у біогазові установки.

Розвиток циркулярної економіки, де відходи стають сировиною для виробництва енергії та добрив, підвищує соціальну і економічну цінність цих технологій. Можливість локального виробництва енергії підвищує енергетичну безпеку регіонів.

Важливою задачею є розробка нормативної бази, що регламентуватиме стандарти якості дигестату, екологічний моніторинг та утилізацію потенційних шкідливих речовин.

Сучасні наукові дослідження зосереджуються на вивченні мікробіологічного складу анаеробних систем, генетичній оптимізації штамів метаногенних бактерій, розробці біоінженерних методів підвищення продуктивності та стійкості реакторів. Також значна увага приділяється аналізу життєвого циклу та екологічної оцінці технологій [50].

Відкриття у сфері синтетичної біології та біоінформатики створюють перспективи для створення штучних мікроорганізмів із заданими функціями, що може радикально змінити підходи до біоконверсії.

Незважаючи на наявні проблеми, анаеробне зброджування органічних відходів у біогаз і дигестат має значний потенціал для сталого розвитку енергетики та сільського господарства. Подальший прогрес залежить від інтеграції технологічних інновацій, державної підтримки, а також комплексного наукового підходу, що дозволить ефективно використовувати ресурси та мінімізувати екологічний вплив.

ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ

1. Наукові дослідження підтверджують, що оптимальний вибір сировини, її попередня підготовка, контроль основних технологічних параметрів мають вирішальне значення для підтримання стабільної діяльності мікробіоти метаногенів.

2. З наукової точки зору, подальше удосконалення технології пов'язане з глибшим розумінням мікробіологічних процесів, оптимізацією штамів метаногенів, впровадженням біоінженерних методів та інтеграцією анаеробного зброджування з іншими екологічними технологіями. Сучасні напрямки синтетичної біології та біоінформатики обіцяють нові якісні прориви у створенні «розумних» систем біоконверсії.

3. Оптимізацію технологічного процесу проводили шляхом використання подрібненої соломи до розміру 10,0x1,5 мм як компоненту субстрату (60% гній ВРХ та 40% соломи); підтриманням рН в межах 7,1; внесенням хлориду міді у концентрації 6,0 мг/л поживного середовища та використання гною як субстрату за концентратного типу живлення.

4. Одержаний нами дигестат – це однорідна суспензія темно-сірого кольору, за консистенцією – розрізняють рідку та тверду фракції, які мають значну кількість органічних, гумінових та фульвових сполук, а також доступних для рослин елементів живлення.

5. Одержаний нами дигестат – це однорідна суспензія темно-сірого кольору, за консистенцією – розрізняють рідку та тверду фракції, які мають значну кількість органічних, гумінових та фульвових сполук, а також доступних для рослин елементів живлення.

6. Використання дигестату як органічного добрива сприятливо впливало на динаміку росту проростків кукурудзи в лабораторних умовах. Найбільш оптимальною дозою виявилась доза: для рідкої фракції – 2,0 т/га, а для твердої фракції – 8,0 т/га

7. Під дією органо-мінеральної добавки (дигестату) агрохімічний склад ґрунту порівняно до контролю позитивно змінився: рН та основні елементи живлення рослин (N, P, K) зросли відповідно на 0,64 одиниць та 92,0; 64,2 та 104,7 мг/кг. Окрім того, також зріс рівень макроелементів (Ca на 123,6 та Mg на 32,8 мг/кг) та мікроелементів (Сульфуру, Цинку та Купруму відповідно на 8,8; 1,94 та 0,16 мг/кг).

8. Оптимізація безвідходного анаеробного процесу біоконверсії органічних відходів є ключовим чинником для досягнення екологічної безпеки, енергетичної незалежності та ефективного ресурсокористування. Впровадження сучасних технологічних інновацій у цю сферу сприятиме переходу до циркулярної економіки, підвищенню якості життя населення та збереженню природного середовища для майбутніх поколінь.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Корнієнко І. М., Ястремська Л. С., Кузнєцова О. О., Барановський М. М., Візер А. К. Біоконверсія органічних відходів – європейський досвід та українські практики// Технології та інжиніринг, № 3(8), 2022. С.37-51
2. Петренко, Г. Д., & Олійник, О. В. (2019). Виробництво біогазу з органічних відходів: сучасний стан та перспективи. Журнал біотехнологій, 7(2), 45-56.
3. Семененко, М. О. (2021). Вплив складових сировини на ефективність анаеробного зброджування. Вісник екології, 15(3), 112-120.
4. Кернасюк Ю. В. Потенціал виробництва біогазу в галузі тваринництва України. Продовольчі ресурси. 2019. № 12. С. 202-209.
5. Гелетуха Г., Кучерук П., Матвєєв Ю.. Аналітична записка UABIO No29. Перспективи виробництва біометану в Україні. Вересень 2022. С. 58
6. Бондаренко, В. П., & Мороз, А. В. (2020). Біогазові технології у контексті сталого розвитку. Український журнал екології, 9(2), 89-98.
7. Сидоренко, Н. В. (2021). Енергетична ефективність біогазових комплексів. Енергетика і екологія, 8(3), 77-85.
8. Карпенко, В.І., Козлов, В.В., Городок, Л.П., Горлінський, О.В. Утилізація відходів з отриманням біопалива і добрив. Проблеми екологічної біотехнології, 2022, No421, 126794.
9. Murphy, J.D., & Power, N. (2019). Anaerobic digestion of organic wastes for biogas production. *Biofuels*, 10(5), 531-544.
10. Fotidis, I.A., et al. (2018). Microbial ecology and process performance during anaerobic digestion: current knowledge and perspectives. *Biotechnology Advances*, 36(2), 452-471.
11. Оверковська Т. К. Правові засади поводження із сільськогосподарськими відходами. Екологічне право. 2021. № 2. С. 85–91.
12. Shvoroov, S., Polishchuk, V., Lukin, V., Opryshko, O., & Davidenko, T. (2023). Адаптивна система з нечітким керуванням температурним режимом

зброджування енергетичних культур у багатомодульних біогазових комплексах. Енергетика і автоматика, 0(5), 100-108. doi: [http://dx.doi.org/10.31548/energiya5\(69\).2023.100](http://dx.doi.org/10.31548/energiya5(69).2023.100)

13. Федоренко, О. В. (2021). Безвідходна утилізація органічних відходів. Вісник аграрної науки, 13(4), 91-100.

14. Колодійчук І.А. Теоретико-методологічні засади формування територіально збалансованих систем управління відходами в регіонах України: дис. ... д-ра екон. наук: 08.00.05. Львів, 2020. 595 с.

15. Потенціал органічних відходів як субстрату для анаеробного зброджування в Україні: визначення тенденцій та екологічна безпека практики / Є. Ю. Черниш та ін. Екологічні проблеми. 2021. Т. 6, № 3. С. 135–144

16. Кравченко, Ю. О. (2020). Використання анаеробного зброджування у переробці органічних відходів. Екологічний вісник, 6(1), 102-110.

17. Скляр О.Г. Методи інтенсифікації процесів метанового зброджування/ О.Г. Скляр, Р.В. Скляр // Вісник НВ ТДАТУ, 2016. В4 № 1. С.3-4

18. Efficiency of Instrumental Analytical Approaches at the Control of Bacterial Infections in Water, Foods and Feed / N. Starodub, J. Ogorodniichuk, O. Novgorodova // Biosensors for Security and Bioterrorism Applications, Edited by Dimitrios P. Nikolelis, 2016. 199 p.

19. Дорошенко, Т. І. (2019). Мікробіологічні аспекти анаеробного зброджування. Журнал мікробіології, 11(2), 34-43.

20. Прокаєва А. Сучасне керування відходами відповідно до принципів циркулярної економіки: навчальний посібник курсу ZWA deep level. 2021. 140 с. URL: <https://zerowastekharkiv.org.ua/wpcontent/uploads/2021/12/posybnic-lekciyebook-5.pdf>.

21. Ткаченко С. Й., Степанов Д. В., Степанова Н. Д. Аналіз соціальної та енерго- і природозбережної ефективності реалізації біогазової технології, Вісник ВПІ, 2020. В. 2, С. 34-41.

22. Біотехнології в екології : навч. посібник / А.І. Горова, С.М. Лисицька, А.В. Павличенко, Т.В. Скворцова. Д. : Національний гірничий університет, 2012. 184 с.
23. Шевченко, О. І. (2019). Використання дигестату у сільському господарстві. *Агроекологія*, 10(1), 55-63.
24. Паламарчук В.Д., Коваленко О.А., Кричковський В.Ю. Підвищення ефективності біогазових комплексів за рахунок використання дигестату при вирощуванні сільськогосподарських та овочевих культур. Міжвідомчий тематичний науковий збірник «Зрошуване землеробство». 2020. № 73. С. 95-101.
25. Іваненко, В. П., & Ковальчук, С. М. (2020). Біотехнологія анаеробного зброджування органічних відходів. Київ: Наукова думка.
26. Скляр О.Г., Скляр Р. В. Аналіз роботи біогазових установок. Механізація та електрифікація сільського господарства: загальнодержавний збірник. Вип. № 10 (109). ННЦ «ІМЕСГ». Глеваха, 2019. С.132-138.
27. Гончарук І.В. Європейський досвід виробництва біогазу й біометану з відходів за принципом циркулярної економіки у сільському господарстві. Економіка, фінанси, менеджмент: актуальні питання науки і практики, 2023, No 4. С.7-19. DOI: 10.37128/2411-4413-2023-4-1
28. Яценко, С. І. (2019). Особливості використання дигестату в сільському господарстві. *Агронаука*, 8(2), 66-75.
29. Слюзар А.В. Очищення біогазу від сірководню хінгідронним методом/ Матеріали XXII міжнародної науково-практичної конференції "Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті", 2021. С. 924-927.
30. Єсіпов О. В., Гринь Є. Л. Потенціал біогазу і біометану з органічних відходів тваринництва/ Вісник Сумського національного аграрного університету Серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів», В 1 (51), 2023. С. 26-29.

31. Черниш Є. Ю., Пляцук Л. Д. Розробка біотехнології видалення сірководню із біогазу з використанням іммобілізаційного матеріалу на основі фосфогіпсу/ Східно-Європейський журнал передових технологій, 2015. № 2(6). С. 28-34.

32. Angelidaki, I., et al. (2018). Biogas production: current state and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 121-132.

33. Tsapekos, P., et al. (2017). Enhancement strategies for anaerobic digestion: a review. *Renewable Energy*, 123, 15-26.

34. Крамар В.Г. Технології збагачення біогазу та їх характеристики/ Теплофізика та теплоенергетика, 2023, Т. 45, №1. С. 64-74.

35. Скляр О.Г, Скляр Р.В. Напрями застосування дигестату, що утворюється в процесі анаеробного зброджування. IX Міжнародна науково-технічна конференція. Глеваха-Київ. 2020. С. 145-147.

36. Dahlin J., Nelles M, Herbes C. Biogas digestate management: Evaluating the attitudes and perceptions of German gardeners towards digestate-based soil amendments. *Resour. Conserv. Recycl.* 2017. №118. P. 27-38.

37. Паламарчук В.Д., Коваленко О.А., & Кричковський В.Ю. Підвищення ефективності біогазових комплексів за рахунок використання дигестату при вирощуванні сільськогосподарських та овочевих культур. Міжвідомчий тематичний науковий збірник «Зрошуване землеробство». 2020. № 73. С. 95-101.

38. Логоша Р.В., Паламарчук В.Д., Кричковський В.Ю. Економічна та біоенергетична ефективність використання дигестату біогазових станцій при вирощуванні сільськогосподарських та овочевих культур в умовах євроінтеграції України. *Бізнес Інформ*, 2022. № 9. С. 40-52.

39. Захарів О.Я. Ефективність використання дигестату із біогазових реакторів для фермерських господарств / Збірник наукових праць ТДАТУ імені Дмитра Моторного №2(40), 2019. С. 79-86.

40. Корнієнко І. М., Головей О. П., Лашкова А. Т., Кривонос О. С., Запаренко С. С. Дослідження ефективності збагачення ґрунтів

мікробіологічним добривом. Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету, 2017. № 1(32). С. 128-131.

41. Онлайн-семінар "Можливості використання дигестату біогазових установок як добрив": підсумки та матеріали – SAF Україна. SAF Україна. 2020. URL: <https://saf.org.ua/news/1069/>

42. Яценко, С. І. (2019). Особливості використання дигестату в сільському господарстві. Агронаука, 8(2), 66-75.

43. Biorefinery of anaerobic digestate in a circular bioeconomy: Opportunities, challenges and perspectives / M. Malhotra et al. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2022. Vol. 166. Art. 112642. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112642.

44. Карпенко, В.І., Козлов, В.В., Городок, Л.П., Горлінський, О.В. Утилізація відходів з отриманням біопалива і добрив. Проблеми екологічної біотехнології, 2022, №421, 126794.

45. Павленко, В. М. (2018). Інновації у технологіях біогазового виробництва. Біоінженерія, 7(3), 23-33.

46. Шинкарчук А., Голуб Н., Козловець М., Козловець О. Порівняння впливу дигестату, що містить додаткове джерело мікроелементів, на ріст рослин в перші 2 тижні вегетації/ Матеріали XXIII Міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Людина. Суспільство» (м. Київ, Україна, 7 грудня 2023 р.). С. 183-185.

47. Li, Y., et al. (2020). Recent advances in anaerobic digestion of organic wastes. *Frontiers in Energy Research*, 8, 52.

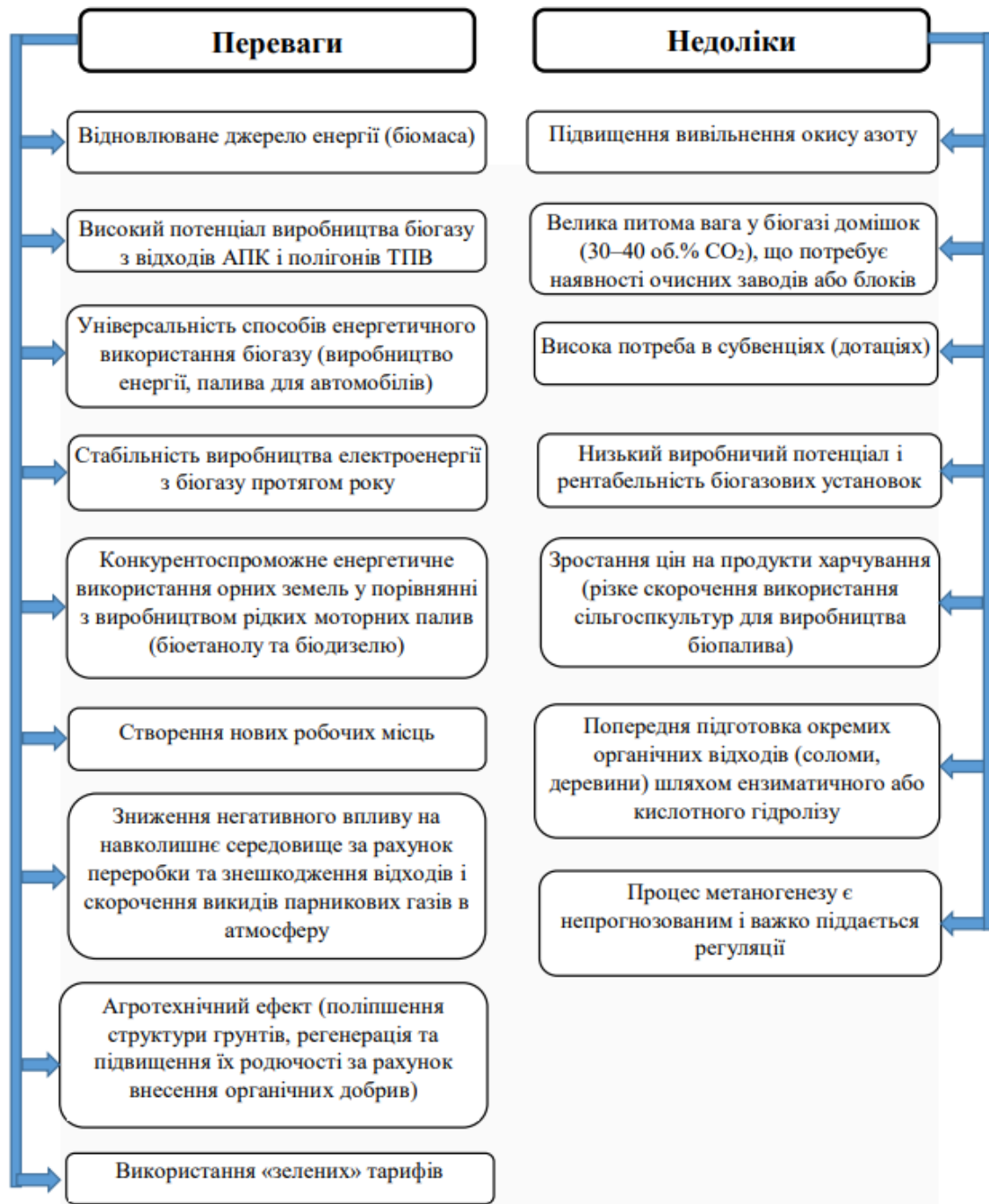
48. Гончарук І. В., Панцирева Г. В., Вовк В. Ю., Верхолюк С. Д. Дослідження екологічної безпеки та економічної ефективності дигестату як біодобрива. Збалансоване природокористування. 2023. № 2. С. 86-92.

49. Гончарук, С. В. (2018). Методи контролю параметрів анаеробного процесу. Біотехнології в Україні, 5(4), 14-22.

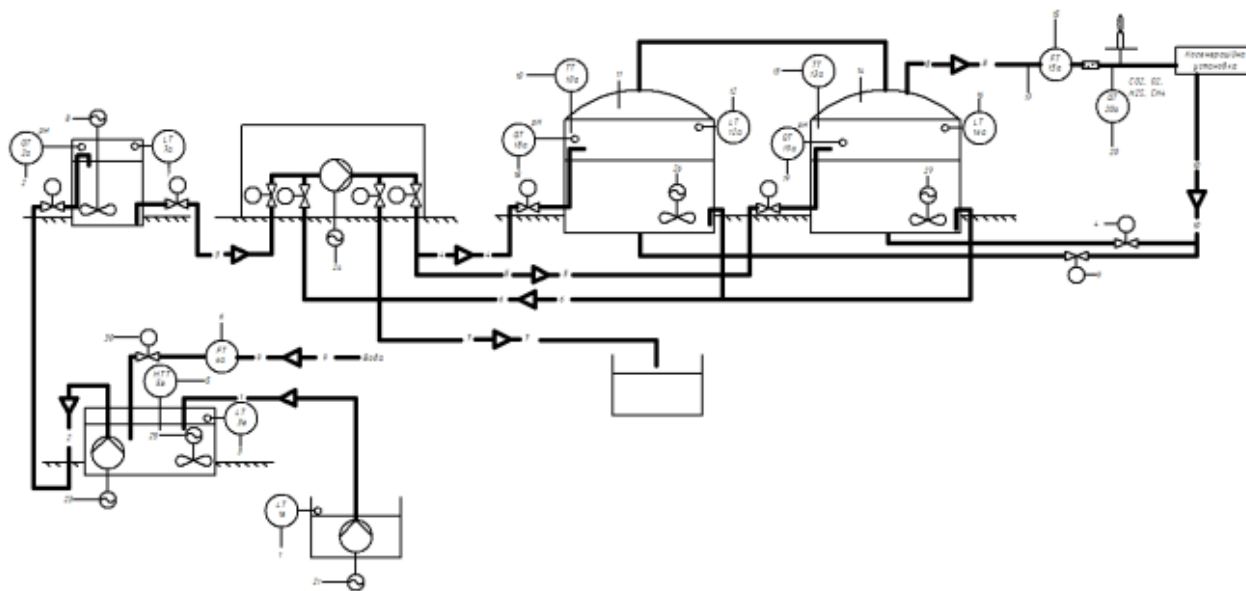
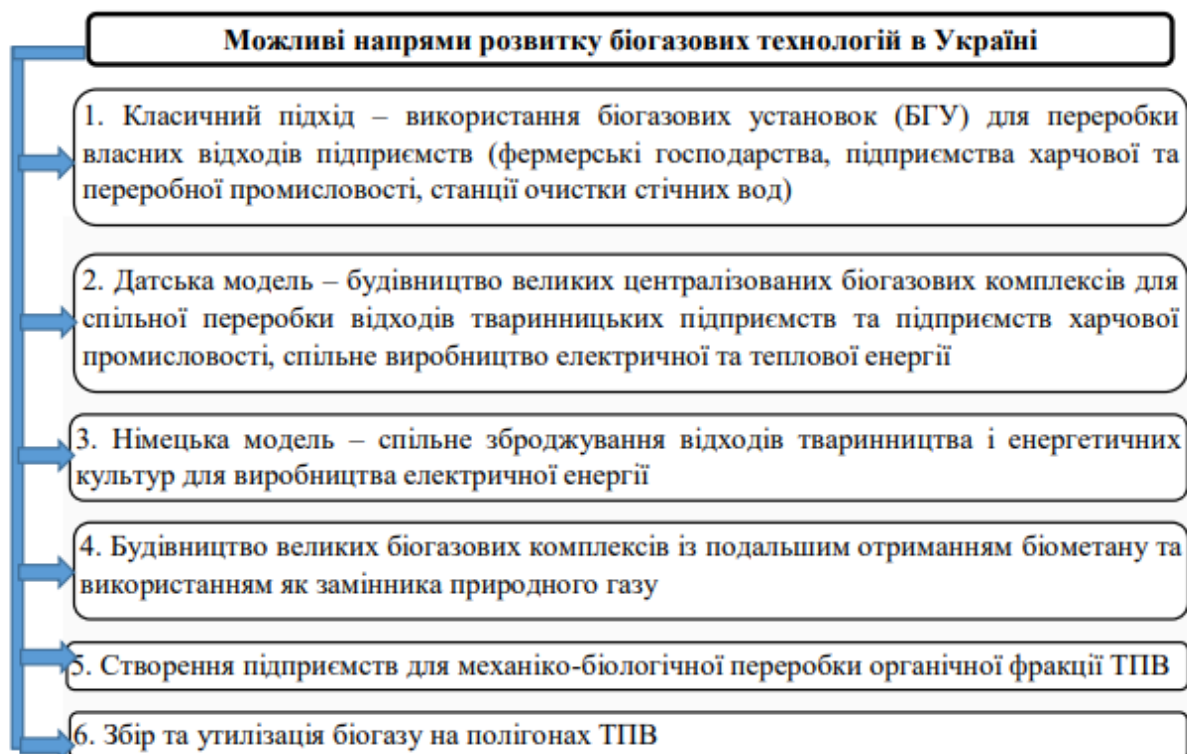
50. Стандартизація якості та сертифікація продуктів з дигестату. 2020. SAF Україна. SAF Україна. URL: <https://saf.org.ua/news/1029/>.

ДОДАТКИ

Додаток А



Переваги та недоліки біоконверсії органічних відходів у біогаз



ФСА біогазової установки



Одержання дигестату як побічного продукту в процесі анаеробного
зброджування



Вміст макроелементів у біогазі