

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**Сумський державний університет**  
**Факультет технічних систем та енергоефективних технологій**  
**Кафедра екології та природозахисних технологій**

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Леонід ПЛЯЦУК  
(підпис)

\_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**на здобуття освітнього ступеня магістр**

зі спеціальності 183 «Технології захисту навколишнього середовища» освітньо-професійної програми «Технології захисту навколишнього середовища»  
на тему:

**РОЗРОБЛЕННЯ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ З УТИЛІЗАЦІЇ  
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ ВІДХОДІВ З ОТРИМАННЯМ  
БІОГАЗУ**

Здобувача групи ТС.м-31/1 Мосійчука Руслана Анатолійовича

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

\_\_\_\_\_ Руслан МОСІЙЧУК  
(підпис)

Керівник – старший викладач кафедри  
екології та природозахисних технологій,  
кандидат технічних наук

\_\_\_\_\_ Євген БАТАЛЬЦЕВ  
(підпис)

**Суми – 2024**

Сумський державний університет  
Факультет технічних систем та енергоефективних технологій  
Кафедра екології та природозахисних технологій  
Спеціальність 183 Технології захисту навколишнього середовища

ЗАТВЕРДЖУЮ:  
Зав. кафедрою \_\_\_\_\_  
“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ**  
**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА**  
**Мосійчука Руслана Анатолійовича**

1. Тема роботи «Розроблення технологічних рішень з утилізації сільськогосподарських відходів з отриманням біогазу» затверджена наказом по університету від 14.10.2024 р. № 1048-VI.
2. Термін здачі студентом закінченого проекту (роботи) 16 грудня 2024 року.
3. Вихідні дані до проекту (роботи): наукові статті щодо способів утилізації сільськогосподарських відходів, методів отримання біогазу.
4. Зміст розрахунково—пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити) вплив сільськогосподарських відходів на довкілля, способи отримання біогазу; визначення найбільш ефективного способу отримання біогазу, процес анаеробного зброджування; визначення критеріїв вибору методів утилізації відходів, огрунтування вибору виробництва біогазу, технологія виробництва біогазу, оцінка ефективності технології біогазу; приклад застосування біогазової установки на реальному агропідприємстві, розрахунок економічної вигоди для підприємства та екологічного впливу  
Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): тенденція використання біогазу, вихід біогазу та вміст метану у різних видах субстратів для біогазового виробництва, способи поводження з відходами, склад біогазу, етапи виробництва біогазу, типова біогазова установка, схема запропонованої когенераційної установки з використанням біогазу.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Термін виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Літературний огляд за досліджуваною проблематикою	Вересень 2024 р.	
2	Робота над розділом «Об'єкт та методика досліджень»	Вересень 2024 р.	
3	Технологічні рішення для утилізації сільськогосподарських відходів	Жовтень 2024 р.	
4	Удосконалена технологія виробництва біометану	Листопад 2024 р.	
5	Впровадження технології виробництва біогазу на підприємстві	Листопад 2024 р.	
6	Робота над розділом «Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях»	Грудень 2024 р.	
7	Оформлення роботи	Грудень 2024 р.	

5. Дата видачі завдання 21.10.2024 року

Студент \_\_\_\_\_

Р. А. Мосійчук

Керівник проекту \_\_\_\_\_

Є. В. Батальцев

## АНОТАЦІЯ

*Структура та обсяг випускної кваліфікаційної роботи магістра*

Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, який містить 48 найменувань. Загальний обсяг кваліфікаційної роботи магістра становить 78 аркушів, у тому числі 7 рисунків, 3 таблиці.

*Мета роботи* – розробка технологічних рішень для утилізації сільськогосподарських відходів із виробництвом біогазу, що дозволять підвищити ефективність процесу та знизити екологічні ризики.

Відповідно до поставленої мети було вирішено такі завдання: проведено аналіз існуючих методів утилізації сільськогосподарських відходів; досліджено технологічні процеси отримання біогазу з відходів; розроблено нові технологічні рішення для підвищення ефективності утилізації відходів; оцінено екологічні та економічні аспекти запропонованих технологій.

*Об'єкт дослідження* – сільськогосподарські відходи.

*Предмет дослідження* – технологічні процеси утилізації сільськогосподарських відходів із отриманням біогазу.

*Методи дослідження.* У роботі використано аналіз наукової літератури, моделювання технологічних процесів, а також оцінку екологічної та економічної ефективності запропонованих рішень.

У роботі запропоновано інновації в конструкції біореакторів, інтеграцію сухого та термофільного зброджування, а також методи попередньої обробки відходів для підвищення виходу біогазу.

Ключові слова: БЮГАЗ, СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ ВІДХОДИ, УТИЛІЗАЦІЯ, ЕКОЛОГІЯ, АНАЕРОБНЕ ЗБРОДЖУВАННЯ, ІННОВАЦІЙНІ БІОРЕАКТОРИ, ВІДНОВЛЮВАНА ЕНЕРГІЯ.



## ЗМІСТ

Вступ.....	5
Розділ 1 Літературний огляд за досліджуваною тематикою.....	7
1.1 Визначення та актуальність теми .....	7
1.2 Біогаз як перспективне джерело енергії .....	11
1.3 Вплив утилізації сільськогосподарських відходів на довкілля .....	14
1.4 Мета і завдання дослідження .....	15
Розділ 2 Об’єкт та методика досліджень.....	17
2.1 Сільськогосподарські відходи як об’єкт дослідження .....	17
2.2 Екологічні аспекти виробництва біогазу .....	18
2.3 Огляд сучасних підходів до отримання біогазу .....	19
Розділ 3 Технологічні рішення для утилізації сільськогосподарських відходів.....	26
3.1 Вибір та обґрунтування методу утилізації відходів .....	26
3.2 Технологія виробництва біогазу.....	28
3.3 Оцінка ефективності та перспективи розвитку технологій біогазу.....	40
3.4 Впровадження технології отримання біогазу на агропідприємстві.....	53
Розділ 4 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.....	64
4.1 Ідентифікація небезпек та оцінка ризиків.....	64
4.2 Типи потенційних надзвичайних ситуацій на біогазових установках.....	65
4.3 Вимоги до засобів індивідуального захисту (ЗІЗ).....	67
4.4 Планування реагування на надзвичайні ситуації.....	69
Висновки.....	71
Перелік джерел посилання.....	73

Підп. і дата		Інв.№ДУБЛ.		Взаєм.інв.		Підп. і дата		<b>ТС 23510265</b>			
Інв.№ГОДЛ.	Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дат	Розроблення технічних рішень з утилізації сільськогосподарських відходів з отриманням біогазу			Літ.	Аркуш	Аркушів
	Розроб.		Мосійчук						4	78	
	Перев.		Батальцев						СумДУ, ф-т ТеСЕТ		
	Н.Контр		Батальцев						гр. ТС.м-31/1		
	Затв.		Пляцук								

## ВСТУП

Актуальність теми. Проблема утилізації сільськогосподарських відходів є однією з найважливіших у контексті сталого розвитку агропромислового комплексу. Накопичення відходів спричиняє значні екологічні проблеми, такі як забруднення ґрунтів і водних ресурсів. Отримання біогазу з цих відходів не тільки дозволяє вирішити проблему їх утилізації, але й забезпечує додаткове джерело відновлюваної енергії, що сприяє зниженню залежності від викопних видів палива.

**Стан наукових досліджень.** На сьогодні існує багато досліджень, присвячених виробництву біогазу з різних видів відходів, зокрема сільськогосподарських. Однак, питання ефективної утилізації сільськогосподарських відходів та підвищення виходу біогазу залишаються актуальними і потребують подальших досліджень.

**Проблематика та обґрунтування вибору теми.** Основна проблема полягає в недостатній ефективності існуючих технологій утилізації відходів та отримання біогазу. Розробка нових технологічних рішень дозволить підвищити ефективність процесу, зменшити негативний вплив на довкілля та забезпечити більш стабільне виробництво енергії.

**Мета дослідження.** Метою даної роботи є розробка технологічних рішень з утилізації сільськогосподарських відходів з отриманням біогазу, що дозволять підвищити ефективність процесу та знизити екологічні ризики.

Для досягнення зазначеної мети було поставлено та вирішено такі **завдання**:

Провести аналіз існуючих методів утилізації сільськогосподарських відходів; дослідити технологічні процеси отримання біогазу з відходів; розробити нові технологічні рішення для підвищення ефективності утилізації відходів; оцінити екологічні та економічні аспекти запропонованих технологій.

Підп. і Дата
Інв.№ДУБЛ.
Взаєм.інв.
Підп. і Дата
Інв.№ГОДА.

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дат
-----	-----	----------	-------	-----

ТС 23510265

Арк  
5

**Об'єкт дослідження** – сільськогосподарські відходи.

**Предмет дослідження** – технологічні процеси утилізації сільськогосподарських відходів з отриманням біогазу.

**Методи дослідження** включають аналіз наукової літератури, експериментальні дослідження, моделювання технологічних процесів та оцінку їх ефективності.

**Наукова новизна та практична значущість.** Розробка нових технологічних рішень сприятиме підвищенню ефективності процесу утилізації сільськогосподарських відходів, що дозволить знизити негативний вплив на довкілля та забезпечити стійке виробництво біогазу як джерела відновлюваної енергії.

**Апробація результатів роботи.** Основні результати роботи було залучено в межах реалізації модуля Жана Моне «Біоенергетичні інновації в управлінні відходами: Європейський досвід впровадження циркулярної економіки» (BIOINWASTE) програми ЄС Еразмус+ за грантовою угодою № 101085172 (2023-2025).



**Фінансується  
Європейським Союзом**

### Дисклеймер

Фінансується Європейським Союзом. Однак висловлені погляди та думки належать лише авторам і не обов'язково відображають погляди Європейського Союзу чи Європейського виконавчого агентства з освіти та культури (EACEA). Ні Європейський Союз, ні орган, що надає гранти, не можуть нести за них відповідальності.

Підп. і дата
Інв. № докл.
Взаєм. інв.
Підп. і дата
Інв. № докл.

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дат
-----	-----	----------	-------	-----

ТС 23510265

## РОЗДІЛ 1

### ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД ЗА ДОСЛІДЖУВАНОЮ ТЕМАТИКОЮ

#### 1.1 Визначення та актуальність теми

Утилізація відходів сільського господарства з отриманням біогазу — це процес перетворення органічних відходів, які утворюються в результаті сільськогосподарської діяльності, на біогаз. Біогаз складається в основному з метану ( $\text{CH}_4$ ) і вуглекислого газу ( $\text{CO}_2$ ) і є відновлюваним джерелом енергії. Сільськогосподарські відходи включають рослинні залишки, відходи тваринництва, харчові відходи тощо. Ефективне управління та утилізація сільськогосподарських відходів є актуальною проблемою, оскільки накопичення цих матеріалів може призвести до значної небезпеки для навколишнього середовища. Анаеробне зброджування є перспективною технологією, яка може перетворити органічні сільськогосподарські відходи на біогаз, відновлюване джерело енергії, а також зменшити вплив утилізації відходів на навколишнє середовище [7]. У цій роботі розглядатимуться розробки технологічних рішень для утилізації сільськогосподарських відходів шляхом виробництва біогазу.

Сільськогосподарські відходи, які охоплюють широкий спектр матеріалів, таких як рослинні залишки, тваринний гній і побічні продукти харчової промисловості, є значним невикористаним ресурсом, який можна використовувати для сталого виробництва енергії. Виробництво біогазу шляхом анаеробного зброджування цих відходів не тільки генерує відновлюване паливо, але й забезпечує засоби управління та перепрофілювання органічних відходів, тим самим зменшуючи забруднення навколишнього середовища та сприяючи циклічній економіці [3, 36, 16].

Анаеробне зброджування — це біологічний процес, у якому мікроорганізми розщеплюють біорозкладаний матеріал за відсутності кисню, утворюючи багатий метаном біогаз, який можна використовувати як відновлюване джерело енергії. У

ІНВ. № ДОКУМ.	Підп. і Дата	Взаєм. інв.	ІНВ. № ДОКУБЛ.	Підп. і Дата
---------------	--------------	-------------	----------------	--------------

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дат
-----	-----	----------	-------	-----

ТС 23510265

Арк

7



процесі також утворюється багатий поживними речовинами дигестат, який можна використовувати як органічне добриво, що ще більше підвищує стійкість системи. Згідно з декількома дослідженнями, на вибір відповідної конструкції або моделі біогазової установки впливає безліч факторів, включаючи економічні міркування, використання місцевих матеріалів, довговічність, придатність до типу вхідних ресурсів, частоту використання установки та легкість обслуговування [9]. Незважаючи на численні переваги використання сільськогосподарських відходів для виробництва біогазу, є кілька проблем, які необхідно вирішити, щоб реалізувати весь потенціал цієї технології [44]. Основні цілі цього дослідження полягають у дослідженні поточного стану технологічного розвитку у сфері утилізації сільськогосподарських відходів для виробництва біогазу, виявленні ключових проблем і перешкод для широкого впровадження та пропозиції інноваційних рішень для вирішення цих проблем.

Сучасний стан технологічного розвитку у сфері утилізації сільськогосподарських відходів для виробництва біогазу характеризується рядом досягнень і триваючих досліджень. Недавні дослідження підкреслили потенціал різних методів попередньої обробки, таких як механічні, хімічні та біологічні методи, для підвищення виходу біогазу з лігноцелюлозних матеріалів, які є значним компонентом сільськогосподарських відходів [27, 29]. Крім того, інтеграція виробництва біогазу з іншими технологіями відновлюваної енергії, такими як сонячна та вітрова, була досліджена для створення гібридних систем, які можуть оптимізувати вихід енергії та подолати проблеми переривчастості

Крім того, розробка нових конструкцій реакторів, включаючи мембранні біореактори та передові мікробні процеси, була спрямована на оптимізацію ефективності та продуктивності процесу анаеробного зброджування [27]. Крім того, досліджувалися технології очищення та модернізації пост-біогазу, такі як використання мембранного розділення та систем на основі адсорбції, щоб покращити якість і товарний вигляд виробленого біогазу [2, 27]. Хоча ці технологічні досягнення показали багатообіцяючі результати, все ще існують

ІНВ.№ГОДА.	Підп. і Дата	Взаєм.ІНВ.	ІНВ.№ДУБЛ.	Підп. і Дата
------------	--------------	------------	------------	--------------

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дат
-----	-----	----------	-------	-----

ТС 23510265

значні проблеми, які необхідно вирішити, щоб сприяти широкому впровадженню систем перетворення сільськогосподарських відходів на біогаз [14, 23, 29,43].

Незважаючи на ці технологічні досягнення, у широкому впровадженні систем перетворення сільськогосподарських відходів у біогаз залишається кілька проблем. До них належать високі капітальні та експлуатаційні витрати, потреба в спеціалізованому обладнанні та кваліфікованій робочій силі, мінливість у складі вихідної сировини та можливість пригнічення процесу анаеробного зброджування через присутність стійких сполук або токсичних речовин [33, 14]. Вирішення цих проблем шляхом розробки інноваційних та економічно ефективних технологічних рішень має вирішальне значення для широкого розповсюдження систем перетворення сільськогосподарських відходів у біогаз.

Таким чином, утилізація сільськогосподарських відходів для виробництва біогазу є перспективним підходом до вирішення глобальних енергетичних та екологічних проблем. Сучасний стан технологічного розвитку в цій галузі має значний прогрес, але необхідні подальші дослідження та інновації, щоб подолати бар'єри, що залишаються на шляху впровадження.

Утилізація сільськогосподарських відходів для виробництва біогазу має велике значення з кількох причин:

По-перше, це забезпечує засоби управління та перепрофілювання органічних відходів, зменшення впливу на навколишнє середовище від утилізації відходів і сприяння циклічній економіці [27]. Перетворюючи сільськогосподарські відходи на біогаз, відновлюване джерело енергії, ця технологія може сприяти диверсифікації джерел енергії та зменшити залежність від викопного палива, тим самим зменшуючи викиди парникових газів і вирішуючи проблеми зміни клімату [44].

По-друге, виробництво біогазу з сільськогосподарських відходів може генерувати цінні енергетичні та паливні ресурси, які можна використовувати для різних цілей, таких як опалення, виробництво електроенергії та транспорт [2]. Це може підвищити енергетичну безпеку, особливо в сільській місцевості та

Інв.№гтодл.	Підп. і дата	Взаєм.інв.	Інв.№гдубл.	Підп. і дата	TC 23510265	Арк
						9
Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дат		

віддалених районах, де доступ до традиційних джерел енергії може бути обмеженим.

По-третє, дигестат, який утворюється як побічний продукт процесу анаеробного зброджування, можна використовувати як органічне добриво, таким чином закриваючи цикл поживних речовин і сприяючи сталому сільському господарству [29]. Інтеграція виробництва біогазу з сільськогосподарською практикою може призвести до покращення родючості ґрунту, підвищення врожайності та зменшення використання синтетичних добрив, сприяючи загальній стійкості системи виробництва продуктів харчування.

Крім того, розробка технологічних рішень для утилізації сільськогосподарських відходів може створити нові економічні можливості та перспективи працевлаштування, особливо в сільській місцевості, де поширена сільськогосподарська діяльність.

Сучасний стан технологічного розвитку у сфері утилізації сільськогосподарських відходів для виробництва біогазу є предметом значних досліджень і розробок. Недавні дослідження підкреслили потенціал різних методів попередньої обробки, таких як механічні, хімічні та біологічні методи, для підвищення виходу біогазу з лігноцелюлозних матеріалів, які є значним компонентом сільськогосподарських відходів [27,29].

Ці методи попередньої обробки спрямовані на руйнування складної структури лігноцелюлозної біомаси, тим самим підвищуючи доступність органічної речовини для анаеробних мікроорганізмів і покращуючи загальну ефективність процесу виробництва біогазу [11].

Крім того, були досліджені нові конструкції реакторів, такі як мембранні біореактори та передові мікробні процеси, щоб оптимізувати продуктивність процесу анаеробного зброджування. Ці інноваційні конструкції реакторів продемонстрували потенціал для підвищення стабільності, стійкості та продуктивності системи виробництва біогазу, вирішуючи деякі проблеми, пов'язані з мінливістю складу вихідної сировини та можливістю гальмування процесу.

Інв.№ЮОАЛ.	Підп. і Дата	Взаєм.інв.	Інв.№ЮДУБЛ.	Підп. і Дата
------------	--------------	------------	-------------	--------------

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дата
-----	-----	----------	-------	------

ТС 23510265

Окрім технологічних досягнень у процесі виробництва біогазу, дослідники також зосередилися на стадіях обробки та очищення після біогазу. Такі методи, як адсорбція при зміні тиску, мембранне розділення та криогенне розділення, були досліджені для підвищення якості біогазу, що дозволяє використовувати його в різних сферах застосування, включаючи транспортування, виробництво електроенергії та введення в мережу.

На додаток до попередньої обробки, розробка нових конструкцій реакторів, включаючи мембранні біореактори та передові мікробні процеси, була спрямована на оптимізацію ефективності та продуктивності процесу анаеробного зброджування [27].

Також, були досліджені технології очищення та модернізації після біогазу, такі як використання мембранного розділення та систем на основі адсорбції, щоб покращити якість і товарний вигляд виробленого біогазу [2].

Незважаючи на ці технологічні досягнення, у широкому впровадженні систем перетворення сільськогосподарських відходів у біогаз залишається кілька проблем. До них належать високі капітальні та експлуатаційні витрати, потреба в спеціалізованому обладнанні та кваліфікованій робочій силі, мінливість складу вихідної сировини та можливість пригнічення процесу анаеробного зброджування через присутність стійких сполук або токсичних речовин [8, 20, 39, 40].

Вирішення цих проблем шляхом розробки інноваційних та економічно ефективних технологічних рішень має вирішальне значення для широкого розповсюдження систем перетворення сільськогосподарських відходів у біогаз.

## 1.2 Біогаз як перспективне джерело енергії

Біогаз — це багатий на метан газ, який утворюється шляхом анаеробного зброджування органічних речовин, у тому числі сільськогосподарських відходів. Його вважають перспективним відновлюваним джерелом енергії завдяки його потенціалу замінити викопне паливо (рис. 1.1), зменшити викиди парникових

Інв. №ГОДА.	Підп. і Дата	Взаєм. інв.	Інв. №ДУБЛ.	Підп. і Дата
-------------	--------------	-------------	-------------	--------------

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дат
-----	-----	----------	-------	-----

ТС 23510265



газів і зробити внесок у більш стійкий енергетичний баланс [5, 16]. Використання біогазу може бути особливо корисним у сільських і сільськогосподарських громадах, де сировина для його виробництва є легкодоступною.

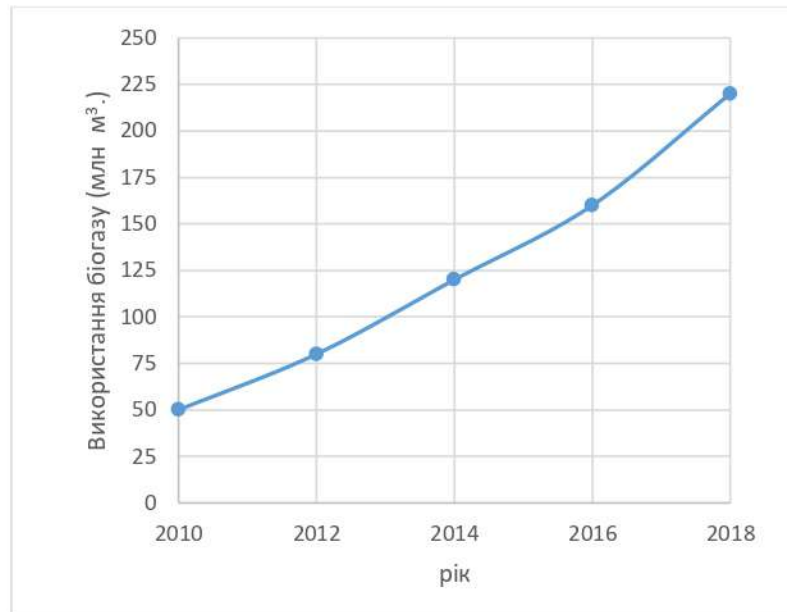


Рисунок 1.1 – Світова тенденція використання біогазу

Кілька досліджень підкреслили потенціал виробництва біогазу з сільськогосподарських відходів. Існують різні типи органічних відходів, які можна використовувати як сировину для анаеробного зброджування, такі як енергетичні культури, сільськогосподарські відходи, побутові стічні води, промислові стічні води, осад стічних вод і тваринний гній (рис. 1.2) [16]. Подібним чином [22] відзначає збільшення використання відходів тваринництва як сировини для виробництва біогазу в Європейському Союзі, де понад 750 біогазових установок зараз переробляють цей тип органічного матеріалу.

Хоча утилізація сільськогосподарських відходів для виробництва біогазу має значні перспективи, є кілька проблем, які необхідно вирішити при розробці цієї технології.

Розробка технологічних рішень для утилізації сільськогосподарських відходів із виробництвом біогазу стикається з різними проблемами, включаючи неоднорідний склад і змінну якість вихідної сировини для відходів, технічну

Підп. і Дата
Інв. № докл.
Взаєм. інв.
Підп. і Дата
Інв. № докл.

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дат
-----	-----	----------	-------	-----

складність процесу анаеробного зброджування, економічну доцільність технології та регулятивні та політичні бар'єри, які можуть перешкоджати його широкому впровадженню.

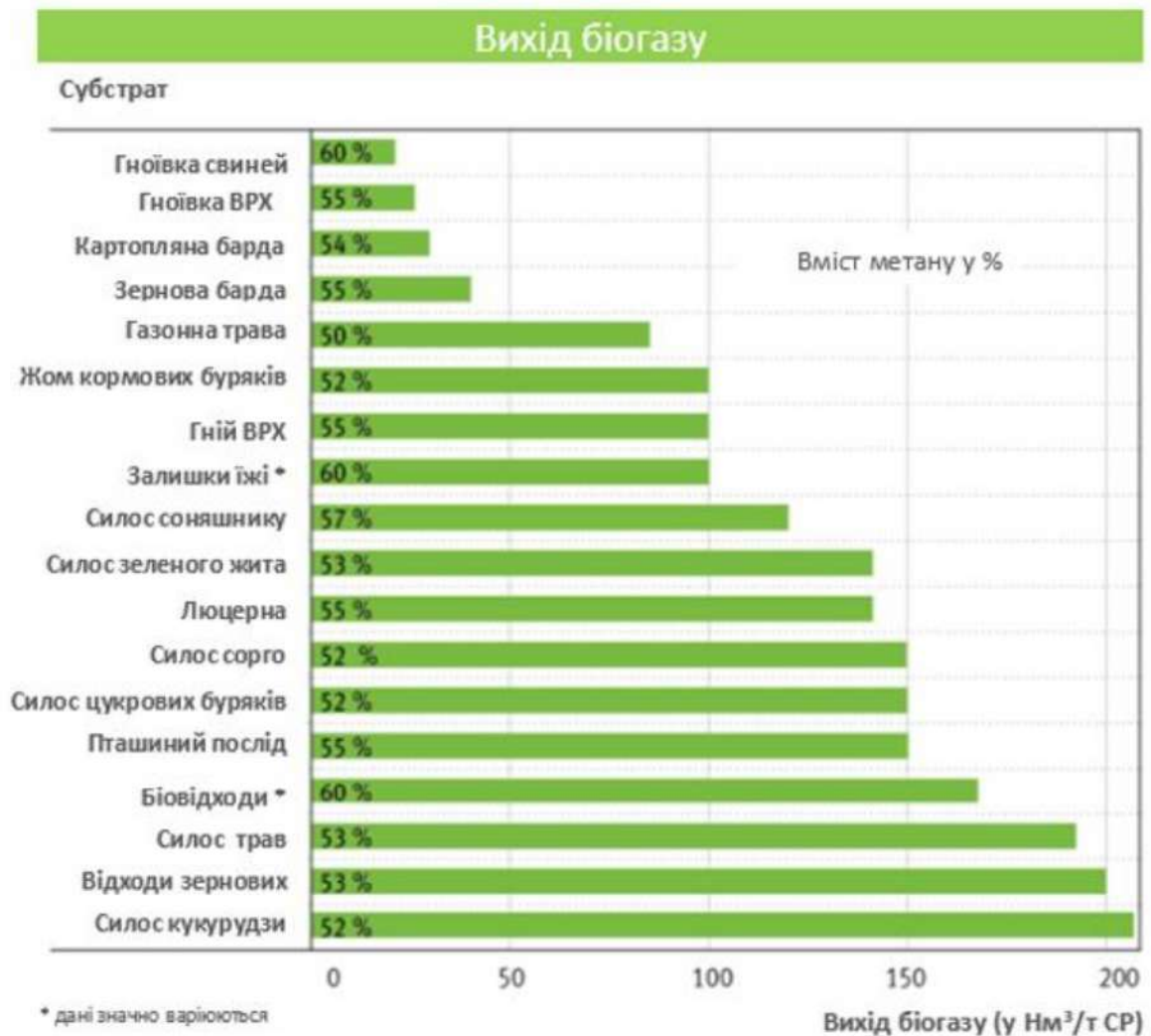


Рисунок 1.2 – Вихід біогазу та вміст метану у різних видах субстратів для біогазового виробництва [47]

Визнаючи важливість лігноцелюлозних матеріалів як основного компонента сільськогосподарських відходів, дослідники досліджували різні методи попередньої обробки для підвищення виходу біогазу з цієї непокірної сировини.

Проте ефективна інтеграція систем переробки сільськогосподарських відходів у біогаз у рамках циркулярної економіки залишається складною

Підп. і Дата  
 Інв. № докл.  
 Взаєм. інв.  
 Підп. і Дата  
 Інв. № докл.

Вип.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата
------	------	----------	-------	------

ТС 23510265

проблемою, яка потребує комплексного підходу, спрямованого на вирішення як технологічних, так і нетехнологічних бар'єрів.

### 1.3 Вплив утилізації сільськогосподарських відходів на довкілля

Сільськогосподарські відходи утворюються в результаті вирощування та збору врожаїв, і їх належна утилізація є важливим елементом сталого розвитку аграрного сектору. Проте традиційні методи, такі як спалювання або захоронення, часто створюють значний екологічний тягар. Спалювання залишків, наприклад стерні або стебел, є поширеним способом через його простоту, але він супроводжується викидами парникових газів, таких як вуглекислий газ і оксиди азоту. Ці викиди погіршують якість повітря та сприяють зміні клімату. Крім того, тверді частинки, що утворюються під час горіння, є небезпечними для здоров'я людей, викликаючи захворювання дихальної системи [28].

Інший традиційний метод утилізації — захоронення органічних залишків на полігонах. Хоча цей спосіб є менш шкідливим для атмосфери порівняно з відкритим спалюванням, він також має низку екологічних недоліків. У процесі розкладу відходів без доступу кисню виділяється метан — потужний парниковий газ, який значно впливає на глобальне потепління. Додатково, рідини, що утворюються внаслідок розкладу органічної маси, можуть проникати в ґрунт і підземні води, викликаючи їх забруднення. Також полігони займають значні земельні площі, що могли б бути використані для інших потреб.

Сучасні методи утилізації сільськогосподарських відходів дозволяють не лише мінімізувати негативний вплив на довкілля, але й отримувати додаткові економічні вигоди. Одним із найефективніших підходів є виробництво біогазу шляхом анаеробного зброджування органічної маси. У цьому процесі метан, що зазвичай вивільняється в атмосферу під час традиційних методів утилізації, використовується для виробництва енергії. Біогаз можна використовувати як паливо для генерації електроенергії або тепла, що зменшує залежність від викопного палива. Крім того, побічним продуктом цього процесу є дигестат —

Інв.№гтоак.	Підп. і дата	Взаєм.інв.	Інв.№гдубл.	Підп. і дата
-------------	--------------	------------	-------------	--------------

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дат
-----	-----	----------	-------	-----

ТС 23510265

Арк

14

органічне добриво, яке містить багато поживних речовин і може використовуватися для підвищення родючості ґрунтів.

Ще одним сучасним методом утилізації є компостування. Перетворення органічних залишків на компост дозволяє не лише зменшити обсяги відходів, але й покращити структуру ґрунтів, повертаючи поживні речовини у природний цикл. Це зменшує потребу у використанні хімічних добрив і сприяє відновленню екосистем.

На глобальному рівні перехід до більш стійких методів управління сільськогосподарськими відходами має значний екологічний вплив. Скорочення викидів парникових газів, зменшення забруднення вод і ґрунтів, а також ефективне використання органічної маси сприяють відновленню природного балансу та зменшенню впливу аграрної діяльності на довкілля. Використання таких підходів, як виробництво біогазу чи компостування, є невід'ємною частиною концепції циркулярної економіки, яка спрямована на повторне використання ресурсів [4848].

Таким чином, утилізація сільськогосподарських відходів за допомогою сучасних методів має вирішальне значення для зменшення негативного впливу на довкілля та сталого розвитку аграрного сектору. Впровадження цих рішень дозволяє не лише мінімізувати екологічні ризики, але й створює додаткові економічні можливості для аграрних підприємств.

#### 1.4 Мета і завдання дослідження

Основною метою цього дослідження є вивчення розробки технологічних рішень для утилізації відходів сільського господарства шляхом виробництва біогазу. Конкретні цілі дослідження включають:

1. Розгляд поточного стану виробництва біогазу з відходів сільського господарства, включаючи типи сировини, технічні проблеми та існуючі технологічні підходи.

ІНВ.№ДОКУМ.	Підп. і дата	Взаєм.інв.	ІНВ.№ДОКУБЛ.	Підп. і дата
-------------	--------------	------------	--------------	--------------

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дат
-----	-----	----------	-------	-----

ТС 23510265



2. Визначення та аналіз ключових факторів, що впливають на ефективність та сталість виробництва біогазу з відходів сільського господарства, такі як склад вихідної сировини, процеси перетравлення та дизайн системи. ключові фактори, що впливають на ефективність і стабільність виробництва біогазу з сільськогосподарських відходів, такі як склад вихідної сировини, процес зброджування та кінцеве використання.

3. Вивчення та оцінка нових технологічних рішень, які можуть покращити використання сільськогосподарських відходів для виробництва біогазу, включаючи передові методи попередньої обробки, покращені системи перетравлення та інноваційні застосування для кінцевого використання.

4. Оцінка економічних та екологічних переваг запропонованих технологічних рішень та їх потенціал для широкого впровадження.

5. Надання дорожньої карти для успішної інтеграції виробництва біогазу в сільськогосподарський сектор, враховуючи технічні, економічні та екологічні фактори.

ІНВ.№ГОДАЛ.	Підп. і дата	Взаєм.інв.	ІНВ.№ДУБЛ.	Підп. і дата	<i>ТС 23510265</i>	Арк
Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дат		16

## РОЗДІЛ 2

### ОБ'ЄКТ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

#### 2.1 Сільськогосподарські відходи як об'єкт дослідження

Основним об'єктом цього дослідження є утилізація сільськогосподарських відходів, які включають широкий спектр органічних матеріалів, утворених у рослинництві, тваринництві та харчовій промисловості. Ці відходи можуть включати рослинні залишки (наприклад, соломку, стебла та лушпиння), тваринний гній, відходи бійні та побічні продукти виробництва їжі та напоїв. Відповідно до [36], сільськогосподарські відходи є звичайними способами використання тваринної сировини та виробництва енергії шляхом спалювання, але існує кілька інших потенційних застосувань цих матеріалів за допомогою біотехнологічних підходів, таких як виробництво цінних біопродуктів та біоенергетики (рис. 2.1) [42].



Рисунок 2.1 – Способи поводження з відходами зліва на право: компостування, спалювання, переробка

У центрі уваги цього дослідження – виробництво біогазу, відновлюваного джерела енергії, із сільськогосподарських відходів. Біогаз в основному складається з метану та вуглекислого газу (рис. 2.2) та може утворюватися шляхом анаеробного зброджування органічних речовин [20, 22]. Утилізація

Інв. № год. авт.	Підп. і дата
Взаєм. інв.	Інв. № год. авт.
Інв. № год. авт.	Підп. і дата
Взаєм. інв.	Інв. № год. авт.

Вип.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат.
------	------	----------	-------	------

ТС 23510265

сільськогосподарських відходів для виробництва біогазу має значні перспективи як для вирішення екологічних проблем, пов'язаних з утилізацією відходів, так і для вирішення зростаючого попиту на стійкі джерела енергії.



Рисунок 2.2 – Склад біогазу

У цьому дослідженні використовується багатоаспектна методологія для вивчення розробки технологічних рішень для утилізації сільськогосподарських відходів із виробництвом біогазу.

## 2.2 Екологічні аспекти виробництва біогазу

Належне управління та утилізація сільськогосподарських відходів шляхом виробництва біогазу може мати позитивний вплив на навколишнє середовище [20, 42]. Завдяки відведенню органічних відходів зі сміттєзвалищ і відкритих звалищ виробництво біогазу може допомогти зменшити викиди парникових газів, запобігти забрудненню води та ґрунту та сприяти створенню більш циклічної та стійкої сільськогосподарської системи [20, 22].

Крім того, використання біогазу як відновлюваного джерела енергії може витіснити споживання викопного палива, призводячи до скорочення викидів вуглекислого газу та пом'якшуючи вплив виробництва енергії на навколишнє середовище [36, 42 **Error! Reference source not found.**].

Інв. № докл.	Підп. і дата
Взаєм. інв.	Інв. № докл.
Підп. і дата	Підп. і дата

Вип.	Арк	№ докум.	Підп.	Дат
------	-----	----------	-------	-----

Розробка технологічних рішень для утилізації відходів сільського господарства з виробництвом біогазу є багатогранною проблемою, яка потребує комплексного розуміння різноманітних технічних, економічних та екологічних чинників.

Для вирішення цілей дослідження в цій роботі використовується комбінація дослідницьких методів, включаючи комплексний огляд літератури, аналіз тематичних досліджень та оцінку нових технологічних рішень. Методологія дослідження розроблена з метою забезпечення цілісного та науково обґрунтованого підходу до розробки технологічних рішень щодо утилізації відходів сільського господарства з виробництвом біогазу.

## 2.3 Огляд сучасних підходів до отримання біогазу

### 2.3.1 Процес анаеробного зброджування

Анаеробне зброджування є добре налагодженим біологічним процесом, який може ефективно перетворювати органічні речовини, включаючи сільськогосподарські відходи, на біогаз, відновлюване джерело енергії. Процес анаеробного зброджування включає послідовне розщеплення складних органічних молекул консорціумом мікроорганізмів, включаючи гідролітичні, ацидогенні, ацетогенні та метаногенні бактерії, за відсутності кисню [26].

Процес можна умовно розділити на чотири основні стадії: гідроліз, ацидогенез, ацетогенез і метаногенез. Під час гідролізу складні органічні сполуки, такі як вуглеводи, білки та ліпіди, розщеплюються на простіші, розчинні молекули. Ацидогенні бактерії потім перетворюють ці розчинні сполуки в летючі жирні кислоти, водень і вуглекислий газ. Ацетогенні бактерії далі окислюють леткі жирні кислоти до водню, вуглекислого газу та ацетату, які потім використовуються метаногенними археями для виробництва метану як основного компонента біогазу.

Підп. і дата
Інв. № док.
Взаєм. інв.
Підп. і дата
Інв. № док.

Вип.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат.
------	------	----------	-------	------

ТС 23510265



Процес анаеробного зброджування може відбуватися в різних середовищах, включаючи сміттєзвалища, очисні споруди та спеціальні установки для виробництва біогазу.

Характеристики вихідної сировини, такі як її склад, вміст вологи та розмір частинок, можуть значно вплинути на ефективність процесу анаеробного зброджування [5Error! Reference source not found.]. Таким чином, правильна підготовка вихідної сировини та методи попередньої обробки мають вирішальне значення для підвищення здатності до біологічного розкладання та виходу метану із сільськогосподарських відходів.

Різні методи попередньої обробки, такі як механічні, термічні, хімічні та біологічні методи, можуть бути використані для покращення доступності органічної речовини для мікробного співтовариства, тим самим збільшуючи загальне виробництво біогазу [5, 26].

Конструкція та конфігурація анаеробного реактора відіграють вирішальну роль у загальній продуктивності системи виробництва біогазу.

Одноступенева, двоступенева система анаеробного зброджування та система анаеробного зброджування з високим вмістом твердих речовин є найбільш часто використовуваними конфігураціями реакторів. Кожна конфігурація має свої переваги та обмеження, а вибір оптимальної конструкції залежить від таких факторів, як характеристики вихідної сировини, бажана швидкість виробництва біогазу та експлуатаційні вимоги.

Такі фактори, як температура, кислотність, час гідравлічного утримування та рівень органічного завантаження, необхідно ретельно контролювати та контролювати, щоб забезпечити ефективну та стабільну роботу процесу анаеробного зброджування [26, 31, 34, 37].

Необроблений біогаз, отриманий під час процесу анаеробного зброджування, зазвичай містить домішки, такі як вуглекислий газ, сірководень і водяна пара, які можуть знизити теплотворну здатність і обмежити кінцеве використання газу.

Підп. і дата
Інв. № док.
Взаєм. інв.
Підп. і дата
Інв. № док.

Вип.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат.
------	------	----------	-------	------

ТС 23510265

Існують різні технології модернізації біогазу, такі як адсорбція змінного тиску, очищення води та мембранне відділення, які можна використовувати для видалення цих домішок і модернізації біогазу до біометану, який потім можна використовувати як чисте, відновлюване джерело енергії. для різних застосувань, включаючи опалення, виробництво електроенергії та як паливо для транспортних засобів, тим самим сприяючи скороченню викидів парникових газів і посилюючи енергетичну безпеку в сільськогосподарських системах [26]. Крім того, впровадження ефективних технологій модернізації біогазу не тільки покращує якість біогазу, але й уможливує його інтеграцію в існуючі енергетичні системи, таким чином розширюючи ринковий потенціал відновлюваної енергії, отриманої з сільськогосподарських відходів, і сприяючи сталим практикам управління відходами в сільськогосподарському секторі.

Для забезпечення ефективної та стабільної роботи систем виробництва біогазу вкрай важливо оптимізувати різні робочі параметри та запровадити ефективні стратегії керування процесом. Це включає в себе використання розширених алгоритмів керування та систем моніторингу, які можуть динамічно регулювати такі параметри, як склад вихідної сировини, температура та час утримування, тим самим максимізуючи вихід біогазу, мінімізуючи ризик збоїв у процесі та підвищуючи загальну надійність системи та ефективність виробництва біогазу.

### 2.3.2 Сухе анаеробне зброджування

Одним з важливим технологічним досягненням у сфері перетворення сільськогосподарських відходів на біогаз є поява систем сухого (з високим вмістом твердих речовин) анаеробного зброджування. Ці системи, що характеризуються здатністю переробляти сировину з високим вмістом твердої речовини без значного додавання води, пропонують ряд переваг, включаючи зниження експлуатаційних витрат і збільшення виходу метану, що робить їх особливо придатними для управління сільськогосподарськими залишками, які

Інв.№докл.	Підп. і дата	Взаєм.інв.	Інв.№доубл.	Підп. і дата
------------	--------------	------------	-------------	--------------

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дат
-----	-----	----------	-------	-----

ТС 23510265

часто мають високий вміст твердих речовин і низький вміст вологи [24]. Крім того, процес сухого анаеробного зброджування може підвищити енергетичну ефективність виробництва біогазу шляхом зменшення енергоємних вимог до нагрівання та змішування, які зазвичай пов'язані з методами мокрого зброджування, таким чином роблячи його більш стійким варіантом для управління сільськогосподарськими відходами та виробництва енергії [10, 24, 37, 41] Крім того, інновації в технологіях сухого анаеробного зброджування полегшують одночасну обробку кількох типів сировини, що призводить до покращення виходу біогазу та робочої гнучкості в різних умовах сільського господарства, що в кінцевому підсумку підтримує ширшу мету сталої утилізації відходів і виробництва відновлюваної енергії в сільськогосподарському секторі. Крім того, розробка технологій моніторингу та оптимізації, призначених для сухого анаеробного зброджування, може підтримати ці системи в досягненні максимальної продуктивності за допомогою коригувань у реальному часі та прогнозової аналітики, тим самим підвищуючи загальну ефективність стратегій управління сільськогосподарськими відходами в рамках циклічної економіки. Підсумовуючи, прогрес технологічних рішень, особливо в контексті сухого анаеробного зброджування, не тільки оптимізує виробництво біогазу з сільськогосподарських відходів, але й узгоджується з цілями сталого розвитку шляхом мінімізації споживання ресурсів і максимального відновлення енергії, тим самим роблячи значний внесок у розвиток моделі циркулярної економіки в аграрному секторі [4,10,15,24,37,41].

### 2.3.3 Термофільне зброджування

Іншим важливим технологічним прогресом у сфері перетворення сільськогосподарських відходів на біогаз є розробка систем термофільного анаеробного зброджування. Ці системи працюють при підвищених температурах, як правило, від 50°C до 60°C, що може посилити деградацію органічного матеріалу та збільшити швидкість виробництва біогазу порівняно з мезофільними

ІНВ.№ГОДА.	Підп. і Дата	Взаєм.ІНВ.	ІНВ.№ДУБЛ.	Підп. і Дата
------------	--------------	------------	------------	--------------

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дат
-----	-----	----------	-------	-----

ТС 23510265

системами. Крім того, термофільне зброджування скорочує час утримування, необхідний для процесу, сприяючи швидшому обороту вихідної сировини і, таким чином, збільшуючи загальну пропускну здатність біогазових установок, а також забезпечуючи покращене знищення патогенів, що робить його життєздатним варіантом для переробки харчових продуктів і потоків сільськогосподарських відходів [24, 37]. Однак впровадження термофільних систем зброджування також вимагає ретельного управління термічною стабільністю та мікробними спільнотами, оскільки вищі температури можуть створювати стрес для певних мікроорганізмів, потенційно впливаючи на загальну ефективність травлення та якість біогазу, якщо не контролювати належним чином [37]. Це вимагає розробки надійних стратегій моніторингу та контролю, які можуть пом'якшити ці виклики, гарантуючи підтримку оптимальних умов для мікробної активності протягом усього процесу перетравлення, що є критично важливим для досягнення високого виходу біогазу та підтримки надійності системи в умовах мінливості сільськогосподарського виробництва.

### 2.3.4 Біоелектрохімічні системи

Біоелектрохімічні системи являють собою новий підхід до виробництва та валоризації біогазу, де процес анаеробного зброджування поєднується з електрохімічними механізмами для посилення перетворення органічної речовини в електричну енергію або цінні хімічні речовини. Ці системи використовують мікробні паливні елементи та інші електрохімічні технології для полегшення передачі електронів під час розпаду органічних субстратів, тим самим не лише покращуючи швидкість виробництва біогазу, але й дозволяючи відновлювати цінні побічні продукти, такі як водень та інші розчинники, які можуть бути додатково використані. використовується в різних програмах. Крім того, інтеграція біоелектрохімічних систем у стратегії управління сільськогосподарськими відходами може підвищити сталість виробництва

ІНВ. №ГОДА.	ПІДП. І ДАТА	ВЗАЄМ. ІНВ.	ІНВ. №ДУБЛ.	ПІДП. І ДАТА
-------------	--------------	-------------	-------------	--------------

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дат
-----	-----	----------	-------	-----

ТС 23510265

біогазу, забезпечуючи подвійну функціональність — одночасну обробку органічних відходів і генерацію відновлюваної енергії, таким чином сприяючи більш ефективному процесу відновлення ресурсів [17, 24]. Крім того, адаптивність біоелектрохімічних систем дозволяє їм використовувати широкий спектр сировини, включно з тими, що мають високий вміст твердих речовин, як правило, у сільськогосподарських відходах, що може ще більше посилити їх застосування та ефективність у різноманітних умовах сільського господарства. Крім того, включення цих систем до існуючої сільськогосподарської інфраструктури може призвести до підвищення економічної життєздатності за рахунок зниження експлуатаційних витрат і збільшення врожайності енергії, таким чином підтримуючи перехід до більш стійких сільськогосподарських практик, які надають пріоритет утилізації відходів і виробництву відновлюваної енергії [24, 29].

ІНВ. №ГОДАЛ.	Підп. і дата	Взаєм. інв.	ІНВ. №ДУБЛ.	Підп. і дата
<i>ТС 23510265</i>				
Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дат
				Арк
				24

РОЗДІЛ 3  
ТЕХНОЛОГІЧНІ РІШЕННЯ ДЛЯ УТИЛІЗАЦІЇ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ  
ВІДХОДІВ

3.1 Вибір та обґрунтування методу утилізації відходів

3.1.1 Критерії вибору методів утилізації відходів

Під час вибору способів утилізації сільськогосподарських відходів важливо врахувати низку критеріїв, які гарантують відповідність обраного методу практичним, екологічним та економічним потребам. Основний акцент робиться на ефективність та адаптованість обраних технологій до умов конкретного регіону чи господарства.

Перш за все, екологічна стійкість є ключовим аспектом. Обраний метод має забезпечувати мінімізацію впливу на довкілля: зниження викидів парникових газів, запобігання забрудненню ґрунтів і вод та можливість повторного використання цінних компонентів відходів у сільському господарстві. Наприклад, анаеробне зброджування дозволяє не тільки виробляти біогаз як джерело відновлюваної енергії, але й отримувати органічні добрива, які можуть покращувати родючість ґрунту. Водночас спалювання або захоронення відходів часто має негативний вплив через викиди шкідливих речовин або забруднення територій [17].

Економічна складова також відіграє вирішальну роль. Витрати на впровадження та експлуатацію технології мають бути виправданими економічними вигодами. Це включає зниження витрат на управління відходами, отримання додаткових прибутків від реалізації побічних продуктів, таких як біогаз чи органічні добрива, і зменшення залежності від викопного палива. Наприклад, для невеликих ферм біогазові установки можуть бути вигідними,

Інв. № докл.	Підп. і дата	Взаєм. інв.	Інв. № докл.	Підп. і дата
--------------	--------------	-------------	--------------	--------------

Вип.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат.
------	------	----------	-------	------

ТС 23510265



забезпечуючи дешеву енергію, тоді як більші системи потребують серйозних фінансових вкладень і тривалого періоду окупності.

Адаптивність технології до місцевих умов визначає її ефективність. Сільськогосподарські відходи відрізняються за складом, кількістю та сезонністю залежно від регіону. Методи утилізації мають враховувати ці особливості. Наприклад, у місцевостях із розвиненим тваринництвом найбільш раціональним рішенням є технології, спрямовані на переробку гною, тоді як у регіонах із великим обсягом рослинних залишків доцільно використовувати компостування або зброджування. Також важливим є врахування наявної інфраструктури, наприклад транспортних мереж чи доступності електроенергії.

Масштабованість і технологічна складність також впливають на вибір методу. Для малих фермерських господарств можуть бути більш доцільними прості рішення, такі як звичайне компостування, яке не потребує складного обладнання. У великих господарствах або агрохолдингах можливе використання більш складних технологій, таких як термохімічна переробка або створення великих біогазових комплексів. При цьому технологія має бути зрозумілою та доступною для тих, хто її використовує.

Дотримання законодавчих вимог і стандартів є ще одним важливим фактором. Методи утилізації повинні відповідати екологічним нормам і політикам, спрямованим на підтримку стійкого сільського господарства. Наприклад, у країнах, де уряд стимулює розвиток відновлюваної енергетики, фермери можуть отримувати субсидії на впровадження біогазових технологій, що робить цей метод більш доступним і привабливим.

Окрему увагу слід приділити соціальному аспекту. Важливо, щоб методи утилізації відповідали культурним і соціальним цінностям місцевих громад. Наприклад, популяризація виробництва біогазу може отримати позитивний відгук у сільській місцевості, адже це не тільки ефективний спосіб управління відходами, але й джерело доступної енергії [13].

Таким чином, вибір способу утилізації сільськогосподарських відходів має базуватися на комплексному аналізі екологічних, економічних, технічних та

ІНВ.№ГОДА.	Підп. і Дата	Взаєм.ІНВ.	ІНВ.№ДУБЛ.	Підп. і Дата
------------	--------------	------------	------------	--------------

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дата
-----	-----	----------	-------	------

ТС 23510265

соціальних критеріїв. Тільки з урахуванням цих аспектів можна забезпечити ефективне використання ресурсів, зниження впливу на довкілля та досягнення цілей сталого розвитку в агросекторі [47].

### 3.1.2 Обґрунтування вибору виробництва біогазу як переважного методу

Виробництво біогазу стало одним із найефективніших методів утилізації сільськогосподарських відходів. Його вибір як основного способу управління такими відходами можна пояснити як екологічними, так і економічними аргументами. Крім того, це вирішення відповідає глобальним тенденціям до відновлювальних джерел енергії та зменшення шкідливого впливу на довкілля.

Однією з головних переваг біогазових систем є можливість одночасного вирішення кількох проблем. Сільськогосподарські відходи, такі як гній, залишки врожаю чи побічні продукти харчової промисловості, багаті на органічні речовини, що робить їх придатними для метанового бродіння. Цей процес допомагає значно зменшити обсяг відходів і уникнути екологічних ризиків, що виникають під час їх спалювання або відкритого розкладання. На відміну від традиційних підходів, які призводять до забруднення повітря та води, виробництво біогазу знижує викиди парникових газів і використовує метан як джерело енергії [30**Error! Reference source not found.**].

Окрім зменшення екологічного навантаження, технологія сприяє принципам циркулярної економіки. Дігестат, який утворюється після процесу бродіння, може використовуватися як добриво, що повертає поживні речовини у ґрунт. Це дозволяє знизити залежність від хімічних добрив і покращити якість ґрунту, сприяючи довгостроковій сталості сільськогосподарського виробництва.

З економічної точки зору, біогазові установки забезпечують значні переваги. Окрім зменшення витрат на утилізацію відходів, вони генерують енергію, яку можна використовувати для власних потреб або продавати. Завдяки підтримці державних програм, спрямованих на розвиток "зеленої енергетики", цей напрямок стає ще більш привабливим для інвестицій.

Підп. і дата
Інв. № док.
Взаєм. інв.
Підп. і дата
Інв. № док.

Вип.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат.
------	------	----------	-------	------

ТС 23510265



Гнучкість біогазових систем є ще однією перевагою. Їх можна адаптувати до різних умов і масштабів: від невеликих установок на окремих фермах до централізованих комплексів, що обробляють відходи з різних джерел. Це робить технологію доступною як для малих, так і для великих сільськогосподарських підприємств [1Error! Reference source not found.].

У регіонах, де доступ до традиційних джерел енергії обмежений, біогазові установки можуть стати надійним рішенням для забезпечення енергетичних потреб. Вони сприяють децентралізації енергосистеми, зменшують залежність від викопного палива і водночас зміцнюють енергетичну безпеку.

З екологічної точки зору, впровадження біогазових технологій допомагає скоротити забруднення води та повітря, усуває проблеми із запахом і знижує негативний вплив на навколишнє середовище. Це особливо важливо для регіонів з інтенсивним сільськогосподарським виробництвом, де екологічне навантаження є значним.

Загалом, біогазові технології представляють собою комплексне рішення, яке об'єднує екологічні, економічні та соціальні вигоди. Їх використання є важливим кроком до сталого розвитку та переходу на відновлювальні джерела енергії.

### 3.2 Технологія виробництва біогазу

#### 3.2.1 Огляд процесу виробництва біогазу

Виробництво біогазу (рис. 3.1) переважно здійснюється через процес анаеробного зброджування, який базується на розкладі органічних матеріалів у середовищі без доступу кисню. Такий підхід дозволяє перетворити сільськогосподарські відходи в біогаз, що є відновлюваним джерелом енергії. Основними компонентами біогазу є метан (CH<sub>4</sub>) і вуглекислий газ (CO<sub>2</sub>), а також невеликі кількості інших газів. Анаеробне зброджування вважається одним із перспективних методів утилізації відходів, оскільки воно не лише сприяє

ІНВ.№ЮТОАД.	Підп. і Дата	Взаєм.ІНВ.	ІНВ.№ДУБЛ.	Підп. і Дата
-------------	--------------	------------	------------	--------------

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дат
-----	-----	----------	-------	-----

ТС 23510265

зменшенню негативного впливу на довкілля, але й дозволяє отримати енергетичний ресурс та цінні побічні продукти, придатні для використання в аграрному секторі.



Рисунок 3.1 – Етапи виробництва біогазу

Процес анаеробного зброджування розподіляється на чотири основні етапи: гідроліз, ацидогенез, ацетогенез та метаногенез. Кожен із них виконує свою функцію в переробці складних органічних матеріалів на простіші сполуки, з яких утворюється біогаз [32].

Інв. № докл.	Підп. і дата
Взаєм. інв.	Інв. № докл.
Підп. і дата	Підп. і дата

Вип.	Арк	№ докум.	Підп.	Дат
------	-----	----------	-------	-----

На першому етапі, гідролізі, складні органічні сполуки, такі як білки, жири та вуглеводи, розщеплюються на простіші молекули. Ця стадія є ключовою, оскільки мікроорганізми, залучені до подальших етапів, можуть споживати лише такі сполуки. Ферменти, які виділяються гідролітичними бактеріями, сприяють розкладанню полімерів до мономерів: вуглеводів до цукрів, білків до амінокислот, жирів до жирних кислот і гліцерину. Проте цей етап часто уповільнюється через наявність у відходах лігноцелюлозних сполук, що є стійкими до розкладу. Для прискорення процесу застосовують попередню обробку, наприклад, механічне подрібнення чи хімічне оброблення.

Після гідролізу настає ацидогенез, на якому продукти розпаду перетворюються на леткі жирні кислоти (ЛЖК), спирти, водень і вуглекислий газ. Цей етап супроводжується діяльністю ацидогенних бактерій, які використовують отримані сполуки як джерело енергії. Проте для успішного протікання ацидогенезу важливо підтримувати стабільний рівень рН, оскільки надмірна кислотність може пригнічувати активність мікроорганізмів. Основними продуктами ацидогенезу є оцтова, пропіонова та масляна кислоти, які є важливими попередниками для наступних етапів.

На третьому етапі, ацетогенезі, леткі жирні кислоти та спирти перетворюються на оцтову кислоту, водень і вуглекислий газ. Цей процес здійснюється за участю ацетогенних бактерій, які працюють у симбіозі з метаногенами, споживаючи водень, що утворюється. Такий зв'язок допомагає підтримувати стабільність системи, оскільки високий рівень водню може пригнічувати діяльність ацетогенних бактерій. Ефективність ацетогенезу також залежить від того, наскільки добре вдається знизити накопичення проміжних продуктів, які можуть гальмувати процес.

На заключному етапі, метаногенезі, відбувається утворення біогазу за допомогою архейних мікроорганізмів, які перетворюють оцтову кислоту, водень і вуглекислий газ у метан. Ця стадія є найбільш чутливою до зовнішніх умов, таких як температура та рН. Для метаногенезу оптимальний рівень рН становить 6,8–8,0. За температурою розрізняють мезофільні (35–40°C) та термофільні (50–

ІНВ. №ГОДА.	Підп. і Дата	Взаєм. ІНВ.	ІНВ. №ДУБЛ.	Підп. і Дата
-------------	--------------	-------------	-------------	--------------

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дата
-----	-----	----------	-------	------

ТС 23510265

60°C) умови. Мезофільний режим є більш стабільним і економічним, тоді як термофільний дозволяє досягти вищого виходу біогазу, проте потребує значних енергетичних витрат [21].

Для підвищення ефективності процесу важливо враховувати такі фактори, як склад сировини, рівень органічного навантаження та час утримання. Оптимальне співвідношення вуглецю до азоту (C/N) у відходах сприяє стабільній діяльності мікроорганізмів. Ко-зброджування сільськогосподарських відходів із іншими органічними матеріалами, наприклад, харчовими відходами чи гноєм, дозволяє збільшити вихід біогазу та покращити баланс поживних речовин.

Інноваційні підходи, такі як попередня обробка сировини, використання специфічних мікроорганізмів і системи моніторингу в реальному часі, сприяють підвищенню продуктивності біогазових установок. Зокрема, застосування біоаугментації дозволяє збільшити активність мікроорганізмів на критичних етапах процесу.

Таким чином, анаеробне зброджування є ефективною технологією утилізації сільськогосподарських відходів, що забезпечує виробництво біогазу як відновлюваного джерела енергії та сприяє зменшенню негативного впливу на довкілля.

### 3.2.2 Ключові компоненти біогазових систем

Виробництво біогазу є багатограним процесом, який базується на використанні цілого комплексу компонентів, що сприяють ефективному розкладанню органічних відходів із максимальним отриманням енергетичного ресурсу. Така система включає реактор (дегістер), сховища для біогазу, блоки для його очищення та інше допоміжне обладнання, необхідне для підготовки сировини та поводження з побічними продуктами. Взаємодія цих компонентів відіграє вирішальну роль у забезпеченні продуктивності системи, її екологічної безпеки та економічної вигоди. Нижче наведено детальний опис основних

Інв. № докл.	Підп. і дата	Взаєм. інв.	Інв. № докл.	Підп. і дата
--------------	--------------	-------------	--------------	--------------

Вип.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат.
------	------	----------	-------	------

ТС 23510265



складових біогазової системи, їх функцій, технічних параметрів і впливу на весь процес (рис. 3.2) [12].

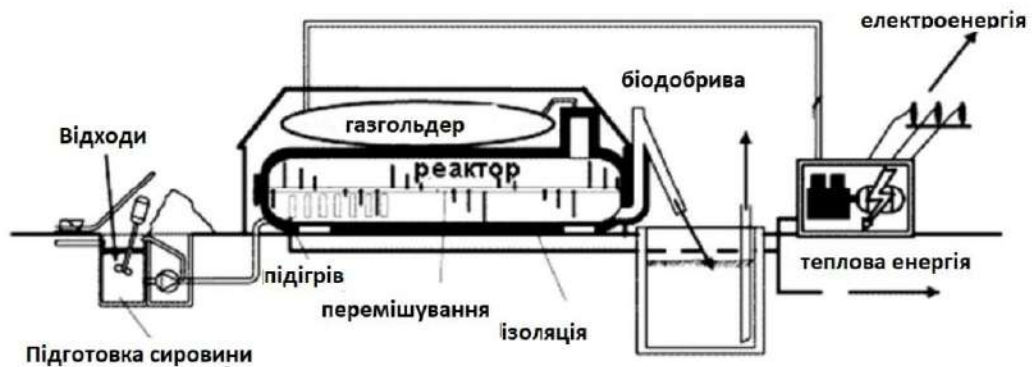


Рисунок 3.2 - Типова біогазова установка

Дегістер виступає центральною складовою біогазової системи, адже саме в ньому відбувається основний процес — анаеробний розклад органічної сировини. Цей реактор створює герметичне середовище без кисню, яке забезпечує сприятливі умови для анаеробних мікроорганізмів. Існує кілька типів дегістерів, серед яких найпоширеніші — це періодичні реактори, системи з безперервним перемішуванням (CSTR), дегістери з потоком "plug-flow" та конструкції із фіксованими або плаваючими куполами. Кожен із цих типів має свої унікальні особливості й використовується залежно від характеристик відходів, масштабів виробництва та технічних потреб.

Реактори періодичної дії є найпростішими за конструкцією. Вони ідеально підходять для невеликих господарств, оскільки сировина завантажується партіями, а весь цикл триває до повного завершення зброджування. Однак їхній недолік полягає в обмеженій здатності забезпечувати постійний вихід біогазу. У великих масштабах більш ефективними є безперервні системи, такі як CSTR, де вміст постійно перемішується для забезпечення рівномірності процесу, або дегістери plug-flow, які оптимально підходять для твердих матеріалів і дозволяють передбачуване утримання сировини в реакторі.

Підп. і дата
Інв. № докл.
Взаєм. інв.
Підп. і дата
Інв. № докл.

Вип.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат.
------	------	----------	-------	------

ТС 23510265

Фіксовані й плаваючі куполи особливо популярні у країнах, що розвиваються, через свою економічність. У дегістерах із фіксованим куполом конструкція залишається нерухомою, збираючи газ у верхній частині системи. Водночас плаваючий купол, який піднімається та опускається відповідно до об'єму газу, забезпечує стабільніший тиск, хоча й потребує більшої уваги до обслуговування. Кожен із цих варіантів може бути адаптований до різних кліматичних умов і технологічних вимог.

Для забезпечення стабільності роботи біогазової установки важливо правильно обирати тип дегістера. Враховуються такі фактори, як склад відходів, вологість, необхідний час розкладання та температурні режими. Температура є ключовим аспектом, адже мезофільні умови (20–45°C) забезпечують стабільність процесу та низьке енергоспоживання, тоді як термофільний режим (45–60°C) дозволяє отримати більше газу, але потребує додаткового підігріву. Ці параметри визначають ефективність дегістера і, зрештою, впливають на рентабельність установки.

Біогаз, що утворюється в дегістері, потребує правильного зберігання, яке залежить від обсягів виробництва та потреб у подальшому використанні. Низькотискові системи зберігання, такі як мембрани або плаваючі куполи, є найбільш економічними для невеликих обсягів. На великих установках використовуються газгольдини середнього тиску з подвійними мембранами, які запобігають втратам газу й забезпечують стабільне постачання. Для транспортування чи довготривалого зберігання біогаз стискається до високого тиску, що вимагає попереднього очищення від домішок.

Перед використанням біогаз має бути очищений від сірководню, вуглекислого газу та водяної пари. Сірководень видаляють із використанням залізної губки, біологічних фільтрів або активованого вугілля, що запобігає корозії обладнання. Видалення CO<sub>2</sub> проводиться методами абсорбції у воді, мембранного розділення або PSA-технологіями. Осушувачі, такі як силікагель, допомагають знизити рівень вологості, попереджаючи конденсацію й закупорки в системах.

ІНВ.№ГОДЛ.	Підп. і дата	Взаєм.інв.	ІНВ.№ДУБЛ.	Підп. і дата
------------	--------------	------------	------------	--------------

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дат
-----	-----	----------	-------	-----

ТС 23510265

Арк

33

Поряд із основними компонентами важливу роль відіграє допоміжне обладнання, яке забезпечує підготовку сировини. Подрібнення, перемішування та інші попередні обробки сприяють кращому розкладанню органічних відходів. Системи підігріву, особливо важливі для холодного клімату, допомагають підтримувати оптимальну температуру в дегістері. Крім того, системи безпеки, такі як клапани для скидання надлишкового тиску та датчики концентрації газу, гарантують безпечну експлуатацію біогазової установки.

Окрім систем підігріву й обробки, сучасні біогазові установки оснащуються автоматизованими системами моніторингу та управління. Ці системи дозволяють контролювати ключові параметри роботи, такі як температура, тиск, склад біогазу та рівень вологи, у режимі реального часу. Використання програмованих логічних контролерів (PLC) підвищує ефективність роботи, а можливість дистанційного управління забезпечує швидке реагування на можливі збої чи відхилення від заданих параметрів [38Error! Reference source not found.].

Значну увагу приділяють екологічним аспектам роботи біогазових установок. Утилізація побічних продуктів, таких як тверді залишки після зброджування, є важливим компонентом замкнутого циклу виробництва. Ці залишки, багаті на органічні речовини, використовуються як цінне органічне добриво, що зменшує потребу в синтетичних хімічних добривах і сприяє поліпшенню структури ґрунту. Такий підхід мінімізує відходи та підвищує екологічну стійкість.

Таким чином, технологічні рішення у виробництві біогазу передбачають комплексний підхід до створення, управління й удосконалення всіх компонентів системи. Інтеграція сучасних технологій, автоматизація процесів та відповідальне ставлення до побічних продуктів дозволяють забезпечити не лише енергетичну ефективність, а й позитивний вплив на довкілля, що робить біогазові системи перспективним елементом сталого розвитку.

ІНВ. № ДОКУМ.	ПІДП. І ДАТА	ВЗАЄМ. ІНВ.	ІНВ. № ДОКУБЛ.	ПІДП. І ДАТА
---------------	--------------	-------------	----------------	--------------

Вип	Арк	№ ДОКУМ.	Підп.	Дат
-----	-----	----------	-------	-----

ТС 23510265

### 3.2.3 Попередня обробка та підготовка сировини

У процесі виробництва біогазу підготовка сировини відіграє ключову роль у забезпеченні високого виходу метану та інших цінних побічних продуктів. Сільськогосподарські відходи, такі як волокнисті залишки врожаю, солома чи багатий на поживні речовини гній, мають різноманітний склад і структуру. Це створює унікальні виклики для їх переробки в умовах анаеробного бродіння. Для досягнення максимальної ефективності процесу необхідно спочатку розщепити складні органічні структури біомаси, щоб зробити їх доступнішими для дії анаеробних мікроорганізмів. Методи підготовки сировини виконують цю функцію, дозволяючи зменшити розмір часток, змінити хімічний склад і підвищити біодоступність поживних речовин [33Error! Reference source not found.].

Сільськогосподарські відходи класифікують на три основні групи: лігноцелюлозну біомасу, гній і залишки врожаю. Кожна група має специфічні властивості, що визначають необхідність застосування різних методів обробки для підвищення ефективності виробництва біогазу. Наприклад, лігноцелюлозні матеріали, такі як солома або стебла кукурудзи, мають високу стійкість до мікробного розкладання через наявність лігніну — органічної речовини, яка формує бар'єр навколо волокон целюлози й геміцелюлози. Такий тип відходів потребує інтенсивної попередньої обробки для полегшення доступу мікроорганізмів до вуглеводів. Гній, натомість, має високу вологість і легше піддається мікробному розкладанню, хоча легка обробка може значно пришвидшити процес і зменшити час утримання матеріалу в реакторі.

Основними цілями попередньої обробки сировини є збільшення площі поверхні відходів, зменшення розміру часток, руйнування складних молекулярних структур та поліпшення доступу анаеробних мікроорганізмів до таких сполук, як целюлоза, геміцелюлоза і білки. Ефективна підготовка сировини забезпечує не лише пришвидшення виробництва біогазу, але й підвищення загального виходу метану — основного компонента біогазу для енергетичних

ІНВ.№ГОДА.	Підп. і Дата	Взаєм.ІНВ.	ІНВ.№ДУБЛ.	Підп. і Дата					Арк
Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дата	ТС 23510265			35	



потреб. Крім того, вона скорочує час перебування сировини в реакторі, оптимізуючи ресурси, необхідні для її обробки та зберігання.

Механічні методи обробки сировини включають фізичні процеси, такі як подрібнення, різання, шліфування й розщеплення волокон. Основна мета цих методів полягає в зменшенні розміру часток і збільшенні площі поверхні для полегшення дії мікроорганізмів. Для механічної обробки використовують різноманітне обладнання, зокрема дробарки, молоткові млини або кульові млини, які забезпечують фізичну руйнацію структури біомаси. Механічні методи є досить простими в реалізації, але можуть бути енергоємними, особливо під час обробки лігноцелюлозних матеріалів. Тому часто їх комбінують з іншими методами, щоб підвищити загальну ефективність підготовки сировини.

Теплова обробка базується на нагріванні біомаси у воді чи парі в умовах підвищеного тиску або температури. Цей метод дозволяє розщеплювати складні полімери, такі як лігнін, полегшуючи доступ до целюлози й геміцелюлози для анаеробних мікроорганізмів. Одним із ефективних варіантів є парова вибухова обробка, що передбачає різке нагрівання біомаси, а потім швидке зниження тиску. Така технологія забезпечує руйнування фізичних і хімічних бар'єрів, збільшуючи доступну площу поверхні для дії мікроорганізмів. Проте теплові методи є енергоємними, що впливає на їхню економічну доцільність і потребує точного розрахунку енергетичних витрат.

Хімічна обробка передбачає застосування різноманітних хімічних реагентів, таких як кислоти, луки чи окислювачі, для зміни структури біомаси. Цей підхід є надзвичайно ефективним для матеріалів із високим вмістом лігніну, оскільки хімічні речовини розщеплюють лігнінові структури, роблячи целюлозу й геміцелюлозу доступними для розкладання. Наприклад, лужна обробка із застосуванням гідроксиду натрію або кальцію полегшує руйнування лігніну, тоді як кислотна обробка спрямована на геміцелюлозу. Однак використання хімічних методів потребує ретельного контролю, оскільки неправильне дозування реагентів може призвести до утворення токсичних побічних продуктів, що гальмують мікробну активність.

ІНВ.№ГОДА.	Підп. і Дата	Взаєм.ІНВ.	ІНВ.№ДУБЛ.	Підп. і Дата
------------	--------------	------------	------------	--------------

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дат
-----	-----	----------	-------	-----

ТС 23510265

Арк

36

Біологічна обробка базується на використанні ферментів або мікроорганізмів для розкладання органічних сполук у біомасі. Це екологічно чистий метод із низькими енергетичними витратами, але його недоліком є відносно тривалий час обробки. У біологічних методах часто використовують ферменти, наприклад, целюлазу або лігнінпероксидазу, які селективно руйнують лігнін, геміцелюлозу чи целюлозу. Також популярним є використання грибів (наприклад, білих чи бурих гнильних грибів), які природно продукують ферменти для розкладання лігніну. Хоча цей метод може бути повільним, він є екологічно стійким і ефективним у поєднанні з іншими підходами [19].

Комбіновані методи інтегрують кілька підходів для досягнення максимальної ефективності обробки. Наприклад, механічну обробку часто поєднують із хімічною, що дозволяє спершу фізично зруйнувати структуру біомаси, а потім хімічно модифікувати її склад. Також перспективним є поєднання теплових і хімічних методів, оскільки нагрівання пом'якшує біомасу, а хімічні реагенти сприяють руйнуванню лігніну. Подібні комбіновані підходи забезпечують найвищий вихід біогазу, хоча їх застосування потребує детального аналізу витрат і екологічного впливу.

Підсумовуючи, попередня обробка сировини є невід'ємним етапом у виробництві біогазу. Вибір методу залежить від типу сировини, масштабу виробництва й економічної доцільності. Ефективна підготовка сприяє оптимізації процесів анаеробного бродіння, забезпечуючи стабільний вихід енергії, зменшуючи екологічний вплив і підвищуючи рентабельність біогазових технологій.

### 3.2.4 Інновації в конструкції біореакторів

Розробка і модернізація біореакторів значно впливають на ефективність технологій виробництва біогазу, зокрема в контексті переробки сільськогосподарських відходів. У той час як традиційні реактори, такі як ті, що працюють у періодичному режимі, чи ті, що забезпечують безперервне

ІНВ.№ЮТОДЛ.	Підп. і Дата	Взаєм.інв.	ІНВ.№ДОУБЛ.	Підп. і Дата
-------------	--------------	------------	-------------	--------------

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дата
-----	-----	----------	-------	------

ТС 23510265

перемішування субстрату, досі залишаються основою галузі, вони не позбавлені недоліків. Зокрема, їх обмеження включають недостатній час утримання субстрату для повного розкладу, труднощі зі стабільністю роботи та недостатню енергетичну продуктивність. Сучасні інженерні рішення спрямовані на вирішення цих проблем, застосовуючи інноваційні підходи до конструкції й функціонування біореакторів. У цьому розділі висвітлюються актуальні вдосконалення, які підвищують ефективність анаеробного зброджування відходів, включаючи вдосконалені фіксовані купольні, трубні та багатостадійні системи.

Фіксовані купольні реактори набули популярності, особливо в сільських регіонах, через їх простоту, доступність і здатність забезпечувати стабільний вихід біогазу. У конструкції передбачено накопичення газу у стаціонарній куполоподібній камері, яка розташована над резервуаром для субстрату. Це знижує потребу в додаткових ємностях для зберігання біогазу та робить конструкцію дешевшою. Проте ранні моделі мали певні технічні недоліки: наприклад, через нерівномірний розподіл тиску виникали витоки газу, що негативно впливало на ефективність.

Значна частина сучасних удосконалень фіксованих купольних реакторів стосується вирішення цих проблем. Використання високоміцних матеріалів, таких як армований бетон, підвищує довговічність конструкцій. Інтеграція сучасних систем герметизації дозволяє мінімізувати витоки. Удосконалення форми купола сприяють витримуванню вищого внутрішнього тиску, що дозволяє зберігати більші об'єми біогазу. Додатково, покращена теплоізоляція сприяє підтримці оптимальних температур навіть у несприятливих кліматичних умовах, що створює стабільне середовище для мікробної активності.

Трубні біореактори забезпечують ефективну переробку твердих сільськогосподарських відходів, таких як гній або солома, завдяки лінійній структурі. Субстрат подається на один кінець горизонтального резервуара і поступово переміщується до іншого кінця, що забезпечує рівномірність процесу

ІНВ. №ГОДЛ.	Підп. і Дата	Взаєм. інв.	ІНВ. №ДУБЛ.	Підп. і Дата
-------------	--------------	-------------	-------------	--------------

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дат
-----	-----	----------	-------	-----

ТС 23510265

розкладу. Цей метод дозволяє уникати змішування нових і частково перероблених матеріалів, що покращує мікробне розщеплення органіки [6].

Подальші інновації в конструкції трубних реакторів включають внутрішні перегородки, які сповільнюють потік субстрату, забезпечуючи повніше розкладання органічної речовини. Використання багатосекційних систем дозволяє розділяти субстрат за стадіями розкладу, що забезпечує точніше налаштування умов для кожної фази. Це, у свою чергу, сприяє підвищенню загальної ефективності системи.

Реактори з безперервним перемішуванням (CSTR) традиційно використовуються для рідких субстратів, таких як рідкий гній чи рослинні соки. Їх перевагою є здатність підтримувати однорідну структуру субстрату й стабільну температуру. Проте попередні конструкції мали проблеми з енергоспоживанням і адаптацією до волокнистих відходів.

Останні розробки CSTR орієнтовані на впровадження новітніх систем перемішування. Наприклад, використання модернізованих мішалок дозволяє досягати кращого розподілу субстрату по всьому резервуару, запобігаючи утворенню застійних зон. Деякі моделі включають газове перемішування, де газові бульбашки, що утворюються під час реакції, створюють природні потоки в резервуарі. Це значно знижує витрати на механічну енергію, водночас підвищуючи рівень виробництва біогазу.

Окрему увагу привертають двостадійні й багатостадійні реактори, які дозволяють оптимізувати весь процес анаеробного зброджування. У таких системах кожна стадія розкладу відбувається в окремому резервуарі, де створюються оптимальні умови для різних груп мікроорганізмів. Це сприяє максимальному розщепленню органіки та більш ефективному метаногенезу.

Багатостадійні системи особливо корисні для складних субстратів. Наприклад, у першій стадії відбувається гідроліз при вищій температурі та кислому середовищі, а в наступних резервуарах підтримується нейтральне середовище для оптимального утворення метану. Такі системи дозволяють

ІНВ. № ДОКУМ.	Підп. і Дата	Взаєм. інв.	ІНВ. № ДОКУБЛ.	Підп. і Дата
---------------	--------------	-------------	----------------	--------------

Вип.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата
------	------	----------	-------	------

ТС 23510265

підвищити вихід біогазу до 30% порівняно з традиційними одностадійними реакторами.

Мембранні технології також набувають популярності. Використання напівпроникних мембран у реакторах сприяє вибіркового утриманню потрібних мікроорганізмів і субстратів, що підвищує продуктивність системи. Це робить анаеробні реактори ефективнішими, стабільнішими та більш універсальними у використанні [25].

### 3.3 Оцінка ефективності та перспективи розвитку технологій біогазу

#### 3.3.1 Оцінка ефективності виробництва біогазу

Ефективність виробництва біогазу є одним із головних показників при впровадженні технологій переробки сільськогосподарських відходів. Цей параметр враховує не лише кількість отриманого біогазу, а й якість його компонентів, таких як метан. Багатофакторний аналіз дозволяє оцінити продуктивність системи, визначити оптимальні умови роботи та внести необхідні корективи для максимального використання потенціалу біогазової технології. У цьому розділі розглядаються основні показники ефективності, фактори, які впливають на результативність систем, а також специфіка управління параметрами для підвищення загальної продуктивності.

Врожайність метану. Метан є основним складником біогазу, формуючи його енергетичну цінність. Кількість метану, яку можна отримати з одиниці органічної сировини, є ключовим показником ефективності системи. Цей параметр визначають у кубометрах метану на тону легких твердих часток (ЛТЧ). ЛТЧ — це частка органічного матеріалу, яка розкладається за допомогою анаеробного бродіння. Висока врожайність метану означає, що система працює з максимальною продуктивністю, але вона залежить від якості сировини, температурного режиму, складу мікроорганізмів та інших чинників.

Інв.№докл.	Підп. і дата	Взаєм.інв.	Інв.№доубл.	Підп. і дата
------------	--------------	------------	-------------	--------------

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дат
-----	-----	----------	-------	-----

ТС 23510265



Наприклад, такі відходи, як гній або харчові залишки, можуть мати різні показники врожайності метану залежно від рівня вологи, доступності органічної складової та хімічного складу. Для покращення цього показника застосовуються методи попередньої обробки відходів, які полегшують доступ мікроорганізмів до органічних компонентів, наприклад, механічне подрібнення, термічна або хімічна обробка.

Час утримання. Гідравлічний час утримання (ГЧУ) визначає тривалість перебування сировини у біореакторі. Він безпосередньо впливає на рівень розкладання органічних речовин і врожайність біогазу. Оптимізація цього параметра є критичною, оскільки занадто короткий час може призвести до неповного перетворення матеріалу, тоді як надмірно довгий збільшує витрати на підтримку реактора. ГЧУ залежить від типу відходів: для легких органічних матеріалів, таких як гній, час утримання може становити 15–30 днів, тоді як для більш складних, наприклад, рослинних залишків, необхідно до 60 днів або більше.

Час утримання тісно пов'язаний із мікробіологічними процесами. Якщо він недостатній, мікроорганізми не встигають повністю розкласти органіку, що призводить до зниження врожайності метану. З іншого боку, занадто довгий час утримання може спричинити накопичення інгібіторів, таких як леткі жирні кислоти (ЛЖК), які пригнічують активність мікроорганізмів.

Органічне навантаження (ОН). ОН визначає кількість органічної сировини, що подається у біореактор за одиницю об'єму на добу. Цей показник вимірюється у кілограмах ЛТЧ на кубічний метр біореактора на день. Високе навантаження може значно підвищити продуктивність системи, але водночас підвищує ризик перевантаження реактора, що призводить до його дестабілізації. Для кожного типу сировини існують свої оптимальні показники ОН. Наприклад, харчові відходи дозволяють використовувати вищі рівні навантаження завдяки високій енергетичній щільності.

Надмірно високе ОН може скоротити час утримання, що унеможливило повний розклад органічних речовин. Це призводить до низької врожайності метану та ризику відмови системи. Натомість надто низьке ОН означає

ІНВ. №ГОДА.	Підп. і дата	Взаєм. інв.	ІНВ. №ДУБЛ.	Підп. і дата
-------------	--------------	-------------	-------------	--------------

Вип.	Арк	№ докум.	Підп.	Дат
------	-----	----------	-------	-----

ТС 23510265



нераціональне використання біореактора, що обмежує загальну ефективність. Тому важливо підтримувати баланс між рівнем органічного навантаження, часом утримання та іншими параметрами.

Зниження летких твердих часток (ЗЛТЧ). ЗЛТЧ є показником того, наскільки ефективно система переробляє органічну сировину. Він вимірює відсоток летких твердих часток, які були перетворені на біогаз. Високе значення ЗЛТЧ свідчить про ефективне розкладання органічних речовин, але воно залежить від типу сировини. Наприклад, відходи, що містять багато лігніну, як-от солома, мають нижчі показники ЗЛТЧ через стійкість до розкладання.

Регулярний моніторинг цього показника дозволяє виявити проблеми, які можуть виникнути під час роботи реактора. Наприклад, недостатній розклад матеріалу може свідчити про проблеми з підготовкою сировини або знижену мікробну активність. Для складних матеріалів застосовуються методи, які покращують біодеградацію, такі як використання ензимів або комбіновані технології переробки.

Операційні та екологічні умови. Температура, рівень рН і баланс поживних речовин значно впливають на продуктивність системи. Анаеробне бродіння проводиться за мезофільних (30–40°C) або термофільних (50–60°C) умов. Мезофільний режим зазвичай забезпечує стабільність, тоді як термофільний дозволяє швидше розкласти органіку, але потребує більше енергії.

Контроль рН є особливо важливим, оскільки відхилення від оптимального діапазону (6.5–7.5) знижує активність мікроорганізмів. Дисбаланс поживних речовин, таких як азот чи фосфор, також може обмежувати ефективність процесу. Тому регулярний аналіз і коригування операційних умов є необхідними для забезпечення стабільності системи.

Досягнення високої ефективності виробництва біогазу залежить від оптимізації ключових параметрів: врожайності метану, часу утримання, органічного навантаження, рівня ЗЛТЧ та операційних умов. Контроль цих факторів дозволяє забезпечити стабільну та продуктивну роботу біогазових систем. Це не лише сприяє сталому управлінню сільськогосподарськими

ІНВ.№ГОДА.	Підп. і Дата
Взаєм.ІНВ.	ІНВ.№ДУБЛ.
Підп. і Дата	Підп. і Дата
ІНВ.№ГОДА.	Підп. і Дата

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дат
-----	-----	----------	-------	-----

ТС 23510265

відходами, але й підтримує розвиток відновлюваної енергетики, зменшуючи викиди парникових газів та сприяючи переходу до кругової економіки.

### 3.3.2 Екологічний та економічний вплив біогазових технологій

Екологічний та економічний вплив біогазових технологій є однією з основних причин їхнього зростаючого впровадження у світі. У сучасному контексті боротьби зі зміною клімату, забезпечення енергетичної безпеки та сталого управління відходами біогазові системи стають важливим елементом екологічної політики та економічного розвитку. Перетворення сільськогосподарських відходів на біогаз через анаеробне бродіння забезпечує комплексні переваги, охоплюючи управління відходами, відновлювану енергетику, сільське господарство та економічний розвиток.

Процес анаеробного бродіння дозволяє ефективно вирішувати екологічні виклики, які виникають у зв'язку з накопиченням відходів. Одним із ключових екологічних аспектів біогазових технологій є їх здатність значно знижувати викиди метану — потужного парникового газу, вплив якого на глобальне потепління у 28-34 рази сильніший за вплив вуглекислого газу. Залишені для розкладу на відкритому повітрі, такі відходи, як гній, залишки врожаю або харчові відходи, сприяють масивним викидам метану в атмосферу. Цей процес не лише впливає на зміну клімату, але й призводить до втрати потенційного енергетичного ресурсу. Біогазові установки дозволяють уникнути цього, забезпечуючи ефективний захват метану та його використання як енергії.

У багатьох країнах світу біогазові технології активно інтегруються у програми боротьби зі зміною клімату. Зменшення метанових викидів, яке досягається завдяки виробництву біогазу, стає одним із способів виконання міжнародних кліматичних угод, таких як Паризька угода. Крім того, використання біогазу як джерела енергії знижує потребу у викопних видах палива, таких як природний газ, вугілля чи нафта, що значно зменшує загальний вуглецевий слід національних енергосистем.

ІНВ. №ГОДА.	ПІДП. І ДАТА	ВЗАЄМ. ІНВ.	ІНВ. №ДУБЛ.	ПІДП. І ДАТА	Вип	Арк	№ ДОКУМ.	ПІДП.	ДАТА	ТС 23510265	Арк
											43

Ще одним важливим екологічним аспектом біогазових технологій є їх внесок у збереження якості ґрунтів і вод. Залишковий матеріал після анаеробного бродіння, відомий як дигестат, багатий на поживні речовини, такі як азот, фосфор і калій. Використання цього матеріалу як органічного добрива замінює синтетичні добрива, які не лише коштовні, але й завдають шкоди навколишньому середовищу. Надмірне використання хімічних добрив спричиняє деградацію ґрунтів, забруднення водоносних горизонтів і навіть евтрофікацію водойм. Натомість дигестат покращує структуру ґрунту, його родючість і водоутримуючі властивості, сприяючи сталому сільському господарству.

Важливою екологічною перевагою біогазових систем також є зменшення забруднення повітря. У багатьох регіонах світу спалювання сільськогосподарських залишків залишається поширеною практикою, яка випускає в повітря шкідливі речовини, такі як тверді частки, монооксид вуглецю та оксиди азоту. Це погіршує якість повітря, особливо в густонаселених регіонах, сприяючи зростанню захворювань дихальної системи. Біогазові технології пропонують альтернативний метод управління відходами, усуваючи необхідність їхнього спалювання.

Крім екологічних вигод, біогазові системи мають вагомий економічний ефект. Одна з ключових переваг — можливість отримання додаткового доходу завдяки виробництву енергії. Біогаз може бути використаний для генерації електроенергії, тепла або навіть як паливо для транспорту. У деяких країнах фермери продають надлишкову електроенергію до загальної мережі за спеціальними тарифами, що забезпечує стабільний дохід. Це особливо важливо для дрібних і середніх фермерських господарств, які стикаються зі зростаючими економічними викликами.

Іншою формою економічної вигоди є зниження витрат на хімічні добрива. Використання дигестату як добрива значно скорочує витрати на придбання синтетичних добрив і сприяє підвищенню рентабельності фермерських операцій. Водночас поліпшення стану ґрунтів за рахунок органічних добрив сприяє збільшенню врожаїв, що додатково покращує економічну ситуацію фермерів.

Підп. і дата
Інв. № док.
Взаєм. інв.
Підп. і дата
Інв. № док.

Вип.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат.
------	------	----------	-------	------

ТС 23510265

Біогазові технології також створюють нові можливості для зайнятості у сільських регіонах. Процеси будівництва, обслуговування та експлуатації біогазових установок потребують кваліфікованих працівників. Це стимулює економічну активність у сільських громадах і сприяє розвитку місцевих ринків праці. Крім того, розвиток супутніх галузей, таких як виробництво біогазового обладнання, транспортування відходів і переробка дигестату, відкриває нові ніші для малого й середнього бізнесу.

Біогазові системи також знижують зовнішні витрати, пов'язані з утилізацією відходів. Замість дорогого видалення відходів на полігонах чи їх спалювання, фермери можуть перетворювати їх на цінний ресурс. Це знижує навантаження на державні системи утилізації відходів і мінімізує екологічні збитки, які виникають унаслідок неправильного управління відходами.

Таким чином, розвиток біогазових технологій є важливим кроком на шляху до сталого розвитку. Вони допомагають вирішити актуальні екологічні виклики, знижуючи викиди парникових газів, зменшуючи забруднення вод і повітря та сприяючи раціональному використанню ресурсів. Водночас економічні переваги біогазу — від створення робочих місць до зниження витрат на енергію й добрива — роблять його привабливим рішенням для багатьох країн і регіонів.

### 3.3.3 Виклики та обмеження впровадження технологій біогазу

Реалізація біогазових технологій для утилізації сільськогосподарських відходів зіштовхується з багатьма викликами, що виникають через поєднання технологічних, економічних, екологічних та соціальних факторів. Ці перешкоди обмежують можливості широкомасштабного застосування біогазових установок і знижують їхню стабільність у довгостроковій перспективі. У цьому розділі буде розглянуто основні бар'єри на шляху впровадження біогазових систем і запропоновано способи їх подолання.

Однією з головних проблем, що впливає на ефективність виробництва біогазу, є неоднорідність сировини. Сільськогосподарські відходи суттєво

ІНВ. №ГОДА.	Підп. і Дата	Взаєм. інв.	ІНВ. №ДУБЛ.	Підп. і Дата
-------------	--------------	-------------	-------------	--------------

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дат
-----	-----	----------	-------	-----

ТС 23510265

відрізняються за своїм складом, вологістю, рівнем біорозкладу та поживними характеристиками. Наприклад, солома різних культур, як-от кукурудза, пшениця чи рис, містить різний вміст целюлози, лігніну та інших органічних сполук, що безпосередньо впливає на швидкість їх розкладу й обсяг виробленого біогазу. Подібно до цього, гній тварин значно варіюється за складом залежно від виду тварин, раціону їхнього харчування, а також методів збору й зберігання відходів.

Ця варіативність сировини є серйозним викликом для операторів біогазових станцій. Мікробіологічні спільноти, що забезпечують процес анаеробного бродіння, чутливо реагують на зміни хімічного складу відходів. Це може призводити до операційних проблем, таких як зменшення виходу газу, подовження часу ферментації чи навіть повного припинення роботи реакторів. Для запобігання таким ситуаціям оператори змушені використовувати методи попередньої обробки сировини, як-от механічне подрібнення, термічна обробка або хімічна деструкція складних органічних сполук. Хоча ці методи дозволяють підвищити біодеградабельність матеріалів і стабілізувати процес виробництва біогазу, вони є енергоємними, складними в реалізації та потребують значних інвестицій.

Ще однією серйозною перешкодою є високі стартові витрати на будівництво та обладнання біогазових станцій. Інфраструктура, необхідна для виробництва біогазу, включає біореактори, системи змішування, насоси, пристрої для збору та очищення газу, а також резервуари для зберігання. Усе це потребує значних капіталовкладень, що є великою проблемою для малих фермерських господарств, особливо у країнах, що розвиваються. Навіть великі агропромислові підприємства часто не готові до таких витрат, оскільки фінансова віддача від біогазових проектів може бути повільною або недостатньою.

Крім високих капітальних витрат, експлуатація біогазових станцій також є досить витратною. Анаеробне бродіння вимагає суворого контролю за такими параметрами, як температура, рівень рН і стан мікробіологічних спільнот. Потрібні регулярні перевірки та оптимізація, щоб уникнути проблем, пов'язаних із зниженням продуктивності. У разі поломок обладнання або збоїв у процесі

Інв. №ГОДА.	Підп. і Дата	Взаєм. інв.	Інв. №ДУБЛ.	Підп. і Дата
-------------	--------------	-------------	-------------	--------------

Вип.	Арк	№ докум.	Підп.	Дата
------	-----	----------	-------	------

ТС 23510265



ферментації витрати на ремонт можуть бути значними, що знижує рентабельність таких проектів.

Технологічні складнощі також стосуються вибору відповідного типу біореактора. Існує кілька основних видів реакторів: реактори з постійним змішуванням, реактори із зафіксованим шаром матеріалу та реактори з потоком типу "пробка". Кожен із цих типів має свої переваги й недоліки залежно від типу сировини, масштабів виробництва й особливостей місцевості. Правильний вибір і налаштування біореактора вимагають глибоких технічних знань і досвіду. Відсутність кваліфікованих спеціалістів, особливо в сільських регіонах, може бути додатковою перешкодою для розвитку біогазових технологій.

Економічна життєздатність біогазових проектів значною мірою залежить від ринкових умов. У багатьох країнах ціни на біогаз і супутні продукти, як-от біодобрива, залишаються низькими, що знижує фінансові стимули для інвестування в цю галузь. Крім того, у регіонах із субсидованими традиційними джерелами енергії біогазові проекти не можуть конкурувати за ціною. Це особливо проблематично в умовах, коли сільськогосподарські відходи мають сезонний характер, що спричиняє перерви у виробництві газу.

Державна підтримка також часто є недостатньою. У багатьох країнах політика підтримки відновлюваних джерел енергії є обмеженою або не охоплює біогазові технології. Навіть якщо субсидії чи пільги доступні, вони часто не покривають високі початкові витрати. Без належної підтримки з боку урядів біогазові проекти залишаються нерентабельними для більшості потенційних інвесторів.

Окрім економічних і технологічних проблем, існують екологічні ризики, пов'язані з біогазовими технологіями. Зокрема, витіки метану під час транспортування або зберігання газу є серйозною загрозою для довкілля. Метан, будучи потужним парниковим газом, може значно посилити негативний вплив біогазових проектів у разі неналежного управління.

Соціальні фактори також відіграють важливу роль. Місцеві громади можуть скептично ставитися до біогазових проектів через побоювання щодо забруднення,

Інв. Нагтодл.	Підп. і Дата	Взаєм. Інв.	Інв. Нагтодл.	Підп. і Дата
---------------	--------------	-------------	---------------	--------------

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дат
-----	-----	----------	-------	-----

ТС 23510265



шуму або неприємного запаху. Це може спричинити опір з боку населення, що уповільнює впровадження нових технологій.

Регуляторні бар'єри додають ще більше ускладнень. У багатьох країнах бракує чітких правил, які б регулювали процес утилізації відходів і виробництва біогазу. Така правова невизначеність створює ризики для інвесторів, ускладнюючи розвиток проектів.

Окрім того, відсутність інтегрованих систем збору та транспортування відходів є значною проблемою. У багатьох регіонах сільськогосподарські відходи залишаються невикористаними через брак інфраструктури. Вирішення цієї проблеми потребує значних фінансових вкладень і координації на рівні урядів та приватного сектору.

Таким чином, хоча біогазові технології мають значний потенціал, їхнє впровадження ускладнене через численні бар'єри. Для подолання цих викликів потрібні скоординовані зусилля, що включають фінансову підтримку, технічні інновації та активну участь урядів і громад.

### 3.3.4 Моделювання економічного ефекту для фермерських господарств

Моделювання економічного ефекту від застосування біогазових технологій у фермерських господарствах є важливим етапом для визначення фінансової обґрунтованості та переваг впровадження таких систем. Це дозволяє не лише ухвалювати рішення щодо інвестування в біогазові установки, але й оцінювати їхній внесок у стале сільське господарство.

Процес економічного моделювання повинен враховувати ключові чинники, що впливають на витрати та доходи, пов'язані з виробництвом біогазу. До витрат належать початкові інвестиції, експлуатаційні витрати та витрати на технічне обслуговування. Доходи формуються за рахунок економії енергії, продажу її надлишків і використання побічних продуктів, таких як дигестат [30].

Початкові капіталовкладення є значною складовою витрат фермерських господарств. Вони охоплюють витрати на придбання чи будівництво біогазових

Інв. №ГОДА.	Підп. і Дата	Взаєм. інв.	Інв. №ДУБЛ.	Підп. і Дата	TC 23510265	Арк
						48
Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дат		

систем, до складу яких входять анаеробні метантенки, сховища для газу, установки для очищення та інше допоміжне обладнання. Конкретний обсяг інвестицій залежить від обраної конструкції системи. Наприклад, метантенки з фіксованим куполом є більш доступними для невеликих господарств, тоді як сучасні реактори зі змішуванням (CSTR) потребують більших вкладень, проте підходять для масштабних проєктів.

Додаткові витрати включають підготовку ділянки, будівельні роботи та інтеграцію нових систем у вже наявну інфраструктуру господарства. Наприклад, для забезпечення ефективного управління сировиною необхідно встановити системи збору відходів, а також створити підключення до енергетичної мережі для розподілу енергії.

Експлуатаційні витрати охоплюють постійні витрати, такі як оплата праці, споживання енергії для допоміжного обладнання, використання води та попередня обробка сировини. Автоматизація системи може значно скоротити потребу в ручному втручанні, однак вимагає більшого початкового фінансування.

Технічне обслуговування включає регулярний контроль і ремонт обладнання. Це передбачає, наприклад, видалення осаду з метантенків чи очищення газу, аби забезпечити оптимальний вміст метану в отриманому біогазі.

Доходи є одним із ключових показників економічної доцільності біогазових систем. Основний дохід забезпечується генерацією енергії, що дозволяє знижувати витрати на електроенергію та паливо. Надлишок енергії може продаватися в мережу, особливо якщо діють державні програми підтримки відновлюваних джерел енергії [5Error! Reference source not found.].

Додаткові доходи утворюються за рахунок використання дигестату як органічного добрива. Цей продукт містить поживні речовини, які знижують потребу в хімічних добривах та покращують якість ґрунтів. Продаючи дигестат іншим господарствам, фермери створюють додаткове джерело доходу [20].

Комплексний аналіз витрат і доходів є важливим для оцінки рентабельності біогазових систем. Окупність інвестицій, тобто період, необхідний для повернення вкладених коштів, є одним із головних показників. Зазвичай строк

Інв. № докл.	Підп. і дата	Взаєм. інв.	Інв. № докл.	Підп. і дата
--------------	--------------	-------------	--------------	--------------

Вип.	Арк	№ докум.	Підп.	Дат
------	-----	----------	-------	-----

ТС 23510265

окупності може становити від 5 до 8 років, залежно від вартості сировини, тарифів на енергію та доступних субсидій.

Фінансові показники, такі як чиста приведена вартість (NPV) і внутрішня норма рентабельності (IRR), дозволяють моделювати довгострокову прибутковість інвестицій. NPV дає змогу оцінити загальну вартість доходів і витрат, тоді як IRR показує очікуваний відсоток прибутку [40].

Вагому роль у фінансовій перспективі відіграють державні стимули. Субсидії на початкові інвестиції, податкові пільги на відновлювану енергію та інші заходи стимулювання знижують фінансові ризики. Крім того, фермери можуть скористатися пільговими кредитами чи грантами.

Аналіз сценаріїв є важливим інструментом для економічного моделювання. Він дозволяє оцінити, як зміна окремих факторів, наприклад, цін на енергію або доступності сировини, вплине на економічні результати. Аналіз чутливості допомагає визначити найважливіші змінні та розробити стратегії для зменшення ризиків.

Масштабованість біогазових систем також має значення. Їх можна адаптувати як для невеликих ферм, так і для великих аграрних підприємств. Великі системи забезпечують економію на масштабі, знижуючи собівартість виробництва.

Загалом, біогазові системи сприяють зменшенню залежності від зовнішніх енергетичних джерел, скороченню витрат на утилізацію відходів і покращенню родючості ґрунтів. Такі технології забезпечують не лише фінансову, а й екологічну стабільність фермерських господарств.

### 3.3.5 Енергетичний баланс біогазових систем

Енергетичний баланс біогазових систем є важливим індикатором їх ефективності, сталості та доцільності використання в практичних умовах. Цей баланс визначає співвідношення енергії, яка виробляється у процесі отримання біогазу, до енергії, що витрачається на всі етапи технологічного процесу:

Інв. №ГОДА.	Підп. і Дата	Взаєм. інв.	Інв. №ДУБЛ.	Підп. і Дата
-------------	--------------	-------------	-------------	--------------

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дата
-----	-----	----------	-------	------

ТС 23510265

збирання та транспортування сировини, її обробку, підтримання оптимальних умов у реакторі, очищення біогазу, а також кінцеву утилізацію побічних продуктів. Якщо енергетичний баланс позитивний, це означає, що система забезпечує вироблення більшої кількості енергії, ніж споживає, що свідчить про її екологічну, технічну та економічну ефективність [14Error! Reference source not found.].

Основним джерелом енергії в біогазових системах є метан, що утворюється під час анаеробного зброджування органічних відходів. Отриманий біогаз може використовуватись у різних цілях: виробництво електроенергії, генерація тепла, застосування як палива для транспорту або як сировина для хімічної промисловості після очищення до стандартів природного газу. Ефективність використання біогазу значною мірою залежить від вибраної технології. Наприклад, комбіновані теплоелектростанції (КТЕ) дозволяють одночасно генерувати тепло та електроенергію, досягаючи загальної енергоефективності на рівні 80-90%. Це дозволяє мінімізувати втрати енергії та максимально використовувати потенціал біогазу [27Error! Reference source not found.].

Процес виробництва біогазу включає кілька енерговитратних етапів:

1. Збір і транспортування сировини – ці операції часто потребують значних енергетичних ресурсів, особливо якщо сировина розташована на віддалених фермах або має високий об'єм.
2. Попередня обробка сировини – залежно від типу відходів, може використовуватися механічне подрібнення, хімічна обробка чи ферментативний гідроліз. Ці процеси підвищують доступність органічної речовини для мікроорганізмів, але одночасно збільшують енерговитрати.
3. Підтримання оптимальних умов у реакторі – у реакторі необхідно контролювати температуру, рН, а також забезпечувати перемішування. Наприклад, термофільні системи потребують більше енергії для обігріву, ніж мезофільні, хоча забезпечують вищий вихід метану.
4. Очищення газу – перед використанням біогаз часто потребує видалення домішок, таких як сірководень, вуглекислий газ та водяна пара. Сучасні

Інв.№гтодл.	Підп. і дата	Взаєм.інв.	Інв.№дубл.	Підп. і дата
-------------	--------------	------------	------------	--------------

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дат
-----	-----	----------	-------	-----

ТС 23510265

технології, як-от мембранна сепарація чи адсорбція при зміні тиску, підвищують якість газу, але потребують додаткової енергії.

Склад і якість сировини є важливими факторами для енергетичного балансу. Органічні відходи з високим вмістом біологічно розкладних компонентів, як-от гній, рослинні залишки чи харчові відходи, забезпечують високий вихід біогазу. Натомість відходи з високим вмістом лігніну чи целюлози потребують додаткової обробки, яка збільшує витрати енергії. Застосування технологій ко-зброджування, коли різні типи сировини змішуються, може значно покращити енергетичний баланс. Наприклад, поєднання гною з енергетичними культурами, такими як кукурудзяний силос, підвищує вихід метану й зменшує відносні енерговитрати.

Одним із важливих елементів оптимізації енергетичного балансу є утилізація теплової енергії, що утворюється під час роботи біогазової установки. У багатьох системах отримане тепло спрямовується на підтримання температури в реакторі, що дозволяє знизити зовнішні енерговитрати. У деяких випадках надлишкове тепло може використовуватися для обігріву теплиць, будівель чи інших місцевих об'єктів, що додатково підвищує загальну ефективність.

Розмір установки також суттєво впливає на енергетичний баланс. Великі біогазові установки зазвичай досягають вищої енергоефективності завдяки економії масштабу. Вони можуть використовувати сучасне обладнання та інтегрувати різноманітні процеси, що мінімізує втрати енергії. У той же час малі установки, які зазвичай застосовуються на фермах, мають обмежені можливості для впровадження високотехнологічних рішень і можуть стикатися з труднощами в досягненні позитивного енергетичного балансу.

Географічне розташування та клімат також суттєво впливають на енергетичний баланс біогазової системи. У регіонах із холодним кліматом значна частина енергії витрачається на обігрів реактора. У теплих регіонах потреба в додатковому обігріві менша, що природно покращує енергетичну ефективність.

Для комплексної оцінки енергетичного балансу часто використовуються інструменти аналізу життєвого циклу (LCA). Вони враховують усі прямі та

ІНВ.№ГОДА.	Підп. і Дата	Взаєм.ІНВ.	ІНВ.№ДУБЛ.	Підп. і Дата
------------	--------------	------------	------------	--------------

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дат
-----	-----	----------	-------	-----

ТС 23510265



непрямі енерговитрати, включаючи енергетичні витрати на виробництво обладнання, будівництво установки та використання допоміжних матеріалів, таких як ферменти чи хімікати. Застосування LCA дозволяє визначити найбільш енерговитратні етапи й розробити стратегії для їх оптимізації.

Подальші інновації у сфері технологій біогазу можуть значно покращити енергетичний баланс. Наприклад, інтеграція відновлюваних джерел енергії, таких як сонячні панелі для живлення допоміжного обладнання, дозволить зменшити залежність від зовнішніх джерел енергії. Крім того, розвиток нових методів попередньої обробки сировини й технологій очищення газу сприятиме підвищенню ефективності систем [39Error! Reference source not found.].

Отже, енергетичний баланс біогазових систем є багатограним і залежить від багатьох факторів: типу сировини, технологічного процесу, масштабів виробництва та кліматичних умов. Оптимізація кожного етапу процесу є ключовою для досягнення високої ефективності та стійкості цих систем, що робить їх важливим компонентом сталого розвитку.

### 3.4 Впровадження технології отримання біогазу на агропідприємстві

#### 3.4.1 Аналіз підприємства та ресурсів для виробництва біогазу

В якості прикладу для впровадження технології отримання біогазу із відкритих джерел було обрано ТОВ "Ремавтокомплект-сервіс". ТОВ "Ремавтокомплект-сервіс" є агропідприємством, розташованим у Конотопському районі Сумської області. Основним видом діяльності є вирощування сільськогосподарських культур, зокрема соняшнику, на площі 600 га. Соняшник є однією з провідних культур у регіоні, яка забезпечує значні обсяги сировини, що утворює відходи під час збору врожаю та переробки.

Враховуючи специфіку діяльності підприємства, воно є перспективним об'єктом для впровадження технології виробництва біогазу. Серед переваг можна виділити:

Підп. і дата
Інв. № док.
Взаєм. інв.
Підп. і дата
Інв. № док.

Вип.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата
------	------	--------	-------	------

ТС 23510265

- Велику площу оброблюваних земель, що гарантує стабільний обсяг відходів;
- Можливість утилізації рослинних залишків (стерні, стебел, лушпиння), які є придатними для анаеробного збродження;
- Логістичну доступність, оскільки підприємство розташоване поблизу основних транспортних шляхів, що спрощує доставку обладнання та матеріалів.

Типи сільськогосподарських відходів. Під час вирощування та переробки соняшнику на ТОВ "Ремавтокомплект-сервіс" утворюються такі основні види відходів:

1. Стерня та стебла: залишаються в полі після збору врожаю. Їх кількість становить 1,5–2 рази більше маси насіння.
2. Лушпиння: утворюється під час переробки насіння на олію. Це легкий матеріал, який складає до 30% маси насіння.
3. Інші залишки рослинного походження: бур'яни, залишки невикористаних частин рослин тощо.

Загальна кількість відходів від обробки соняшнику можна оцінити наступним чином:

Врожайність насіння соняшнику становить 2,5–3 т/га. для розрахунку обираємо найменший показник. Площа становить 600 га

- Загальний урожай насіння:

$$600\text{га} \times 2,5 \frac{\text{т}}{\text{га}} = 1500\text{т}, \quad (3.1)$$

- Маса стерні та стебел:

$$1500\text{т} \times 1,5 = 2250\text{т}, \quad (3.2)$$

- Маса лушпиння:

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Взаєм. інв.	
Підп. і дата	
Інв. № год.	

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дат
-----	-----	----------	-------	-----

ТС 23510265

Арк

54

$$1500\text{т} \times 0,3 = 450\text{т}, \quad (3.3)$$

Загальна кількість доступних відходів: 2700 т.

Потенціал виробництва біогазу. Відходи соняшнику є багатим джерелом целюлози та геміцелюлози, що робить їх ефективною сировиною для виробництва біогазу. Потенційний вихід біогазу з загального об'єму відходів можна оцінити наступним чином:

- Вихід біогазу: 105 – 120 м<sup>3</sup>/т. [47]
- Загальний обсяг біогазу ( $Q_{\text{заг}}$ ):

$$Q_{\text{заг}} = 2700\text{т} \times 105\text{м}^3/\text{т} = 283500\text{м}^3, \quad (3.4)$$

Розрахунки зведені в таблицю (таб. 3.1):

Таблиця 3.1 – Аналіз ресурсів підприємства ТОВ "Ремавтокомплект-сервіс"

Показник	Величина
Врожайність насіння соняшнику для Сумської області (т/га)	2,5
Площа оброблюваних земель (га)	600
Загальний врожай насіння (т)	1500
<b>Кількість відходів</b>	
Маса стебел та стерні (т)	2250
Маса лушпиння (т)	450
Загальний кількість відходів (т)	2700
<b>Потенціал виробництва біогазу</b>	
Вихід біогазу з відходів соняшника (м <sup>3</sup> /т)	105
Загальний обсяг біогазу (м <sup>3</sup> )	283500
Час збродження (при мезофільному режимі) (діб)	25
Швидкість утворення біогазу (м <sup>3</sup> /добу)	11340

1. Екологічні переваги:

- Зниження викидів парникових газів шляхом утилізації відходів.
- Зменшення забруднення повітря та ґрунту.
- Використання дигестату (залишків після ферментації) як добрива для сільськогосподарських угідь.

Підп. і дата
Інв. № дубл.
Взаєм. інв.
Підп. і дата
Інв. № год.

Вип.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат.
------	------	----------	-------	------

ТС 23510265

Арк

55

## 2. Економічна вигода:

- Заміна частини викопного палива біогазом.
- Зменшення витрат на утилізацію відходів.
- Потенційний продаж надлишкової електроенергії чи тепла.

ТОВ "Ремавтокомплект-сервіс" має значний потенціал для впровадження біогазової технології. Великі обсяги сільськогосподарських відходів, географічна доступність і стабільна діяльність підприємства створюють сприятливі умови для побудови біогазової установки. Це рішення не лише сприятиме підвищенню екологічної стійкості, а й забезпечить додаткове джерело доходу для підприємства.

### 3.4.2 Технологічний процес і необхідне обладнання

Біогаз, отриманий у процесі, складається переважно з метану (50–70%) та вуглекислого газу (30–50%), а також незначних кількостей водяної пари, сірководню та інших домішок.

Основні етапи виробництва біогазу:

#### 1. Підготовка сировини:

- Попередня обробка для забезпечення оптимальної біодоступності.
- Подрібнення рослинних залишків до розміру 10–50 мм для збільшення площі контакту мікроорганізмів із субстратом.
- Змішування з водою чи іншими органічними матеріалами для досягнення необхідної вологості (60–70%).

#### 2. Анаеробне зброджування:

- Герметичне середовище реактора забезпечує відсутність кисню.
- Процес складається з чотирьох стадій: гідроліз, ацидогенез, ацетогенез і метаногенез.
- Оптимальна температура для реакції: мезофільний режим (35–38 °С) або термофільний (50–55 °С).

Інв.№гтоад.	Підп. і дата	Взаєм.інв.	Інв.№дубл.	Підп. і дата						Арк
					ТС 23510265					56
Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дат						

### 3. Збір та очищення біогазу:

- Відокремлення домішок (сірководню, водяної пари).
- Очищений біогаз зберігається в газгольдерах або використовується безпосередньо.

### 4. Утилізація залишків (дигестату):

- Використання дигестату як органічного добрива завдяки його високому вмісту поживних речовин.

Сировина, отримана з сільськогосподарських відходів, піддається декільком видам обробки:

- Механічне подрібнення: зменшення розмірів частинок для полегшення доступу мікроорганізмів.
- Зволоження: досягнення оптимальної консистенції шляхом додавання води.
- Змішування: якщо доступні різні типи відходів, їх змішують для забезпечення балансу вмісту вуглецю та азоту (C:N = 20–30:1).

Біогаз, отриманий у процесі, містить домішки, такі як сірководень та водяну пару. Для їх видалення використовують фільтри (наприклад, з активованим вугіллям) або спеціальні мембранні системи. Очищений біогаз накопичується у газгольдерах і далі використовується для виробництва енергії або як паливо.

Після завершення процесу в реакторі залишається дигестат, що є багатим на азот, фосфор і калій. Його використовують як екологічно безпечне добриво.

Обладнання для біогазового комплексу:

- Подрібнювачі. забезпечують механічну обробку сировини, зменшуючи розмір частинок до необхідного рівня.
- Реактори (метантенки). Вертикальні чи горизонтальні ємності з герметичними кришками оснащені системами підігріву та перемішування.
- Системи подачі сировини. Конвеєрні лінії для завантаження органічної маси.
- Газгольдери. Резервуари для зберігання біогазу.
- Очищувальні системи. фільтри для видалення сірководню, мембранні або адсорбційні установки для видалення CO<sub>2</sub>.

Інв. №ГОДА.	Підп. і Дата
Взаєм. інв.	Інв. №ДУБЛ.
Підп. і Дата	Підп. і Дата
Вип.	Арк
№ докум.	Підп.
Дата	

ТС 23510265

Арк

57



- Когенераційні установки. Генератори для виробництва електроенергії та тепла з біогазу.

Впровадження сучасного обладнання дозволяє підвищити ефективність виробництва біогазу, мінімізуючи вплив на довкілля. Використання когенераційних систем сприяє зменшенню залежності від викопного палива, водночас забезпечуючи підприємство додатковою енергією. Таким чином для ТОВ "Ремавтокомплект-сервіс" пропонується наступна схема когенераційної установки з використанням біогазу (рис. 3.3).

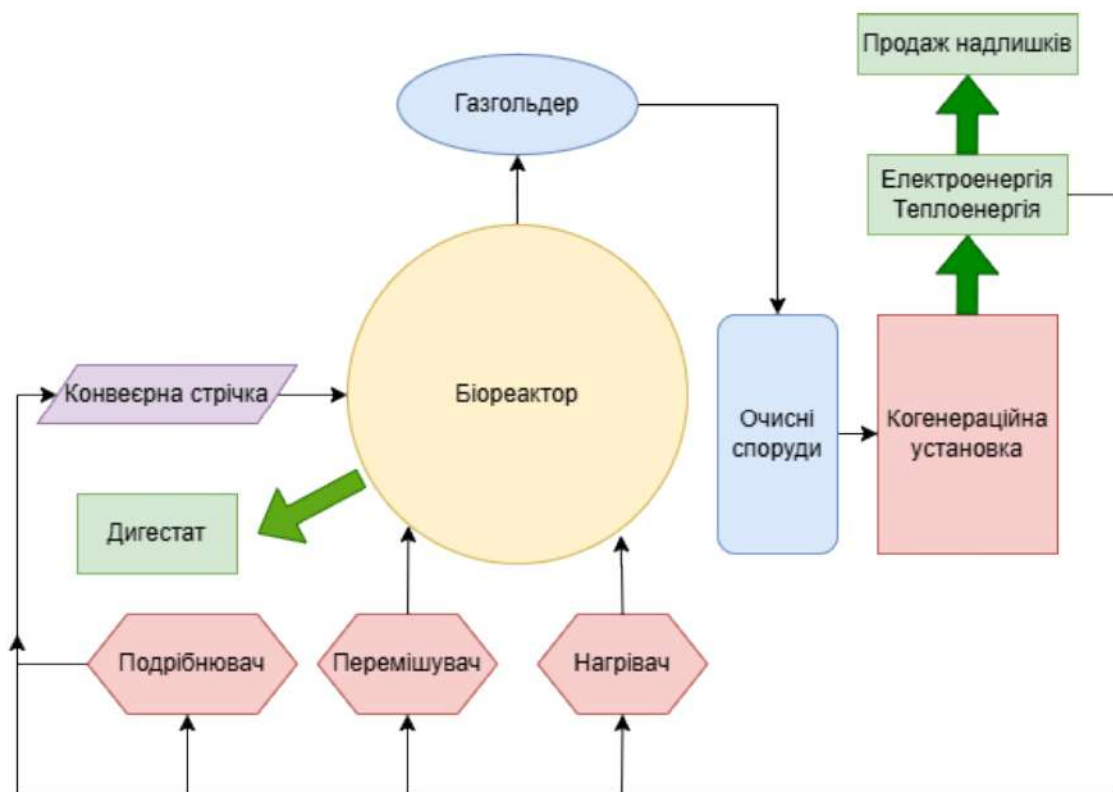


Рисунок 3.3 – Схема запропонованої когенераційної установки з використанням біогазу

Технологічний процес виробництва біогазу є оптимальним рішенням для утилізації сільськогосподарських відходів. Обладнання, необхідне для цього, дозволяє адаптувати систему до умов конкретного підприємства, зокрема ТОВ "Ремавтокомплект-сервіс". Це сприяє підвищенню енергетичної незалежності підприємства та екологічної безпеки регіону.

### 3.4.3 Економічні та екологічні аспекти

#### 3.4.3.1 Економічні аспекти впровадження технології біогазу

Для впровадження біогазової установки в інфраструктуру підприємства необхідно провести економічний розрахунок доцільності такого впровадження. Запропоновані в рчій роботі розрахунки мають приблизний характер, сформованих на основі відкритих джерел і можуть бути використані як орієнтовний план для представлення власниу ТОВ "Ремавтокомплект-сервіс". Конкретні цифри будуть повністю залежати від побажань та вимог власника підприємства. Серед основних витрат на будівництво біогазової установки можна виділити: інвестиційні, операційні, транспортні витрати, заробітна плата працівникам, та ін.

Інвестиційні витрати. Будівництво біогазового комплексу вимагає значних капіталовкладень. Основні витрати включають:

- Будівництво реактора (метантенка): залежно від обсягу та типу конструкції ціна може варіюватися від 800 до 1500 євро за кубометр корисного об'єму. Для ТОВ "Ремавтокомплект-сервіс" пропонується використання схеми біореактора об'ємом 50 м<sup>3</sup>. з підігрівом та перемішувачем, приблизно 75 тис. євро.
- Закупівля допоміжного обладнання. Пропонується закупівля подрібнювача, насосів, систем подачі сировини (конвеєрної стрічки), газгольдера, очищувальних фільтрів, когенераційної установки. Орієтовна вартість такого обладнання становить 200–400 тис. євро.
- Інженерні та монтажні роботи: витрати на проектування, встановлення та введення в експлуатацію приблизно оцінюються у 26 тис. євро.

Операційні витрати. Щоденна робота біогазової установки супроводжується такими витратами:

Інв. №ГОДЛ.	Підп. і Дата	Взаєм. інв.	Інв. №ДУБЛ.	Підп. і Дата
-------------	--------------	-------------	-------------	--------------

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дат
-----	-----	----------	-------	-----

ТС 23510265

- Сировина: використання власних відходів сільського господарства мінімізує витрати. Також можливе залучення відходів сусідніх підприємств.
- Енергія для роботи обладнання: зокрема насосів та систем нагрівання. У процесі виробництва та споживання біогазу установка використовує тепло й електроенергію власного генерування, що мінімізує витрати.
- Технічне обслуговування: заміна деталей, очищення систем, оновлення програмного забезпечення.

Вцілому операційні витрати залежать від конкретного проєкту біогазової установки, тому орієнтовно можна закласти їх вартість на рік як 10% від інвестиційних витрат.

Транспортні витрати. Якщо сировина для біогазової установки знаходиться за межами підприємства, потрібно врахувати витрати на транспортування:

- Доставка відходів до установки. Це стосується як органічних залишків виробництва, так і інших типів сировини.
- Вивіз дигестату. У разі використання побічного продукту як добрива потрібно організувати його транспортування до місця зберігання або використання.

Заробітна плата персоналу. Для роботи біогазової системи потрібен навчений персонал. Це можуть бути:

- Оператори біогазової установки. Вони контролюють процес зброджування, моніторять параметри та вносять корективи.
- Технічні спеціалісти. Відповідають за обслуговування обладнання та усунення несправностей.

В залежності від побажань підприємства додаткові витрати на заробітну плату можуть становити приблизно 15 тис. євро. Розраховано залучення додатково 3 осіб.

До інших витрат належать:

- Купівля реагентів. Для очищення газу від сірководню або корекції рН субстрату.

Інв. Нагод.	Підп. і Дата
Взаєм. інв.	Підп. і Дата
Інв. Нагод.	Підп. і Дата

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дат
-----	-----	----------	-------	-----

ТС 23510265

- Комунальні витрати. Споживання води для роботи системи або додавання її до субстрату для досягнення потрібної консистенції.
- Адміністративні витрати. Витрати на звітність, ліцензування або юридичну підтримку.

Також розраховуються орієнтовно на рік як 5% від інвестиційних витрат.

Розрахунки зведені в таблицю (таб. 3.2):

Таблиця 3.2 – Розрахунок орієнтованих капіталовкладень для будівництва біогазової установки

Капіталовкладення	Сума (євро)
Будівництво реактора	75000
Допоміжне обладнання	300000
Інженерні та монтажні роботи	26000
Загалом інвестицій	401000
Операційні витрати	40100
Заробітна плата	15000
Інші витрати	20050
<b>Річні витрати</b>	<b>75150</b>

#### 3.4.3.2 Економічні вигоди

1. Зменшення витрат на утилізацію відходів: Традиційні способи утилізації відходів (спалювання або вивезення на полігони) є дорогими і часто екологічно шкідливими. Використання відходів для виробництва біогазу усуває ці витрати.
2. Генерація енергії: Біогаз може використовуватися для виробництва електроенергії або тепла. Для підприємства ТОВ "Ремавтокомплект-сервіс", з потенціалом виробництва як мінімум 283,5 тис. м<sup>3</sup> біогазу на рік, енергетична вигода може бути розрахована наступним чином. В середньому співвідношення вироблення електричної та теплової енергії залежить від конкретної когенераційної установки та її ККД. Так при ККД когенераційної установки 85% ефективність електричної генерації складає 35%, теплової – 50%. Знаючи приблизне середнє значення калорійності біогазу виробленого

Інв. №ГОДЛ.	Підп. і дата	Взаєм. інв.	Інв. №ДУБЛ.	Підп. і дата
-------------	--------------	-------------	-------------	--------------

Вип.	Арк	№ докум.	Підп.	Дат
------	-----	----------	-------	-----

ТС 23510265

із відходів соняшника (20-25 МДж/м<sup>3</sup>.) [46], можна визначити об'єм виробленої електричної та теплової енергії на рік.

Загальна енергія біогазу:

$$E_{\text{заг}} = C_{\text{біог}} * Q_{\text{заг}} = 20 * 283500 = 5670000 \text{ МДж}, \quad (3.5)$$

Вихід електричної енергії:

$$E_{\text{ел}} = E_{\text{заг}} * 35\% = 5670000 * 0,35 = 1984500 \text{ МДж}, \quad (3.6)$$

Вихід теплової енергії:

$$E_{\text{теп}} = E_{\text{заг}} * 50\% = 5670000 * 0,5 = 2835000 \text{ МДж}, \quad (3.7)$$

Або в кВт·год:

$$E_{\text{ел}} = \frac{1984500}{3.6} = 551250 \text{ кВт} \cdot \text{год}, E_{\text{теп}} = \frac{2835000}{3.6} = 787500 \text{ кВт} \cdot \text{год}, \quad (3.8)$$

Продаж надлишкової енергії: Згідно з "зеленим тарифом" в Україні, продаж електроенергії з відновлюваних джерел є додатковим джерелом доходу.

При тарифі 0,146 євро/кВт·год за електроенергію прибуток становить:

$$P_{\text{ел}} = E_{\text{ел}} * 0.146 = 551250 * 0.146 = 80482 \text{ євро на рік}, \quad (3.9)$$

При тарифі 0,086 євро/кВт·год за теплову енергію прибуток становить:

$$P_{\text{теп}} = E_{\text{теп}} * 0.086 = 787500 * 0.086 = 67725 \text{ євро на рік}, \quad (3.10)$$

Загальний прибуток, за умови повного продажу отриманої енергії:

Підп. і дата
Інв. № дубл.
Взаєм. інв.
Підп. і дата
Інв. № год.

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дат
-----	-----	----------	-------	-----

ТС 23510265

Арк

62



$$P_{\text{пов}} = E_{\text{теп}} + E_{\text{ел}} = 80482 + 67725 = 148207 \text{ євро на рік,} \quad (3.11)$$

3. Отримання субсидій: Відновлювана енергетика підтримується державними програмами, що передбачають субсидії або пільгове кредитування для впровадження біогазових технологій.
4. Термін окупності. За оцінками, термін окупності біогазового комплексу складає 5–7 років, залежно від масштабів виробництва та ефективності використання ресурсів. Загалом окупність розраховується як:

$$T_{\text{окуп}} = \frac{\text{Інвестиції}}{\text{Чистий річний прибуток}}, \quad (3.12)$$

або

$$T_{\text{окуп}} = \frac{\text{Інвестиції}}{\text{річний прибуток} - \text{річні витрати}}, \quad (3.13)$$

Отже маємо:

$$T_{\text{окуп}} = \frac{401000}{148207 - 75150} = 5,49 \text{ років,} \quad (3.14)$$

Розрахунки зведені в таблицю (таб. 3.3):

Таблиця 3.3 – Розрахунок вироблення електричної та теплової енергії, визначення окупності установки

Розрахунок вироблення електричної та теплової енергії	Величина
Калорійність біогазу (МДж/м³)	20
Загальна енергія біогазу (МДж)	5670000
Ефективність електричної генерації	0,35
Ефективність теплової генерації	0,5
Електрична енергія (МДж)	1984500
Теплова енергія (МДж)	2835000
Електрична енергія (кВт*год)	551250
Теплова енергія (кВт*год)	787500
Тариф на електроенергію (євро за кВт*год)	0,146
Прибуток від продажу електроенергії (євро на рік)	80482,5
Тариф на теплову енергію (євро за кВт*год)	0,086
Прибуток від продажу теплової енергії (євро на рік)	67725
Загальний прибуток (євро на рік)	148207,5
Термін окупності (років)	5,49

Інв. № год. д. л.	Підп. і дата	Взаєм. інв.	Інв. № дубл.	Підп. і дата	TC 23510265				Арк
									63
Вип.	Арк	№ докум.	Підп.	Дат					

## РОЗДІЛ 4

### ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

#### 4.1 Ідентифікація небезпек та оцінка ризиків

Робота біогазових установок завжди пов'язана з певними ризиками, тому визначення потенційних небезпек і правильна оцінка ризиків є основою для забезпечення безпеки працівників і стабільної роботи обладнання. Урахування всіх можливих загроз дозволяє вжити превентивних заходів, які мінімізують ризики аварійних ситуацій.

Основними небезпеками на біогазових установках є гази, що утворюються під час анаеробного бродіння, високий тиск, температура та біологічні фактори. Метан, що є основним продуктом такого бродіння, відрізняється високою легкозаймистістю. У разі витoku він може створити вибухонебезпечну суміш із повітрям, яка при найменшій іскрі здатна спричинити потужний вибух. Сірководень, інший побічний продукт, є вкрай токсичним і може завдати значної шкоди здоров'ю працівників навіть у невеликих концентраціях. Крім того, робота установок у режимах високих температур і тисків підвищує ризик поломок обладнання, які можуть призвести до витоків або механічних пошкоджень.

Існують також біологічні небезпеки. Анаеробне бродіння передбачає участь мікроорганізмів, які можуть бути небезпечними при контакті зі шкірою чи вдиханні їхніх спор. Особливо ризикованими є ситуації, коли порушується герметичність системи.

Щоб ефективно управляти цими загрозами, проводять детальний аналіз небезпек. Першим етапом є визначення основних ризиків, які можуть виникнути під час експлуатації. Наприклад, до типових аварійних ситуацій належать витoki газів з трубопроводів або резервуарів, пожежі через займання метану, вибухи при накопиченні горючих газів у замкнених приміщеннях, а також вихід з ладу системи вентиляції чи охолодження.

ІНВ. №ГОДА.	Підп. і дата	Взаєм. інв.	ІНВ. №ДУБЛ.	Підп. і дата
-------------	--------------	-------------	-------------	--------------

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дат
-----	-----	----------	-------	-----

ТС 23510265

Арк

64

Після визначення потенційних загроз оцінюється їхній вплив. Наприклад, витік метану може викликати не лише пожежу, але й спричинити тривале забруднення навколишнього середовища. Сірководень при високих концентраціях небезпечний для життя, а поломки обладнання можуть спричинити значні фінансові втрати через зупинку роботи.

Для оцінки ризиків застосовують різні методи. Наприклад, матриця ризику допомагає визначити пріоритетність небезпек, класифікуючи їх за імовірністю та тяжкістю наслідків. Аналіз небезпечних видів робіт (JSA) передбачає розбиття процесів на окремі завдання з подальшим аналізом ризиків для кожного з них. Використання методу "що-якщо" дозволяє обговорити з працівниками можливі сценарії розвитку подій та врахувати їхній досвід для виявлення прихованих загроз.

Важливим етапом є документування результатів ідентифікації небезпек. Усі знайдені ризики фіксуються в спеціальних звітах, що включають опис потенційних загроз, імовірність їхнього виникнення, можливі наслідки та перелік заходів для їхнього усунення. Це може включати регулярні перевірки герметичності обладнання, впровадження систем моніторингу газів, проведення навчальних програм для персоналу та розробку чітких інструкцій дій у разі аварій.

Особливу увагу приділяють запобіжним заходам. Регулярне обслуговування реакторів, налаштування вентиляційних систем і контроль рівня газів дозволяють уникати більшості критичних ситуацій. Крім того, навчання працівників допомагає їм бути підготовленими до можливих аварій.

Таким чином, ідентифікація небезпек і оцінка ризиків — це не просто бюрократичний процес. Це системний підхід, який захищає працівників, зберігає ресурс обладнання та забезпечує ефективність роботи установки.

#### 4.2 Типи потенційних надзвичайних ситуацій на біогазових установках

Виробництво біогазу пов'язане з обробкою органічної сировини, яка піддається анаеробному бродінню, у результаті чого утворюється метан та інші

Інв. №ГОДА.	Підп. і Дата	Взаєм. інв.	Інв. №ДУБЛ.	Підп. і Дата
-------------	--------------	-------------	-------------	--------------

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дат
-----	-----	----------	-------	-----

ТС 23510265

гази. Цей процес має високий ризик через властивості утворених речовин, а також складність технологічного обладнання. Будь-яке порушення в роботі установок може призвести до аварій, що становлять небезпеку для здоров'я працівників, роботи обладнання та навколишнього середовища.

До основних типів надзвичайних ситуацій на біогазових установках належать:

1. Витоки газів. У процесі виробництва біогазу утворюється метан, який є горючим і вибухонебезпечним. Витоки можуть виникати через несправності в системах зберігання або транспортування газу, пошкодження трубопроводів чи порушення герметичності реакторів. Небезпека витоків полягає у створенні вибухонебезпечної суміші газу з повітрям. Крім метану, токсичний сірководень також може накопичуватися у приміщеннях, витісняючи кисень і створюючи загрозу отруєння для персоналу.

2. Пожежі та вибухи. Метан та інші горючі гази можуть легко загорітися або вибухнути за наявності джерела запалювання. Небезпека пожежі зростає у випадку витоків газів у приміщеннях із недостатньою вентиляцією або через несправність електрообладнання. Вибухи мають катастрофічні наслідки, спричиняючи руйнування обладнання, травми працівників і значні матеріальні втрати.

3. Перегрів і перевищення тиску. Біогазові реактори працюють під високими температурою та тиском, що потрібні для оптимального анаеробного бродіння. У разі несправності систем охолодження або перевищення допустимого рівня тиску може статися розрив реакторів чи трубопроводів. Це може спричинити як витоки газів, так і механічні пошкодження обладнання та загрозу травм для працівників.

4. Несправність систем вентиляції. Вентиляція має критичне значення для запобігання накопиченню газів у робочій зоні. У разі виходу з ладу вентиляційних систем концентрація токсичних і вибухонебезпечних газів може швидко досягти небезпечного рівня. Це створює ризик вибуху, пожежі або отруєння працівників.

ІНВ. №ГОДА.	ПІДП. І ДАТА	ВЗАЄМ. ІНВ.	ІНВ. №ДУБЛ.	ПІДП. І ДАТА
-------------	--------------	-------------	-------------	--------------

Вип	Арк	№ ДОКУМ.	Підп.	Дат
-----	-----	----------	-------	-----

ТС 23510265

5. Електричні несправності. На біогазових установках використовуються численні електроприлади, які керують роботою обладнання. Короткі замикання, перевантаження або пошкодження ізоляції можуть стати причиною пожежі чи вибуху у разі витоків газу.

6. Екологічні аварії. У разі пошкодження резервуарів для зберігання сировини чи біомаси можливі витoki рідких відходів, які можуть забруднити ґрунт і водойми. Такі аварії мають значний вплив на екологію і потребують тривалого процесу очищення та рекультивації.

Кожен із цих видів надзвичайних ситуацій може мати різний рівень небезпеки, але всі вони потребують чітких і швидких дій для мінімізації наслідків. Розуміння природи цих ситуацій і розробка відповідних протоколів допомагають зменшити ризики.

Запобігання надзвичайним ситуаціям включає регулярне обслуговування обладнання, контроль герметичності систем, використання сучасних технологій для моніторингу стану газів та проведення навчання персоналу. Це дозволяє підтримувати безпечні умови праці та уникати серйозних аварій на виробництві.

#### 4.3 Вимоги до засобів індивідуального захисту (ЗІЗ)

Біогазові установки є об'єктами підвищеної небезпеки, де працівники щодня стикаються з ризиками. Для забезпечення їхнього захисту використовуються засоби індивідуального захисту (ЗІЗ), які спрямовані на зниження впливу небезпечних факторів. Вибір і правильне використання ЗІЗ мають вирішальне значення для створення безпечних умов праці.

Основні види ЗІЗ на біогазових установках включають:

- Засоби захисту органів дихання (респіратори, протигази). Вони необхідні для захисту від токсичних газів, таких як сірководень і вуглекислий газ, а також від пилу та інших забруднень повітря.

ІНВ.№ГОДА.	Підп. і Дата	Взаєм.ІНВ.	ІНВ.№ДУБЛ.	Підп. і Дата
------------	--------------	------------	------------	--------------

Вип.	Арк.	№ док.ум.	Підп.	Дат.

ТС 23510265



- Засоби захисту очей та обличчя (захисні окуляри, екрани, маски). Вони запобігають потраплянню крапель агресивних рідин або дрібних часток, що можуть травмувати очі чи шкіру обличчя.

- Засоби захисту слуху (шумозахисні навушники, вкладиші). Вони знижують вплив високого рівня шуму, який може викликати зниження слуху або дискомфорт.

- Захист рук і шкіри (рукавички, захисний спецодяг, креми). Вони захищають від контакту з агресивними речовинами, високих температур чи механічних пошкоджень.

- Захисне взуття. Спеціальне взуття з протиковзкою підшвою та міцними носками зменшує ризик травмування в разі падіння важких предметів.

- Засоби запобігання падінню (страхувальні ремені, пояси). Вони потрібні для робіт на висоті.

Правильний підбір ЗІЗ базується на оцінці ризиків і специфіці виконуваних робіт. Наприклад, для захисту від сірководню необхідно використовувати протигазу з відповідними фільтрами, а для робіт із гарячими поверхнями — рукавички зі стійких до високих температур матеріалів.

Використання ЗІЗ регламентується вимогами, які забезпечують їхню ефективність:

- Перевірка перед використанням. Усі ЗІЗ мають бути оглянуті на предмет пошкоджень чи дефектів.

- Дотримання інструкцій. ЗІЗ повинні використовуватися відповідно до рекомендацій виробника, щоб забезпечити максимальний захист.

- Правильне зберігання. Засоби захисту слід зберігати в умовах, які не порушують їхніх експлуатаційних властивостей (наприклад, уникати надмірної вологості чи впливу прямих сонячних променів).

Ефективне застосування ЗІЗ залежить не тільки від їхньої якості, але й від рівня обізнаності працівників. Навчання персоналу включає практичні заняття, що демонструють, як правильно користуватися ЗІЗ, а також інструктажі, які пояснюють, чому важливо дотримуватися правил безпеки. Регулярні тренінги

ІНВ.№ГОДА.	Підп. і Дата	Взаєм.ІНВ.	ІНВ.№ДУБЛ.	Підп. і Дата
------------	--------------	------------	------------	--------------

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дат
-----	-----	----------	-------	-----

ТС 23510265

допомагають оновлювати знання працівників, особливо якщо на підприємстві вводяться нові види ЗІЗ або змінюється технологічний процес.

Особливу увагу слід приділяти таким аспектам:

- Респіратори й протигази. Вибір і заміна фільтрів мають здійснюватися відповідно до рівня концентрації газів у робочій зоні. Для герметичності респіратора важливо правильно його надягати.
- Захисні окуляри та екрани. Вони мають бути ударостійкими та не обмежувати поле зору.
- Шумозахисні навушники. Вони повинні знижувати рівень шуму до безпечного, не викликаючи дискомфорту під час тривалого використання.
- Рукавички. Їхній матеріал має відповідати характеру ризиків: хімічний захист, теплоізоляція чи механічна стійкість.
- Взуття. Воно повинно бути міцним, з протиковзкими підошвами і захистом для пальців.

ЗІЗ потребують регулярного обслуговування та своєчасної заміни. Керівництво підприємства має забезпечувати доступ до якісних засобів захисту, проводити огляди та організовувати навчання працівників.

#### 4.4 Планування реагування на надзвичайні ситуації

Ефективне планування реагування на надзвичайні ситуації на біогазових установках є ключовим елементом забезпечення безпеки. Оскільки робота з горючими та токсичними газами пов'язана з високими ризиками, наявність чітких процедур і готовність персоналу до дій у кризових умовах є критично важливими для запобігання людським жертвам і зменшення матеріальних втрат.

Процес планування реагування починається з ідентифікації потенційних надзвичайних ситуацій. До таких належать витoki газів, пожежі, вибухи, несправності систем вентиляції та електрообладнання, а також екологічні аварії. Для кожного з цих ризиків розробляються окремі протоколи реагування, які враховують специфіку ситуації та наявне обладнання.

ІНВ.№ГОДА.	Підп. і Дата	Взаєм.ІНВ.	ІНВ.№ДУБЛ.	Підп. і Дата
------------	--------------	------------	------------	--------------

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дат
-----	-----	----------	-------	-----

ТС 23510265

Евакуаційні плани є центральною частиною підготовки до надзвичайних ситуацій. Усі працівники повинні знати маршрути евакуації, які мають бути чітко позначені і регулярно перевірятися на доступність. Місця збору після евакуації повинні бути організовані на безпечній відстані від виробничих об'єктів. Для забезпечення ефективності евакуації проводяться регулярні тренування, під час яких персонал відпрацьовує свої дії у разі загрози.

Системи оповіщення забезпечують швидке інформування працівників про небезпеку. Це можуть бути звукові або світлові сигнали, що запускаються автоматично при спрацюванні датчиків, або ручні системи оповіщення. Крім того, важливо мати резервні засоби зв'язку, наприклад, радіостанції або мобільні телефони, для координації дій у разі аварії.

Особливу увагу приділяють наявності та готовності аварійного обладнання. Це включає вогнегасники, протигази, аварійні душові установки, аптечки та інші засоби для першої допомоги. Усе обладнання повинно розташовуватися у доступних місцях, мати чітке маркування і регулярно перевірятися на справність.

Крім обладнання, важливою частиною планування є тренування персоналу. Працівники повинні бути добре ознайомлені з процедурами реагування на аварії. Це включає не лише теоретичні знання, але й практичні навички, такі як використання протигазів, гасіння пожеж або надання першої допомоги.

Після кожного тренування або реального випадку аварії проводиться аналіз ефективності заходів. Це дозволяє визначити, які аспекти плану працюють добре, а які потребують доопрацювання. Наприклад, можуть бути змінені маршрути евакуації, додане нове обладнання чи проведені додаткові навчання для персоналу.

Планування реагування на надзвичайні ситуації на біогазових установках охоплює широкий спектр заходів — від створення детальних протоколів і тренувань персоналу до забезпечення готовності аварійного обладнання і взаємодії з екстреними службами. Цей комплексний підхід дозволяє мінімізувати ризики для людей, обладнання та навколишнього середовища.

ІНВ.№ГОДА.	Підп. і Дата
Взаєм.ІНВ.	ІНВ.№ДУБЛ.
Підп. і Дата	Підп. і Дата

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дат
-----	-----	----------	-------	-----

ТС 23510265

## ВИСНОВКИ

У результаті аналізу технологічних рішень утилізації сільськогосподарських відходів із виробництвом біогазу можна зробити кілька важливих висновків. Анаеробне зброджування зарекомендувало себе як ефективний метод переробки органічних відходів, що дозволяє одночасно отримувати відновлювальну енергію та знижувати екологічний вплив від накопичення сільськогосподарських залишків. Цей процес дає можливість не лише утилізувати відходи, але й отримувати біогаз, який може бути використаний для виробництва електроенергії, тепла чи як паливо для транспорту. Крім того, побічний продукт цього процесу — дигестат — є цінним органічним добривом, що сприяє підвищенню родючості ґрунтів і зменшенню залежності від хімічних добрив.

Сучасні інновації у сфері виробництва біогазу, такі як сухе анаеробне зброджування, термофільні технології та біоелектрохімічні системи, дозволяють значно підвищити ефективність і рентабельність цього процесу. Зокрема, сухе анаеробне зброджування є оптимальним для сировини з високим вмістом твердих речовин, а термофільні технології забезпечують швидше перетравлення органічних залишків та зниження ризиків поширення патогенів. Біоелектрохімічні системи, у свою чергу, відкривають можливості для отримання не лише біогазу, а й додаткових цінних продуктів, таких як водень, підвищуючи загальну стійкість та економічну вигоду процесу.

Екологічна значущість виробництва біогазу є очевидною, оскільки цей метод дозволяє зменшити викиди парникових газів, які утворюються внаслідок неконтрольованого розкладання органічних відходів. Завдяки анаеробному зброджуванню метан, що є потужним парниковим газом, перетворюється на відновлювальне джерело енергії, що сприяє зниженню вуглецевого сліду сільськогосподарської діяльності. Окрім того, використання дигестату як

Інв. № докл.	Підп. і дата	Взаєм. інв.	Інв. № дубл.	Підп. і дата	ТС 23510265	Арк
						71
Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дат		

органічного добрива допомагає повернути поживні речовини до ґрунту, що підтримує принципи циркулярної економіки.

Разом із екологічними перевагами, виробництво біогазу має значний економічний потенціал. Використання біогазу для задоволення енергетичних потреб сільськогосподарських підприємств дозволяє знизити витрати на енергоресурси, а надлишкову енергію можна продавати, створюючи додатковий дохід. Це робить біогазові установки привабливими для інвестицій, особливо за умови доступу до державних субсидій і пільг для відновлюваної енергетики.

Попри переваги, впровадження біогазових технологій стикається з низкою викликів, таких як високі початкові витрати, необхідність спеціалізованих знань для обслуговування установок та варіативність складу сировини. Ці проблеми потребують розробки інноваційних рішень, які забезпечать зниження витрат і підвищення ефективності систем. Водночас перспективи масштабування біогазових технологій та їх інтеграція з іншими методами переробки, такими як піроліз чи газифікація, відкривають нові можливості для досягнення сталого управління відходами.

Таким чином, виробництво біогазу із сільськогосподарських відходів є одним із найбільш перспективних напрямів сталого розвитку аграрного сектору. Воно забезпечує одночасне вирішення екологічних, енергетичних і економічних проблем, сприяючи зниженню негативного впливу сільського господарства на довкілля, підвищенню енергетичної незалежності фермерських господарств та розвитку місцевих громад. Подальші дослідження мають бути спрямовані на вдосконалення технологій, підвищення їхньої доступності та розробку інтегрованих підходів до утилізації відходів, що сприятиме ефективному впровадженню цих рішень у різних регіонах.

Інв. №ГОДА.	Підп. і Дата	Взаєм. інв.	Інв. №ДУБЛ.	Підп. і Дата
-------------	--------------	-------------	-------------	--------------

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дат
-----	-----	----------	-------	-----

ТС 23510265



## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Acién G., Gómez-Serrano C., Fernández-Sevilla J. M. Recovery of Nutrients From Wastewaters Using Microalgae // *Bioresource Technology*. – 2021. – Vol. 319. – Article ID 124215. – DOI: 10.1016/j.biortech.2020.124215.

2. Adnan A. I., Ong M. Y., Nomanbhay S., Chew K. W., Show P. L. Technologies for Biogas Upgrading to Biomethane: A Review // *Environmental Technology & Innovation*. 2019. T. 15. DOI: 10.1016/j.eti.2019.100388.

3. Afolalu S. A., et al. Bio-Agro Waste Valorization and its Sustainability in the Industry: A Review // *Environmental Science and Pollution Research*. 2020. T. 27, № 5. С. 5560–5576. DOI: 10.1007/s11356-020-07681-9.

4. Allegue, L. D., Puyol, D., Melero, J. A. Novel approach for the treatment of the organic fraction of municipal solid waste: Coupling thermal hydrolysis with anaerobic digestion and photo-fermentation // *Science of the Total Environment*. 2020. Vol. 714. Article No. 136845. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.136845.

5. Angelidaki I., Treu L., Tsapekos P., Luo G., Campanaro S., Wenzel H., Kougias P. G. Biogas Upgrading and Utilization: Current Status and Perspectives // *Biotechnology Advances*. 2018. T. 36, № 2. С. 452–466. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2018.01.011.

6. Anyanwu R. C., Rodríguez C., Durrant A., Olabi A. G. Micro-Macroalgae Properties and Applications // *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. – 2018. – Elsevier. – DOI: 10.1016/B978-0-12-803581-8.09259-6.

7. Appels L., Baeyens J., Degreève J., Dewil R. Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge // *Progress in Energy and Combustion Science*. 2008. Vol. 34, No. 6. P. 755–781. DOI: 10.1016/j.peccs.2008.06.002.

8. Arenas C. B., Pesantes A. A., Carpio E. P., Torres E. J. M., Gómez X. Anaerobic Digestion for Producing Renewable Energy—The Evolution of This Technology in a New Uncertain Scenario // *Entropy*. 2021. T. 23, № 2. С. 145. DOI: 10.3390/e23020145.

Піап. і дста
Інв. № дубл.
Взаєм. інв.
Піап. і дста
Інв. № товл.

Вип	Арк	№ докум.	Піап.	Дат
-----	-----	----------	-------	-----

*TC 23510265*

9. Armah E., Armah T. Biogas Production from Anaerobic Digestion: A Systematic Review // International Journal of Advanced Research. 2017. T. 5, № 11. C. 495–505. DOI: 10.21474/IJAR01/5871.

10. Arthur, R., Baidoo, M. F., Antwi, E. Biogas as a Potential Renewable Energy Source: A Ghanaian Case Study // Renewable Energy. 2011. Vol. 36, No. 5. P. 1510–1516. DOI: 10.1016/j.renene.2010.11.012.

11. Baredar P., Suresh S., Kumar A., Krishnakumar P. A Review on Enhancement of Biogas Yield by Pre-treatment and Addition of Additives // MATEC Web of Conferences. 2016. T. 62. C. 06002. DOI: 10.1051/mateconf/20166206002.

12. Bhowmick G. D., Sarmah A. K. Pertinent Issues of Algal Energy and Bio-Product Development: A Biorefinery Perspective // Biofuels, Bioproducts and Biorefining. – 2021. – Vol. 15, No. 2. – P. 456–472. DOI: 10.1002/bbb.2198.

13. Chen, P., Zhou, J., Zhang, Y., Wu, J., Lin, C. Utilization of municipal solid and liquid wastes for bioenergy and bioproducts production // Bioresource Technology. 2018. Vol. 265, pp. 292–298. DOI: 10.1016/j.biortech.2018.03.055.

14. Ellacuriaga M., García-Cascallana J., Gómez X. Biogas Production from Organic Wastes: Integrating Concepts of Circular Economy // Fuels. 2021. T. 2, №2. C. 144–167. DOI: 10.3390/fuels2020009.

15. Erşahin, M. E., Özgün, H., Dereli, R. K., Öztürk, İ. Anaerobic Treatment of Industrial Effluents: An Overview of Applications // In: García, F. S. (Ed.) Waste Water - Treatment and Reutilization. Rijeka: IntechOpen, 2011. P. 3–28. DOI: 10.5772/20953.

16. Grangeiro L. C., Almeida S. G. C. D., Mello B. S. D., Fuess L. T., Sarti A., Dussán K. J. New trends in biogas production and utilization // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2020. T. 128. DOI: 10.1016/j.rser.2020.109864.

17. Guran, S. Sustainable Waste-to-Energy Technologies: Gasification and Pyrolysis // Trabold, T.A., Babbitt, C.W. (Eds.). Sustainable Food Waste-to-Energy Systems. Cambridge: Academic Press, 2018. pp. 141–158. ISBN 9780128111574.

18. Inyinbor A. A., Oluyori A. P., Adelani-Akande T. A. Biomass Valorization: Agricultural Waste in Environmental Protection, Phytomedicine, and Biofuel

Підп. і дата
Інв. № дубл.
Взам. інв.
Підп. і дата
Інв. № товл.

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дат
-----	-----	----------	-------	-----

TC 23510265

Production // Biomass Volume Estimation and Valorization for Energy. InTech, 2017. DOI: 10.5772/66102.

19. J. H. Martin, A. Kiss. A Protocol for Quantifying and Reporting the Performance of Anaerobic Digestion Systems for Livestock Manures. U.S. Environmental Protection Agency, AgSTAR Program. Washington, DC, 2011.

20. Kapoor R., Ghosh P., Kumar M., Sengupta S., Gupta A., Kumar S. S., Vijay V., Kumar V., Vijay V. K., Pant D. Valorization of Agricultural Waste for Biogas-Based Circular Economy in India: A Research Outlook // Bioresource Technology. 2021. T. 304. C. 123036. DOI: 10.1016/j.biortech.2020.123036.

21. Khoo C. G., Dasan Y. K., Lam M. K., Lee K. T. Algae biorefinery: Review on a broad spectrum of downstream processes and products // Bioresource Technology. – 2019. – Vol. 292. – Article 121964. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.121964.

22. Korbag I., Omer S. M. S., Boghazala H., Abusasiyah M. A. Recent Advances of Biogas Production and Future Perspective // Energy. 2021. T. 237. C. 121524. DOI: 10.1016/j.energy.2021.121524.

23. Koszel M., Lorencowicz E. Agricultural Use of Biogas Digestate as a Replacement Fertilizer // Agriculture. 2020. T. 10, № 9. DOI: 10.3390/agriculture10090434.

24. Luo, T., Shen, B., Mei, Z. Unlocking the Potential of Biogas Systems for Energy Production and Climate Solutions in Rural Communities // Nature Communications. 2024. July.

25. M. N. Uddin, J. T. Hossen, M. A. Sayed, S. A. Shetu, M. M. Hossain. Prospects of Bioenergy Production from Organic Waste Using Anaerobic Digestion Technology: A Mini Review // Journal of Cleaner Production, vol. 321, pp. 129065, 2021. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.129065.

26. Manyi-Loh C., Mamphweli S., Meyer E. L., Okoh A. I., Makaka G., Simon M. Microbial Anaerobic Digestion (Bio-Digesters) as an Approach to the Decontamination of Animal Wastes in Pollution Control and the Generation of Renewable Energy // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2020. T. 120. C. 109608. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109608.

Підп. і дата
Інв. № дубл.
Взам. інв.
Підп. і дата
Інв. № докл.

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дат
-----	-----	----------	-------	-----

TC 23510265

Арк  
75

27. Maurya R., Tirkey S. R., Rajapitamahuni S., Ghosh A., Mishra S. Recent Advances and Future Prospective of Biogas Production // Bioresource Technology Reports. 2020. T. 11. DOI: 10.1016/j.biteb.2020.100532.

28. Moretti P., Araujo J. M. D., Castilhos A. B. D., Buffière P., Gourdon R., Bayard R. Characterization of Municipal Biowaste Categories for Their Capacity to Be Converted Into a Feedstock Aqueous Slurry to Produce Methane by Anaerobic Digestion // Waste Management. 2022. T. 137. C. 168–179. DOI: 10.1016/j.wasman.2021.11.021.

29. Neves L. C. M. D., Converti A., Penna T. C. V. Biogas Production: New Trends for Alternative Energy Sources in Rural and Urban Zones // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2020. T. 128. DOI: 10.1016/j.rser.2020.109865.

30. Ng H. S., Kee P. E., Yim H. S., Chen P., Wei Y., Lan J. C. Recent advances on the sustainable approaches for conversion and reutilization of food wastes to valuable bioproducts // Bioresource Technology. – 2021. – Vol. 333. – Article ID 125070. – DOI: 10.1016/j.biortech.2021.125070.

31. Oppong G., Montague G., Elaine B., FReNg M. O. Towards Model Predictive Control on Anaerobic Digestion Process // Processes. 2023. T. 11, № 2. DOI: 10.3390/pr11020045.

32. Quej C., Mayol A. P., Juan J., Ubando A. T., Culaba A. B. Multi-objective optimal synthesis of algal biorefineries toward a sustainable circular bioeconomy // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2020. – Vol. 463, No. 1. – Article ID 012051. – DOI: 10.1088/1755-1315/463/1/012051.

33. Ramesh, D., Muniraj, I. K., Thangavelu, K., Karthikeyan, S. Chemicals and Fuels Production from Agro Residues: A Biorefinery Approach // Springer Proceedings in Energy: Advances in Biofuels and Bioproducts. Springer, 2020. pp. 143–162. DOI: 10.1007/978-981-13-3868-5.

34. Sapci Z., Ilter F. Evaluation of Anaerobic Treatability of Between Cotton and Polyester Textile Industry Wastewater // Journal of Hazardous Materials. 2021. T. 419. C. 126495. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.126495.

Підп. і дата
Інв. № док.
Взам. інв.
Підп. і дата
Інв. № док.

Вип	Арк	№ док.	Підп.	Дат
-----	-----	--------	-------	-----

TC 23510265

35. Singh B., Szamosi Z., Siménfalvi Z. State of the Art on Mixing in an Anaerobic Digester: A Review // Renewable Energy. 2019. T. 141. C. 922–936. DOI: 10.1016/j.renene.2019.04.072.

36. Singhanian R. R., Patel A. K., Pandey A. Biotechnology for Agricultural Waste Recycling // Current Developments in Biotechnology and Bioengineering. 2017 P. 223-240. DOI:10.1016/B978-0-444-63664-5.00010-1.

37. Tagne R. F. T., Dong X., Anagho S. G., Kaiser S., Ulgiati S. Technologies, Challenges, and Perspectives of Biogas Production Within an Agricultural Context: The Case of China and Africa // Energy Reports. 2022. T. 8. C. 1196–1215. DOI: 10.1016/j.egyr.2022.07.110.

38. Tsegaye B., Jaiswal S., Jaiswal A. K. Food Waste Biorefinery: Pathway towards Circular Bioeconomy // Foods. – 2021. – Vol. 10, No. 6. – Article 1174. DOI: 10.3390/foods10061174.

39. Ubando A. T., Rosario A. J. R. D., Chen W., Culaba A. B. A State-of-the-Art Review of Biowaste Biorefinery // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2022. T. 152. C. 111651. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111651.

40. Valenti F., Liao W., Porto S. M. Life Cycle Assessment of Agro-Industrial By-Product Reuse: A Comparison Between Anaerobic Digestion and Conventional Disposal Treatments // Green Chemistry. 2020. T. 22. C. 7119–7139. DOI: 10.1039/D0GC01918

41. Van Lier, J. B. High-rate anaerobic wastewater treatment: diversifying from end-of-the-pipe treatment to resource-oriented conversion techniques // Water Science and Technology. 2008. Vol. 57, No. 8. P. 1137–1148. DOI: 10.2166/wst.2008.040.

42. Voicu G., Dincă M., Paraschiv G., Moiceanu G. A Review Regarding the Biogas Production Through Anaerobic Digestion of Organic Waste // Sustainability. 2024. T. 16, № 9. C. 3617. DOI: 10.3390/su16093617.

43. Wang J. Decentralized Biogas Technology of Anaerobic Digestion and Farm Ecosystem: Opportunities and Challenges // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2020. T. 132. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110037.

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Взам. інв.	
Підп. і дата	
Інв. № товл.	

Вип.	Арк	№ докум.	Підп.	Дат
------	-----	----------	-------	-----

TC 23510265



44. Гелетуха Г.Г., Железна Т.А Перспективи використання відходів сільського господарства для виробництва енергії в Україні // Аналітична записка БАУ №7. 2014. С. 33

45. Електронний ресурс: <https://sungoldsolar.com/uk/how-solar-and-net-metering-work-a-diagrammatic-guide/>

46. Електронний ресурс: <https://saf.org.ua/news/1230/>

47. Електронний ресурс: <https://agrobiogas.com.ua/raw-material-for-biogas/>

48. Креативний простір України та світу: кол. моногр. – Харків: СГ НТМ «Новий курс», 2022. – 264 с.

ІНВ. №ГОДА.	Підп. і дата	Взаєм. інв.	ІНВ. №ДУБЛ.	Підп. і дата	ТС 23510265	Арк
						78
Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дат		