

ЗАТВЕРДЖЕНО  
Наказ Міністерства освіти і науки,  
молоді та спорту України  
29 березня 2012 року №384

Форма № Н-9.02

**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**

за ОС «Магістр»

**на тему: “Оптимізація технологічних параметрів та базового субстрату анаеробного зброджування гнойової біомаси в пілотній біогазовій установці”**

Виконав: студент 2 \_\_ курсу, групи \_\_1\_\_  
спеціальності

162 «Біотехнологія та біоінженерія»

**Цинко Роман Олександрович**

(прізвище та ініціали)

Керівник **професор Василь БУЦЯК**

(прізвище та ініціали)

Рецензент **доц. Дмитро ПЕРІГ**

(прізвище та ініціали)

Робота заслухана на засіданні кафедри біотехнологій та радіології і  
рекомендована до захисту в ДПК, протокол № \_\_від\_\_ грудня 2023 р.

Завідувач кафедри біотехнологій та радіології,  
професор, доктор с.-г. наук

Василь БУЦЯК

Львів – 2023

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	3
АНОТАЦІЯ	4
ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ	8
1.1. Перспективи використання біогазу як відновлювального джерела енергії	8
1.2. Біогазове виробництво на планеті	11
1.2.1. Зменшення глобального впливу:	14
1.3. Утилізація органічних і побутових відходів	16
1.4. Преспективи використання біогазових установок в Україні	20
РОЗДІЛ 2. УМОВИ ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ	24
2.1. Матеріал та методи	24
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ	28
3.1. Технології виробництва та використання біогазу в Україні	28
3.1.1. Сировина (субстрат) для анаеробного зброджування в процесі метаногенезу	31
3.1.2. Біохімічні процеси в метантенках	37
3.1.3. Технологічна схема та апаратурне забезпечення одержання біогазу	44
3.2. Оптимізація умов культивування метаноутворюючих мікроорганізмів	50
3.3. Перспективи розвитку біогазової промисловості в Україні	53
ВИСНОВКИ І ПРОПОЗИЦІЇ	56
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	58
ДОДАТКИ	65

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АПК – агропромисловий комплекс;

БГУ - біогазова установка;

БМ – біомаса;

ВДЕ – відновлювані джерела енергії;

ВРХ – велика рогата худоба;

ЗТ - «зелений» тариф;

КОС – каналізаційні очисні споруди;

СОР – суха органічна речовина;

СОТ – всесвітня торгова організація;

СР – суха речовина;

ТПВ – тверді побутові відходи;

ФС – фенольні сполуки;

ХСК – хімічне споживання кисню;

NADH – нікотинаміддинуклеотид відновлений;

## АНОТАЦІЯ

Робота написана на 70 сторінках комп'ютерного тексту. Складається із вступу, трьох розділів (огляду літератури, умов та методики проведення досліджень, результатів досліджень), висновків та пропозицій, списку використаної літератури та додатків. Містить 23 рисунки, 7 таблиць, 55 джерел використаної літератури.

**Ключові слова:** органічні відходи АПК, субстрат, популяції метаногенних анаеробних та аеробних бактерій, параметри технологічного процесу (температура, вологість, співвідношення C:N, рН, структура субстрату), метантенк, апаратурне забезпечення.

**Об'єкт дослідження:** органічні відходи АПК, популяції метаногенних анаеробних мікроорганізмів, основні параметри технологічного процесу – метаногенезу.

**Предмет дослідження:** оптимізація окремих ланок технологічного процесу одержання біогазу за використанням гнойової біомаси як базового субстрату.

**Мета:** проаналізувати сучасні технології одержання біогазу та на підставі експериментальних досліджень запропонувати оптимізацію окремих параметрів технологічного процесу.

### **Завдання:**

- охарактеризувати вітчизняні та зарубіжні біогазові установки і ознайомитися із сучасними, удосконаленими, перспективними технологіями виробництва та використання біогазу в Україні;

- подати технологічну характеристику базових субстратів (сировини) для анаеробного зброджування метаногенними мікроорганізмами, обґрунтувати

екологічну та економічну доцільність використовувати як субстрат для ферментації – органічні відходи АПК;

- навести перелік основних анаеробних популяцій мікроорганізмів – продуцентів метану, охарактеризувати важливі метаболічні процеси біотрансформації органічних речовин у бродильному середовищі та розкрити їх хімізм;

- описати та охарактеризувати принципову технологічну схему виробництва біогазу, його апаратне забезпечення при використанні як субстрату органічних відходів АПК;

- у лабораторних умовах дослідити оптимальні умови культивування метаноутворюючих мікроорганізмів та на підставі отриманих результатів рекомендувати оптимізувати окремі параметри технологічного процесу одержання біогазу;

- вивчити недоліки та переваги виробництва біогазу в сучасних умовах, розробити можливі напрямки розвитку біогазових технологій в Україні, зокрема, втілення Національного проєкту «Енергія біогазу».

**Актуальність теми.** Забезпечення населення енергетичними ресурсами постійно було та є актуальною проблемою. Зростаючий технологічний прогрес забезпечує населення все новими та новими технологіями, з одного боку покращує життя населення, одержуючи нові вигоди, а з другого боку вимагає значних енергетичних ресурсів. Традиційні енергетичні ресурси, такі як вуглеводні та вугілля є викопними і їх запаси щорічно знижуються. Сьогодні, актуальною і нагальною проблемою є пошук та розробка нових альтернативних технологій забезпечення населення енергетичними ресурсами.

Однією із таких альтернативних технологій є відновлювальні технології. Ці технології ґрунтуються на використанні енергетичних ресурсів рослинної біомаси, яка щорічно поновлюється за рахунок енергії Сонця. Серед даних технологій, чільне місце посідає, анаеробне зброджування не тільки біомаси рослин, але й різноманітних органічних відходів, в тому числі гнойових відходів АПК.

Тому, розробка та вдосконалення, особливо, безвідходних технологій виробництва біогазу на основі анаеробної ферментації органічних відходів агропромислового комплексу вирішить кілька проблем одночасно:

- екологічні проблеми, які виникають в процесі функціонування тваринницьких ферм;
- економічні проблеми, що стосується виробництва та безпосереднього використання біогазу для господарських та побутових потреб;
- господарські проблеми, які стосуються рослинницької галузі, а саме забезпечення її високоякісним, збагаченим мікробним білком органічного добрива.

***Практична цінність роботи.*** Досліджений комплекс правових, соціальних, організаційно-технологічних і технічних заходів, щодо забезпечення оптимізації технологічних процесів виробництва біогазу із відходів АПК та запропоновані напрямки перспективи розвитку біогазової промисловості в Україні.

***Науковий внесок роботи.*** Із узагальнених даних матеріального балансу випливає, що за трансформації органічних відходів АПК за анаеробного бродіння в метан перетворюється від 57,1 до 80,0 % ацетатна кислота, а за рахунок відновлення вуглекислого газу – від 20,0 до 42,9% залежно від субстрату, що піддається ферментації.

## ВСТУП

У сучасному світі, де енергетичні потреби постійно зростають, пошук відновлювальних та сталих джерел енергії стає необхідністю для забезпечення сталого розвитку та зменшення негативного впливу на навколишнє середовище. Одним із перспективних напрямків в цьому контексті є використання біогазу як альтернативного та відновлювального енергетичного джерела [1]

Біогаз є результатом складного процесу анаеробного розкладання органічних матеріалів, таких як тваринний гній, сільськогосподарські залишки та харчові відходи. Його виробництво не тільки дозволяє використовувати природний процес розкладання органічних ресурсів для отримання енергії, але й робить його екологічно чистим джерелом, оскільки воно сприяє зменшенню викидів парникових газів та впливає на стале розвиток та екосистему.

У даній дипломній роботі розглядається широкий спектр аспектів, пов'язаних із використанням біогазу. Вивчаються технічні аспекти його виробництва, аналізуються екологічні переваги порівняно з традиційними джерелами енергії, розглядається економічний вигляд та визначаються перспективи впровадження цього відновлювального ресурсу [2, 3]

## РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

### 1.1. Перспективи використання біогазу як відновлювального джерела енергії

Підкреслюється перспективність переробки біомаси та органічних відходів для виробництва газового палива. Зазначається, що в Україні за останні три роки потужності біогазових установок зросли майже втричі. Динаміці цього розвитку сприяла прийнята державна програма "Національний план дій з відновлюваної енергетики до 2020 року". Виділяється, що вітчизняні біогазові установки в основному працюють на імпортному обладнанні, використовуючи різноманітні сировини, такі як гній, посівні залишки, сировина від переробки деревини тощо [6].

Окрему увагу привертає розширене використання газифікації твердого палива в світі, яка, зокрема, застосовується в Німеччині та Індії. Описуються приклади газогенераторних установок, які використовують біомасу для генерації електроенергії.

Наявність пілотних газогенераторних установок на біомасі в Україні та описує приклади підприємств, які використовують автономні газогенераторні установки для отримання генераторного газу з різних видів сировини, таких як тріска, пелети, відходи деревини тощо. Також зазначається про розвиток газогенераторної установки в м. Малині на деревній трісці та використання генераторного газу в когенераційній установці [8]

Біогаз-процес є біологічним процесом, в ході якого анаеробно розщеплюється органічна субстанція, тобто без участі кисню. Анаеробні мікроорганізми, які здатні до такого розкладання, природно зустрічаються там, де відсутній кисень, наприклад, на дні водойм, у болотах, а також в рубці жуйних тварин. В процесі біогаз-процесу утворюється біогаз, який, в основному, складається з метану та вуглекислого газу, а також із залишкових газів, таких як аміак, сірководень і водяна пара. Залишки бродіння можуть бути використані як органічні добрива в природному кругообігу речовин [14]



Розщеплення субстратів та органічних речовин відбувається на кількох етапах: гідроліз, підкислення (ацидогенез), утворення оцтової кислоти (ацетогенез) і утворення метану (метаногенез). Цей процес залежить від співпраці різноманітних мікроорганізмів, таких як бактерії і археї. Методологічно-технічно біогаз-процес може бути розділений на термофільний, мезофільний і психрофільний процеси в залежності від температурного режиму. Термофільний процес відбувається при високих температурах (45-55°C), мезофільний при помірних (30-44°C), а психрофільний при низьких температурах (<30°C). Кожен з цих процесів має свої переваги та особливості [9].

Розкладання субстратів і утворення біогазу відбувається шляхом співпраці різних груп бактерій і архей на різних етапах. Гідролітично-ацидогенні, ацетогенні і метаногенні мікроорганізми здійснюють розкладання і утворення біогазу, при цьому велику роль відіграють умови середовища, такі як температура, рН, наявність поживних речовин і тривалість перебування у ємності.

Виробництво біогазу є важливим напрямком в галузі відновлюваної енергії. Його джерелами слугують органічні матеріали, такі як сільськогосподарські залишки, тваринний гній і харчові відходи. Це робить біогаз екологічно чистим джерелом енергії, оскільки відновлювана біомаса може бути використана знову [10].

Зменшення викидів парникових газів є ще однією важливою перевагою біогазу. Порівняно з традиційними джерелами, такими як вугілля або нафта, він має менший вплив на зміну клімату. Це важливо в контексті боротьби з глобальним потеплінням та ефектом парникового газу.

Виробництво біогазу також вирішує проблеми пов'язані із зайнятістю населення в сільських районах і підвищує їх реальні доходи, що робить його важливим інструментом для розвитку економіки. Разом із тим, біогаз сприяє утилізації органічних відходів, зменшуючи кількість сміття, що потрапляє на сміттєзвалища [11].

Деталізуючи використання біогазу в аграрних господарствах, слід відзначити, що він може стати додатковим джерелом доходу для сільськогосподарських господарств, зокрема тих, які використовують тваринний гній як сировину. Це дозволяє розвивати сільськогосподарські регіони та робить їх більш стійкими до змін в галузі енергетики та сільського господарства.

Загалом, біогаз не лише забезпечує відновлювану енергію, але і сприяє різноманітним аспектам економіки, екології та соціального розвитку, зроблюючи його важливим фактором для сталого розвитку [12].

Перша криза в енергетиці, яка виникла в 1970-х роках, визначила напрямок розвитку альтернативних технологій для виробництва енергії та стала важливим аспектом стратегій заміщення вичерпних джерел палива і технологій, спрямованих на зменшення впливу на навколишнє середовище. У цьому контексті, анаеробний переробний процес (АД) визнано одним з перспективних джерел енергії (Kumaran et al., 2016, Zhang et al., 2016a).

АД представляє собою синергетичний процес, у якому консорціум мікроорганізмів розкладає органічний матеріал відсутності кисню, переходячи через чотири етапи, природним чином формуючи біогаз. На етапі гідролізу складні органічні сполуки субстрату ферментативно перетворюються в більш прості та розчинні молекули, такі як амінокислоти, жирні кислоти та цукри. Далі ці сполуки перетворюються у суміш летких жирних кислот (ЛЖК) та інших продуктів ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ , оцтова кислота) через ацидогенний бродіння. Ацетогенні бактерії конвертують органічні кислоти в ацетат,  $\text{CO}_2$  та/або водень, які виступають субстратами для виробництва метану на останньому метаногенному етапі (Jain et al., 2015).

Отриманий біогаз складається головним чином з метану (60%) і вуглекислого газу (35%–40%), а також слідової кількості інших газів, таких як аміак ( $\text{NH}_3$ ), сірководень ( $\text{H}_2\text{S}$ ), водень ( $\text{H}_2$ ), кисень ( $\text{O}_2$ ), азот ( $\text{N}_2$ ) і оксид вуглецю ( $\text{CO}$ ) (Abdeshahian et al., 2016, Appels et al., 2011). Також, під час мезофільної фази метаногенезу, токсичні сполуки, які можуть міститися в

дигестаті, частково мінералізуються, утворюючи кінцеві перетравлені відходи, схожі на компост) [13].

Існує значна кількість факторів, які впливають на процес перетравлення органічних речовин та, відповідно, на виробництво біогазу. Проте одним з ключових аспектів є постійне використання доступної сировини з високим потенціалом метану, який часто визначається за допомогою біохімічних тестів потенціалу метану (Zhang et al., 2016a). Серед найбільш поширених субстратів можна відзначити різноманітні органічні відходи, такі як тверді побутові відходи, залишки їжі, осад стічних вод, тваринний гній, агропромислові залишки чи промислові відходи (Abdeshahian et al., 2016, Mata-Alvarez et al., 2011). Вміст метану в біогазовій суміші залежить від окисного ступеня вуглецю (чим вищий рівень відновлення вуглецю, тим більший вміст метану в біогазі). Також важливе значення має збалансоване співвідношення C/N, і повідомляється, що оптимальне співвідношення C/N для АД становить 20–30 [19].

## **1.2. Біогазове виробництво на планеті**

Незважаючи на переваги анаеробного перетравлення (АП) та біогазу як джерела енергії, його використання розходиться по всьому світу та відрізняється за різними рівнями технічного розвитку. Продвиження біогазу порівняно з іншими джерелами енергії сильно залежить від урядових політик, що спричиняє нерівномірний розподіл потужності біогазової енергії по всьому світу.

В Європі більше 10 000 діючих установок для перетравлення розташовані в країнах, таких як Німеччина, де виробництво біогазу отримує значний фінансовий сприяння, що призвело до стрімкого розширення цієї відновлюваної технології енергії в останні роки. Привабливі німецькі фінансові стимули сприяють використанню різних сировин (наприклад, спеціальних енергетичних культур) для анаеробного перетравлення, і, таким чином, загальний потенціал виробництва біогазу значно збільшився за останні два десятиліття [20].

Додатково, нещодавній аналіз прийшов до висновку, що стимули, особливо спрямовані на мало-середні установки, менші 500 кВт, мають значущу позитивну кореляцію з ростом використання цієї технології в Німеччині та Об'єднаному Королівстві. Деякі інші європейські країни, такі як Данія, Австрія, Італія чи Швеція, мають законодавство та фінансові стимули, які сприяють інвестиціям і сприяють поширенню використання біогазової енергії (Буджяновський 2016, Едвардс та ін. 2015), але їх потужність далека від німецької. Виробництво біогазу в Європі становило 12 кт у 2015 році, і очікується, що воно зросте до 16 кт до 2020 року, при цьому 16% буде походити з очисних стічних шламів, а 72% - з сільськогосподарських відходів (Європейська асоціація біогазу) [21].

У порівнянні, приблизно 2000 установок для анаеробного перетравлення розташовані на всій території Сполучених Штатів, хоча Рада з біогазу Америки підраховувала близько 11 000 об'єктів для розробки у 2014 році, включаючи лише ті, які можуть потрапити в потенційні органічні відходи як сировину, такі як ферми з вирощуванням дійки та свиней, очисні споруди, а також проекти газу з полігонів сміття. Фактично виробництво біогазу в Північній Америці становило 3,5 кт у 2015 році, і очікується, що це зросте до приблизно 5 кт до 2020 року, причому велика частка, 60%, буде походити з очисних стічних шламів (Рада з біогазу Америки).

У Африці, незважаючи на спроби міжнародних організацій просувати технологію біогазу, результати все ще обмежені. Засновано кілька малих установок для біогазу, але лише кілька з них знаходяться в експлуатації, і в більшості випадків працюють в невідповідних умовах експлуатації. Процеси передового окиснення (AOP) набувають популярності як методи, спрямовані на підвищення біодеградації осадів і, отже, ефективності анаеробного покращення. Вони вивчаються як перспективні методи, що ґрунтуються на внутрішньому утворенні гідроксильних радикалів (HO•), які мають високу окисну активність (із сильним потенціалом окиснення-відновлення 2,33 В).

Ультразвук - єдина техніка АОР, яка була предметом великої кількості наукових досліджень та оглядів перед обробкою осадів (Pilli et al. 2011). Це вважається механічним та передовим окислювальним процесом, оскільки воно створює гідро-механічні силові впливи внаслідок кавітації, генеруючи переважно гідроксильні радикали. Кавітаційний колапс породжує інтенсивне місцеве нагрівання та високий тиск на інтерфейсі рідина-рідина (Le et al. 2015). Існує багато факторів, які впливають на ефективність кавітації та ультразвукації; дисинтеграція осаду, введення енергії, інтенсивність та частота здаються важливими. Однак недоліком є споживання енергії під час обробки; отже, одним із параметрів, які слід оптимізувати для отримання економічної вигідності, є тривалість та конкретне введення енергії.

Однак виявлено, що при збільшенні цих параметрів розмір часток осаду зменшується. Ультразвукова попередня обробка дуже ефективна у зменшенні розміру часток осаду, збільшуючи тим самим відношення поверхні до об'єму, інтенсифікуючи область, яка доступна хімічному та ферментативному взаємодії (Pilli et al. 2011). Крім того, ультразвукові обробки зменшують в'язкість осаду, покращують його однорідність та поліпшують процес обезвожування.

Біогаз, отриманий через анаеробний розклад органічних матеріалів, стоїть на передовому краї відновлюваної енергії. Цей вид енергії виробляється внаслідок природного процесу розкладання органічних ресурсів, таких як тваринний гній, залишки сільськогосподарської діяльності та харчові відходи. Важливо підкреслити, що цей процес дозволяє постійно отримувати енергію, при цьому уникаючи виснаження природних ресурсів, що є суттєвим внеском у сталість та природоохоронний підхід [29].

Захоплююче в тому, що тваринний гній, залишки сільського господарства та відходи харчової промисловості, які часто розглядаються як відходи, стають цінними ресурсами для виробництва біогазу. Це відкриває можливість для ефективного використання і повторного використання відходів, що робить процес виробництва біогазу не лише важливим енергетичним методом, але й частиною стратегії управління відходами.

Зокрема, анаеробний розклад забезпечує розщеплення складних органічних речовин у прості, що призводить до виходу газу, включаючи метан, який може бути використаний як ефективне джерело енергії. Цей процес є не лише дієвим, але і екологічно чистим, позбавленим забруднення та викидів, що дозволяє створити стале та екологічно безпечне джерело енергії для різних сфер виробництва та життєдіяльності. [7]

Загалом, відновлювана енергія, здобута через виробництво біогазу, представляє собою інноваційний і ефективний спосіб використання природних ресурсів для забезпечення енергетичних потреб, збереження навколишнього середовища та стимулювання сталого розвитку.

### **1.2.1. Зменшення Глобального Впливу:**

Використання біогазу представляє значущий крок у напрямку зменшення глобального впливу на навколишнє середовище та є ключовим компонентом стратегії боротьби з кліматичними змінами та глобальним потеплінням. Детальне розглядання цього аспекту вказує на ряд переваг та позитивних внесків, які внесе використання біогазу у енергетичну систему [38].

Однією з ключових переваг є зменшення викидів парникових газів, зокрема метану, який є основним складовим біогазу. Метан є потужним парниковим газом, його викиди сприяють збільшенню теплового ефекту та, відповідно, глобальному потеплінню. Заміна традиційних джерел енергії біогазом допомагає знизити обсяги викидів, зменшуючи тиск на кліматичну систему. Крім того, використання біогазу є важливим екологічним джерелом енергії, яке сприяє сталому розвитку та збереженню екосистем. Оскільки виробництво біогазу базується на обробці органічних відходів, це дозволяє уникнути забруднення навколишнього середовища, а також зменшує потребу у видобутку та використанні несталі ресурси. [5]

Узагальнюючи, використання біогазу впливає не лише на конкретний енергетичний сектор, але і на світове екологічне становище, роблячи значущий внесок у стратегію глобальної сталості та зменшення негативного впливу на клімат та природне середовище.

Біогаз дозволяє скорочувати викиди, які сприяють глобальному потеплінню. Ця екологічно чиста альтернатива грає важливу роль у сталому розвитку, оскільки вона зменшує негативний вплив на екосистему та біорізноманіття. Враховуючи, що біогаз виробляється з використанням органічних відходів, таких як тваринний гній чи рослинні залишки, він сприяє управлінню відходами, що також має важливий екологічний аспект.

Загалом, біогаз є перспективним засобом скорочення екологічного відбитку та вдосконалення умов для здоров'я нашої планети. Його використання в енергетичних процесах є не лише кроком у напрямку сталого розвитку, але й важливим елементом глобальної стратегії збереження навколишнього середовища [51].

Біогаз, утворюючись в результаті анаеробного розкладання органічних матеріалів, має значущий вплив на зниження залежності регіонів від традиційних джерел енергії. Цей вид енергії, що базується на природньому процесі розкладання органічних ресурсів, сприяє створенню стійкого енергетичного сектора та розвитку енергетичної незалежності.

Використання біогазу визначається як використання відновлюваної енергії, оскільки воно ґрунтується на природних процесах розкладання органічних ресурсів, таких як тваринний гній, сільськогосподарські залишки та харчові відходи. Такий метод виробництва енергії забезпечує сталість в постачанні, уникаючи вичерпання традиційних джерел енергії [42].

Застосування біогазу визначається не лише його сталим походженням, але й ключовою роллю в розвитку стійкого енергетичного сектора та підтримці енергетичної незалежності. Це створює можливість регіонам ефективно використовувати власні ресурси та уникати залежності від непостійних джерел

Такий підхід до використання біогазу відкриває нові горизонти для регіонального розвитку та створює базу для розвитку відновлюваних ресурсів. Це знижує вплив на природні ресурси та сприяє сталому розвитку, забезпечуючи регіонам стійке та надійне енергетичне постачання [32].

Зменшення залежності від традиційних джерел енергії через використання біогазу робить акцент на енергетичній незалежності. Це дозволяє

регіонам визначати свою стратегію управління енергетичними ресурсами та сприяє створенню стійкого та ефективного енергетичного сектора [12].

### **1.3. Утилізація органічних і побутових відходів**

Використання біогазу включає утилізацію органічних відходів, яка становить ключовий аспект процесу виробництва. Серед цих відходів основними є тваринний гній та харчові залишки. Цей підхід до утилізації органічних матеріалів має суттєві переваги, які виходять за рамки лише виробництва енергії [32].

Утилізація тваринного гною та харчових залишків у процесі біогазового виробництва веде до значного зменшення обсягів сміття, яке в іншому випадку б потрапило на сміттєзвалища. Це допомагає вирішити проблеми пов'язані із забрудненням та переповненням сміттєзвалищ, сприяючи сталому використанню ресурсів [11].

Однак важливість утилізації органічних відходів у контексті біогазового виробництва також полягає в екологічних перевагах. Замість того, щоб просто викидати органічні відходи на сміттєзвалище, де вони можуть розкладатися та виділяти метан (який є потужним парниковим газом), ці відходи піддаються контрольованому анаеробному розкладанню, що призводить до виробництва біогазу. Це сприяє зменшенню викидів метану в атмосферу та допомагає зменшити глобальний вплив парникових газів.

Отже, утилізація органічних відходів у виробництві біогазу не лише забезпечує стійкий джерело енергії, але також сприяє раціональному управлінню відходами та допомагає знижувати негативний екологічний вплив.

Використання біогазу в аграрних господарствах відкриває нові перспективи для сільського господарства та має значний вплив на економіку та соціальний розвиток сільських районів. Однією з ключових переваг є те, що біогаз може служити джерелом додаткової енергії для аграрних підприємств [38].



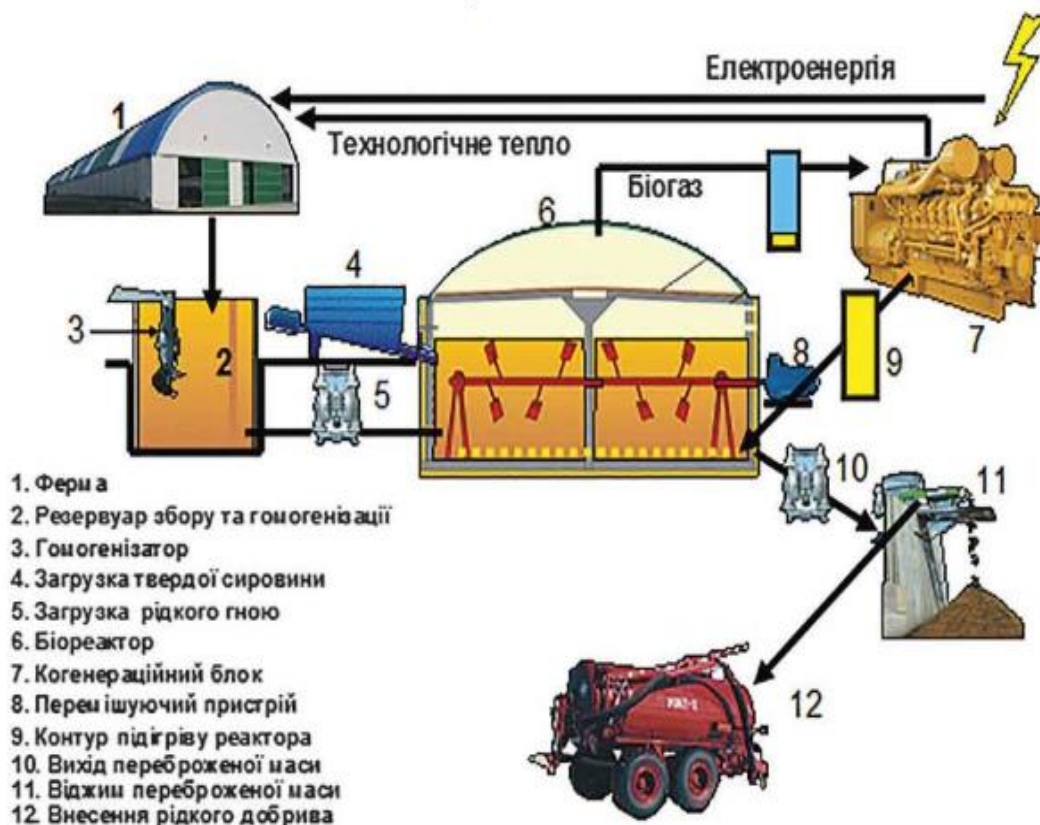


Рис. 1.1. Принципову систему біогазової установки в сільськогосподарському секторі:

Забезпечення енергією з власних ресурсів дозволяє сільськогосподарським виробникам економити на витратах на традиційні джерела енергії, такі як електроенергія чи паливо. Це сприяє значному зниженню витрат на виробництво, збільшуючи прибутковість аграрних підприємств та роблячи їх більш конкурентоспроможними на ринку [19].

Заощаджені кошти можуть бути використані для модернізації та вдосконалення сільськогосподарської інфраструктури, придбання сучасного обладнання та технологій. Це в свою чергу сприяє підвищенню ефективності виробництва, збільшенню врожаю та покращенню якості продукції.

Розвиток біогазового сектору також стимулює створення нових робочих місць у сільських громадах, покращуючи соціальний стан місцевого населення. Зменшення залежності від зовнішніх джерел енергії сприяє стійкому економічному розвитку сільських територій та забезпечує їхню енергетичну незалежність [42].

Виробництво біогазу має потенціал стати справжнім катализатором для економічного зростання та соціального розвитку різних регіонів. Давайте детальніше розглянемо, які економічні вигоди відчувають місцеві громади завдяки цьому процесу.

Виробництво біогазу вимагає спеціалізованих фахівців для управління та обслуговування устаткування, а також для ведення досліджень і розробки в цьому напрямку. Це створює нові робочі місця і підтримує зайнятість місцевого населення.

Виробництво біогазу може викликати попит на послуги та товари в місцевому бізнесі. Від підприємств, які постачають устаткування для виробництва біогазу, до транспортних компаній, які забезпечують транспортування біомаси, бізнеси в регіоні отримують нові можливості для розвитку та зростання.

Сільські господарства, які стають постачальниками сировини для біогазових установок, отримують додаткові джерела доходів. Вони можуть використовувати тваринний гній та інші органічні відходи для виробництва біогазу, що приносить їм додатковий прибуток [43].

Залучення Інвестицій: Розвиток біогазової інфраструктури привертає інвестиції в регіон. Це може включати як національні, так і міжнародні інвестори, які бачать потенціал у стійкому та екологічно чистому виробництві біогазу.

Вид сировини	Об'єм переробки, т	Вихід біогазу з 1т, м <sup>3</sup>	Валовий вихід біогазу, тис. м <sup>3</sup>	Собівартість одержаного біогазу, тис. грн	Валовий прибуток, тис. грн	Чистий прибуток, тис. грн
Гній, одержаний від свиней	1000	60	60	13,2	150	136,8
Гній, одержаний від великої рогатої худоби	1000	50	50	11	130	119
Пташиний послід	1000	130	130	28,6	338	309,4

Рис.1.2. Розрахунок прибутку виробництва біогазу з біомасти

Економічні вигоди від виробництва біогазу також виявляються в підвищенні життєвого рівня місцевого населення. Зменшення безробіття та збільшення доходів сприяє поліпшенню умов життя громадян.

Збільшення економічної активності через виробництво біогазу може мати суттєвий вплив на соціальний розвиток регіону. Забезпечення робочих місць та створення нових можливостей може позитивно впливати на освіту, охорону здоров'я та загальний розвиток громад. В цілому, економічні вигоди від виробництва біогазу простежуються впродовж всього ланцюжка виробництва та споживання, приносячи позитивний вплив на різні аспекти життя місцевих громад [18].

## Динаміка зростання біогазових потужностей в Україні

(що працюють за «зеленим» тарифом)



Рис. 1.3. Збільшення потужностей біогазових установок в Україні

### 1.4. Перспективи використання біогазових установок в Україні

Використання гною для виробництва біогазу є ефективним та екологічно чистим рішенням, особливо в умовах великої кількості сільськогосподарських господарств в Україні. Тваринний гній містить багато органічних речовин, які можуть бути піддані анаеробному розкладанню, щоб виробити біогаз. Цей процес дозволяє не лише використовувати відходи, але і зменшує негативний вплив сільськогосподарської діяльності на довкілля. Біогаз, отриманий з гною, може бути використаний для виробництва тепла та електроенергії, надаючи сільським господарствам додатковий, сталий ресурс енергії [52].

Вирощування енергенчних рослин, таких як енергетична верба чи соя, є ще одним перспективним напрямком для виробництва біогазу. Енергетичні культури вирізняються високим вмістом біомаси та енергетичних речовин, які можуть бути використані для отримання газу. Цей підхід дозволяє сільським господарствам не лише виробляти продукцію, але й стати важливими учасниками виробництва відновлювальної енергії. Взаємодія між вирощуванням енергетичних культур і виробництвом біогазу сприяє створенню

енергетично самодостатніх сільськогосподарських об'єктів та сприяє сталому розвитку сільських районів.

Використання міських відходів для виробництва біогазу є стратегічно важливим напрямом в управлінні відходами та розвитку сталого міського господарювання. Процес обробки відходів із застосуванням біогазових технологій дозволяє відділити органічні компоненти від звичайного сміття, такі як продукти харчування, трава, або біологічно розкладаючі матеріали [16].

Це важливо не лише з погляду утилізації відходів, але й для зменшення викидів парникових газів, які можуть утворюватись під час розкладання органічних матеріалів на сміттєзвалищах. Використання біогазу, отриманого із цих відходів, має двоякий позитивний вплив на навколишнє середовище: зменшення викидів та використання відновлювального джерела енергії.

Одним із ключових аспектів цього процесу є вдосконалення сортування відходів на початковому етапі, що полегшує подальшу обробку. Міські обласні центри та мегаполіси можуть вигідно використовувати цю технологію, оскільки вони генерують великі обсяги відходів щодня.

Крім того, обробка міських відходів для виробництва біогазу може стати елементом комплексного підходу до розвитку відновлювальних джерел енергії та сталого розвитку міст. Це відкриває нові можливості для управління ресурсами та зменшення впливу людської діяльності на навколишнє середовище в міських регіонах. На рисунку зображено: схему відходів в місті [21].

Використання біогазу в енергетичному секторі відкриває широкі перспективи для забезпечення різноманітності та сталості енергетичного міксу. Однією з ключових галузей є теплогенерування, де біогаз використовується для виробництва тепла в різних сферах. Промислові підприємства можуть використовувати біогаз для обігріву своїх приміщень чи виробничих процесів, споживаючи при цьому менше традиційних видів палива, що сприяє зменшенню викидів шкідливих речовин [13].



Рис.1.4. Теплогенерування та електрогенерування

Теплогенерування на основі біогазу також знаходить застосування в житловому будівництві та комунальних послугах. Будинки можуть опалюватися за допомогою систем, які працюють на біогазі, забезпечуючи високоефективне та екологічно чисте опалення. Такі системи можуть бути особливо привабливими у зонах, де доступність природного газу обмежена.

Електрогенерування на базі біогазу є ще однією перспективною галуззю. Спеціалізовані електростанції використовують біогаз для виробництва електроенергії. В цьому процесі під час спалювання біогазу утворюється тепло, яке використовується для виробництва пари або гарячої води, а потім приводить турбіни генератора для створення електричної енергії. Цей метод є не лише високоефективним, а й сприяє використанню відходів для виробництва енергії, зменшуючи кількість відходів, що потрапляють на сміттєзвалища [41].

Такий підхід до використання біогазу в енергетичному секторі визначається високою ефективністю та екологічною чистотою, вносячи вагомий внесок у збереження ресурсів та зниження впливу на довкілля. На зображені: відсотковий поділ між енергетичними системами України

Зменшення викидів біогазу відзначається ключовими екологічними перевагами, що впливають на збереження навколишнього середовища та скорочення негативного впливу на кліматну систему.

Зниження викидів парникових газів: Однією з основних переваг виробництва біогазу є зменшення викидів парникових газів, зокрема метану. Метан є потужним парниковим газом, його викиди призводять до потенційної підвищеної температури атмосфери. Використання біогазу вигідно тим, що він відповідає концепції "зеленого палива" і дозволяє замінити менш екологічно чисті джерела енергії [13-15].

Боротьба зі змінами клімату: Зменшення викидів метану шляхом використання біогазу є важливим кроком у боротьбі зі змінами клімату. Метан в атмосфері має більший потенціал глобального потепління порівняно з CO<sub>2</sub>, тому зменшення його викидів є ключовим аспектом стратегії зниження впливу людської діяльності на клімат.

Стале розвиток та екосистема: Використання біогазу сприяє сталому розвитку, оскільки він базується на обробці відходів та відновлюваних ресурсів. Це не тільки зменшує тиск на традиційні джерела енергії, але й сприяє збереженню біорізноманіття та стабільності екосистем.

Екологічні переваги виробництва біогазу роблять його важливим внеском у стале розвиток та ефективне використання ресурсів, сприяючи при цьому збереженню навколишнього середовища для майбутніх поколінь [18].

## РОЗДІЛ 2. УМОВИ ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 2.1. Матеріал і методи

Наші дослідження були зосереджені на теоретичному та в окремих випадках експериментальному дослідженні окремих ланок технологічного процесу починаючи із одержання та приготування базового субстрату, процесів бродіння та одержання біогазу його очищення та подальше використання споживачами принципова технологічна схема цього процесу наведена на рис. 2.1.

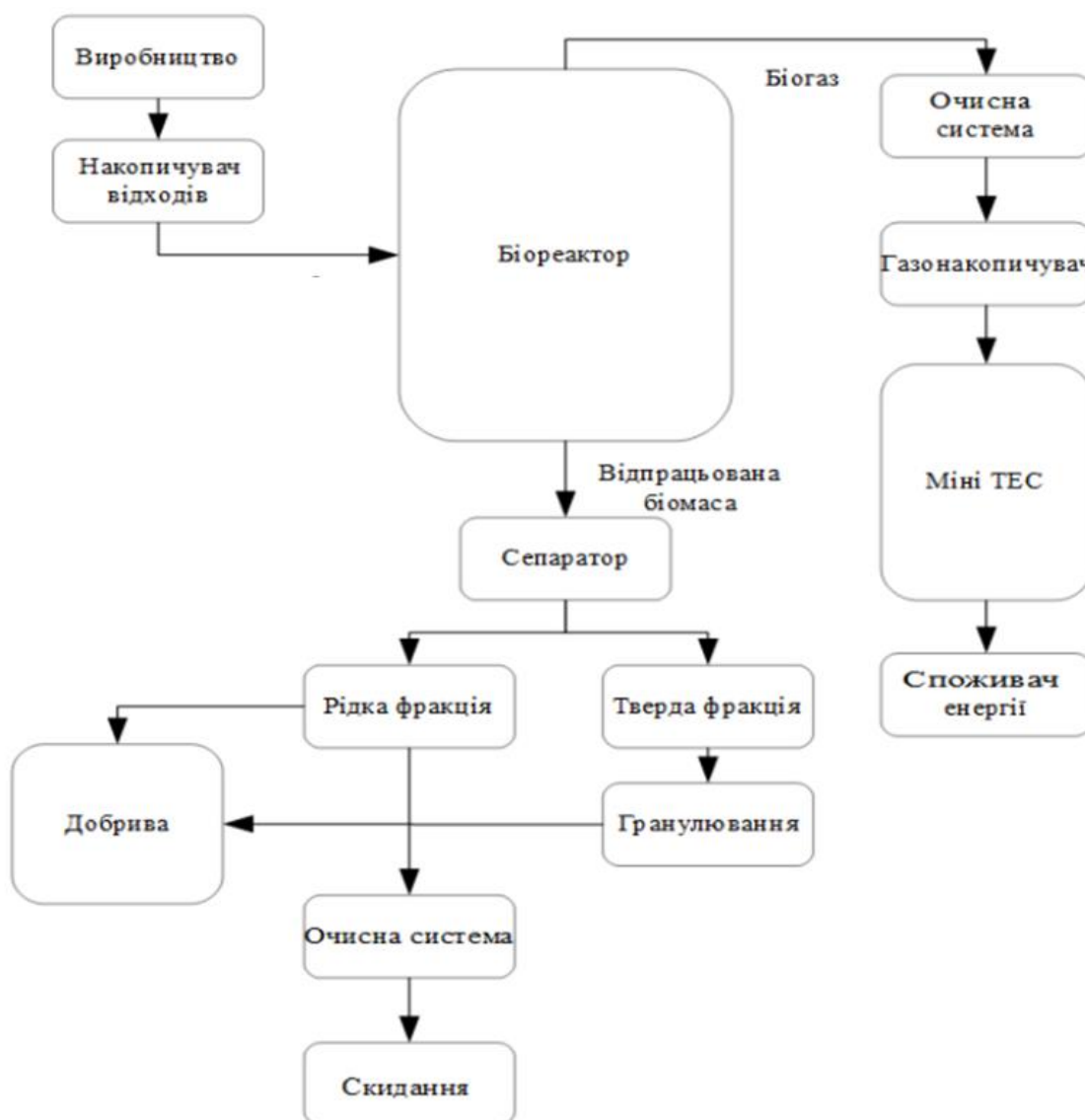


Рис. 2.1. Принципова технологічна схема одержання та використання біогазу



Особливого значення нами було приділено вивченню впливу технологічних параметрів на анаеробний процес збродження органічних відходів АПК у біогаз.

Експериментальні дослідження проводили з метою визначення параметрів живильного і температурного режиму середовища росту, розвитку і ефективного функціонування бактерій – продуцентів метану, які створювались шляхом композиції в різному співвідношенні рослинної сировини, гною ВХР і посліду птиці та води на лабораторній установці (рис. 2.2), яка складається з чотирьох метантенків 1, об'ємом по 3 дм<sup>3</sup>.

Останні забезпечені ємністю для збору біогазу 3 та пристроєм для його виведення 2. Конструкція ємності дозволяла збирати біогаз впродовж декількох діб у ємність, яка змінює свій об'єм за допомогою водяного затвору. При цьому спиралися на біохімічні методи аналізу сировини, порівнювали технологічні прийоми її збродження, посилалися на методики економічних розрахунків ефективності виробництва біогазу.



Рис. 2.2. Лабораторна біогазова установка.

Визначення технологічних параметрів проводили за використанням класичних методів дослідження [22]:

- динаміку та валовий вихід біогазу досліджували об'ємним газовим лічильником;
- температурні режими (психрофільний (діапазон температури 16 – 25 °С); мезофільний (діапазон температури 25 – 45 °С) та термофільний (діапазон температури – вище 45 °С) у лабораторній біогазовій установці підтримували за допомогою автоматичного температурного реле
- вологість базового органічного субстрату в біогазовій установці підтримували на рівні 90% шляхом додавання води (розрахунковим методом);
- визначення значення рівня рН проводили за використанням лакмусового папірця.

Експериментальну частину досліджень проведено в науковій лабораторії кафедри біотехнології та радіології університету у 2023 році із використанням також пілотної біогазової установки (рис.2.3)

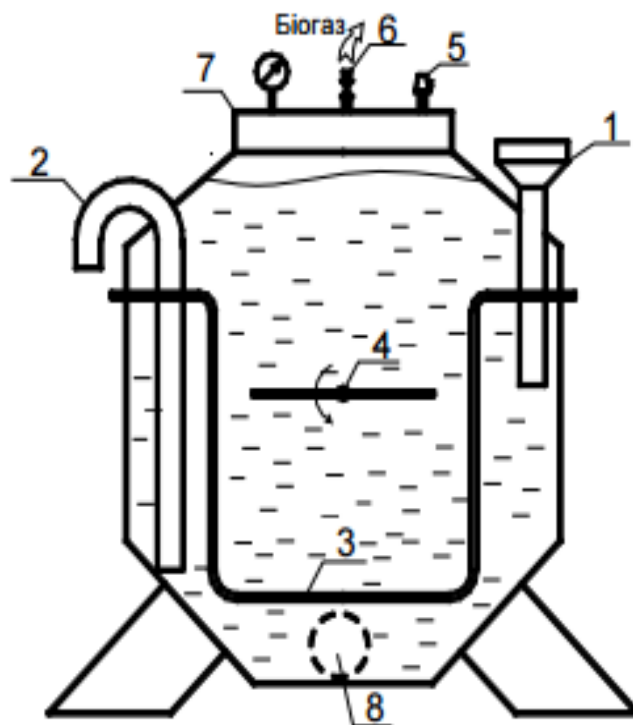


Рис. 2.3. Пілотна біогазова установка кафедри біотехнології та радіології

Пілотна біогазова установка – герметичний металічний резервуар, у якому знаходяться:

- 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.

Запропонована схема біореактора забезпечує повне перемішування та ефективне нагрівання сировини за мінімуму енерговитрат. Ця конструкція біогазової установки є безперервної дії, в ній відбувається постійне виділення біогазу, що дає можливість значно зменшити об'єм біореактора і відповідно мінімізувати тепловтрати.

У резервуар невеликими порціями подають органічну сировину через патрубок 1, яку необхідно перемішувати міксером 4, для того, щоб на поверхні не утворювалась кірка, яка перешкоджає виходу біогазу. У холодний період року для забезпечення термостабілізації внутрішнього середовища включають систему підігрівання 3. Отриманий біогаз через патрубок 6 надходить до споживача. Надлишок біогазу скидається в атмосферу за допомогою скидного клапана 5. За необхідності через люки 7, 8 здійснюють ревізію внутрішнього об'єму.

## РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 3.1. Технології виробництва та використання біогазу в Україні

Із стратегій розвитку як світової, так й української енергетичної галузі та основних тенденцій енергетики в цілому в XXI столітті випливає, що актуальним на даний час і подальшу перспективу є поступова заміна викопних енергетичних джерел на джерела відновлюваної енергетики (рис. 3.1).

Поновлювальна або відновлювальна енергетика має значну перспективу для подальшого розвитку, адже енергетичний потенціал їх постійно або (в наших природних умовах) сезонно поновлюється. Ці процеси відбуваються за участю рослин, які шляхом фотосинтезу, трансформують енергію Сонця, акумулюючи її в біомасу рослин. Вдосконалюючи існуючі технологічні системи одержання енергетичних ресурсів з відновлювальних джерел можна повністю, а в майбутньому це так і буде відмовитися від викопних джерел енергії.

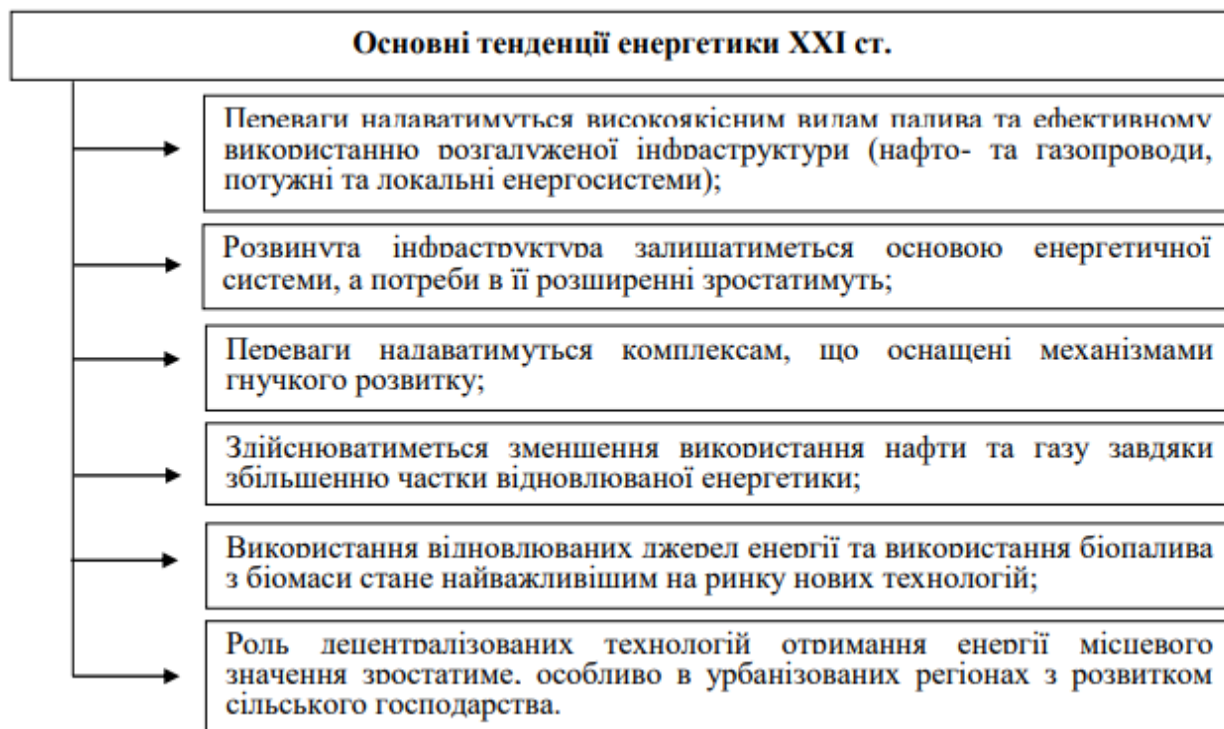


Рис. 3.1. Основні напрямки розвитку енергетики на перспективу

Використання відновлювальної енергетики має значні переваги, в екологічному плані, над викопними джерелами енергоносіїв, в основному, вугіллям та вуглеводнями. В першу чергу, ці переваги зумовлюють зменшення на порядок викидів токсичних продуктів горіння, а також речовин (вуглекислого газу, метану), які безпосередньо беруть участь у формуванні парникового ефекту. Зростання викидів вище зазначених газів безпосередньо впливає на зміну клімату, відбувається глобальне потепління, тануть льодовики [28].

Тому, активне використання біомаси, в тому числі відходів АПК у безвідходних технологія одержання енергетичних ресурсів є перспективним як з екологічної, так й економічної (енергетичної) точки зору. В таблиці 3.1. наведено дані щодо перспективи використання енергоресурсів на період до 2035 року [18].

Таблиця 3.1.

Динаміка енергетичних ресурсів на період до 2035 року [18].

Споживання первинних енергетичних ресурсів, млн т н.е.	2013	2020	2025	2030	2035
Вугілля	41,4	32	28,8	24	17,7
Природний газ	39,5	33	30	29	28,8
Нафтопродукти	9,85	13	12,5	12	11
Атомна енергія	21,9	26,7	27,8	28	28
Біомаса, біопаливо та відходи	1,56	3,6	4,5	6	8
Сонячна енергія	0,07	0,5	1,5	2,8	5
Енергія вітру	0,08	0,4	1,6	2,3	4
Гідравлічна енергія	1,14	0,9	1	1,2	1,2
Енергія довкілля	0,05	0,3	0,7	1,1	2,3
Нетто експорт ПЕР	-0,35	-0,9	-1,3	-2,2	-2,6
Усього, в т.ч.	115,2	109,5	107,1	104,2	102,6
ВДЕ	3,13	5,7	9,3	13,4	20
Реалізація потенціалу підвищення енергоефективності					
Енергоємність, т н.е./тис. дол. США	0,32	0,26	0,2	0,15	0,12
Реалізований потенціал підвищення енергоефективності, млн т н.е.	-	36,6	65,6	98,7	144,6
Розширення використання відновлюваної енергетики					
Частка ВДЕ у ЗППЕ, %	2,7	5,2	8,7	12,9	20

Аналізуючи дані таблиці, можна спостерігати, що використання біомаси та органічних відходів АПК щорічно зростали і за прогнозами [18] на 2035 рік

порівняно із 2013 роком зростуть у 5,2 рази. Таке зростання використання біомаси та органічних відходів АПК, зокрема для виробництва біогазу, можливе при активному використанні та удосконаленні сучасних технологій трансформації органічних відходів у енергоресурси.

Як зазначено на рис.3.2, за прогнозами [16, 18] на 2035 рік у структурі енергетики країни на долю біомаси та органічним відходам АПК припадає 12%, йде помірне зниження використання природного газу (біля 30%), вугілля (на рівні 13%) та нафтопродуктів (7%) та зростає використання ядерної енергетики (25%) і інших відновлювальних джерел енергії (соняшна та вітрова енергія – 10%, геотермальна енергія – 2% та гідроенергетика 1%)



Рис. 3.2. Прогнозна структура постачання енергії в Україні у 2035 році

### 3.1.1. Сировина (субстрат) для анаеробного зброджування в процесі метаногенезу

Органічні субстрати, що використовуються в технології метанового бродіння можуть бути різноманітними, однак їх вибирають, враховуючи в першу чергу економічну доцільність. Загалом, для метанового бродіння найбільш використовують сировину, яка наведена в табл. 3.2.

Таблиця 3.2

Види органічних субстратів, які можна використовувати для одержання біогазу [48]

№	Категорія	Об'єкти збору сировини	Приклади сировини
1	Гнойові відходи тваринництва	- ферми ВРХ (молочні ферми) - свиноферми - птахофабрики - ферми МРХ, інші ферми	- гній підстилковий - гноївка рідка - послід
2	Пожнивні рештки сільсько-господарських культур	- підприємства рослинництва	- солома зернових (насамперед пшениці) - стебла та початки кукурудзи - стебла та кошики соняшнику - ботвина буряків
3	Побічні продукти та відходи харчової переробної промисловості	- цукрові заводи - спиртні заводи - пивні заводи - крохмале-патокові виробництва - борошномельні та круп'яні заводи - олійно-екстракційні заводи - м'ясопереробні заводи - забійні цехи - консервні заводи - виноробні підприємства - інші виробництва	- жом буряковий - меляса (патока) - дробина пивна - спиртова барда (зернова, післямелясна) - вичавки та відходи фруктові - вичавки та відходи овочеві - вичавки виноградні - жмих та фуз олійні - лушпиння соняшнику - лушпиння зернових - полова, висівки та інші відходи зернових - побічні продукти тваринного походження, згідно [23], тощо
4	Відходи виробництва біоетанолу та біодизелю	- біоетанольні заводи - біодизельні заводи	- спиртова барда - шрот/макуха ріпаковий - гліцерин
5	Енергетичні культури	- підприємства рослинництва	- кукурудза на силос - сорго на силос - сильфій пронизанолистий - цукровий буряк - жито озиме, інші
6	Фітобіомаса водних об'єктів	- природні водні об'єкти - штучні водні об'єкти та системи	- вища водна рослинність - мікроводорості
7	Відходи садово-паркових господарств	- комунальні паркові господарства - аеропорти - великі спортивні майданчики з природним покриттям	- скошені трави з газонів - листя опале

продовження табл. 3.2

№	Категорія	Об'єкти збору сировини	Приклади сировини
8	Відходи сфери торгівлі та громадського харчування	<ul style="list-style-type: none"> <li>- комунальні та приватні заклади громадського харчування</li> <li>- продуктові ринки та магазини</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- залишки готової їжі</li> <li>- некондиційна харчова продукція</li> <li>- залишки та відходи продуктів харчування</li> <li>- відпрацьована олія</li> </ul>
9	Тверді побутові відходи	<ul style="list-style-type: none"> <li>- сміттесортувальні станції</li> <li>- підприємства комплексної механо-біологічної обробки ТПВ</li> <li>- сміттєві баки з роздільним збором органічних відходів</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- органічна фракція ТПВ</li> </ul>
10	Стічні води та їх осади	<ul style="list-style-type: none"> <li>- міські очисні споруди</li> <li>- локальні очисні споруди промислових підприємств</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- первинні осади станцій аерації</li> <li>- вторинні осади (активний мул) станцій аерації</li> <li>- жирові флотошлами</li> <li>- висококонцентровані виробничі стічні води</li> </ul>
11	Покривні культури (зелені добрива)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- підприємства рослинництва</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- вика</li> <li>- жито</li> <li>- ріпа / редька</li> <li>- бобові</li> <li>- конюшина, інші</li> </ul>
12	Рослинність луків	<ul style="list-style-type: none"> <li>- природні луки, які не використовують для ведення господарства та які не занесені до природно-заповідного фонду</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- скошені з луків мультивидові багаторічні трави</li> </ul>

Із задекларованих 12 позицій органічної сировини найчастіше для біометаногенезу використовують зведені три групи відходів (рис. 3.3)

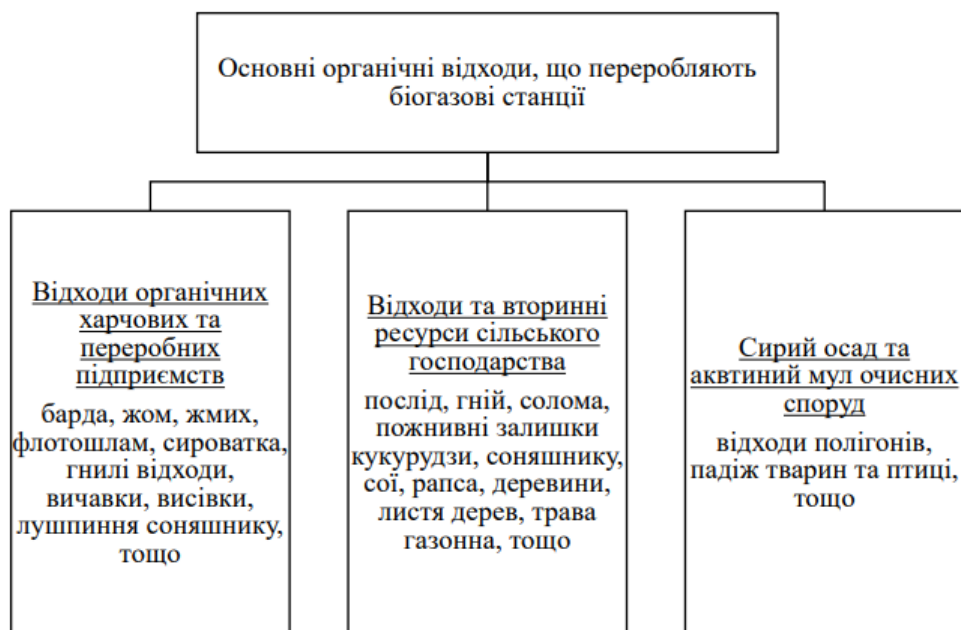


Рис.3.3. Перспективні органічні відходи, для одержання біогазу [55]



Із перерахованих вище (табл. 3.2), потенційних субстратів для анаеробного зброджування з метою одержання біогазу ми зупинимося на перших двох, а саме:

- гнойових відходах тваринницької галузі;
- органічних відходах АПК (поживних залишків органічних відходів сільськогосподарських рослин).

Згідно із узагальнених літературних даних [26, 36, 51] на долю гнойових відходах тваринницької галузі органічних відходах АПК припадає 17,49 млрд м<sup>3</sup>/рік виробленого біогазу із загального балансу 38,43 млрд м<sup>3</sup>/рік, що складає біля 45,5% (рис. 3.4).



Рис. 3.5. Перелік субстратів та кількість виробленого біогазу з них в Україні, млрд. м<sup>3</sup>/рік [26, 36, 51]

Згідно із статистичними даними [49], в структурі субстратів для виробництва біогазу, чільне місце займає жом (51,8%) – побічний продукт переробки цукрових буряків, друге місце займають консервовані корми у

вигляді силосу (19,8%) – потім гнойові маси тварин та птиці (гній свиней 13,5%, гній ВРХ 10,0%, послід 1,6%) (рис. 3.6).

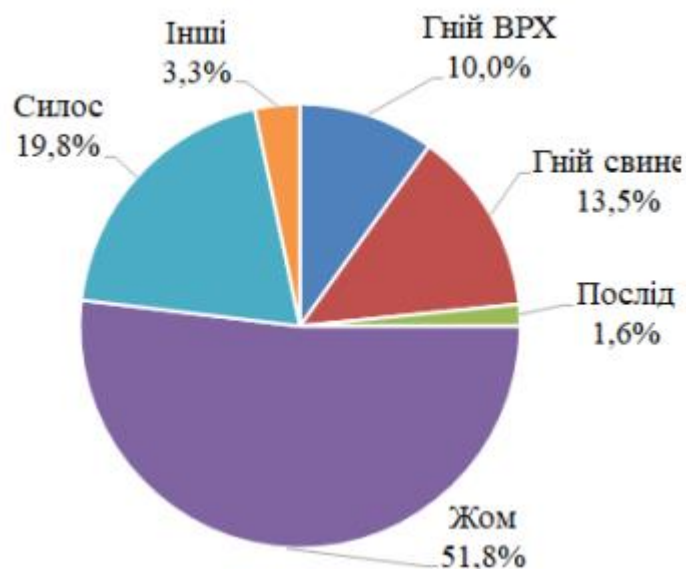


Рис. 3.6. Структура основних субстратів для отримання біогазу в балансі побічних продуктів виробництва та органічних відходів АПК (2020 р.)

Таблиця 3.3

Порівняльна динаміка виробництва біогазу із органічних відходів АПК та із полігонів ТПВ у межах України [31]

Роки	Кількість біогазових установок, од.			Потужність біогазових установок, МВт		
	біогаз із відходів та сировини АПК	біогаз із полігонів ТПВ	всього	біогаз із відходів та сировини АПК	біогаз із полігонів ТПВ	всього
2012	0	7	7	0	7	7
2013	2	7	9	7	7	14
2014	3	7	10	8	7	15
2015	5	7	12	11	7	18
2016	6	7	13	14	7	21
2017	9	12	21	23	11	34
2018	13	20	33	28	18	46
2019	20	25	45	47	23	70

Використання, як субстрату для виробництва біогазу органічних відходів АПК, в Україні щороку зростає і на початок 2020 року порівняно із 2013 роком кількість біогазових установок, які використовують відходи АПК

зросла у 10 разів, а їх потужність майже у 7 разів. Така тенденція, очевидно, буде тривати і надалі, бо органічних відходів та некондиційної сировини АПК є значні запаси і щорічно вони поповнюються.

Використання вище наведених субстратів для метанового бродіння, особливо гнойових мас є також актуальним із екологічної точки зору, бо значне їх нагромадження негативно впливає на довкілля, а саме [52-54]:

- через емісію газів, в тому числі вуглекислого газу, амоніаку, сірководню тощо;
- проникання продуктів розпаду, в тому числі й токсичних у ґрунтові води та забруднення водних ресурсів;
- забруднення органічними відходами прилеглих територій, обсіменіння її популяціями мікроорганізмів та можливе розповсюдження хвороботворних мікробів, яєць гельмінтів тощо.

Для усунення цих негативних явищ необхідна спеціальна технологія обробки гною, що дозволяє підвищити концентрацію живильних речовин і одночасно усунути неприємні запахи, подавити патогенні мікроорганізми, понизити вміст канцерогенних речовин.

Ми погоджуємося, що перспективним, екологічно безпечним і економічно вигідним напрямом рішення цієї проблеми є анаеробна переробка гною і відходів в біогазових установках з отриманням біогазу. Органічна маса, що залишилася після такої природної переробки, є якісним знезараженим добривом. Для переробки використовуються дешеві відходи сільського господарства: гній великої рогатої худоби, свиней, кіз, овець, послід птахів, солома, стружка, тирса, смітна рослинність, побутові відходи, відходи життєдіяльності людини, побутове органічне сміття і т.д. Одержаний біогаз йде на опалювання тваринницьких приміщень, житлових будинків, теплиць, приготування їжі, сушку сільськогосподарських продуктів гарячим повітрям, підігрів води, вироблення електроенергії за допомогою газових генераторів [15-17].

Однак перед використанням субстрату (органічних відходів АПК) в технологічному процесі анаеробного бродіння з метою одержання біогазу необхідно провести необхідну підготовку субстрату (рис. 3.7).

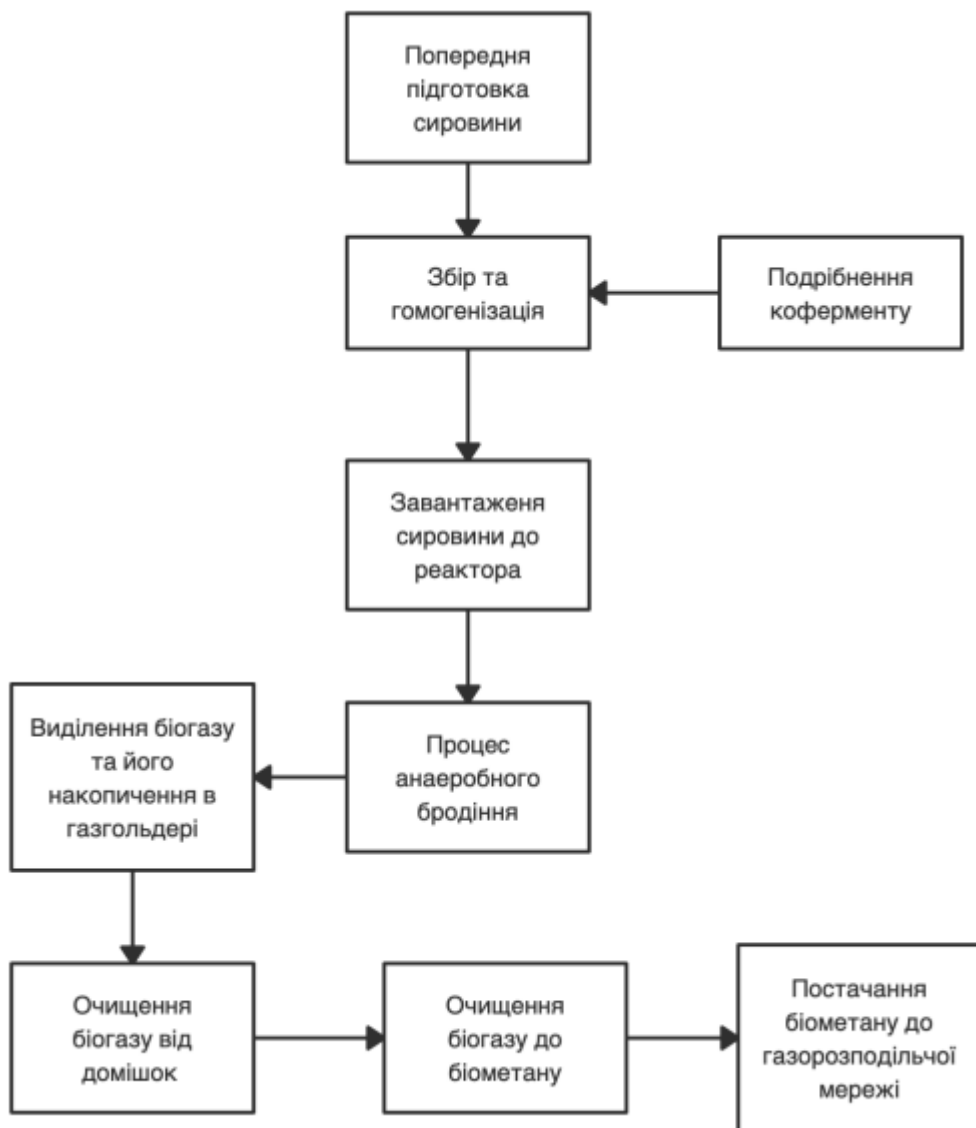


Рис. 3.7. Принципова технологічна схема підготовки субстрату до бродіння та виробництва біогазу

### 3.1.2. Біохімічні процеси в метантенках

Біохімічні процеси в метантенках проходять за участю ферментних систем аборигенних мікроорганізмів, які безпосередньо знаходяться на субстраті, який піддається бродінню. За даними літературних джерел [45-47] ідентифіковано та виділено 30-50 популяцій аеробних та анаеробних мікроорганізмів, які безпосередньо або опосередковано беруть участь у трансформації органічної складової субстрату в цільовий продукт – метан. Цей процес проходить у 4 етапи за схемою наведеною на рис. 3.8.

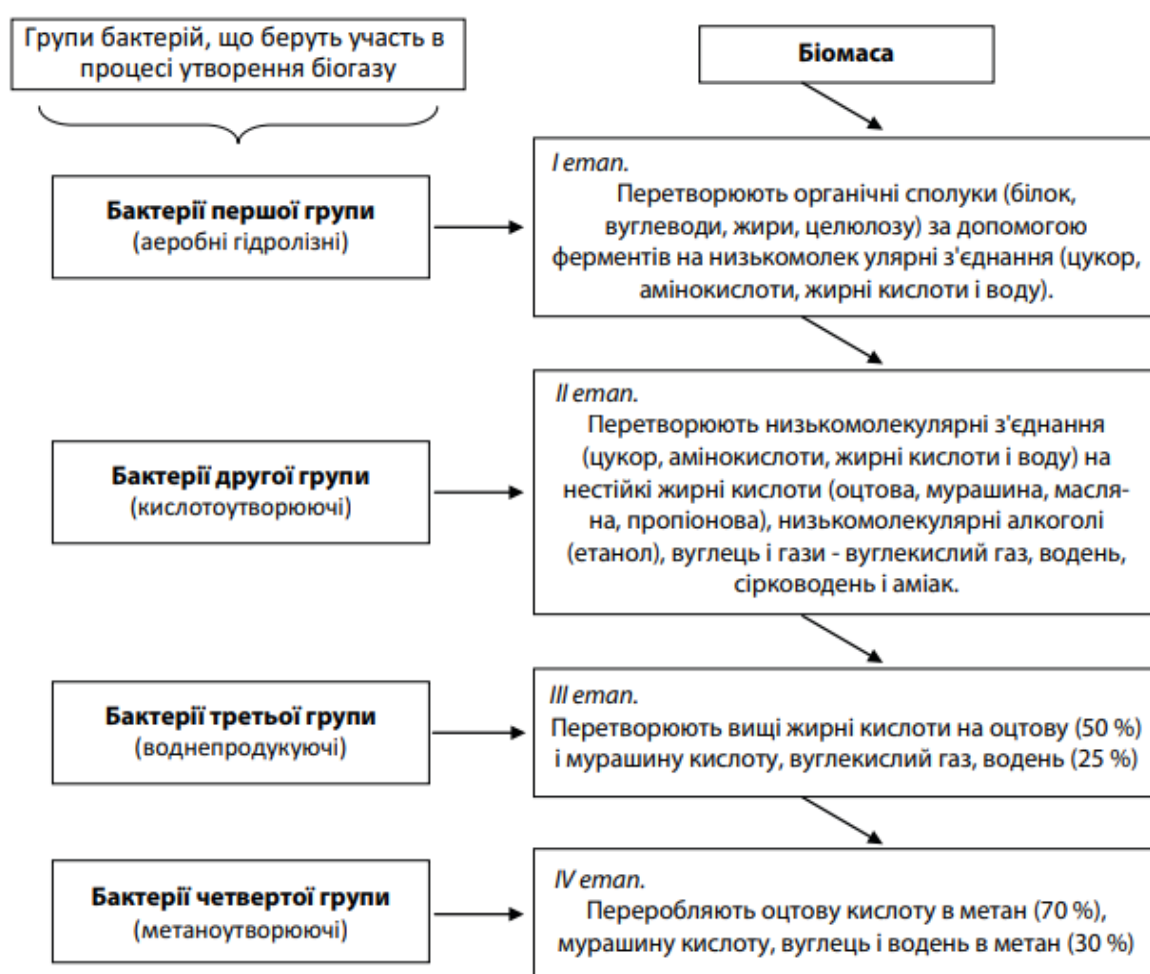


Рис. 3.8. Основні етапи трансформації біомаси у біогаз

Для підтримання оптимальних умов ферментації в метантенку необхідно дотримуватися наступних вимог[34]:

- на 2-4 етапах трансформації біомаси у біогаз створити та підтримувати анаеробні умови ферментації;

- підтримувати оптимальний температурний режим біомаси, яка зброджується;
- підтримувати оптимальне рН середовища;
- присутність аборигенних або внесення селекційних штамів метансинтезуючих мікроорганізмів у бродильне середовище.

Основні представники метаногенних популяцій бактерій представлені наступними видами [24]:

- Methanobacterium,
- Methanococcus,
- Methanosarcina,
- Methanothrix,
- Methanocorpusculum,
- Methanobrevibacteria,
- Methanopyrus

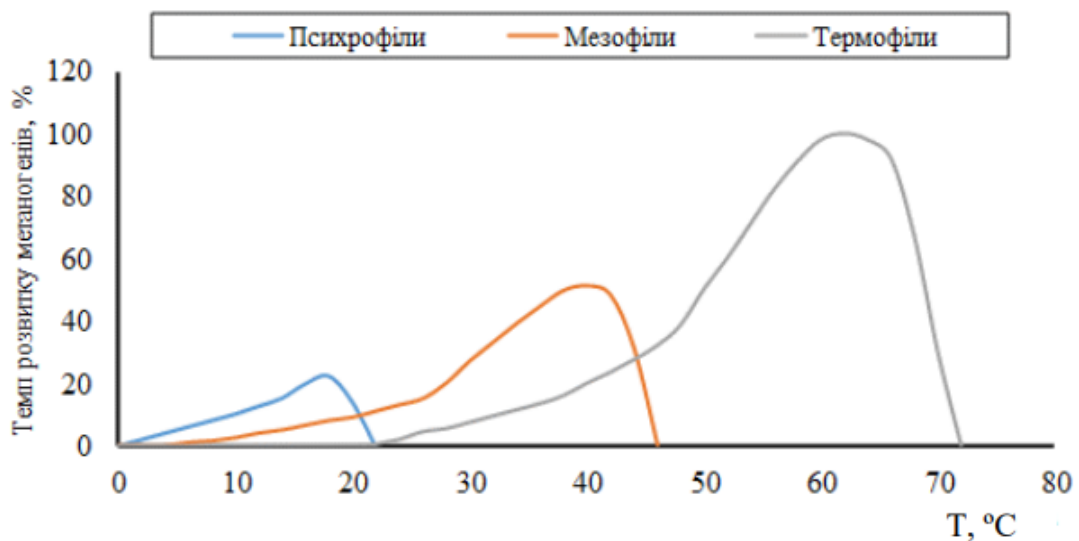


Рис. 3.9. Динаміка активності мікроорганізмів залежно від температури бродіння [39]

Важливу роль також має температура анаеробного зброджування (рис. 3.9), оскільки відомі три групи метаногенних мікроорганізмів, які активні в трьох різних температурних діапазонах [33]:

- психрофіли (діапазон температури 16 – 25 °C);

- мезофіли (діапазон температури 25 – 45 °С);
- термофіли (діапазон температури – вище 45 °С).

Найкраща активність ензимних систем щодо ферментації субстрату анаеробними метаносинтезуючими бактеріями проявляється за температури 45-55°C, тобто в цих умовах інтенсивно працюють термофіли (табл. 3.4). За такого температурного режиму бродіння триває 15-25 днів із ступенем трансформації 60%. За мезофільного та психрофільного бродіння час ферментації є набагато довшим із зниженням ступеня трансформації субстрату в біогаз.

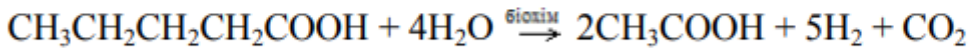
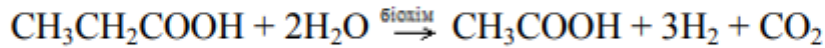
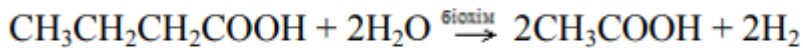
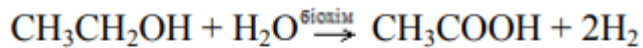
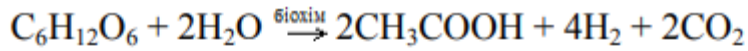
Таблиця 3.4

Динаміка трансформації субстрату в біогаз залежно від температури ферментації [44]:

№ п/п	Температурний режим, °С	Тривалість зброджування, доба	Ступінь перетворення, %
1	45–55	15–25	60±3,0
2	30–35	30–50	46±2,3
3	20–25	60–70	40±2,0

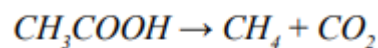
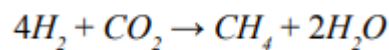
Тривалість зброджування за термофільного бродіння порівняно з мезофільними та психрофільним була відповідно меншою на 15-25 та 35-45 днів. Ступінь трансформації органічного субстрату аналогічно був нижчим на 14 і 20%. Дані показники яскраво засвідчують економічну доцільність саме використовувати термофільний тип бродіння. Цей тип бродіння забезпечує швидкість та ефективність технологічного процесу в цілому.

Популяції метаногенних мікроорганізмів забезпечують себе енергією за рахунок окиснення водню у метаболічних процесах відновлення вуглекислого газу. Окрім того, ці популяції також можуть використовувати, як джерело енергії мурашину та ацетатну кислоти, метиловий спирт, похідні амінокислот тощо. Основні біохімічні процеси наведено нижче [32, 43]:

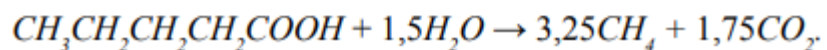
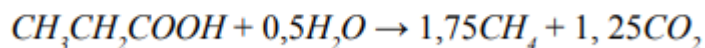
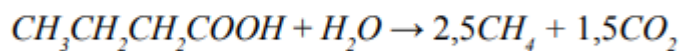
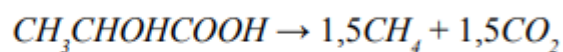
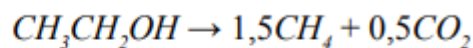
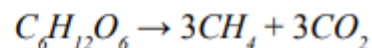


де  $C_6H_{12}O_6$  – глюкоза;  $CH_3CH_2OH$  – етанол;  $CH_3CHONCOOH$  – лактат;  $CH_3CH_2CH_2COOH$  – масляна кислота;  $CH_3CH_2COOH$  – пропіонова кислота;  $CH_3CH_2CH_2CH_2COOH$  – валеріанова кислота.

Синтез метану, на кінцевих етапах анаеробного перетворення органічного субстрату відбувається за рахунок відновлення вуглекислого газу та перетворенню ацетатної кислоти:

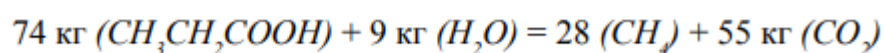
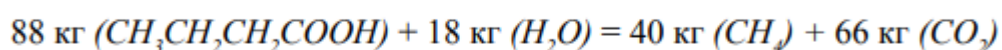
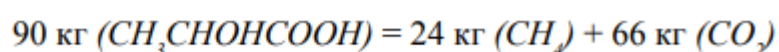
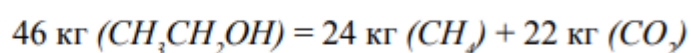
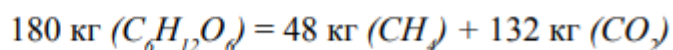


Проаналізувавши метаболічні процеси, за яких як кінцеві продукти утворилися прості метаболіти: ацетатна кислота, вуглекислий газ та водень можна отримати наступне рівняння по кожному проміжному продукту, що утворилися в процесі бродіння:



Використовуючи, вище наведені реакції метаболічних перетворень, можна розрахувати, математичним методом, баланс основних кінцевих продуктів (метану та вуглекислого газу) анаеробних перетворень базового субстрату:





Узагальнені дані матеріального балансу наведено в табл. 3.5, з яких видно, що за трансформації органічних відходів АПК за анаеробного бродіння в метан перетворюється від 57,1 до 80,0 % ацетатна кислота, а за рахунок відновлення вуглекислого газу – від 20,0 до 42,9% залежно від субстрату, що піддається ферментації.

Таблиця 3.5

Показники виходу біометану при анаеробній ферментації

№ п/п	Складова частина біомаси	Вихід біометану, %:		Масовий вихід в перерахунку на 1 кг розкладеної біомаси	
		за рахунок розщеплення	за рахунок відновлення	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>
		CH <sub>3</sub> COOH	CO <sub>2</sub>		
1	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub>	66,7	33,3	0,267	0,733
2	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> OH	66,7	33,3	0,522	0,478
3	CH <sub>3</sub> CHOHCOOH	66,7	33,3	0,267	0,733
4	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> COOH	80	20	0,455	0,75
5	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> COOH	57,1	42,9	0,378	0,743
6	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> COOH	61,5	38,5	0,51	0,755
	<b>В середньому</b>	<b>66,45</b>	<b>33,55</b>	<b>0,4</b>	<b>0,7</b>

У перерахунку на 1 кг перетвореного, розщепленого субстрату – органічних відходів АПК утворюється в середньому 0,4 кг CH<sub>4</sub> та 0,7 кг CO<sub>2</sub>. Основні метаболічні перетворення на клітинному рівні, за участю ферментів метаносинтезуючих бактерій, легкозброджуваних цукрів та клітковини наведено на рис. 3.10.

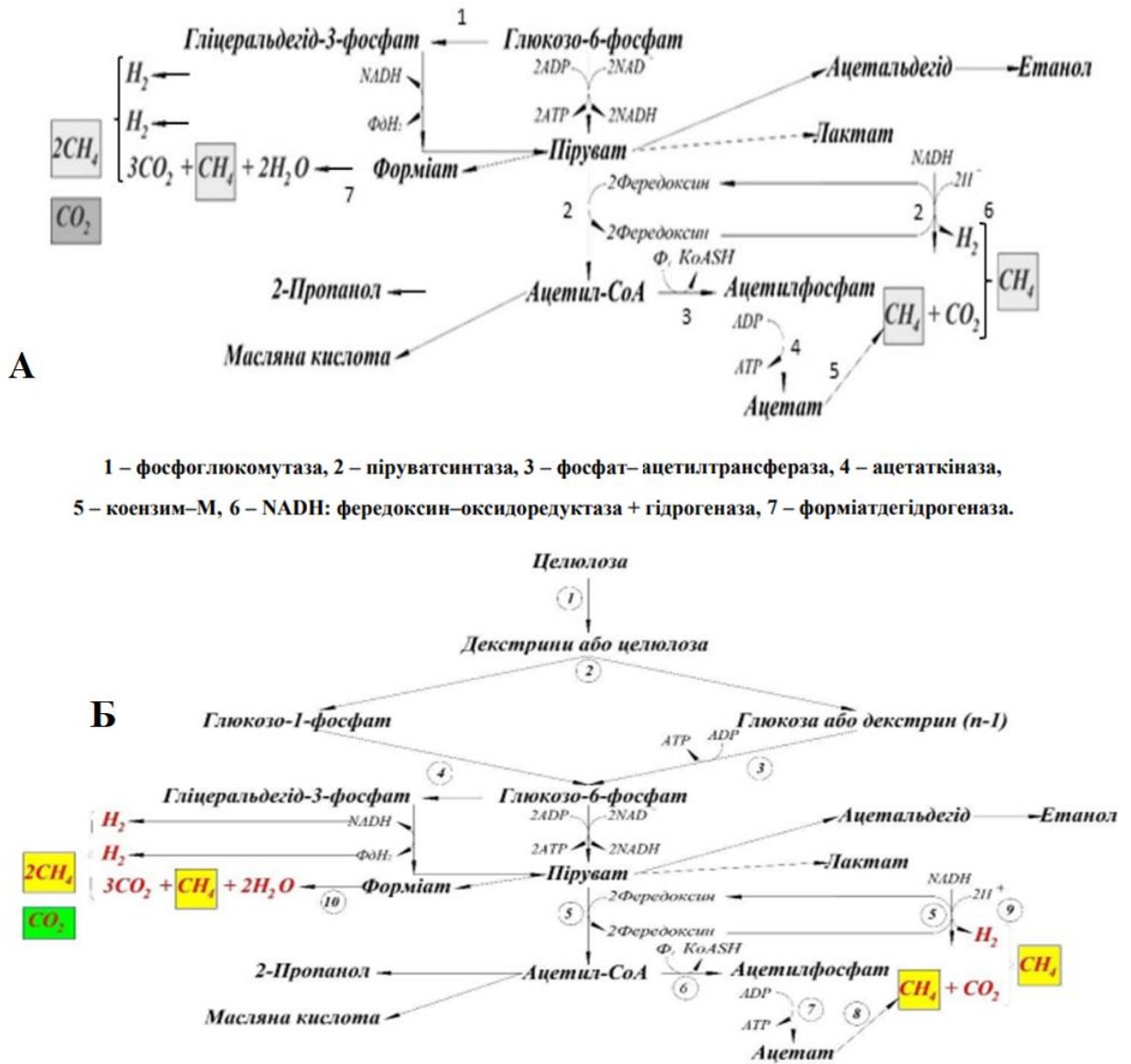


Рис. 3.10. Метаболічні перетворення легкозброджуваних цукрів (А) та клітковини (Б) метаносинтезуючими мікроорганізмами до ацетатної кислоти

Наведені вище, метаболічні перетворення стосується вуглеводів, які найбільш представлені і є основним компонентом в базовому субстраті – органічних відходів АПК. Однак, окрім вуглеводів у субстратах можуть міститися інші органічні компоненти, такі як ліпіди та білки, як компоненти побічних кінцевих продуктів, зокрема, переробної харчової промисловості. Вихід біогазу із зазначених вище компонентів є вищим порівняно із вуглеводами, як основного компоненту базового субстрату (табл. 3.6).

Вихід біогазу та біометану залежно від складу базового субстрату для анаеробної ферментації [50]

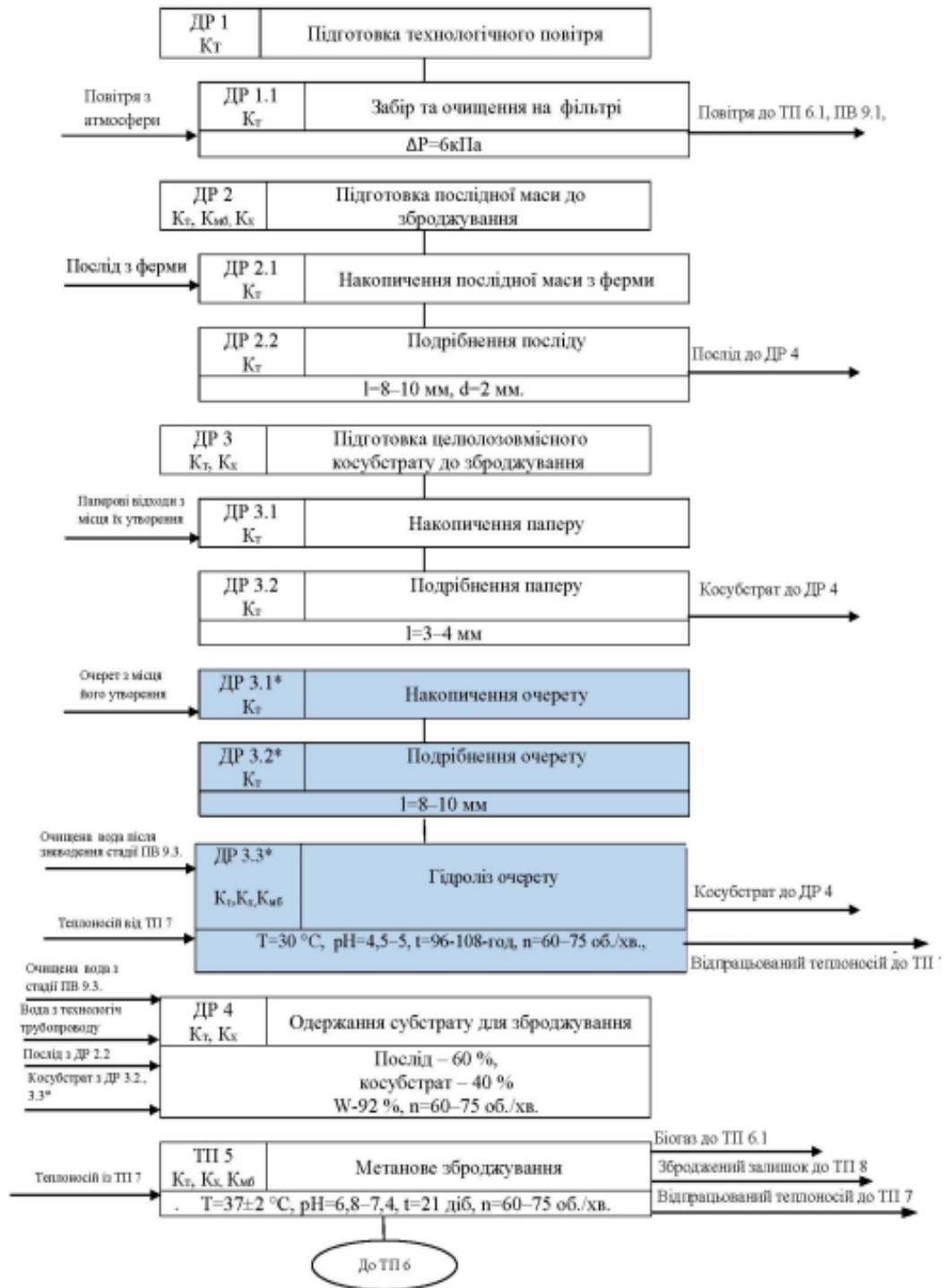
Органічна сполука	Хімічна формула	Біогаз м <sup>3</sup> /кг	СН <sub>4</sub> м <sup>3</sup> /кг
Вуглеводи	$C_6H_{10}O_5$	0,75	0,37
Ліпіди	$C_{16}H_{32}O_2$	1,44	1,44
Білок	$C_{16}H_{24}O_5N_4$	0,98	0,49

Як видно із таблиці, найефективнішим субстратом для одержання біогазу та метану загалом є ліпідні субстрати, використання яких дає майже у два рази вищий вихід біогазу, та у 3,9 рази вихід чистого метану. Щодо протеїнових субстратів, то використання їх в метановому бродінні, вони, незначно, порівняно із вуглеводами підвищують вихід біогазу.

### 3.1.3. Технологічна схема та апаратурне забезпечення одержання біогазу

Принципова технологічна схема виробництва біогазу наведена на рис.

3.11.



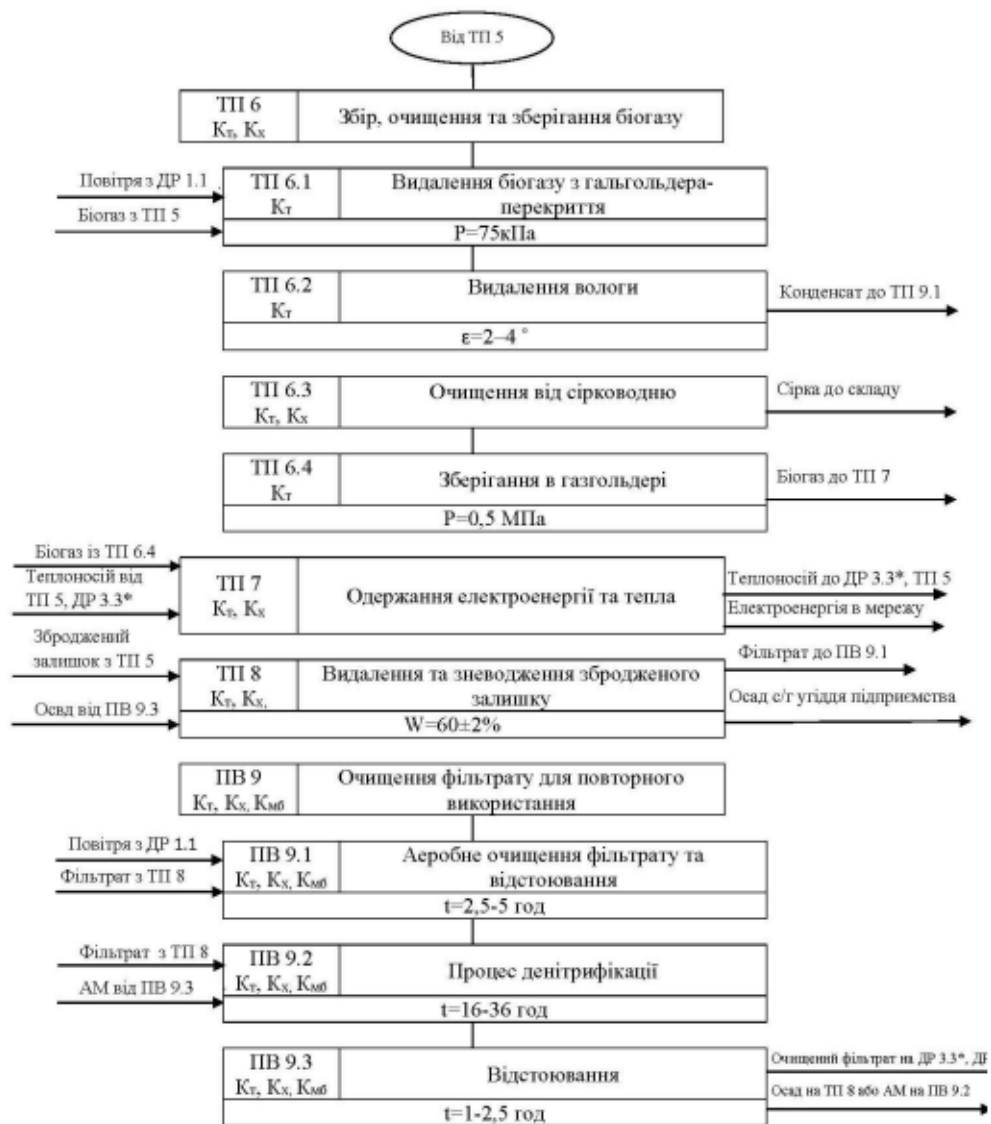


Рис. 3.11. Принципова технологічна схема процесу отримання біогазу

### Опис технологічної схеми

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 повітрязбірник 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 температури процесу  $37 \pm 2$  °С, перемішування проводиться двома мішалками (погружною та бічною), накопичування газу видбувається 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 комплекс біогаз спалюють у блочній теплоелектростанції. Пара (теплоносій), 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 зброженого залишку. Відбір зброженої 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  $60 \pm 2$  %), 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 зброженої 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 зброженої біомаси ТП 8.

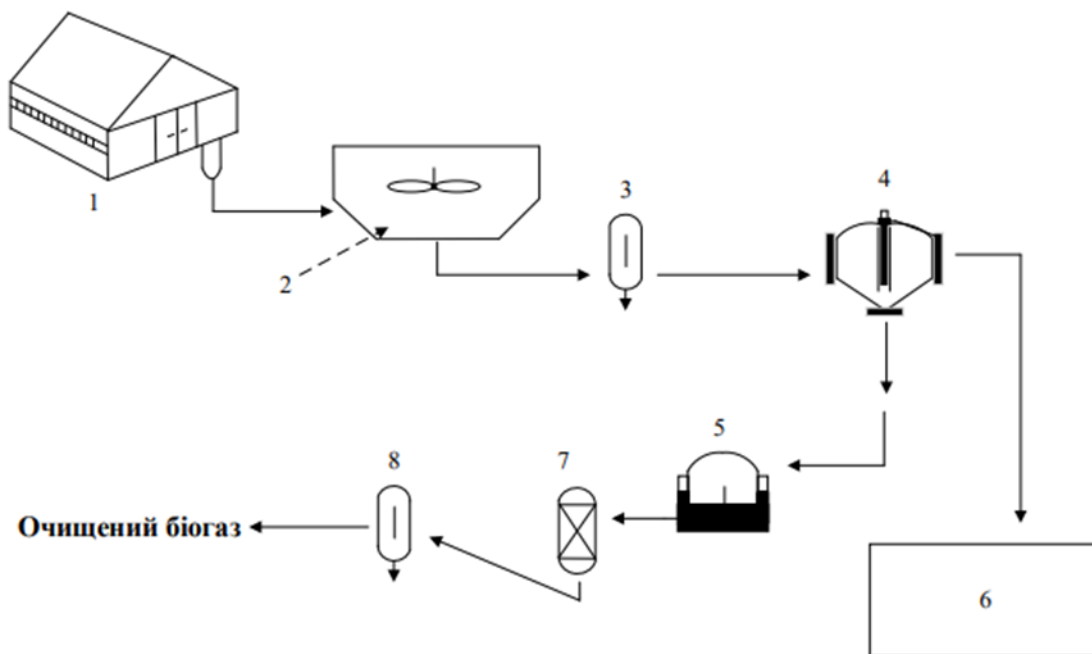


Рис. 3.12. Апаратурна схема виробництва та очистки біогазу:

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

### 3.2. Оптимізація умов культивування метаноутворюючих мікроорганізмів

У технологічному процесі одержання біогазу необхідно постійно контролювати наступні показники [29]:

- температурні умови отримання біогазу;
- рН середовища;
- тривалість ферментації;
- масообмінні процеси при метаногенезі;
- наявність летких жирних кислот;
- співвідношення C:N [30].

Серед перерахованих показників, які безпосередньо впливають на процеси анаеробної ферментації, підтримання рН базового субстрату на оптимальному рівні є однією із важливих умовою для забезпечення швидкої і повної трансформації органічної сировини в біогаз. Шляхом експериментального дослідження було встановлено, що метаногенні популяції мікроорганізмів найбільш активно трансформують базовий субстрат в біогаз за рН середовища бродіння на рівні 6,85-7,45 (рис. 3.13).

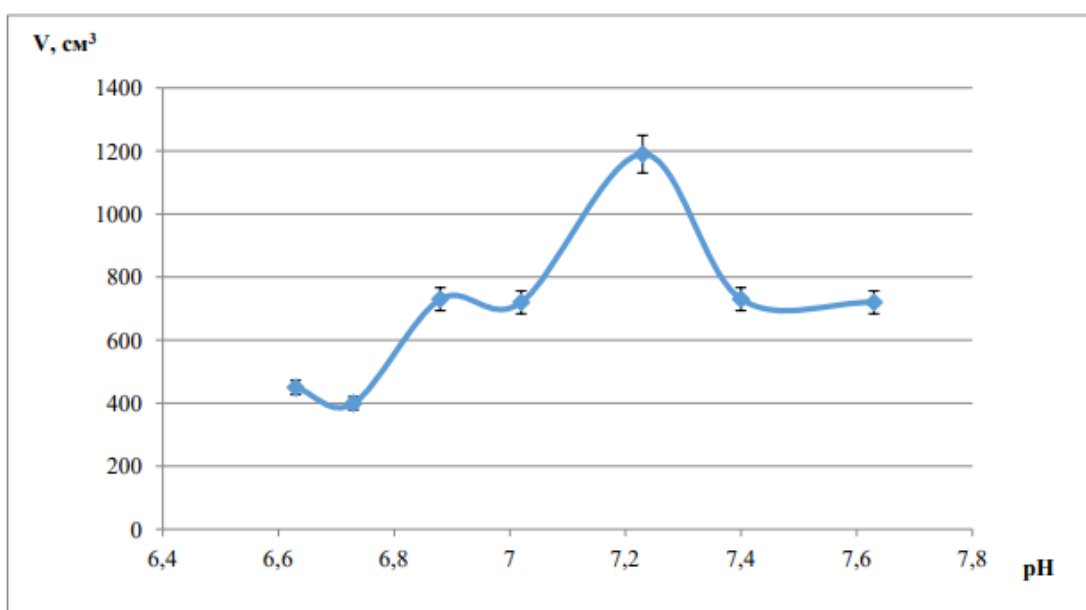
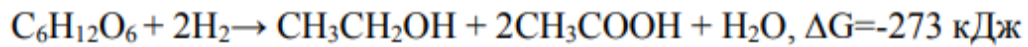


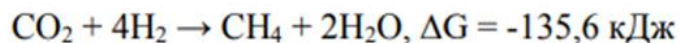
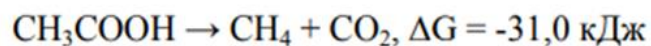
Рис. 3.13. Валовий вихід біогазу залежно від рН культурального середовища

В процесі ферментації базового субстрату, до складу якого, в основному, входять вуглеводи утворюються проміжні сполуки, з яких, в кінцевому рахунку, утворюється метан – основний продукт біогазу [37-38]:

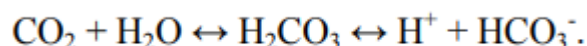


Із наведеної реакції за відновлення глюкози в анаеробних умовах до етилового спирту та двох молекул ацетатної кислоти, утворені кислоти, дисоціюючи в бродильному середовищі знижує рН. За таких умов, метаболічні процеси у бродильному середовищі переключаються на синтез нейтральних сполук.

Основними метаболітами, із яких, за ферментної участі мікроорганізмів, синтезується біометан, є ацетатна кислота та вуглекислий газ:



Перетворення ацетатної кислоти на метан супроводжується підвищення рН бродильного середовища, тобто проходить поступове вирівнювання рН середовища до оптимального значення. Крім того, вуглекислий газ, що утворився в процесі бродіння залежно від рН середовища може взаємодіяти із водою з утворенням вугільної кислоти за наступною реакцією:



Як видно з рівняння реакції, вугільна або карбонатна кислота, яка до речі завжди присутня у водних розчинах, де розчинений вуглекислого газу, може взаємодіяти із лужноземельними металами, утворюючи при цьому гідрокарбонатну буферну систему, яка й регулює рН у бродильному середовищі. Така буферна система може регулювати, підвищувати чи понижувати рН середовища в межах наближених до оптимальних.

Поряд із регуляцією рН у ферментованому органічному субстраті гідрокарбонатною (бікарбонатною) буферною системою, на рН середовища впливають і частково його регулюють кінцеві продукти анаеробної

ферментації, зокрема амоніак та сірководень на долю, який, в кінцевому продукті – біогазі, припадає відповідно до 1 та 2%

Таблиця 3.7

Метаболічні перетворення в процесі метаногенезу [27]:

Біохімічний попередник	Хімічне рівняння утворення метану	$\Delta G$ , кДж/моль CH <sub>4</sub>	№ р-ня
Водень	$4\text{H}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$	-130	1.1
Ацетат	$\text{CH}_3\text{COOH} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{CO}_2$	-31	1.2
Форміат	$4\text{HCOOH} \rightarrow \text{CH}_4 + 3\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	-119	1.3
Метанол	$4\text{CH}_3\text{OH} \rightarrow 3\text{CH}_4 + \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	-103	1.4
Оксид карбону (II)	$4\text{CO} + 5\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_4 + 3\text{H}_2\text{CO}_3$	-185	1.5
Триметиламін	$4(\text{CH}_3)_3\text{N} + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow 9\text{CH}_4 + 3\text{CO}_2 + 4\text{NH}_3$	-74	1.6
Диметиламін	$2(\text{CH}_3)_2\text{NH} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{CH}_4 + \text{CO}_2 + 2\text{NH}_3$	-74	1.7
Метиламін	$4(\text{CH}_3)\text{NH}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{CH}_4 + \text{CO}_2 + 4\text{NH}_3$	-74	1.8
Меркаптани	$2(\text{CH}_3)_2\text{S} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{CH}_4 + \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{S}$	-49	1.9

Як видно із рисунку 3.13 валовий вихід біогазу в значній мірі регулюється кислотністю чи лужністю середовища. За умов наших досліджень найвищою продуктивністю щодо синтезу біогазу було слабо лужне рН на рівні 7,25. Зміна рН бродильної суміші на 0,2, як в напрямку збільшення, так й напрямку його зменшення суттєво впливає на синтез біогазу.

Так, при значенні рН у 7,25 (оптимальне значення для нашого експерименту) кількість одержаного валового біогазу в лабораторних умовах складала 1200 см<sup>3</sup>, тоді як за рН 7,05 та 7,45 його кількість відповідно складала 660 см<sup>3</sup> та 670 см<sup>3</sup>, що на 45 і 44% була нижчою за контрольний зразок (культивування за рН 7,25).

### 3.3. Перспективи розвитку біогазової промисловості в Україні

Зрозуміло, що використання відновлювальної енергетики, в тому числі виробництво біогазу, має безальтернативну перспективу, бо викопні енергетичні запаси стрімко зменшуються і прийде час, коли ми їх повністю використаємо.



Рис. 3.14. Основні переваги та недоліки виробництва біогазу в сучасних умовах

На даний час, необхідно проводити вдосконалення та модернізацію технологій анаеробного зброджування органічних відходів у біогаз, особливо це стосується запровадження безвідходних технологій та вирішення інших проблемних питань в цьому напрямку. Проаналізувавши сучасні технології щодо виробництва біогазу, які на даний час активно використовуються, можна виділити сильні та слабкі їх сторони. На рис. 3.14 наведено переваги та недоліки сучасних технологій.

Для вирішення основних недоліків, зазначених на рис.3.14, в першу чергу необхідно забезпечити достатнім фінансуванням даної галузі енергетичної промисловості для розробки нових та удосконалення існуючих технологій анаеробного метаносинтезуючого бродіння з метою одержання біогазу та його очищення від попутних кінцевих продуктів, а саме вуглекислого газу, оксиду Нітрогену, амоніаку, сірководню тощо.

Вітчизняними вченими [25], розроблена концепція можливих напрямків розвитку біогазових технологій в Україні (рис. 3.15), а також національний проєкт «Енергія біогазу» [23] (рис. 3.16).

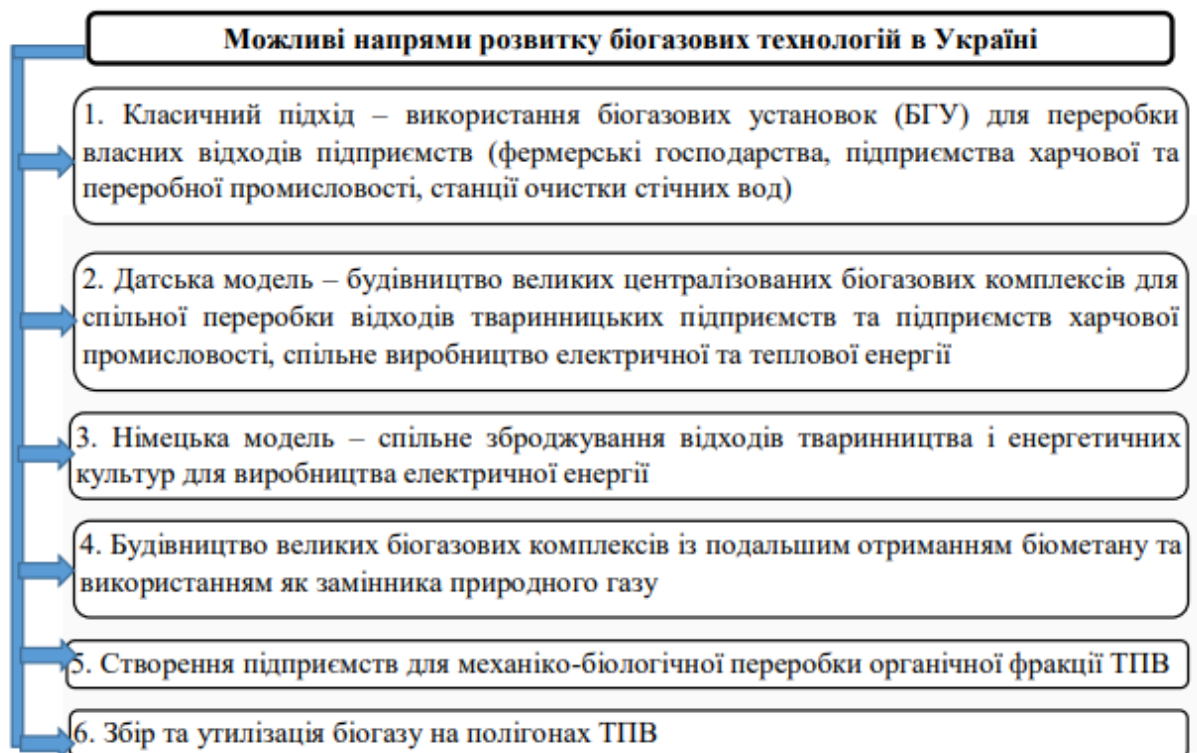


Рис. 3.15. Концепція можливих напрямків розвитку біогазових технологій в Україні [25]

Суть проекту	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Впровадження біогазових установок і міні-ТЕЦ, що працюють на біогазі загальною потужністю 1700 МВт тепла + 1500 МВт електроенергії;</li> <li>• Виробництво біометану і подача його в газопроводи: до 5 млрд. м<sup>3</sup>/рік.</li> </ul>
Стратегічні цілі	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Енергетична незалежність України;</li> <li>• Виробництво біометану в якості заміника природного газу;</li> <li>• Заміщення споживання природного газу - до 1 млрд. м<sup>3</sup>/рік до 2020 р., а в перспективі - до 8 млрд. м<sup>3</sup>/рік (до 2030 р.);</li> <li>• Екологічна безпека України;</li> <li>• Підвищення рентабельності сільського господарства України.</li> <li>• Підвищення та стабілізація родючості ґрунту - внесок в реалізацію проекту «органічне землеробство»</li> </ul>
Програмна відповідальність	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Програма екологічних реформ на 2010-2014 рр.;</li> <li>• Закон України «Про основні положення державної аграрної політики на період до 2015 р.»;</li> <li>• «Енергетична стратегія України на період до 2030 р.»;</li> <li>• Рішення РНБО України.</li> </ul>
Економічна доцільність	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Заміщення проблемного імпортованого природного газу біогазом і біометаном;</li> <li>• Покриття частини пікових навантажень в споживанні енергії;</li> <li>• Отримання екологічно чистих біологічних добрив;</li> <li>• Розвиток інфраструктури місцевої економіки;</li> <li>• Покращення інвестиційного клімату в державі;</li> <li>• Окупність деяких проектів у формі державно-приватного партнерства 7-8 років за умови впровадження обґрунтованого ЗТ.</li> <li>• Диверсифікація сільськогосподарського виробництва (розширення номенклатури товарної продукції - добриво, вітамінні препарати, тепло, електрика, квоти на парникові гази ...)</li> </ul>
Соціальний ефект	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Покращення екологічної ситуації;</li> <li>• Створення нових робочих місць - до 15 тис.</li> <li>• Самозабезпечення енергією і добривом</li> </ul>
Термін реалізації	5-15 років
Обсяг залучення інвестицій	Близько 30 млрд. грн.

Рис. 3.16. Національний проект «Енергія біогазу»

## ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ

1. Світовий досвід розробки, запровадження і використання сучасних технологій анаеробного зброджування органічних відходів та некондиційної сировини АПК для одержання біогазу свідчить про рентабельність та перспективність їх впровадження.

2. Проаналізовано динаміку зростаючої тенденції використання біомаси та органічних відходів АПК в технологія з виробництва біогазу, із економічної точки зору, запропоновані найбільш доцільні базові субстрати (сировина) для анаеробного зброджування в процесі метаногенезу.

3. Проаналізовано біохімізм метаногенезу:

- за трансформації органічних відходів АПК за анаеробного бродіння в метан перетворюється від 57,1 до 80,0 % ацетатна кислота, а за рахунок відновлення вуглекислого газу – від 20,0 до 42,9% залежно від субстрату, що піддається ферментації;

- найкраща активність ензимних систем щодо ферментації субстрату проявляється за температури 45-55°C (термофільні мікроорганізми). За такого температурного режиму бродіння триває 15-25 днів із ступенем трансформації 60%;

- у перерахунку на 1 кг розщепленого субстрату – органічних відходів АПК утворюється в середньому 0,4 кг  $\text{CH}_4$  та 0,7 кг  $\text{CO}_2$ ;

- найефективнішим субстратом для одержання біогазу та метану загалом є ліпідні субстрати, використання яких дає майже у два рази вищий вихід біогазу, та у 3,9 рази вихід чистого метану.

4. Подана принципова технологічна схема, конструктивні технологічні параметри та апаратурне забезпечення одержання біогазу за використанням органічних відходів АПК в процесі метаногенезу.

5. Аналіз динаміки зміни рівня рН при зброджуванні органічних відходів АПК найбільш оптимальним виявилось рН 7,25. Кількість одержаного валового біогазу в лабораторних умовах складала 1200 см<sup>3</sup>, тоді як за рН 7,05 та 7,45



його кількість відповідно складала 660 см<sup>3</sup> та 670 см<sup>3</sup>, що на 45 і 44% була нижчою за контрольний зразок.

6. Досліджений комплекс правових, соціальних, організаційно-технологічних і технічних заходів, щодо забезпечення оптимізації технологічних процесів виробництва біогазу із відходів АПК та запропоновані напрямки перспективи розвитку біогазової промисловості в Україні.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Гелету́ха, Г. Г.; Кучерук, П. П.; Матвеєєв, Ю. Б. Перспективи виробництва та використання біогазу в Україні. Аналітична записка БАУ № 4 <http://www.uabio.org/img/files/docs/position-paper-uabio-4-ua.pdf>
2. Степанов, Д. В., Ткаченко, С. Й., Ранський, А. П. Оцінка можливостей отримання енергоносіїв з органічних відходів з урахуванням 144 техногенного навантаження на навколишнє середовище. Наукові праці ВНТУ 2012, 1, с 1–7.
3. Енергетичний баланс України за 2012 рік. Експрес-випуск. №08/4-16/240. <http://www.uabio.org/img/files/docs/ukraine-energy-balance-2012.pdf>
4. Mutton, M., Rossetto, R., Mutton, M. Agricultural use of stillage. Sugarcane bioethanol – R&D for Productivity and Sustainability, 1; Blucher: Brazil, 2010; pp 423–440.
5. Мартусенко, І. В., Погріщук, Б. В. Регіональна економіка: Підручник; Крок: Тернопіль, 2015; с 626
6. Взаємодія мікробних популяцій у метаногенних асоціаціях і шляхи збільшення виходу метану в метантенках / [В.І. Карпенко, Л.С. Ястремська, Л.П. Голодок та ін.]. Дніпропетровськ: Вид-во Дніпропетров. ун-ту. 2006. 153 с.
7. Руда, М. В., Лук'янчук, Н. Г. Екологічні шляхи використання відходів ДП "Немирівський спиртозавод". *Науковий вісник НЛТУ України*, 2011, 21.4, с 131–135.
8. Голуб, Н. Б., Потапова, М. В. Вплив співвідношення косубтратів на вихід біогазу при утилізації післяспиртової барди. *Відновлювана енергетика* 2017, 49(2). С 90–97.
9. Гелету́ха, Г. Г., Кучерук, П. П., Матвеєв, Ю. Б., Ходаківська, Т. В. Перспективи виробництва біогазу в Україні. *Відновлювана енергетика* 2011, 3, с 73–77.
10. Куріс, Ю. В., Ткаченко, С. І., Семененко Н. В. Способи утилізації біогазу. *Енергосбереження. Енергетика. Енергоаудит* 2010, 7(77), с 20–30

11. Carrilho, E., Labuto, G. and Kamogawa, M. Destination of Vinasse, a Residue From Alcohol Industry. *Environmental Materials and Waste* 2016, pp 21–43.
12. Westerholma M., Hansson M., Schnürer A. Improved Biogas Production From Whole Stillage By Co-digestion With Cattle Manure. *Bioresource Technology*. – 2012. – №114. – P. 314–319.
13. Wilkie A.C., Riedesel K.J., Owens J.M. Stillage Characterization and Anaerobic Treatment of Ethanol Stillage From Conventional and Cellulosic Feedstocks. *Biomass and Bioenergy*. – 2000. – №19. – P. 63–102.
14. Методичні вказівки та робочий зошит до виконання лабораторно-практичних робіт для студентів із спеціальності 7.070801 – екологія / В. Г. Герасименко, М.О. Герасименко, О.М. Мельниченко та інші. Біла Церква, 2004. 82 с.
15. Хижняк, М. І., Цьонь, Н. І. Спиртова барда як цінна кормова добавка й органічне добриво у сільському господарстві. *Рибогосподарська наука України* 2010, 2, с 122–130.
16. Потапова, М. В. Технологія одержання біогазу при утилізації післяспиртової зернової барди : дис. ... канд. екон. наук: 03.00.20 біотехнологія / Потапова Мар'яна Володимирівна. Київ, 2019. 170 с.
17. Голуб, Н. Б.; Потапова, М. В. Підвищення виходу біогазу при утилізації післяспиртової барди. *Відновлювальна енергетика та енергоефективність у XXI столітті, Тези Доповідей XIX Міжнародної Науково-практичної Конференції, Вересень 26-28, 2018, Київ, Україна; Календар : Київ, 2018; с 726–729.*
18. Гелетуха Г., Кудря С. Україна: нетрадиційні та відновлювані джерела енергії // *Зелена енергетика*. – 2005. – № 2. – С. 8-10.
19. Syaichurrozi I., Budiyo V., Sumardiono S. Predicting Kinetic Model of Biogas Production and Biodegradability Organic Materials: Biogas Production From Vinasse At Variation of COD/N Ratio. *Bioresource Technology*. 2013. №149. P. 390–397.

20. Біопалива (технології, машини і обладнання) / В.О. Дубровін, М.О.Корчемний, І.П. Масло та інш. – К.: ЦТІ, „Енергетика і електрифікація”, 2004.– 256 с.
21. Moraes B.S., Triolo J.M., Lecona V.P., Zaiat M., Sommer S.G. Biogas Production Within The Bioethanol Production Chain: Use of Co-substrates For Anaerobic Digestion of Sugar Beet Vinasse. *Bioresource Technology*. – 2015. – Vol. 190. – P. 227–234.
22. Silva C.E., Abud A.K. Anaerobic Biodigestion of Sugarcane Vinasse Under Mesophilic Conditions Using Manure As Inoculum [Електронний ресурс]. SciELO. 2016. Режим доступу: [http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1980-993X2016000400763&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1980-993X2016000400763&script=sci_arttext) (20.09.2017).
23. Потапова, М. В.; Козловець, О. А. Одержання біогазу з пташиного посліду та відходів спиртового виробництва. Біотехнологія ХХІ століття, Тези Доповідей ІХ Всеукраїнської Науково-практичної Конференції, Квітень 24, 2015; НТУУ «КПІ» : Київ, 2012; с 160–161
24. Голуб Н.Б., Потапова М.В. Вплив співвідношення косубстратів на вихід біогазу при утилізації післяспиртової барди. *Відновлювана енергетика*. 2017. №2(49). С. 90-97.
25. Троценко М. В. (Потапова М. В.) Грануляція активного мулу. Біотехнологія ХХІ століття. Тези Доповідей V Регіональної Науковопрактичної Конференції викладачів, науковців, аспірантів, молодих вчених та студентів, Київ, Україна, Листопад 25, 2011; НТУУ «КПІ» : Київ, 2011. С 93
26. Ратушняк, Г. С., Джеджула, В. В., Анохіна, К. В. Енергозберігаючі відновлювальні джерела теплопостачання: навчальний посібник; ВНТУ: Вінниця, 2010. С 170.
27. В. Ясенєцький, В. Таргоня, В. Клименко. Сучасні тенденції в створенні біогазових установок // *Техніка АПК*. – 2003. – № 1. – С. 24-25.
28. Білявський Г.О., Фурдуй Р.С., Костіков І.Ю. Основи екологічних знань. К: Либідь, 2000. С 180-186.
29. Салюк, А.І., Жадан, С.О., Шаповалов, Є.Б. Виробництво біогазу з курячого посліду та його оптимізація. *Харчова промисловість* 2012, 13, с 81–85.

30. Mohana S., Acharya Bh.K., Madamwar D. Distillery Spent Wash: Treatment Technologies and Potential Applications. Journal of Hazardous Materials. 2009. Vol. 163, №1. P. 2–25.

31. Prakash N.B., Sockan V., Sitarama Raju V. Anaerobic Digestion of Distillery Spent Wash. Journal of Science and Technology. 2014. Vol. 4. №3. P. 134–140.

32. Продуктування біогазу та органічних добрив в агровиробництві / Альтернативні джерела енергії. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://pidruchniki.com/73010/ekologiya/produktuvannya\\_biogazu\\_organichnih\\_dobri\\_v\\_virobnitstvi](http://pidruchniki.com/73010/ekologiya/produktuvannya_biogazu_organichnih_dobri_v_virobnitstvi)

33. Відкриття біогазової установки на Теофіпольщині / Офіційний сайт Теофіпольської районної державної адміністрації. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://rdatf.gov.ua/news/id/2931>

34. Калетнік Г.М. Доцільність виробництва біогазу в Україні // Г.М. Калетнік, О.П. Скорук, А.А. Ратушняк. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://www.rusnauka.com/34\\_NIEK\\_2010/Economics/75102.doc.htm](http://www.rusnauka.com/34_NIEK_2010/Economics/75102.doc.htm)

35. 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

36. Гроші із сміття. Біогазові установки дозволяють великим компаніям і селянам не купувати газ та електроенергію / Біогаз, технології, агропром, досвід, економіка, енергетика, екологія, газ. – [Електронний ресурс]. Режим доступу: [http://texty.org.ua/pg/article/editorial/read/62202/Groshi\\_iz\\_smitta\\_Biogazovi\\_ustanovky\\_dozvolajut\\_velykum](http://texty.org.ua/pg/article/editorial/read/62202/Groshi_iz_smitta_Biogazovi_ustanovky_dozvolajut_velykum)

37. Калетнік Г. М., Пришляк В. М. Біопаливо: ефективність його виробництва та споживання в АПК України: Навч. посіб. К.: «Хай-Тек Прес», 2010. 312 с

38. 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.

39. 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.

40. Четверик Г.О., Ключ В.П. Утилізація шкідливих органічних відходів термічної газифікації біомаси у біогазовій установці // Міжнародна науковопрактична конференція «Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні», тези доповідей. м. Львів. 2017. С. 126 – 128

41. 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

42. Ключ В.П. Сумісне анаеробне бродіння гнойових відходів та конденсату газогенераторної установки / В.П. Ключ, Г.О. Четверик // Відновлювана енергетика. 2017. № 3. С. 80 – 86

43. Северілов П. В., Гула К. І. Моделі оптимального розподілу ресурсів у вертикально інтегрованій системі. Вісник ВПІ. 2009. № 1. С. 6.

44. Альтернативна енергетика: [навч. посібник для студ. вищ. навч. закл.] / М.Д. Мельничук, В.О. Дубровін, В.Г. Мироненко, І.П. Григорюк, В.М. Поліщук, Г.А. Голуб, В.С. Таргоня, С.В. Драгнєв, І.В. Свистунова, С.М. Кухарець. – К: «Аграр Медіа Груп», 2012. 244 с.

45. Аналіз метаноутворення в біогазових установках / [Голуб Г.А., Дубровіна О.В., Войтенко В.О., Гох В.В.]: Сучасні проблеми збалансованого природокористування: Збірник наукових праць / Подільський державний аграрно-технічний університет (ПДАТУ); Науковий редактор: Бахмат М.І. – Кам'янець-Подільський, 2012. – Спеціальний випуск до VII науково-практичної конференції. 334 с. С. 141–145.

46. Ястремська Л. С., Карнаух І. П., Тражуков А. Ю. Анаеробна мікробна конверсія відходів тваринництва в енергоносії / Мат-ли міжн. наук.-

практ. конф. «Новітні досягнення біотехнології» – (Київ, 21–22 жовтня 2010 р.), МОН, НАУ. К.: Нац. авіац. ун-т, 2010. С. 47–48.

47. Технологія переробки біологічних відходів у біогазових установках з обертовими реакторами / [Г. А. Голуб, О. В. Сидорчук, С. М. Кухарець та ін.; за ред. Г. А. Голуба] К.: НУБіП України, 2014. 106 с.

48. Технічні та технологічні пропозиції отримання енергії із сировини сільськогосподарського походження / С. М. Кухарець, Г. А. Голуб, О. В. Скидан, О. Ю. Осипчук // Вісник ЖНАЕУ. 2015. 2 (50), т. 1. С. 369–385

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

50. Голуб Г. А. Енергетична автономність агроєкосистем / Г. А. Голуб // Вісник аграрної науки. 2010. № 3 С. 50–54

51. Мазема Ю. В. Вплив температури на утворення біогазу з відходів целюлозно–паперового виробництва / Ю. В. Мазема, О. О Семінський // Вісник ІХФ. 2011. V. 7. № 1. Режим доступу. <http://ihf.kpi.ua/files/downloads/222%5B1%5D.pdf>.

52. Салюк А. І., Котинський А. В., Жадан С. О., Шаповалов Є. Б. Режими метанової ферментації курячого посліду. Наукові праці Національного університету харчових технологій. 2017. Т. 23 (2). С. 31–36.

53. Салюк А. І., Жадан С. О., Шаповалов Є. Б. Рециркуляція газової фази з її очищенням при метановій ферментації курячого посліду. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2016. № 254. С. 189–202.

54. Жадан С. О., Шаповалов Є. Б., Салюк А. І., Шаповалов В. Б. Патент України на корисну модель 105418. МПК (2016.01) C08J 11/00, C12M 1/02, C02F 11/04. Біогазовий реактор для переробки відходів з високим вмістом азоту; патентовласники С. О. Жадан, Є. Б. Шаповалов, А. І. Салюк, В. Б. Шаповалов. № 201505824; заявлено 12.06.2015; опубліковано 25.03.2016. Бюл. № 6. 4 с.

55. Дехтяр І.В. Аналіз факторів управління процесами анаеробного мікробіологічного бродіння у біогазових установках // III Всеукраїнська школа-семінар молодих вчених і студентів «Сучасні комп'ютерні інформаційні технології» (АСІТ'2013): матеріали. Тернопіль, 2013. С.21-22.