

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

**Механіко – технологічний факультет**

**ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ**

**Завідувач кафедри**

охорони праці та біотехнічних систем у  
тваринництві

(назва кафедри)

д.т.н., проф. \_\_\_\_\_ Хмельовський В.С.

(підпис)

(ПІБ)

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2025 р.

**МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**на тему:** «Обґрунтування технології та вибір обладнання отримання біогазу з відходів тваринництва з використанням косубстратів»

Спеціальність – 208 «Агроінженерія»

Освітня програма – Агроінженерія

Орієнтація освітньої програми – освітньо-професійна

**Гарант освітньої програми**

д.т.н., професор

(науковий ступінь та вчене звання)

\_\_\_\_\_ (підпис)

**Братішко В.В.**

(ПІБ)

**Керівник магістерської роботи**

професор

\_\_\_\_\_

**Поліщук В. М.**

Виконав

\_\_\_\_\_

**Кулик Б.О.**

**Київ – 2025 р.**

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Механіко – технологічний факультет

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри

охорони праці та біотехнічних систем у тваринництві

д.т.н., проф. \_\_\_\_\_ Хмельовський В.С.  
(наук. ступінь, вчене звання) (підпис) (ПІБ)  
“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2025 р.

**ЗАВДАННЯ**  
на виконання кваліфікаційної роботи магістранту

**Кулику Богдану Олександровичу**

Спеціальність – 208 «Агроінженерія»

Освітня програма – Агроінженерія

Орієнтація освітньої програми – освітньо-професійна

Тема магістерської роботи “ Обґрунтування технології та вибір обладнання отримання біогазу з відходів тваринництва з використанням косубстрактів ”

Затверджена наказом ректора НУБіП України від "13" листопада 2024 р. за № 2038 "С".

**Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи:**

Аналітичні і статистичні огляди щодо розвитку твердопаливних виробництв. Технічна і технологічна документація на процеси виготовлення твердих видів палива. Науково-практичні розробки стосовно виробничого процесу та параметрів брикетного преса з розробленням засобів колективного захисту працівників.

Термін подання завершеної роботи на кафедру – 01.10.2024 року.

**Перелік питань, які потрібно розробити в розрахунково-пояснювальній записці**

1. Аналіз сучасного стану проблеми та обґрунтування напрямків досліджень
2. Теоретичне обґрунтування конструктивних параметрів обладнання для виготовлення паливних брикетів
3. Програма та методика проведення експериментальних досліджень
4. Результати експериментальних досліджень технологічного процесу формування паливних брикетів
5. Засоби колективного захисту
6. Економічна ефективність використання обладнання для виготовлення паливних брикетів

**Перелік обов'язкових слайдів презентації**

Дата видачі завдання 14.02.2024 р.

Керівник магістерської роботи \_\_\_\_\_ Поліщук В. М.

Завдання прийняв до виконання \_\_\_\_\_ Кулик Б.О.

## АНОТАЦІЯ

Випускна кваліфікаційна робота магістра: сторінок – 76, рис. – 17 табл. – 7, література – 18.

**Перелік ключових слів:** біогаз, відходи тваринництва, метаногенез, метантенк, біогазова установка, зброджування

**Мета роботи** – обґрунтувати та вибрати умови технології отримання біогазу з відходів тваринництва. Для досягнення мети поставлено **такі завдання:** визначити найбільш ефективні види відходів тваринництва для виробництва біогазу, провести аналіз їх доступності; проаналізувати етапи анаеробного бродіння та їх параметри, температуру, вологість, рН; охарактеризувати гній ВРХ і силос кукурудзи як сировину для виробництва біогазу.

**Об’єкт дослідження** – відходи тваринництва.

**Предмет дослідження** – процес їх переробки за допомогою анаеробного зброджування.

Кваліфікаційна робота магістра складається з таких розділів:

**Розділ 1.** Здійснено огляд вихідної сировини та технологій утилізації відходів тваринництва та продуктів метаболізму .

**Розділ 2.** Визначені об’єкти, охарактеризовані методи дослідження. Обґрунтовані параметри роботи метантенка в мезофільному і термофільному періодичному режимах зброджування та визначені методи визначення фізико-хімічних показників.

**Розділ 3.** Теоретично обґрунтований та експериментально перевірений процес утилізації відходів тваринництва із застосуванням анаеробної технології зброджування, наведена характеристика активного мулу для одержання біогазу із застосуванням анаеробної технології.

**Розділ 4.** Наведено правила безпеки та обов’язкові вимоги для роботи в лабораторії. Здійснено аналіз потенційно небезпечних та шкідливих факторів.

**Розділ 5.** Розкрито поняття захисту населення і територій у разі загрози або виникнення надзвичайних ситуацій (НС).

## ЗМІСТ

	Сторінки
<b>ВСТУП.....</b>	<b>5</b>
<b>РОЗДІЛ 1. ХАРАКТЕРИСТИКА ВІДХОДІВ ТВАРИННИЦТВА ТА ПРОДУКТІВ ЇХ КАТАБОЛІЗМА</b>	<b>7</b>
1.1. Еколого-економічна необхідність в біогазі.....	7
1.2. Характеристика відходів тваринництва .....	14
1.3. Характеристика продуктів метаболізму	17
Висновки до першого розділу.....	22
<b>РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБЛАДНАННЯ.....</b>	<b>23</b>
2.1. Механічні методи інтенсифікації технологічних процесів.....	23
2.2. Біологічні методи інтенсифікації технологічних процесів.....	30
Висновки до другого розділу.....	32
<b>РОЗДІЛ 3. ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА БІОГАЗУ З ВІДХОДІВ ТВАРИННИЦТВА.....</b>	<b>33</b>
3.1. Світовий досвід використання біогазу.....	33
3.2. Мікробіологічні та біохімічні основи процесів метаногенезу	34
3.3. Етапи технологічного процесу.....	43
Висновки до третього розділу.....	53
<b>РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ.....</b>	<b>54</b>
<b>РОЗДІЛ 5. ЦИВІЛЬНИЙ ЗАХИСТ.....</b>	<b>71</b>
<b>ВИСНОВКИ.....</b>	<b>73</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>74</b>

## ВСТУП

Виробництво біогазу має значну екологічну актуальність і є важливим елементом сталого розвитку. Отримання біогазу зменшить об'єм викидів парникових газів та у якості сировини відбудеться утилізація відходів, таких як гній, харчові відходи, сільськогосподарські залишки, запобігаючи їх розкладу на відкритих полігонах або в навколишньому середовищі. При анаеробному розкладі, в біогазових установках утворюється метан, який спалюється для отримання енергії і не потрапляє безпосередньо в атмосферу, збільшуючи парниковий ефект. Крім того, використання органічних відходів у біогазових установках запобігає їх накопиченню на звалищах, де вони можуть просочуватися у ґрунтові води, викликаючи забруднення, а перероблені залишки (дигестат) можна використовувати як органічне добриво, зменшуючи потребу в хімічних добривах.

Біогаз є нетрадиційним відновлюваним джерелом енергії, що може застосовуватися для виробництва електроенергії, тепла чи навіть як паливо для транспорту, це сприятиме зменшенню викидів CO<sub>2</sub>, пов'язаних із спалюванням вугілля, газу чи нафти, що призведе до зменшення залежності від викопних палив.

Раціональне використання природних ресурсів за рахунок біогазових технологій дозволяють замкнути цикл використання органічних ресурсів, забезпечуючи їх повну утилізацію та зменшуючи кількість сміття.

Використання біогазу замість деревини чи вугілля зменшує кількість твердих частинок і шкідливих речовин у повітрі.

Отже, біогазові технології сприяють зниженню екологічного навантаження, зменшують вплив людини на клімат, допомагають раціонально використовувати ресурси та стимулюють перехід до економіки замкнутого циклу. Вони є перспективним інструментом для боротьби зі зміною клімату та забрудненням довкілля.

**Актуальність роботи.** В Україні швидкими темпами поширюється популярність створення та використання біоенергетичних технологій. Вирішення проблеми переробки органічних відходів з отриманням біогазу дає потенціал замінити в Україні природний газ. Використання біогазу - це не тільки отримання альтернативного виду енергії, а і вирішення екологічних проблем, пов'язаних з утилізацією відходів АПК і отриманням органічних добрив, відтворенням родючості ґрунтів.

**Мета роботи** – обґрунтувати та вибрати умови технології отримання біогазу з відходів тваринництва. Для досягнення мети поставлено **такі завдання:**

-визначити найбільш ефективні види відходів тваринництва для виробництва біогазу,

-провести аналіз їх доступності;

-проаналізувати етапи анаеробного бродіння та їх параметри, температуру, вологість, рН;

-охарактеризувати гній ВРХ і силос кукурудзи як сировину для виробництва біогазу.

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

**Предмет дослідження** – процес їх переробки за допомогою анаеробного зброджування.

## РОЗДІЛ 1

# ХАРАКТЕРИСТИКА ВІДХОДІВ ТВАРИННИЦТВА ТА ПРОДУКТІВ ЇХ КАТАБОЛІЗМА

### 1.1 Еколого-економічна необхідність у біогазі

Біогаз, отриманий із відходів тварин і птахів, має потенціал замінити в Україні природний газ. Однак для його виробництва потрібні значні інвестиції, які зможуть окупитися протягом 4–5 років. У Китаї планують досягти виробництва 100–120 млрд м<sup>3</sup> біогазу за кілька років.

Біометан, аналог природного газу, який використовують для виробництва теплової та електричної енергії, таких як моторне паливо, у побуті та як сировину для хімічної промисловості. Його виробництво відповідає принципам циркулярної економіки, оскільки воно трансформує відходи сільського господарства, промисловості чи побуту в енергію, одночасно повертаючи поживні речовини в ґрунт. Експерти вважають, що «біометан – це майбутнє біогазу».

Біометан можна виробляти як для внутрішнього використання (введення в газові мережі з подальшим застосуванням у виробництві тепла, електроенергії чи як паливо для транспорту), так і для потенційного експорту до країн Європи.

Україна має розвинену газотранспортну систему, інтегровану з європейською мережею, що включає магістральні трубопроводи, газорозподільні станції та підземні сховища. У Європі діє розгалужена газова інфраструктура протяжністю 2,2 млн кілометрів, до якої підключені дві третини біометанових установок. Така мережа дає змогу здійснювати торгівлю біометаном як фізично, так і віртуально.

В 2021 році в Україні діяли 77 біогазових підприємств, з яких 31 займалися збором та утилізацією біогазу на полігонах ТПВ, а решта



В країнах ЄС кількість таких заводів у з 2011 по 2020 роки наведена у таблиці 1.1 та на рисунку 1.2.

Таблиця 1.1 – Кількість біометанових заводів в країнах ЄС

Країна	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Німеччина	86	125	157	186	202	214	219	226	232	242
Франція	3	3	4	8	17	26	44	76	123	214
Велика Британія	5	13	20	36	54	85	89	93	99	107
Швеція	47	53	54	59	61	71	70	72	70	70
Нідерланди	16	19	23	21	21	21	34	39	51	60
Данія		1	3	6	12	17	25	34	42	52
Швейцарія	13	15	19	24	27	29	32	35	37	39
Італія		1	2	5	6	5	1	1	12	23
Фінляндія	2	4	5	9	10	11	14	15	17	22
Австрія	10	10	11	14	13	14	15	15	15	15
Норвегія	4	6	7	10	10	10	11	13	13	13
Люксембург	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Угорщина	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2
Іспанія	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2
Ісландія					2	2	2	2	2	2
Естонія								2	2	4
Чехія									2	2
Бельгія									1	5
Ірландія										1
Латвія										1

В Європі виробляється на біогазових установках, приблизно 53% біометану, що використовують сільськогосподарську сировину. Другим за значимістю джерелом є органічна фракція твердих побутових відходів, на яку припадає 11%.

У європейських країнах спостерігається явна тенденція до зміни типу сировини для виробництва біометану. З 2016 року розпочався перехід від використання енергетичних культур, таких як силос кукурудзи, популярних раніше в Німеччині, до сільськогосподарських залишків, комунальних відходів і осаду стічних вод. Починаючи з 2017 року, нові заводи, які працюють на енергетичних культурах, майже не будувалися.

У 2019 році 60% сировини для виробництва біометану становили сільськогосподарські залишки, 13% – осад стічних вод, 10% – комунальні відходи, а лише 4% – силос кукурудзи.

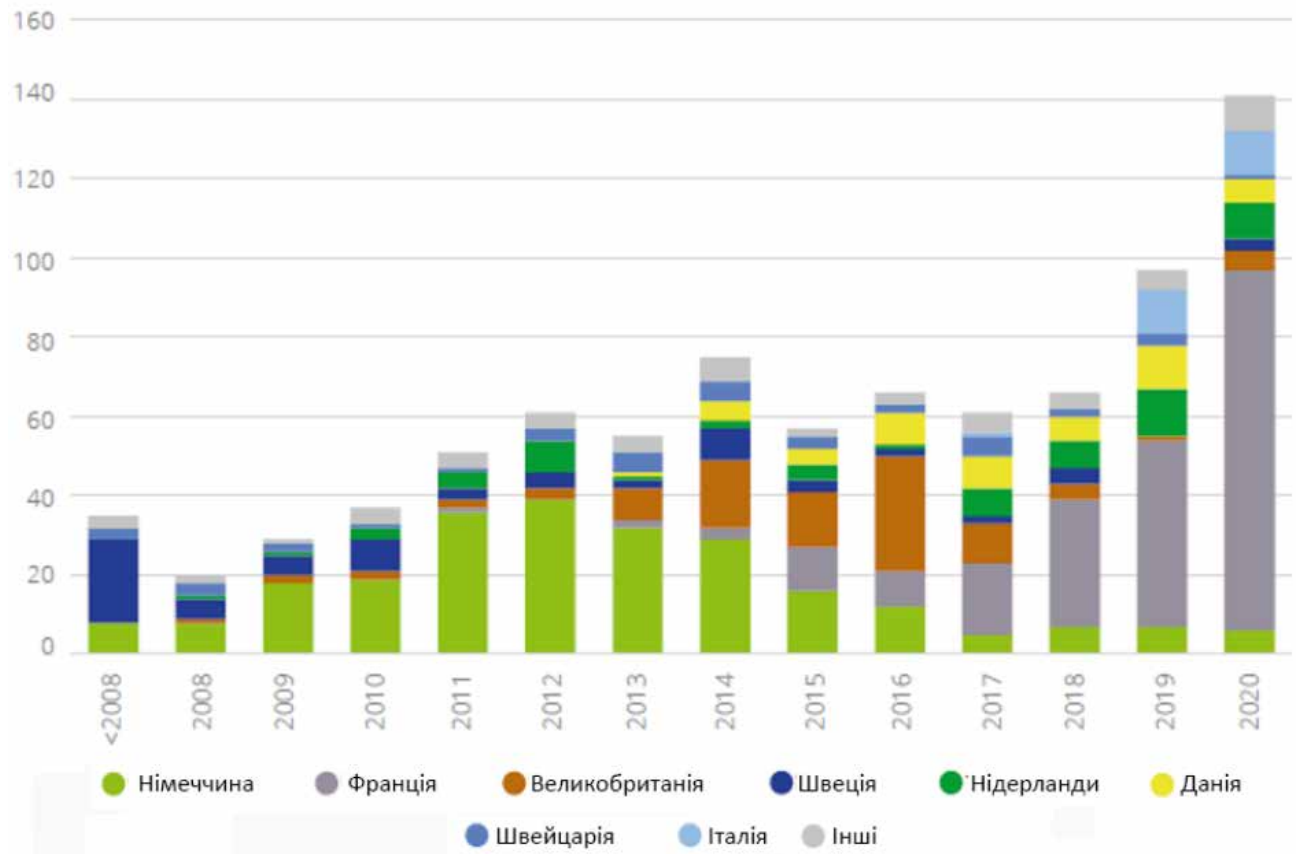


Рисунок 1.2 – Кількість біометанових заводів у країнах ЄС

Для виробництва біометану сировинна база охоплює широкий перелік видів органічних матеріалів. Можна виділити 12 окремих категорій видів сировини, як показано в табл.1.3

Для забезпечення сталого розвитку виробництва біометану пріоритет слід надавати відходам, які не мають альтернативного застосування, окрім як захоронення, спалювання, перетворення в енергію або використання як органічних добрив чи ґрунтополіпшувачів. До таких відходів належать гній, некондиційні харчові продукти, органічна частина ТПВ, осад стічних вод, скошена трава з газонів, побічні продукти тваринництва, непридатні для вживання людиною.

В Україні для виробництва біогазу використовується обмежений перелік сировини, що складається з п'яти основних видів: свинячий гній, гній великої рогатої худоби, курячий послід, жом цукрових буряків і силос кукурудзи.

Таблиця 1.2 - Категорії видів сировини, придатної для виробництва біогазу

№	Категорія	Об'єкти збору сировини	Приклади сировини
1	Гнойові відходи тваринництва	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ферми ВРХ (молочні ферми)</li> <li>- свиноферми</li> <li>- птахофабрики</li> <li>- ферми МРХ, інші ферми</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- гній підстилковий</li> <li>- гнойівка рідка</li> <li>- послід</li> </ul>
2	Пожнивні рештки сільсько-господарських культур	<ul style="list-style-type: none"> <li>- підприємства рослинництва</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- солома зернових (насамперед пшениці)</li> <li>- стебла та початки кукурудзи</li> <li>- стебла та кошики соняшнику</li> <li>- ботвина буряків</li> </ul>
3	Побічні продукти та відходи харчової переробної промисловості	<ul style="list-style-type: none"> <li>- цукрові заводи</li> <li>- спиртові заводи</li> <li>- пивні заводи</li> <li>- крохмале-патокові виробництва</li> <li>- борошномельні та круп'яні заводи</li> <li>- олійно-екстракційні заводи</li> <li>- м'ясопереробні заводи</li> <li>- забійні цехи</li> <li>- консервні заводи</li> <li>- виноробні підприємства</li> <li>- інші виробництва</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- жом буряковий</li> <li>- меляса (патока)</li> <li>- дробина пивна</li> <li>- спиртова барда (зернова, післямелясна)</li> <li>- вичавки та відходи фруктові</li> <li>- вичавки та відходи овочеві</li> <li>- вичавки виноградні</li> <li>- жмих та фуз олійні</li> <li>- лушпиння соняшнику</li> <li>- лушпиння зернових</li> <li>- полова, висівки та інші відходи зернових</li> <li>- побічні продукти тваринного походження, згідно [23], тощо</li> </ul>
4	Відходи виробництва біоетанолу та біодизелю	<ul style="list-style-type: none"> <li>- біоетанольні заводи</li> <li>- біодизельні заводи</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- спиртова барда</li> <li>- шрот/макуха ріпаковий</li> <li>- гліцерин</li> </ul>
5	Енергетичні культури	<ul style="list-style-type: none"> <li>- підприємства рослинництва</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- кукурудза на силос</li> <li>- сорго на силос</li> <li>- сільфій пронизанолистий</li> <li>- цукровий буряк</li> <li>- жито озиме, інші</li> </ul>
6	Фітобіомаса водних об'єктів	<ul style="list-style-type: none"> <li>- природні водні об'єкти</li> <li>- штучні водні об'єкти та системи</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- вища водна рослинність</li> <li>- мікрободорості</li> </ul>
7	Відходи садово-паркових господарств	<ul style="list-style-type: none"> <li>- комунальні паркові господарства</li> <li>- аеропорти</li> <li>- великі спортивні майданчики з природним покриттям</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- скошені трави з газонів</li> <li>- листя опале</li> </ul>

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

За оцінками UABIO, ці види сировини становлять близько 97% за свіжою масою, а їх частка у виробництві біогазу досягає 92%.

На сьогодні найбільше біогазу виробляється із жому цукрових буряків (39,8%) та силосу кукурудзи (38,4%). У менших обсягах використовуються полова зернових, меляса, жирові флотошлами та інші види сировини (рисунок 1.3-1.4.) [1].

Серед відходів тваринництва великий потенціал має курячий послід, на який припадає 53,5%. Серед поживних залишків найбільшу частку становлять пшенична солома та стеблова маса кукурудзи – по 34,7% кожна.

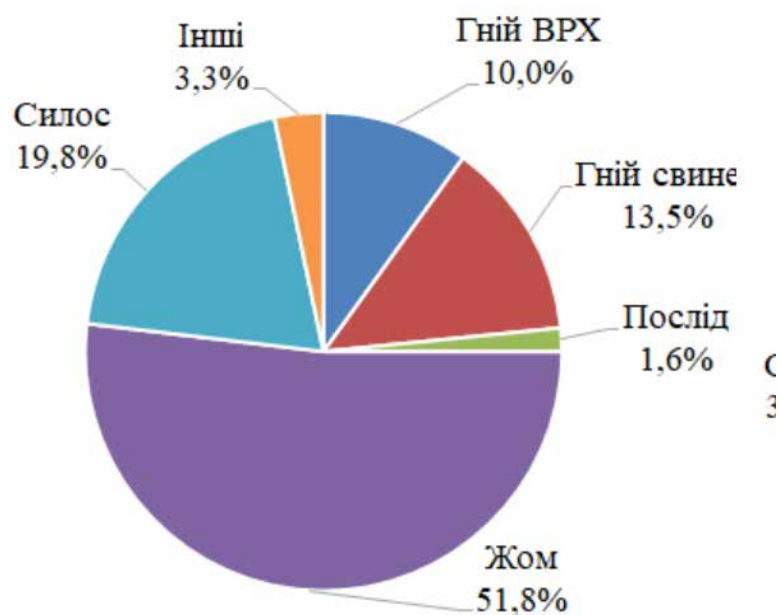


Рисунок 1.3 – Структура споживання свіжої маси сировини для виробництва біогазу

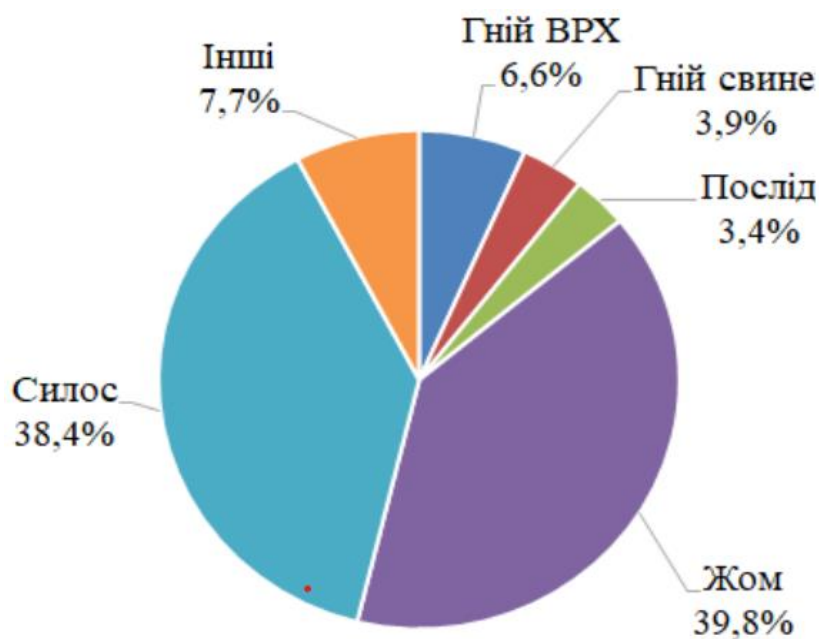


Рисунок 1.4 – Структура обсягів виробництва біогазу за видами сировини

Що стосується відходів від продуктів харчової промисловості, то найбільший потенціал мають жом буряків (31,3%) та соняшникові макуха та шрот (31,0%).

## 1.2. Характеристика відходів тваринництва

Системи утримання свиней поділяються на три основні типи, кожен із яких має свої особливості щодо управління гноєвидаленням та ефективності для виробництва біогазу:

### 1. Самосплавна система (пробкова-ванна, датська або іспанська система)

Ця система передбачає додавання води до гною у співвідношенні 1:1. Гній накопичується у спеціальних ваннах із пробкою, а потім видаляється з певною періодичністю – раз на 1–3 тижні.

Самосплав є ідеальним для біогазового виробництва завдяки оптимальній вологості гною та зручності управління процесом. Більшість нових свиноферм впроваджують саме цю систему, оскільки вона забезпечує ефективну підготовку сировини для анаеробного зброджування.

### 2. Гідрозмив

Гідрозмив передбачає постійне змивання гною водою у співвідношенні 1:10. Ця система була поширена на старих свинокомплексах із великою кількістю тварин. Проте вона має кілька суттєвих недоліків:

- висока вологість гною значно знижує ефективність зброджування;
- реактори, які працюють із таким матеріалом, потребують великого обсягу, а вихід біогазу з 1 м<sup>3</sup> реактора залишається дуже низьким;
- через економічну недоцільність використання гідрозмиву для біогазових станцій не рекомендується, якщо немає додаткових джерел сировини.

Незважаючи на це, гідрозмив іноді плутають із самосплавною системою через зовнішню подібність у процесі видалення гною.

### 3. Холодне вирощування

Вирощування та утримання свиней передбачає у тентових ангарах, де підстилку постійно посипають сіном. Гній видаляється лише один раз після забою тварин.

Такий підхід робить виробництво біогазу практично неможливим через кілька причин:

- протягом тривалого зберігання значна частина газу вивільняється ще до початку процесу переробки;
- великий обсяг підстилки в реакторах ускладнює його перемішування.

На підприємствах о вирощуванні свиней солому, як підстилку не використовують. Замість цього впроваджують гідравлічні системи для видалення гною, забезпечуючи чистоту приміщень і покращуючи мікроклімат. Проте такі системи створюють гній із високою вологістю (93–99%), що значно ускладнює його переробку через високу енергоємність і вартість.

Свинячий гній є субстратом для росту бактерій, але його хімічний склад залежить від виду тварин, годування, утримання (табл 3.1.).

Вологість гною без підстилки становить 87–88%. Співвідношення вуглецю до азоту (C:N) становить лише 6–8, що є занадто низьким для ефективного анаеробного зброджування. Для оптимального процесу потрібно досягти співвідношення 30:1. Це можливо шляхом додавання косубстратів – матеріалів із високим вмістом вуглецю, таких як солома, побутові чи сільськогосподарські відходи.

Додавання косубстратів дозволяє:

- покращити баланс між карбоном і нітрогеном;
- утворення більшій кількості біогазу;
- забезпечити ефективне бродіння та знезараження гною.

Субстрат для оптимального анаеробного процесу може містити різні джерела органічного вуглецю: сирий осад стічних вод, побутові та сільськогосподарські відходи, біомасу, зокрема залишки рослин чи культур.

Ефективність біогазового виробництва залежить від системи утримання тварин, способу обробки гною та його складу. Найбільш перспективною є самосплавна система, яка забезпечує необхідну якість гною для зброджування.

Таблиця 1.3 – Характеристика сировини

Найменування	Категорія та НТД, яким регламентується сировина	Обов'язкові для перевірки показники та їх значення
<b>Основна сировина:</b>		
1. Гній свиней	ДСТУ 8003:2015 Свині. Настанови щодо обмеження викиду забруднювальних речовин під час утримання у свинарниках (VDI 3471:1996, NEQ)	Показники відповідно до вимог технології: вологість 98%
2. Солома	Згідно з технологічним регламентом	Показники відповідно до вимог технології: Вологість 14%, відсутність важких металів
<b>Допоміжна сировина</b>		
3. Вода водопровідна (Вода питна)	ДСТУ 7525:2014 Вода питна. Вимоги та методи контролювання якості	Амонійний азот ( $\leq 0,5$ мг/дм <sup>3</sup> ); хлор залишковий вільний ( $\leq 0,5$ мг/дм <sup>3</sup> ); хлор залишковий зв'язаний ( $\leq 1,2$ мг/дм <sup>3</sup> ); важкі метали (Cu $\leq 1,0$ мг/дм <sup>3</sup> , Zn $\leq 1,0$ мг/дм <sup>3</sup> ), завислі речовини $>1,5$ мг/л
<b>Напівпродукти</b>		
Біогаз	ДСТУ 7721:2015 Газоподібне паливо. Біогаз. Технічні вимоги та методи контролювання	Метан (60-65% від загального об'єму газів), Вуглекислий газ (30-35%), сірководень ( $\leq 0,02$ г/м <sup>3</sup> ), Меркаптанова сірка ( $\leq 0,03602$ г/м <sup>3</sup> ), кисень ( $\leq 1\%$ ), механічні домішки ( $\leq 0,001$ г/м <sup>3</sup> ), вода ( $\leq 1\%$ )
Зброджена суміш	Згідно з технологічним регламентом	Вологість 70%

Застосування іншої за хімічним складом сировини у якості ко-субстратів дозволяє досягти оптимального співвідношення C:N та максимального виходу біогазу.

### **1.3 Характеристика продуктів метаболізма**

Методом, який є найкращим з утримання свиней для отримання біогазу є спосіб самосплаву, оскільки осад має вологість близько 99%. Свинячий гній має недостатній вміст карбону, тому його змішують із соломною та водою, що дозволяє досягти вологості понад 88%. Співвідношення гною свиней до соломи становить 8:1.

Впровадження біогазових підприємств має кілька позитивних аспектів. Біогаз дозволить зменшити використання природного газу, зменшиться кількість відходів сільського господарства та збільшиться кількість екологічно чистих добрив, зменшиться викид токсичних речовин та парникових газів

Існує вологе та сухе анаеробне зброджування. Сухе зброджування є доцільним для невеликих виробництв або при низькому рівні вихідної вологості сировини.

Цей метод потребує мінімальної обробки матеріалів, і характеризується нижчими енерговитратами. Однак основним недоліком сухого зброджування є режимна робота біореактора.

Для вологого зброджування використовують біореактори, що забезпечують перемішування свіжого субстрату з уже збродженим. Вологість сировини спрощує транспортування через трубопроводи, що прискорює всі процеси в біореакторі.

Більшу технологічність має процес вологої методу, за рахунок спрощення транспортування сировини трубопроводами.

Культивування мікробіоти у метантенках може здійснюватися двома основними методами: періодичним і безперервним.

Безперервний метод полягає у постійному надходженні сировини та одночасному видаленні частини продуктів катаболізму через рівні проміжки часу. Для ефективної роботи метантенка необхідно забезпечити рівність кількості надходження субстрату та виходу кількості продукту.

Періодичний метод, завдяки своїй ефективності, передбачає повне завантаження сировини у реактор і подальшу роботу протягом певного періоду часу.

Періодичні метантенки є дешевшими і простішими у конструкції, але вони мають певні обмеження по об'єму та висоті конструкції. Після завершення процесу біореактор відкривається і повністю вивантажується.

Метантенки видають різні об'єми і склад утвореного газу, це пов'язано зі зміною складу сировини в процесі анаеробного зброджування. Періодичні метантенки мають ще один значний недолік – відсутність герметизації, що є складовою нормального проходження анаеробного бродіння. Вона є дуже важливим фактором, оскільки анаеробні мікроорганізми вимагають відсутності кисню для нормальної роботи. Якщо герметизація не забезпечена належним чином, це призведе до зниження ефективності процесу зброджування та якості отриманого газу.

Анаеробний процес має такі види температурного режиму, які дають різну тривалість зброджування сировини, це – мезофільний режим – 10-20 діб; психрофільний режим – 30-40 і більше діб; термофільний режим – 5-10 діб.

Мезофільний режим (35-37°C) є оптимальним рішенням для отримання біогазу, тоді як інші два режими мають недоліки. Психрофільний режим триває досить довго, а термофільний – потребує затрат енергії для підтримання великої температури, що призводить до витрат і є економічно не вигідним [16].

На отримання біогазу впливають різні показники – це сировина, культивування, апарати.

Перед початком роботи метантенка в безперервному режимі культивування необхідне накопичення сировини. Особливо це потрібно для першого запуску реактору та для подальшого порціонного завантаження.

Під час підготовки сировини важливим фактором є розмір частинок, чим дрібніше, тим вищий вихід біогазу. Це пояснюється тим, що більша поверхня контакту між мікроорганізмами та субстратом сприяє більш ефективному зброджуванню і можливості ферментів проводити каталіз.

Шнекові дробарки з ножами необхідні для подрібнення субстратів та мають велику продуктивність (до 50м<sup>3</sup>/добу) і автоматичне управління завантаження, подрібнення сировини. Дробарки забезпечують ефективне подрібнення субстратів, що сприяє підвищенню виходу біогазу.

Для підвищення відсоткового виходу метану перед початком анаеробного зброджування хімічно оброблюють субстрат, що призводить до збільшення кількості виходу біогазу, але цей процес досить високовартісний і не завжди економічно вигідний, тому його не завжди використовується на практиці.

Для більш рівномірного розміру частинок субстрату і підвищення ефективності подальшого процесу зброджування, подрібнюють свинячий гній окремо від соломи, тому що є різниця у властивостях соломи і гною. Такий прийом дозволить досягти більш рівномірного розміру частинок і підвищити ефективність подальшого процесу зброджування.

Застосування біогазу різне, в багатьох місцях і за різними цілями. Є застосування біогазу для утворення різних видів енергії, теплоенергії та електроенергії. При спалюванні біогазу на території підприємства в когенераційній установці надасть можливість використати і електроенергію, і тепло. Це дуже ефективний спосіб використання біогазу, оскільки дозволяє отримати два цінні ресурси одночасно.

Також можна використовувати біогаз, як паливо для транспорту, або як сировину для виробництва хімічних речовин. Крім того, біогаз можна використовувати для виробництва рідкого палива, такого як метанол або

диметиловий етер. Усі ці варіанти використання біогазу можуть бути дуже ефективними і вигідними, залежно від конкретних умов і потреб підприємства.

Подача біогазу у газорозподільну систему буде ефективним способом транспортування його до споживачів, але в цьому випадку є суттєвий недолік - біогаз потребує попередньої очистки для видалення супутніх газів, які утворюються при бродінні. Такі гази, як діоксид вуглецю, водяна пара та інші домішки, можуть знижувати якість біогазу і зробити його непридатним для використання.

Додаткові дії по біогазу, його доочищення потребують витрати на виробництво, тому цей варіант може бути менш вигідним для підприємств, які займаються виробництвом біогазу.

Крім того, суміш, що утворюється внаслідок метаногенезу, також потребує утилізації. Характеризується відходи метаногенезу високим вмістом мінеральних речовин і може бути використана як добриво, але так як в ній міститься велика кількість води, то це ускладнює зберігання та транспортування. Для зберігання цієї суміші потрібні спеціальні споруди, а транспортування її може бути дуже дорогим. Це зменшує її привабливість для потенційних споживачів.

Отже, підприємства, які займаються виробництвом біогазу, повинні ретельно розглядати всі варіанти використання біогазу і збродженої суміші, щоб мінімізувати витрати і максимізувати прибуток.

Для того, щоб товарні якості покращились, зброджену суміш прийнято включити в стадію виготовлення твердих добрив. Це рішення дозволяє не тільки зменшити витрати на зберігання і транспортування збродженої суміші, але також створити додатковий продукт, який може бути використаний як добриво.

Процес отримання твердих добрив із суміші складається з кількох етапів. Відділяють тверду фракцію збродженої суміші, потім її сушать для зниження вмісту вологи. Після цього тверда фракція гранулюється, що дозволяє отримати однорідний продукт.

Таким чином, технологічна схема виробництва газу з відходів тваринництва включає кілька стадій: анаеробне зброджування в безперервному режимі роботи біореактора за відповідною температурою, використання косубстрату, спалювання біогазу в установці і виготовлення твердих добрив з суміші.

Технологічна схема дозволяє отримати два цінні продукти: біогаз, який використовується для виробництва електроенергії і тепла, і тверді добрива, які можуть бути використані в сільському господарстві. Крім того, ця схема дозволяє зменшити кількість відходів тваринництва, що видаляються самосплавом, і зменшити вплив виробництва біогазу на довкілля [2].

На субстрати, які складаються з целюлози, білків та ліпідів потрібні мікроорганізми з відповідними ферментами.

Спочатку мікроорганізми виділяють ферменти для розпаду органічних речовин, зокрема целюлозолітичної, протеолітичної, ліполітичної та інших видів активності. Цей етап називається гідролітичною фазою. На цьому етапі мікроорганізми розщеплюють складні органічні речовини на простіші сполуки, такі як моносахариди, амінокислоти та жирні кислоти.

Мікробіота, що приймає участь на цьому етапі, це штами роду *Clastridium*, *Peptococcus*, *Bacterioides*, *Eubacterium*, *Bifidobacterium*. Вони мають протеолітичну активність, тобто здатність розщеплювати білки на амінокислоти.

При подальшій дії мікробіота перетворює вищі жирні кислоти, що утворилися на попередньому етапі у водень, вуглекислий газ та оцтову кислоту. Етап називається ацетогенезом, в ньому беруть участь ацетогенні і гідрогенпродукуючі бактерії, які перетворюють пропіонову кислоту в оцтову,  $\text{CO}_2$  та  $\text{H}_2$ .

На останній стадії метаноутворюючі бактерії дисимілюють проміжні етаболіти в кінцеві продукти і продукують метан та вуглекислий газ. Цей етап називається метаногенезом. На цьому етапі беруть участь метаноутворюючі

мікроорганізми, такі як *Archaea*, які мають здатність перетворювати ацетат, CO<sub>2</sub> та H<sub>2</sub> у метан та вуглекислий газ.

Таким чином, процес мікробної ферментації, який відбувається під час виробництва біогазу, складається з трьох етапів: гідролітичної фази, ацетогенезу та метаногенезу. Кожен етап здійснюється різними групами мікроорганізмів, які мають різні види активності.

### **Висновки до першого розділу**

Аналіз відходів тваринництва та продуктів їх катаболізму показує, що ці матеріали є важливими джерелами екологічних ризиків, однак при належній обробці та утилізації можуть стати цінними ресурсами для виробництва біогазу, органічних добрив та інших корисних продуктів. Відходи, що утворюються під час тваринництва (гній, сеча, залишки кормів), можуть спричиняти забруднення ґрунтів та водних ресурсів, а також викиди парникових газів. Однак впровадження сучасних біотехнологій, таких як біогазові установки, дає змогу ефективно переробляти ці відходи, знижуючи їх вплив на довкілля.

Катаболізм органічних речовин тваринного походження може бути спрямований на енергетичне використання та зменшення забруднення, що дозволяє забезпечити сталий розвиток аграрного сектора. Однак важливим є комплексний підхід до управління відходами, який включає розробку ефективних методів їх збору, обробки та утилізації.

## РОЗДІЛ 2

### МЕТОДИ ТА ОБЛАДНАННЯ

#### 2.1 Методи інтенсифікації технологічних процесів

Для покращення роботи технологічних процесів, це використання апаратів та приладів або додаткових дій оброблення сировини, застосовують інтенсифікацію методів, які підвищують вихід готової продукції. Можливі методи інтенсифікації сировини та етапів технологічного процесу наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1. Засоби інтенсифікації технологічного процесу

Фізичні	Біологічні	Хімічні
Перемішування сировини	Аеробна обробка	Додавання стимуляторів
Механічна обробка сировини	Збільшення концентрації біомаси бактерій	Контроль рН сировини
Термічна обробка сировини	Використання адаптованої біомаси	Видалення або пригнічення речовин, що інгібує діяльність біомаси
Термічна обробка субстрату		Хімічна обробка сировини
		Коферментація

Кожен з методів має свої особливості, які представлені нижче.

Фізичні методи базуються на обробці сировини та субстрату за допомогою механічного впливу. Розглянемо основні методи фізичної інтенсифікації:

1. Механічна обробка сировини полягає в попередньому подрібненні органічних відходів за допомогою різних технічних засобів, таких як шарові млини, центрифуги, насоси високого тиску, а також ультразвукова обробка. Основна мета цих способів – зменшити розмір часток субстрату для

забезпечення гомогенності сировини та прискоренню каталізу за рахунок ферментів.

2. Термічна обробка сировини спрямована на зменшення розміру часток органічних речовин, однак для цього використовуються високі температури.

3. Перемішування субстрату застосовується для попередньої обробленої сировини. Його основна мета – рівномірний розподіл твердих частинок у рідкій фазі.

4. Термічна обробка субстрату сприяє каталізації процесів метаногенезу завдяки підтримці мезофільних або термофільних режимів роботи.

Іншою важливою групою методів інтенсифікації є біологічні, які базуються на використанні органічних компонентів. Основні підходи включають:

1. Аеробна обробка передбачає використання аеробних бактерій для попередньої обробки субстрату. Він спрямований на прискорення початкових стадій метаногенезу та створення сприятливих умов для подальшого анаеробного процесу.

2. Підвищення концентрації біомаси бактерій призводить до збільшення кількості активних мікроорганізмів сприяє пришвидшенню всіх стадій метаногенезу завдяки більш інтенсивному функціонуванню бактеріальної популяції.

3. Використання адаптованої біомаси. Застосування спеціалізованих культур бактерій, адаптованих до певних типів органічних відходів, забезпечує більш ефективно та швидко перетворення сировини.

Хімічні методи інтенсифікації передбачають використання хімічних реагентів та реакцій для оптимізації процесів [6]. Основні підходи включають:

1. Додавання стимуляторів за рахунок використання хімічних сполук, які прискорюють процеси метаногенезу, підвищуючи активність бактерій.

2. Контроль рН сировини для підтримання оптимального рівня рН сприяє розвитку мікробіоти, що є ключовим фактором ефективності процесу.

3. Видалення або пригнічення інгібіторів для усунення речовин, що гальмують діяльність біомаси, дозволяє забезпечити стабільний і безперервний метаногенез.

4. Хімічна обробка сировини. Попереднє оброблення субстрату кислотами, лугами чи окисниками руйнує клітинні структури органічних речовин. Це сприяє їх швидшому розкладу, полегшує доступ до внутрішнього вмісту клітин та створює необхідне кислотно-лужне середовище.

5. Коферментацією є додавання додаткових субстратів до основної сировини, що забезпечує бактерії додатковими джерелами поживних речовин, стимулюючи їх активність.

Такі доповнення до основних технологічних процесів покращують утворення кінцевих метаболітів анаеробного катаболізму. Для кращого розуміння відповідності методів процесам, які відбуваються по стадіям анаеробного бродіння – метаногенезу в таблиці 2.2 наведена відповідність.

Фізичні методи обробки базуються виключно на фізико-механічних способах, які потребують лише обладнання та електроенергії. Їх головною перевагою є довговічність роботи апаратів за умови належного технічного обслуговування, а також низька собівартість процесу. Енергія, необхідна для роботи цих апаратів, може бути отримана під час анаеробного зброджування, що додатково знижує витрати.

Механічна обробка сировини спрямована на руйнування клітинних стінок, що дозволяє мікроорганізмам розпочати першу стадію метаногенезу – гідроліз – без значних витрат енергії на доступ до вмісту клітин. Тип руйнування клітин залежить від обраного технічного обладнання:

- використання кулькових млинів передбачає вплив відцентрової сили та сили тертя між частинками (рис2.1).

Таблиця 2.2 – Узагальнення етапів метаногенезу

<i>Фізична група методів</i>	
Механічна обробка сировини	Руйнування стінок клітин
	Прискорення гідролізу
Термічна обробка сировини	Руйнування стінок клітин
	Зміна органічного та бактеріального складу сировини
Механічна обробка субстрату	Руйнування стінок клітин
	Прискорення гідролізу
Термічна обробка субстрату	Прискорення усіх стадій метаногенезу
<i>Біологічна група методів</i>	
Анаеробно обробка сирована	Підігрівання субстрату
	Прискорення гідролізу
	Створення необхідного рівня рН
	Зменшення розміру твердих частинок
Збільшення концентрації біомаси	Прискорення усіх стадій метаногенезу
Використання адаптованої бактеріологічної групи	Прискорення усіх стадій метаногенезу
	Зменшення витрат на підготовку субстрату
<i>Хімічна група методів</i>	
Додавання окисників	Прискорення стадій метаногенезу
	Покращення кількісного складу біогазу
	Стимулювання роботи бактерій
Контроль рН субстрату	Стимулювання роботи бактерій
Виключення інгібіторів	Прискорення роботи бактерій
Хімічна обробка сировини	Руйнування стінок клітин
	Прискорення гідролізу
Коферментація	Стимулювання роботи бактерій
	Покращення якісного та кількісного складу біогазу

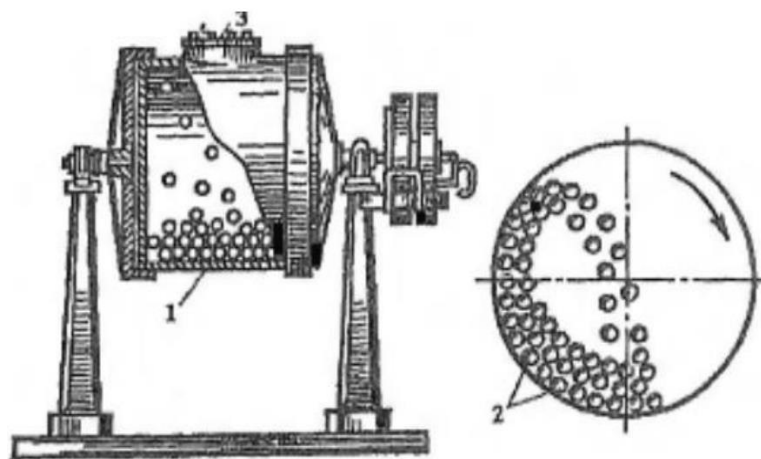


Рисунок 2.1 – Кульковий млин

1 – корпус млина; 2 – вантажні кулі; 3 – завантажувальний люк

- застосування ультразвукових апаратів базується на ефекті кавітації (рис.2.2).

Під час цього процесу в рідині гази розташовуються пластами. При підвищенні зовнішнього тиску ці газові бульбашки зменшуються і зникають,

створюючи сферичні хвилі. Такі хвилі перетворюються на ударні з великим тиском, що спричиняє руйнування клітинних структур (рис.2 3).



Рисунок 2.2 – Ультразвукова установка TUS-300ST

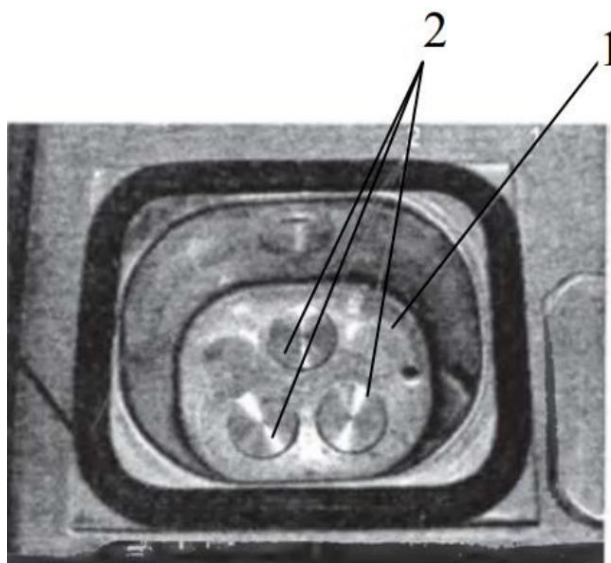


Рисунок 2.3 – Основа ультразвукової установки

1 – корпус ультразвукової установки; 2 – ультразвукові перетворювачі

Отже, механічні методи ефективно забезпечують підготовку сировини для подальших стадій біологічного процесу.

Термічна обробка сировини спрямована на руйнування клітинних стінок шляхом нагрівання субстрату до температури 100–200 °С. Високі температури спричиняють не лише руйнування клітинних стінок, але й зміни у

внутрішньому складі клітин внаслідок термічних реакцій розкладу. Вода, яка міститься як усередині клітин, так і поза ними, випаровується, це визиває зневоднення субстрату. Однак цей метод використовується рідко, оскільки субстрат після такої обробки не матиме необхідного складу для ефективного метаногенезу. При перегортанні субстрату виконуються кілька важливих функцій:

- запобігає утворенню поверхневої плівки;
- забезпечує рівномірний розподіл температури в об'ємі субстрату;
- тверді частинки розподілюються в рідкій фазі.

Такий стан досягається шляхом встановлення механічних мішалок у реакторах для безперервного або переривчастого процесу. Таке перемішування дозволяє підтримувати оптимальні умови для подальших стадій обробки субстрату (рис.2.4) [3]/

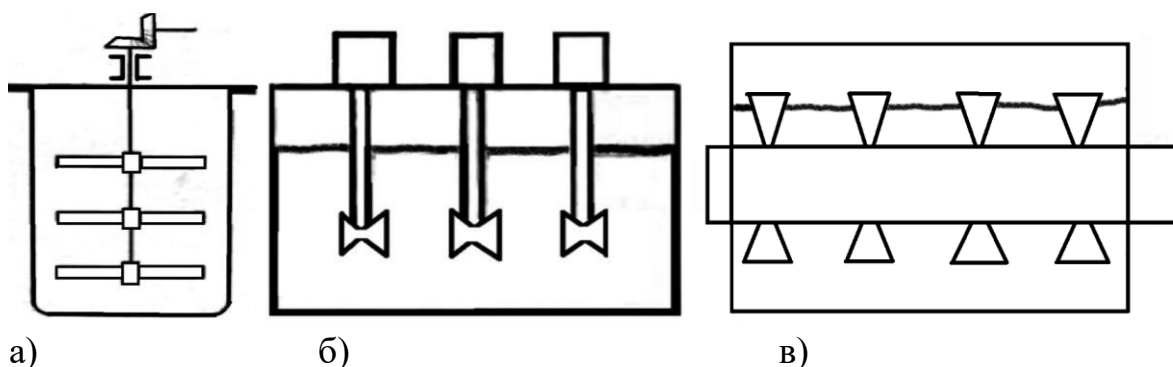


Рисунок 2.4 – Схеми механічних мішалок

а). схема механічної мішалки (трирядкова)

б).схема механічної мішалки з електродвигунами

в). схема мішалки з механічними лопастями

Термічна обробка субстрату є важливим етапом на всіх стадіях метаногенезу, адже вона сприяє створенню оптимальних умов для різних груп бактерій, які функціонують у певних температурних діапазонах:

- психрофільний режим (10–25 °С): ефективний при низьких температурах, не потребує додаткового нагрівання, але процес проходить повільно;

- мезофільний режим (25–40 °С): вважається "золотою серединою" завдяки помірній швидкості роботи та економічно вигідним умовам підтримання;

- термофільний режим (40–55 °С): забезпечує найвищу швидкість метаногенезу, проте потребує значних енерговитрат для нагрівання.

На великих підприємствах зазвичай використовують мезофільний режим, оскільки він поєднує помірну швидкість із доступністю підтримання температури. Нагрівання субстрату для цього режиму може здійснюватися двома способами:

1. Прямий підігрів характеризується:

- використовуються методи по нагріванню води (37–40 °С) або створення "тепличного ефекту" шляхом накриття куполоподібної поверхні метантенка поліетиленовою плівкою;

- перевагами є простота та економічність;

- недоліками є складність контролю температури (перегрів вдень та охолодження вночі), а також зміни концентрації речовин і вологості через постійне введення гарячої води.

2. Непрямий підігрів:

- використовуються методи по застосуванню теплообмінників (зовнішніх або внутрішніх) із трубами, по яких циркулює гаряча вода;

- перевагами є точне регулювання температури без впливу на склад субстрату;

- рекомендаціями є встановлення теплообмінників у зонах перемішування для рівномірного розподілу тепла.

Таким чином, вибір способу термічної обробки залежить від умов роботи, але на практиці непрямий підігрів частіше застосовується через його більшу ефективність та контрольованість.

## 2.2. Біологічні методи інтенсифікації технологічних процесів

Для ефективності біологічних методів інтенсифікації додаються види мікроорганізмів згідно складу сировини.

Ефективність аеробної обробки є ключовим аспектом біологічних методів підготовки сировини для метаногенезу. При цьому підході анаеробний процес починається з аеробної стадії, що має кілька суттєвих переваг:

1. Виділення тепла. Аеробні процеси супроводжуються утворенням тепла, яке забезпечує самостійне нагрівання субстрату, що знижує енерговитрати на підігрів.

2. Прискорення гідролізу. Константа гідролізу при аеробній обробці ( $r_v = 0,12 \text{ доба}^{-1}$ ) значно перевищує цей показник для анаеробних процесів ( $r_v = 0,06 \text{ доба}^{-1}$ ). Швидкість гідролізу також пропорційно зростає із підвищенням температури.

3. Оптимізація складу субстрату.

- підвищення рН субстрату на 10–15%;
- перетворення твердих частинок на тонкодисперсні, що полегшує подальші етапи метаногенезу.

4. Додавання робочої групи бактерій. Інтродукція додаткових бактерій прискорює проходження етапів метаногенезу та дозволяє збільшити об'єм стартової сировини, що обробляється.

Утворення адаптованих груп бактерій є перспективним направленням розвитку біологічних методів. Мікробіота має потенціал значно полегшити та прискорити всі етапи метаногенезу завдяки:

- вищій швидкості поглинання та перероблення органічних сполук;
- розширенню спектра придатної сировини;
- спрощенню вимог до температурного та кислотного режимів;
- виключенню впливу інгібіторів.

Однак створення таких "ідеальних" бактерій наразі залишається технічно складним завданням, оскільки можливості генної інженерії все ще обмежені, а вимоги до таких мікроорганізмів надзвичайно високі.

Хімічні методи інтенсифікації є важливим інструментом для підвищення ефективності процесу метаногенезу. Ці методи передбачають використання хімічних сполук для зміни складу субстрату та оптимізації умов для мікробіологічних процесів.

1. Використання окисників:

- прискорення руйнування клітинних стінок. Хімічні окисники сприяють розщепленню складних органічних сполук на простіші, що значно пришвидшує перші три стадії метаногенезу (гідроліз, ацидогенез, ацетогенез).

- оптимізація співвідношення Карбону і Нітрогену. Використання органічних сполук дозволяє досягти оптимального співвідношення C:N (близько 20:1), що:

- зменшує утворення азотовмісних сполук;
- збільшує вихід метану;
- покращує якість біогазу.

2. Додавання поживних речовин сприяє активному розмноженню бактерій, що підвищує швидкість переробки органічних сполук.

3. Контроль кислотно-лужного балансу (рН) при підтримці оптимального рН субстрату дозволяє бактерії працювати на максимальній ефективності, що прискорює виробництво біогазу.

4. Усунення інгібіторів сприяє видалення або нейтралізація речовин, які гальмують діяльність бактерій, забезпечує безперервність анаеробного процесу.

Хімічні методи забезпечують комплексний підхід до оптимізації умов для бактерій, що дозволяє значно підвищити якість і кількість виробленого біогазу.

Суть методу коферментації полягає у додаванні інших субстратів до основного органічного субстрату, для підживлення діючої мікробіоти, а також підвищенням якісного складу біогазу, в залежності від виду сировини.

В залежності від хімічного складу субстрату обирають відповідні методи в склад технологічного процесу.

### **Висновки до другого розділу**

Аналіз методів дослідження та обладнання для отримання біогазу засвідчує, що ефективне виробництво біогазу залежить від раціонального підходу до вибору технологій, параметрів процесу та обладнання. Основними аспектами є оптимізація анаеробного розкладу органічних матеріалів, вибір відповідних сировинних компонентів та забезпечення стабільних умов процесу.

Сучасні біогазові установки оснащені технологіями для моніторингу температури, рН, концентрації газів і процесів мікробіологічної активності, що дозволяє досягти максимальної ефективності біодеградації органіки. Вибір обладнання залежить від масштабу виробництва, доступної сировини, а також кінцевих потреб у біогазі чи побічних продуктах, таких як дигестат.

Отже, впровадження передових методів дослідження та використання сучасного обладнання є ключовим для розвитку біогазових технологій. Це забезпечує не лише екологічну стійкість і енергетичну незалежність, а й можливість переробки відходів у цінні ресурси, сприяючи сталому розвитку аграрного та енергетичного секторів.

## РОЗДІЛ 3

# ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА БІОГАЗУ З ВІДХОДІВ ТВАРИННИЦТВА

### 3.1 Світовий досвід використання біогазу

Систематичні дослідження біогазу розпочалися наприкінці XVIII століття завдяки італійському натуралісту Алессандро Вольта. У 1770 році він зібрав болотяний газ із озерних відкладень на півночі Італії та провів експерименти зі спалювання цього газу.

Подальші дослідження проводив англійський фізик Майкл Фарадей, який також працював із болотяним газом і визначив, що він є вуглеводнем. У 1821 році вчений Авогадро встановив хімічну формулу метану ( $\text{CH}_4$ ) [2].



Рисунок 3.1 – Перші установки для отримання біогазу

Луї Пастер у 1884 році експериментував із біогазом, виділеним із твердого гною. Він першим запропонував використовувати гній із паризьких стаєнь для виробництва газу, що міг слугувати джерелом освітлення вулиць.

У 1897 році в місті Бомбей (Індія) на території лікарні для хворих на проказу було побудовано першу установку для виробництва біогазу, який використовували для освітлення. У 1907 році цей газ почали застосовувати для живлення двигуна, що виробляв електроенергію.

У Німеччині з 1906 року інженер Імгофф розпочав систематичне будівництво двох'ярусних анаеробних установок для очистки стоків у регіоні Рур. Ці установки отримали назву «емшерський колодязь» і стали однією з перших промислових реалізацій технології біогазу.

Індія має II місце у виробництві біогазу, яка у 1930-х роках впровадила першу у світі державна програма розвитку біогазових технологій. До кінця 2000 року в сільських районах Індії було збудовано понад 1 мільйон метантенків, що значно покращило енергозабезпечення сіл, санітарно-гігієнічні умови, знизило вирубку лісів та підвищило якість ґрунтів. Наразі щоденний обсяг виробництва біогазу в Індії становить 2,5–3 мільйони кубометрів.

Лідером у виробництві біогазу є Європейський Союз, особливо Німеччина. У ЄС налічується понад 11 тисяч біогазових установок, із яких 7,2 тисячі розташовані в Німеччині. У 2010 році загальне виробництво біогазу в ЄС досягло 10,9 мільйона тон (еквівалент 13,5 мільярда кубометрів природного газу), з яких 6,7 мільйона тон було вироблено в Німеччині. Річний приріст виробництва біогазу в Європі становив 31,3%.

### **3.2 Мікробіологічні та біохімічні основи процесів метаногенезу**

Метанове бродіння (зброджування) — це безкисневий біологічний процес конверсії поживних речовин у біогаз, який складається з метану ( $\text{CH}_4$ ) і вуглекислого газу ( $\text{CO}_2$ ).

Катаболізм метанового бродіння є видом анаеробного дихання. Електрони, які звільняються при дисиміляції, переносяться на вуглекислий газ, який відновлюється до метану. В метаногенезі акцептором виступає  $\text{CO}_2$ .

а донором електронів для метаногенів є водень ( $H_2$ ) та оцтова кислота ( $CH_3COOH$ ).

Процес утворення біогазу включає складний ланцюг біодеструкції, у якому задіяна асоціація різних груп мікроорганізмів:

1. Деструктори — забезпечують гідроліз складної органічної маси з утворенням проміжних продуктів, таких як органічні кислоти (масляна, пропіонова, молочна), спирти, аміак і водень.

2. Ацетогени — перетворюють органічні кислоти, спирти й інші продукти гідролізу на оцтову кислоту, водень і вуглекислий газ.

3. Метаногени — використовують водень і оцтову кислоту для синтезу метану, відновлюючи кислоти, спирти та окиси вуглецю.

Цей комплексний біологічний процес дозволяє ефективно переробляти органічні відходи у високоефективне джерело енергії — біогаз [7].

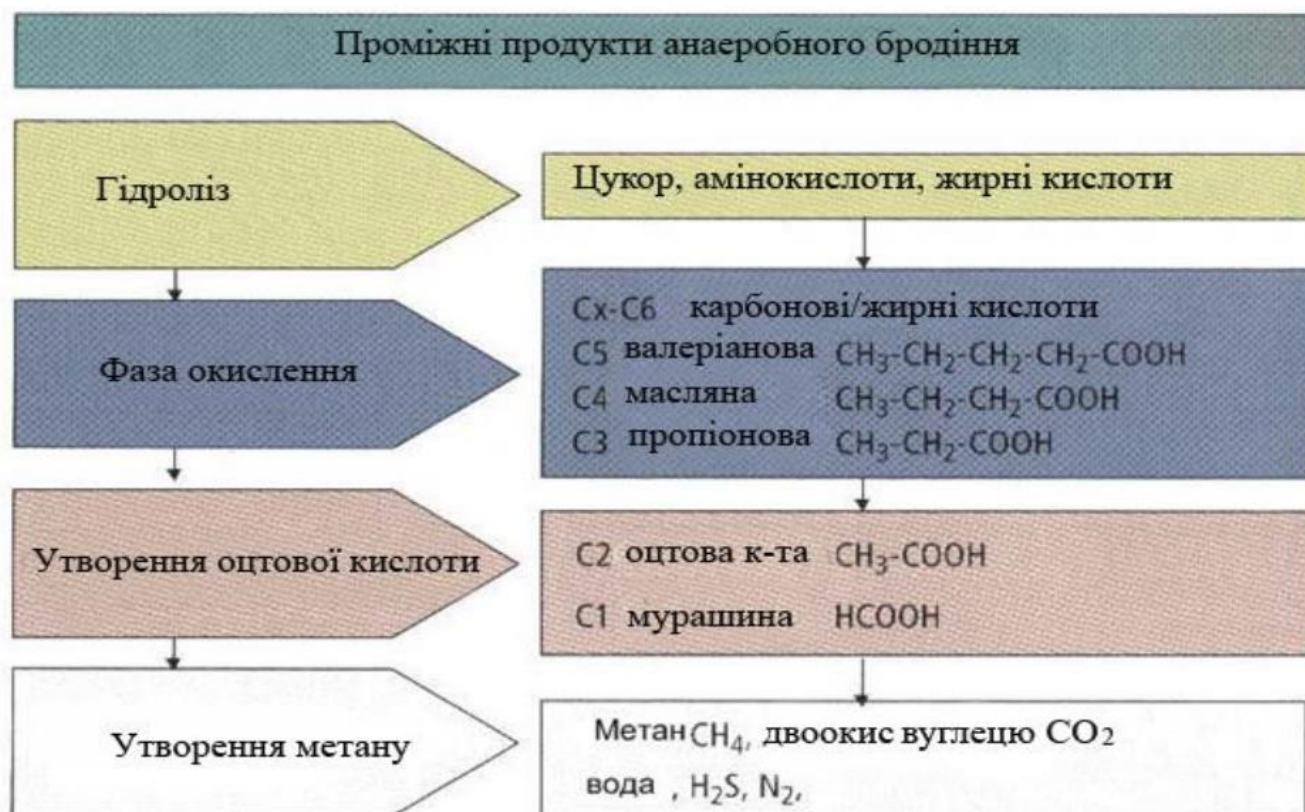


Рисунок 3.2 – Продукти анаеробного бродіння

Анаеробне бродіння є багатостадійним процесом, у якому беруть участь кілька видів мікроорганізмів, що взаємодіють між собою.

Перша стадія – кислотогенна або воднева

Ця стадія характеризується розщепленням складних органічних полімерів на простіші сполуки під дією ензимної активності мікробіоти.

Етапи першої стадії:

1. Гідроліз органічних полімерів:

- білки, ліпіди та полісахариди розщеплюються до простіших молекул (моноцукрів, карбонових кислот і алкоголятів).

- мікробіота (*Clostridium*, *Bacteroides*, *Butirivibro*) здійснює безпосередній контакт із субстратом, що піддається гідролізу.

2. Подальший розклад продуктів гідролізу:

- мікроорганізми мікрофлори розсіювання функціонують у рідкому середовищі, розкладаючи моноцукри, органічні кислоти й спирти, утворені під час гідролізу;

- результатом є утворення низькомолекулярних речовин, це водня ( $H_2$ ), вуглекислого газу ( $CO_2$ ), карбонових кислот (летк жирні кислоти, ЛЖК) і спиртів.

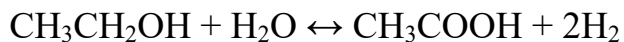
Типи бактерій, що беруть участь у цій стадії, це облигатні анаеробні бактерії: *Clostridium*, *Bacteroides*, *Butirivibro*, факультативні анаеробні бактерії: *Escherichia coli*, *Bacillus sp.*

Перша стадія є критичною для подальших етапів анаеробного бродіння, адже саме тут утворюються основні субстрати (водень, ЛЖК,  $CO_2$ ), необхідні для наступних стадій процесу.

Друга стадія анаеробного бродіння – метанова або лужна

Ця стадія є завершальним етапом анаеробного бродіння, на якому утворюється метан ( $CH_4$ ) і вуглекислий газ ( $CO_2$ ). Основну роль у цьому процесі відіграють метаногени – спеціалізовані бактерії, які здатні перетворювати обмежений набір субстратів у метан. Основні субстрати для метаногенів: водень ( $H_2$ ), вуглекислий газ ( $CO_2$ ), органічні кислоти це –

мурашина кислота (НСООН), оцтова кислота  $\text{CH}_3\text{COOH}$ ), спирти – метанол ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ), метиловані сполуки: моно-, ді- та триметиламіни.



Під час цієї стадії субстрати, які використовуються метаногенами, частково присутні після стадії кислотогенезу. Однак їх основну кількість продукують так звана синтрофна мікрофлора – це ацетогенні бактерії (перетворюють складні органічні кислоти, спирти та інші леткі сполуки в оцтову кислоту, водень і вуглекислий газ) та гомоацетогенні бактерії (сприяють утворенню оцтової кислоти з вуглекислого газу та водню).

Характерними особливостями метаногенів є температура (оптимальна для термофільних і мезофільних груп) та кислотно-лужний баланс (рН) – найефективніше функціонують у лужному середовищі. Ця стадія є ключовою для утворення біогазу, адже основним кінцевим продуктом є метан, який становить його основну частку.

Синтрофні мікроорганізми відіграють критичну роль у розкладанні органічних кислот і спиртів, що є важливим етапом підготовки субстратів для метаногенів [3]. Основні представники синтрофної мікрофлори, облігатні анаероби (*Syntrophobacter*, *Syntrophomonas*), факультативні анаероби: *Desulfovibrio*

Особливості функціонування синтрофних бактерій:

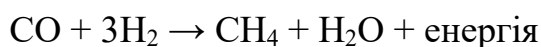
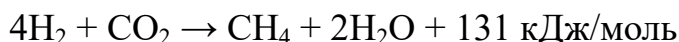
- розкладання органічних кислот і спиртів (наприклад, бутирова, пропіонова кислоти) до оцтової кислоти ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) і водню ( $\text{H}_2$ );
- залежність від низьких концентрацій водню, цей процес є термодинамічно можливим лише за дуже низького рівня водню в середовищі.

Роль водень-використовуючих метаногенів заключається в тому, що метаногени, що належать до родів *Methanobacterium*, *Methanobrevibacter*, *Methanosarcina*, виконують функцію видалення водню з середовища, перетворюючи його разом із вуглекислим газом на метан ( $\text{CH}_4$ ). Зниження концентрації водню метаногенами забезпечує умови, за яких синтрофні

бактерії можуть продовжувати розклад органічних речовин. Це підтримує рівновагу і дозволяє продовжувати цикл біоконверсії органіки в біогаз.

Взаємозалежність метаногенів і синтрофів є прикладом синтрофії – обов’язкової співпраці, за якої життєдіяльність одних організмів безпосередньо залежить від метаболічної активності інших.

Синтрофні бактерії та метаногени формують комплексну екосистему, яка забезпечує ефективний розклад органічної речовини до кінцевих продуктів метанового бродіння – метану і вуглекислого газу [7].

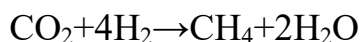


Механізм утворення метану в анаеробних процесах характеризується формуванням метану з двох основних джерел: водню та вуглекислого газу (водневий шлях), а також з ацетату і мурашиної кислоти.

Роль водень-використовуючих метаногенів:

- водневий шлях у процесі анаеробного бродіння забезпечує лише 28 % від загальної кількості метану.

- цей шлях включає використання водню ( $\text{H}_2$ ) як донора електронів  $\text{CO}_2$  як акцептора, що призводить до утворення метану



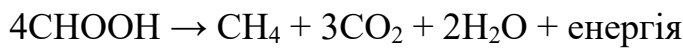
-цей процес є важливим для підтримання низької концентрації водню, необхідної для роботи синтрофних бактерій.

Основний шлях метаногенезу – ацетатний, 72 % метану утворюється шляхом розкладання ацетату ( $\text{CH}_3\text{COO}^-$ ) і мурашиної кислоти ( $\text{НСООН}$ ):



Перевагами ацетатного шляху є висока ефективність, за рахунок перетворення ацетату на метан, що є енергетично вигідним процесом для метаногенних бактерій. Висока частка метану, що утворюється саме на цьому етапі, яка робить його ключовим для утворення газів. Сталість процесу забезпечується стабільним середовищем для роботи мікроорганізмів.

Водень-використовуючі метаногени відіграють важливу роль у метаногенезі, забезпечуючи приблизно чверть від загального виробництва метану. Основний внесок у формування біогазу здійснюється через перетворення ацетату та мурашиної кислоти, що робить цей шлях основним у технологіях анаеробного дихання [7].



*Methanosarcina* і *Methanothrix* – це метанобактерії, які перетворюють оцтову кислоту.

Метаногени є важливою групою мікроорганізмів, що належать до архебактерій. Вони мають низку специфічних характеристик, які відрізняють їх від інших бактерій, і виконують ключову роль у процесі метаногенезу — утворення біогазу. Основні аспекти, які визначають їх особливості:

#### 1. Біохімічні та фізіологічні характеристики

- метаногени розвиваються повільно, що є однією з причин труднощів у їх виведенні та культивуванні в лабораторних умовах;

- метаногени дуже залежать від умов довкілля, зокрема до наявності розчиненого кисню або інших окислювачів. Вони можуть жити лише в умовах суворої анаеробності.

- метаногени належать до архебактерій, що не мають муреїну в клітинній стінці, що є характерним для більшості бактерій; специфічний склад жирів, що не містять карбонових кислот; ДНК має послідовність 16S рРНК, унікальні характеристики, що дозволяють відрізнити архебактерії від інших прокаріот.

#### 2. Специфічні ферменти та біохімічні процеси:

- метаногени використовують специфічні ферменти, такі як фактори F20 і F30 та кофермент M, для здійснення своїх метаболічних процесів. Ці ферменти є критичними для каталізу реакцій, що призводять до утворення метану;

- метаногени є суворими анаеробами, що означає, що вони не можуть існувати в присутності кисню. Вони відновлюють вуглекислий газ або

органічні сполуки до метану, виводячи водень або оцтову кислоту як побічні продукти.

### 3. Температурні умови та харчування

-метаногени можуть бути як мезофільними (потребують температури в межах 25-40°C), так і термофільними (оптимум 40-55°C);

- метаногени можуть бути гетеротрофами (живитися органічними сполуками) або автотрофами (виробляти свою їжу за допомогою хімічних реакцій, зокрема з водню та вуглекислого газу).

### 4. Симбіоз з іншими мікроорганізмами

Метаногени активно взаємодіють з іншими групами мікроорганізмів у симбіотичних відносинах, що сприяє їх розвитку. Інші мікроорганізми (як, наприклад, деструктори органічної речовини) постачають метаногенам необхідні субстрати — органічні кислоти (особливо ацетат) або водень, що є джерелами енергії для утворення метану.

### 5. Роль у метаногенезі

Метаногени є ключовими мікроорганізмами в процесі метаногенезу, який є останньою стадією біологічного розкладу органічних сполук в анаеробних умовах. Вони відновлюють органічні речовини, такі як ацетат та вуглекислий газ, до метану (CH<sub>4</sub>), що є основним компонентом біогазу.

Метаногени є особливою групою археобактерій, що відрізняються своєю здатністю до метаногенезу в анаеробних умовах. Вони мають унікальні біохімічні властивості, ферменти та здібності до симбіозу з іншими мікроорганізмами, що дозволяє їм ефективно функціонувати в екологічних нішах, де створюється біогаз.

Метаногенне оточення є складною екологічною системою, у якій взаємодіють різні групи мікроорганізмів. Вони відрізняються за своїми фізіологічними характеристиками, біохімічними властивостями та умовами росту. Успішність анаеробного метанового бродіння залежить від гармонійного співіснування цих груп і їхньої здатності адаптуватися до умов середовища. Час подвоєння біомаси бактерій різних груп при температурі

35°C варіюється залежно від їхніх функціональних, фізіологічних особливостей та параметрах росту:

- гідролітичні мікроорганізми розмножуються 10–20 годин і відповідають за початкову стадію розщеплення складних органічних сполук;

- негідролітичні кислотогени розмножуються 1–10 годин і перетворюють проміжні продукти на леткі жирні кислоти (ЛЖК) та інші субстрати;

- синтрофні бактерії розмножуються близько 100 годин і забезпечують утворення субстратів, необхідних для метаногенів, працюючи при низьких концентраціях водню;

- метанові бактерії розмножуються 15–100 годин і завершують процес, утворюючи метан із доступних субстратів.

Кожна група мікроорганізмів представлена кількома родами (видами), які мають різну кінетику росту. *Methanosarcina* мають час подвоєння біомаси 20–30 годин і вони ефективні при відносно високих концентраціях ацетату. *Methanothrix* (*Methanosaeta*) подвоюють біомасу за 200–300 годин, але ці бактерії можуть використовувати ацетат у п'ять разів нижчій концентрації, ніж *Methanosarcina*. Перевага того чи іншого роду залежить від складу субстрату, його концентрації та умов проведення процесу (температура, рН, анаеробність).

Метаногенез є системним процесом, який не можна зрозуміти, розглядаючи окремо властивості окремих видів мікроорганізмів. Необхідно аналізувати весь комплекс взаємовідносин між функціональними групами. Метаногенне оточення є складною багатокomпонентною системою, у якій різні групи мікроорганізмів функціонують у тісній взаємодії. Гармонійна робота цих груп визначає ефективність анаеробного метанового бродіння, яке залежить як від властивостей окремих видів, так і від умов навколишнього середовища.

Просторові структури метанових бактерій в анаеробних біореакторах

Метанові бактерії, взаємодіючи між собою та іншими мікроорганізмами, здатні утворювати складні просторові структури, що мають важливе значення для функціонування анаеробних біореакторів. Такі утворення включають:

1. Флокули (пластівці): Кластери бактерій, що плавають у рідині.
2. Біоплівки: Щільні структури бактерій, прикріплені до поверхонь.
3. Гранули: Компактні тривимірні утворення, розмір яких може досягати кількох міліметрів.

Біоплівки в анаеробних біореакторах мають товщину, яка зазвичай становить 1–4 мм, оптимальна товщина плівки – до 1 мм, що забезпечує вільне проникнення субстратів та ефективний відвід метаболітів. При перевищенні цієї товщини зростає опір дифузії, що обмежує ефективність реакцій. Метаногенна плівка має крихку структуру, яка сприяє обміну речовинами, але вимагає дбайливого поводження для запобігання її руйнуванню.

Анаеробні біореактори другого покоління побудовані з урахуванням явища утворення бактеріальних макроструктур [12]. Переваги таких реакторів:

1. Висока концентрація біомаси, що забезпечує інтенсивність процесу.
2. Можливість підтримувати локальні оптимальні умови для мікроорганізмів.
3. Стійкість до зовнішніх впливів, таких як токсичність субстратів.

Таким чином, використання просторових структур, зокрема біоплівок, є ключовим для підвищення ефективності анаеробного метанового бродіння та розширення можливостей сучасних біореакторів.

Біогаз, піддається осушенню, потім подається і зберігається у газгольдерах. Біогаз не потребує очищення, тому що тут же спалюється в когенераційній установці. Хімічний склад утвореного біогазу наведений на рис 3.3

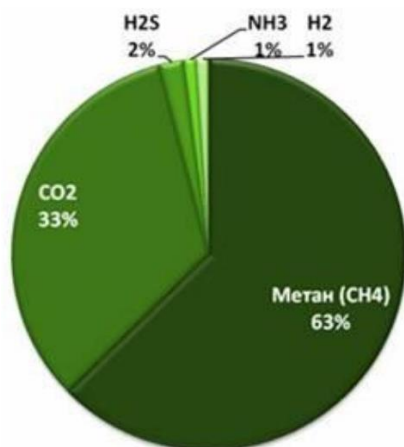


Рисунок 3.3 – Відсотковий склад утвореного біогазу

### 3.3 Етапи технологічного процесу

Біогазова установка працює на органічній сировині, як було показано в попередніх розділах. Вихід газу і його склад залежать виду та складу сировини. На рисунку 3.4. показана схема біогазової установки, де у якості сировини відходи тваринництва з додаванням рослинних відходів.

#### Принцип роботи біогазової установки

1. Збір та підготовка сировини, що підлягає обробці, спочатку надходить до станції зважування, де її маса точно визначається. Під час транспортування сировини здійснюється її підігрів, що покращує подальше оброблення.

2. Ультразвукова обробка відбувається після зважування сировини коли надходить до камери ультразвукової обробки, де додається необхідна кількість води для підтримки робочої вологості субстрату. Ультразвукова обробка покращує структуру сировини, що збільшує вихід біогазу в 1,4-1,7 рази та пришвидшує процес метаногенезу. Цей етап є важливим для інтенсифікації виробництва біогазу.

3. Ферментація відбувається після ультразвукової обробки, сировина подається до ферментатора, де здійснюється основний процес анаеробного зброджування. Ферментатор має систему перемішування та обігріву, що

створює оптимальні умови для активного росту метаногенних бактерій і прискорює біогазовий процес.

4. Накопичення та використання біогазу. Отриманий біогаз накопичується у газгольдері, звідки він надходить до очисних споруд. Біогаз використовують як теплове та енергетичне джерело для живлення процесів на станції. Транспортування та захист насосів відбувається за рахунок транспортування субстрату в систему за допомогою насосів з попередньо встановленими подрібнювачами, що захищають насоси від пошкоджень, спричинених великими твердими частками. Покращення ефективності процесу відбувається за допомогою ультразвукової обробки. Ультразвукова обробка є важливим етапом, оскільки вона сприяє:

- полегшенню подальшого гідролізу органічних сполук;
- покращенню структури та гідравлічних властивостей субстрату, що дозволяє отримати більшу кількість біогазу за менший час;
- зменшенню часу, необхідного для початку метаногенезу, що сприяє більш ефективному процесу.

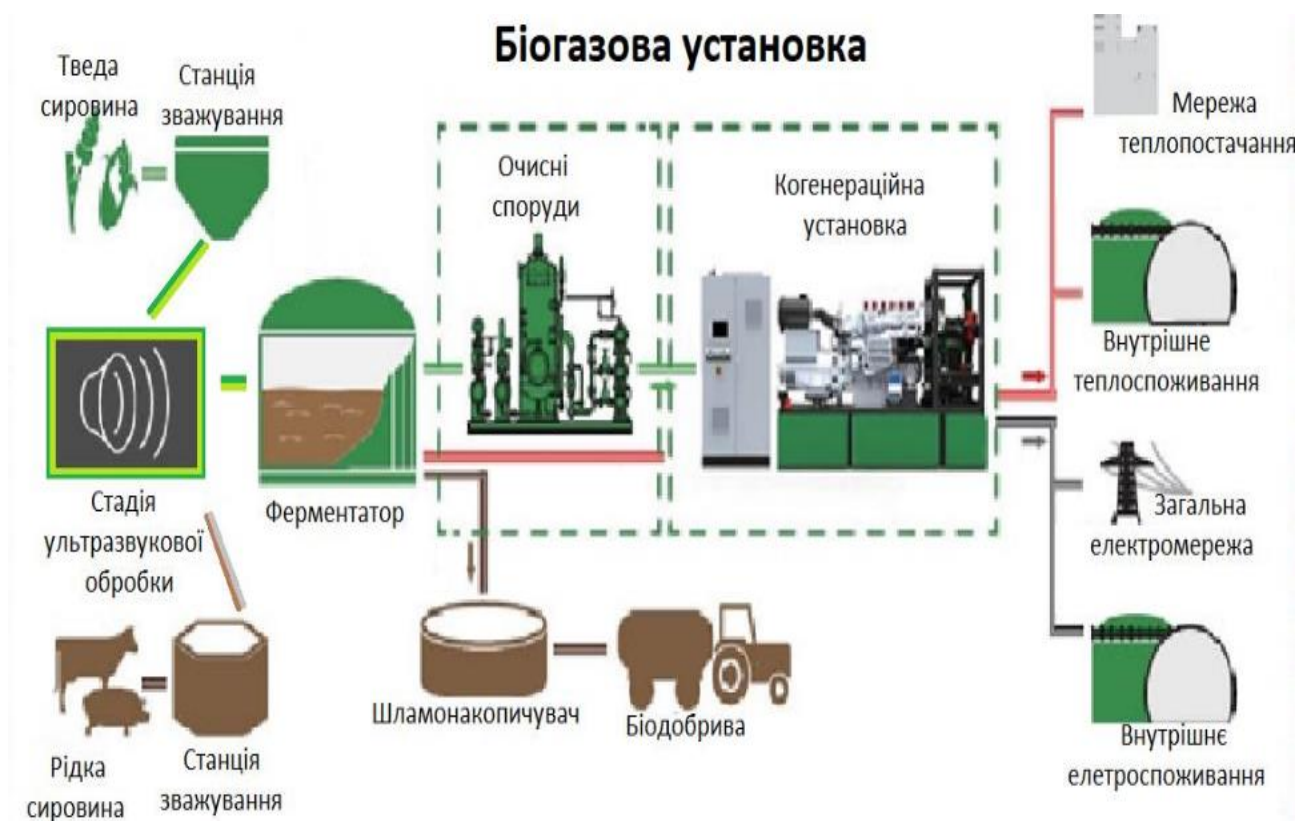


Рисунок 3.4 – Схема біогазової установки

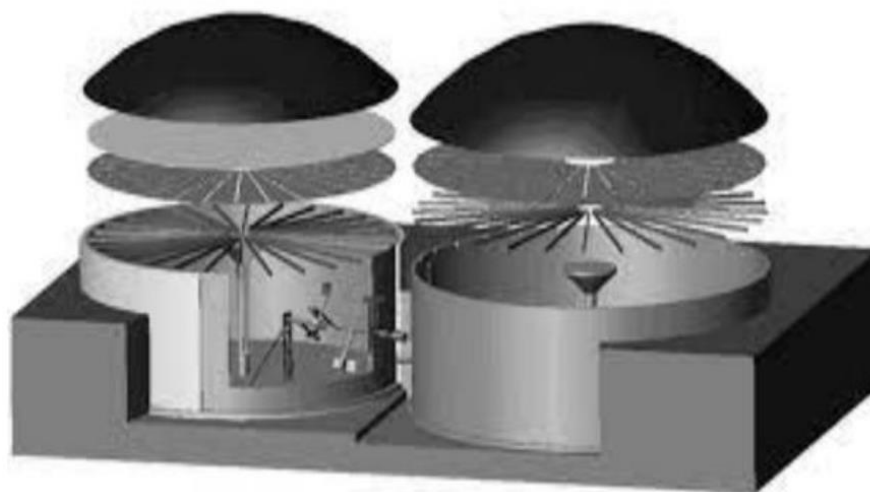


Рисунок 3.5 – Ферментатор



Рисунок 3. 6 – Газгольдер



Рисунок 3.7 – Когенераційна установка

Таким чином, інтенсифікація процесу з допомогою ультразвукової обробки значно покращує загальну ефективність біогазової установки [16].

Характеристика технологічного процесу послідовно складається зі стадій:

ДР1 Підготовчий етап. Налаштування апаратури. Починається робота, з проведення перевірки всіх апаратів на герметичність. Контролюються технологічні параметри роботи обладнання, герметичність апаратів та трубопроводів.

ДР2 Нагрівання води. Вода певної температури необхідна для метантенку для підтримання температури метаногенезу. Вода нагрівається за допомогою гарячих вихлопних газів, що утворилися при спалюванні біогазу в когенераційній установці. Холодна вода знову використовується для приготування гарячого теплоносія, якщо вода втрачається, то відповідний об'єм поповнюється. Контроль температури.

ДР3 Підготовка технологічного повітря виконується для забезпечення процесу спалювання газу. Забір атмосферного повітря здійснюється на висоті 10 метрів, після чого воно подається до фільтраційної системи. Для очищення використовуються касетні фільтри, здатні затримувати мікрочастинки розміром до 0,2 мікрона з ефективністю 99,5 %. Повітря повинно бути очищеним від вибухонебезпечних сумішей. Після етапу фільтрації повітря компресується, а конденсат відводиться. Контроль параметрів температури та тиску здійснюється на всіх етапах процесу.

ДР4 Підготовка сировини. Вона, постачається у збірники. Для початку роботи, необхідно накопичити її добовий запас. Гній та солома накопичуються окремо.

ДР4.1. Гній накопичується. Накачується за допомогою насосів. Контролюється рівень заповнення, температура та рН гною.

ДР4.2 Подрібнення гною виконується до заданого розміру часток ( $d = 1-3$  мм) із забезпеченням його гомогенізації. Цей процес здійснюється у змішувачі, оснащеному мішалкою-подрібнювачем. Конструкція мішалки

передбачає наявність лопатей, які одночасно виконують функції ножів для подрібнення.

ДР4.3 Накопичення соломи здійснюється у спеціальному збірнику, куди вона завантажується з вантажних автомобілів, що доставляють її на підприємство, або транспортується зі складу. У процесі забезпечується контроль рівня заповнення збірника.

ДР4.4 Подрібнення соломи. Забезпечується за допомогою молоткової дробарки, ступень подрібнення ( $d=1-3$  мм)

ДР5 Підготовка субстрату.

ДР5.1 Змішування субстрату включає комбінування відходів свиноферми та соломи, що забезпечує оптимальний рівень амонійного азоту та співвідношення C:N, необхідне для ефективного зброджування. Рекомендоване співвідношення маси гною до соломи становить 8:1 [17]. У процесі змішування здійснюється контроль рівня рН і вологості субстрату.

ДР5.2 Розбавлення субстрату здійснюється у змішувачі, де подрібнена сировина досягає необхідного рівня вологості. Оптимальна вологість субстрату становить 95%. У процесі проводиться контроль рівня заповнення, рН та вологості сировини.

ТП6 Метаногенез відбувається шляхом подачі сировини в метантенк для анаеробного зброджування. Процес є безперервним і передбачає регулярне додавання субстрату, з одночасним відбором збродженої маси в обсязі, еквівалентному доданій сировині. Для забезпечення мезофільного режиму культивування в змієвик метантенка подається гаряча вода, яка після охолодження повертається в систему для повторного використання. Оптимальна температура в метантенку має становити 36-38°C. Крім того, контролюється рівень рН, який повинен залишатися в межах 6,8-7,2 для забезпечення стабільності процесу зброджування.

Протягом процесу метаногенезу регулярно відбираються проби для контролю ходу зброджування. Загальний час зброджування становить 20 діб, однак його тривалість уточнюється на основі аналізу відібраних проб.

Для забезпечення рівномірного перебігу процесу та підвищення виходу біогазу здійснюється постійне перемішування субстрату за допомогою турбінної мішалки, яка працює з частотою обертання 40 об/хв.

Протягом усього процесу контролюються рівень заповнення метантенка, температура (36-38°C) та рН (у межах 6,8-7,2).

ТП7 Конденсаційне осушування біогазу здійснюється шляхом проходження біогазу через газопровід, прокладений на глибині 1,5 м. Температура середовища варіюється залежно від сезону: влітку в межах 12-16°C, а взимку – близько 3°C.

За рахунок перепаду температур волога, що міститься в біогазі, конденсується. Утворений конденсат разом із аерозолями видаляється та збирається у конденсатозбірнику. Рідкі відходи (конденсат) спрямовуються на обробку до стадії ПВ11. У процесі постійно контролюється температура для забезпечення ефективності осушування.

ТП8 Накопичення біогазу в газгольдерах здійснюється шляхом подачі біогазу від ТП7 до газгольдерів, де він зберігається під тиском 0,5 МПа. Звідти біогаз транспортується для спалювання на ТП9, а утворений конденсат спрямовується на обробку до стадії ПВ11 [17]. У процесі забезпечується постійний контроль тиску для підтримання стабільних умов зберігання.

ТП9 Спалювання біогазу в когенераційній установці здійснюється із забезпеченням подачі повітря від ДРЗ для підтримання оптимальних умов горіння. Виділена теплота нагрітих газів використовується для підготовки гарячої води на ДР2, яка подається в метантенк для підтримання мезофільного режиму та сушіння субстрату на стадії ПВ10.2.

Водночас електроенергія, що виробляється під час роботи когенераційної установки, спрямовується в енергомережу.

ПВ10 Обробка субстрату. Зброджений залишок, що надійшов від ТП8, накопичується в збірнику.

ТП10.1 Відділення твердої фракції на шнековому сепараторі відбувається після зброджування суміші на ТП 6. Процес розділення на рідку

та тверду фракції здійснюється на шнековому сепараторі до досягнення вологості 70%.

Фільтрат, що утворюється, відводиться до ПВ11, де він збирається разом з іншими рідкими відходами виробництва. Твердий броджений залишок направляється на обробку до ПВ10.2. Протягом процесу контролюється тиск для забезпечення стабільності роботи системи.

ПВ10.2 Сушіння здійснюється за рахунок гарячих вихлопних газів від ТП9. Процес сушіння триває до досягнення кінцевої вологості субстрату, яка не повинна перевищувати 15%.

Утворений конденсат направляється на ДР5.2 для розбавлення субстрату. Відпрацьовані гази після процесу сушіння направляються на очищення. Протягом усього процесу постійно контролюються температура та вологість для забезпечення ефективності сушіння.

ПВ10.3 Гранулювання здійснюється для полегшення транспортування, зберігання та використання зброженого субстрату. Твердий зброжений субстрат гранулюється і вивозиться для подальшого застосування. Гранульований субстрат використовують як біодобриво, яке засвоюється рослинами значно краще, ніж вихідна сировина. Протягом процесу контролюється розмір частинок гранул для досягнення оптимальних характеристик.

ПВ11 Накопичення рідких відходів відбувається шляхом збору фільтрату від ПВ10.1 та конденсату від ДР3 і ТП8 в спеціальний збірник. Ці рідкі відходи вивозяться на поля та використовуються як рідке біодобриво, багате мікроелементами та мінеральними речовинами.

Ко-ферментація є сучасним підходом до підвищення ефективності анаеробного зброжування, оскільки дозволяє використовувати різні види органічних відходів для поліпшення процесу зброжування та отримання більшої кількості біогазу.

Ко-ферментація передбачає одночасне використання кількох видів субстратів з метою [14]:

- збалансування поживних речовин, таких як вуглець (C) і азот (N);
- оптимізації умов процесу, таких як вологість, рН, та уникнення накопичення інгібіторів;
- збільшення виходу біогазу завдяки синергії між субстратами;
- забезпечення стабільності процесу та різноманітності мікроорганізмів, які беруть участь у деградації органічної речовини.

Хімічні аспекти та інгібітори:

- вуглеводи та жири сприяють високому співвідношенню C/N, проте їх надлишок може викликати накопичення летких жирних кислот (ЛЖК);
- білки знижують співвідношення C/N, що може призводити до надлишку амонію, який пригнічує метаногенез;
- рослинні відходи часто характеризуються високим рівнем C/N, проте низький рН та надмірне накопичення ЛЖК можуть дестабілізувати процес;
- лігніноцелюлозні відходи (наприклад, деревні відходи) мають високий рівень C/N (>100), що призводить до нестачі азоту.
- гній та пташиний послід містять надлишок азоту (низький C/N), виділяючи значну кількість амонію, що може викликати інгібування.

Переваги ко-ферментації:

- оптимальне співвідношення C/N забезпечує поживні речовини для мікроорганізмів та зменшує накопичення ЛЖК, амонію та інших інгібіторів.
- підвищений вихід біогазу при ко-ферментації часто перевищує сумарний вихід від окремих субстратів.
- стабільність процесу покращується завдяки комбінованому внесенню субстратів.
- підвищення різноманіття мікроорганізмів забезпечується за рахунок різних видів субстратів.
- силос кукурудзи є найбільш популярною культурою для біогазових установок завдяки легкій силосації та стабільності процесу зброджування,

високій енергетичній привабливості, можливості використовувати спеціальні сорти кукурудзи з підвищеним виходом біомаси [5].

Ефективність ко-ферментації з силосом кукурудзи. Дослідження демонструють ефективність сумісного зброджування кукурудзяного силосу з іншими субстратами:

-гній ВРХ + силос кукурудзи (4:1): вихід біогазу становить 152 дм<sup>3</sup>/кг сухої речовини;

-гній ВРХ + силос кукурудзи (9:1): вихід біогазу досягає 194 дм<sup>3</sup>/кг сухої речовини (за вологості 90% та перемішуванні).

Основні переваги ко-ферментації полягає в зниженні концентрації амонію, яка спостерігається при зброджуванні лише гною; підвищення виходу метану за рахунок оптимізації співвідношення С:N; збільшення інтенсивності біогазового виходу на одиницю об'єму метантенка.

Ко-ферментація дозволяє не лише підвищити ефективність виробництва біогазу, але й забезпечити стійкість та екологічність процесу.

Таблиця 3. 1 – Хімічний склад біогазу

Газ	Хімічна формула	Об'ємна частка, %
Метан	CH <sub>4</sub>	40-70
Вуглекислий газ	CO <sub>2</sub>	30-60
Інші гази		1-5
Водень	H <sub>2</sub>	0-1
Сірководень	C <sub>2</sub> S	1-2

Таблиця 3. 2 – Показники біогазу з різних органічних відходів

Категорія сировини	Питомий вихід біогазу, м <sup>3</sup> /т	Вміст метану в біогазі, %
Коров'ячий гній	39 - 55	60 - 64
Свинячий гній	49 - 57	61 - 65
Пташиний послід	46 - 108	59 - 63
Силос кукурудзяний	210 - 400	52 - 59
Пивна дробина	59 - 98	50 - 65
Овочеві відходи	330 - 500	45 - 65
Відходи скотобійні	240 - 510	47 - 54
Стічні води	70 - 100	45 - 60
Тверді побутові відходи	100 - 180	45 - 53
Жирова тканина	1250 - 1300	54 - 70

Для з'ясування виходу біогазу з субстрату свинячого гною провели експеримент.

Свинячий гній містить поживні речовини, необхідні для росту бактерій, однак його хімічний склад залежить від кількох факторів: виду тварин, типу годування, способу утримання, технології зберігання.

Вологість гною без підстилки становить 87–88%. Співвідношення вуглецю до азоту (C:N) становить лише 6:1, що є занадто низьким для ефективного анаеробного зброджування. Для оптимального процесу потрібно досягти співвідношення 30:1. Це можливо шляхом додавання косубстратів – матеріалів із високим вмістом вуглецю, таких як солома, побутові чи сільськогосподарські відходи.

В якості косубстрату взяли силос кукурудзяний в співвідношенні силос/гній. Були взяті 4 зразки з різним співвідношенням: №1 – 1:3,4; №2 – 1:1,7; №3 – 1:1,1; №4 – 1:1,5.

Загальний вихід біогазу та вміст метану в ньому за період ферментації показано на рис. 3.8, табл.3.2 . Вміст метану у біогазі вищий при більших пропорціях гною в субстраті. За співвідношення силос/гній 1:3,3 вміст метану досягає  $71 \pm 2\%$ . При співвідношенні 1:1,7 та 1:1,5 вміст метану варіюється в межах 66-70%. При збільшенні концентрації силосу вміст метану знижується і становить  $55 \pm 2\%$  за співвідношення компонентів 1:1,1. За таких умов відбувається закисання середовища, що призводить до припинення продукування метану, оскільки переважає процес гідролізу, і в основному утворюється  $\text{CO}_2$ .

Таблиця 3.2 – Вихід біогазу на г СОР

Показник	1	2	3	4
Вихід біогазу, см <sup>3</sup> /г СОР	184	265	56	165

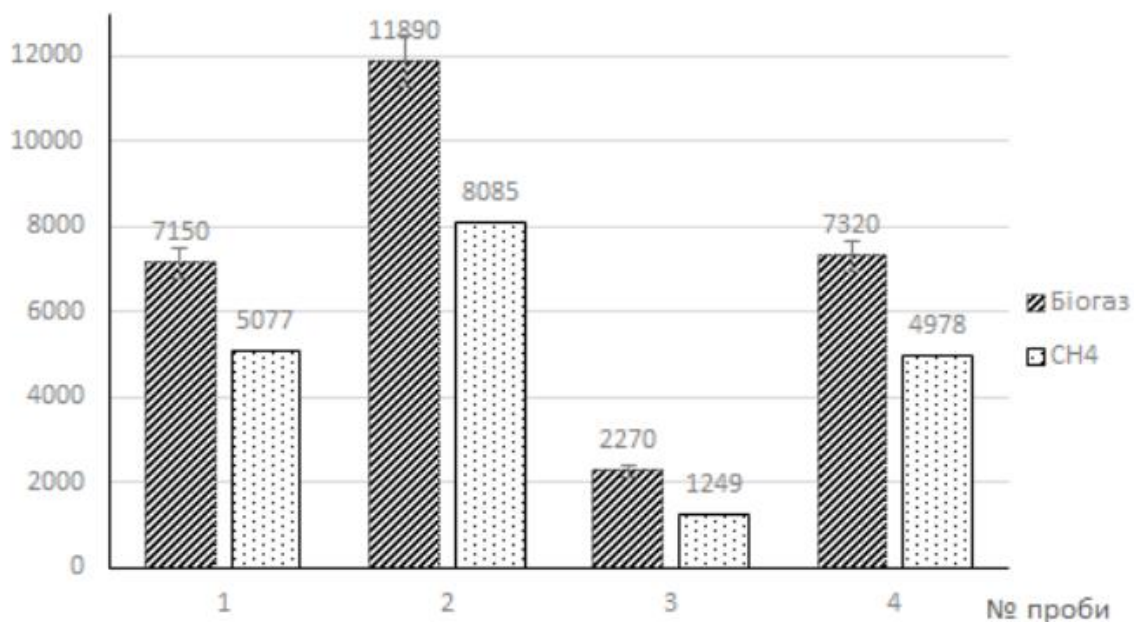


Рисунок 3.8 – Загальний вихід біогазу та метану (V) за 20 діб ферментації за різного вмісту компонентів субстрату силос/гній: №1 – 1:3,4; №2 – 1:1,7; №3 – 1:1,1; №4 – 1:1,5.

В таблиці 3.2 наведено вихід біогазу, що одержано з одиниці сухої органічної речовини. Як загальний вихід біогазу, так і його питомий вихід з 1 г СОР має максимальне значення при співвідношенні силос/гній 1:1,7. При цьому вихід на 40% більший по відношенню до співвідношення 1:3,3 і на 60% більше, ніж при співвідношенні 1:1,5. Вихід біогазу корелює з даними існуючих промислових технологій метанового зброджування.

Вихід біогазу має максимальне значення при співвідношенні силос/гній 1:1,7. В такому випадку вихід біогазу на 40% більший порівняно зі співвідношенням 1:3,3 і на 60% більше, ніж при співвідношенні 1:1,5.

Таким чином, заміну хімічних речовин, які використовуються для підвищення значення рН при ферментації силосу з отриманням біогазу, можна здійснити за допомогою гною свиней. Послід, на відміну від хімічних реагентів, сам виступає субстратом для мікроорганізмів, що сприяє збільшенню виходу біогазу та підвищенню вмісту метану в ньому.

## РОЗДІЛ 4

### ОХОРОНА ПРАЦІ

#### 4.1. Аналіз потенційно небезпечних та шкідливих факторів

Процес виробництва біогазу передбачає роботу з органічними відходами, хімічними речовинами та обладнанням, що створює низку потенційних ризиків. Аналіз основних небезпечних та шкідливих факторів включає такі аспекти:

##### I. Хімічні небезпеки

##### 1. Викиди газів:

- сірководень ( $\text{H}_2\text{S}$ ), токсичний газ, що утворюється під час анаеробного бродіння. Ризиками є отруєння дихальної системи, небезпека смерті при високих концентраціях;

- метан ( $\text{CH}_4$ ), вибухонебезпечний газ. Ризиками, є створення пожежонебезпечної атмосфери у випадку витоку;

- вуглекислий газ ( $\text{CO}_2$ ), є небезпечний у закритих приміщеннях через витіснення кисню.

2. Хімічними речовинами для очищення та обслуговування є луги та кислоти для очищення систем можуть спричиняти опіки та корозію матеріалів.

##### II. Біологічні небезпеки

-контакт із патогенами, відбувається за рахунок біоти, яка міститься в органічних відходах, що містять патогенні бактерії (сальмонели, кишкові палички), гельмінти та інші паразити. Ризиками є зараження шкіри, слизових оболонок, можливість інфекційних захворювань;

- аерозолі, що утворюються під час роботи з органічними рідинами створюють ризик вдихання мікроорганізмів.

##### III. Механічні небезпеки

- робота з обладнанням, це насоси, подрібнювачі, змішувачі, які можуть спричинити травми через обертальні частини. Ризиками є порізи, забиття, защемлення;

- падіння та удари можливі через неправильну організацію робочого простору (слизькі підлоги, відсутність огорож) може спричинити травми.

#### IV. Технологічні небезпеки

1. Порушення роботи системи за рахунок неконтрольованого виділення газів або їх накопичення у замкнених просторах та відмова систем нагрівання або змішування спричиняють зупинку процесу.

2. Вибухи та пожежі призводять до витoku метану та його займання. Ризиками є пошкодження обладнання, травми персоналу.

#### V. Фізичні небезпеки

1. Температурний вплив високих температур під час роботи з нагрівальними елементами та ризики опіків при контакті з гарячими поверхнями.

2. Шум і вібрація від обладнання, як-от змішувачі та насоси, може створювати небезпечний рівень шуму та вібрації. Ризиками є зниження слуху, втома, негативний вплив на опорно-руховий апарат.

#### VI. Екологічні ризики

1. Забруднення ґрунту та води від витоків необроблених органічних відходів або токсичних речовин. Ризиками є забруднення природного середовища, негативний вплив на здоров'я населення.

2. Парникові гази призводять до неправильного управління процесом, який може спричинити викиди метану та вуглекислого газу в атмосферу.

VII. Психофізіологічними факторами є фізичне та емоційне навантаження. Для запобігання потрібно постійний контроль процесу, робота у змінних умовах. Ризиками є перевтома, стрес, зниження концентрації.

Рекомендації для зниження ризиків:

1. Технічні заходи потребують: установлення газоаналізаторів для моніторингу  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{CH}_4$  та  $\text{CO}_2$ , забезпечення вентиляції у приміщеннях, застосування герметичних систем для транспортування та зберігання.
2. Організаційні заходи потребують: розробку чітких інструкцій з експлуатації обладнання; проведення регулярних навчань з техніки безпеки.
3. Індивідуальний захист потребує: використання спецодягу, респіраторів, рукавичок та захисних окулярів.
4. Екологічний контроль вимагає: постійного моніторингу стану ґрунту та води, ефективного управління залишками після зброджування.
5. Зниження психологічного навантаження необхідне для: організації змінної роботи для уникнення перевтоми та забезпечення комфортних умов праці.

Впровадження комплексних заходів безпеки дозволить мінімізувати ризики для персоналу, обладнання та довкілля під час виробництва біогазу.

#### **4.2. Вимоги до охорони праці при організації робочого місця працівника**

Організація робочого місця при виробництві біогазу вимагає забезпечення безпечних і комфортних умов для працівників. Це включає дотримання законодавчих норм у сфері охорони праці, захисту від шкідливих та небезпечних виробничих факторів, а також створення належних умов для виконання робіт.

1. Вимоги до виробничого середовища
  - вентиляція та повітрообмін у робочих приміщеннях повинні бути обладнані системами вентиляції, що забезпечують видалення шкідливих газів (метан, сірководень, вуглекислий газ) та подачу свіжого повітря. Концентрація токсичних речовин у повітрі робочої зони не повинна перевищувати допустимих норм.

- температурний режим у робочих приміщеннях необхідно підтримувати, враховуючи тепловиділення від обладнання. Температура поверхонь обладнання не повинна перевищувати встановлених норм, щоб уникнути опіків.

- освітлення на робочих місцях повинно мати достатнє освітлення (природне та штучне) відповідно до норм охорони праці. Заборонено використання обладнання з несправними джерелами світла.

## 2. Вимоги до обладнання

1. Безпека експлуатації обладнання (ферментатори, насоси, подрібнювачі, змішувачі), яке повинно бути обладнане захисними кожухами для запобігання контакту з рухомими частинами. Контрольна автоматика та сигналізація повинні бути справними.

2. Заземлення та електробезпека усіх електричних пристроїв, які мають бути заземлені та відповідати класу захисту. Електрощити повинні бути розташовані в місцях із обмеженим доступом та забезпечені попереджувальними знаками.

3. Контроль за витокami газу контролюється установками систем газоаналізаторів для виявлення витоків метану, сірководню чи інших газів. Системи повинні автоматично блокувати процеси у разі аварійних ситуацій.

## 3. Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ)

Обов'язкові ЗІЗ для працівників є спецодяг, стійкий до агресивного середовища; респіратори або протигази для захисту від токсичних газів; захисні окуляри для запобігання контакту зі шкідливими аерозолями; рукавички, що захищають від дії хімічних речовин. Резервні ЗІЗ це наявність аварійного запасу ЗІЗ для використання у разі непередбачених ситуацій.

## 4. Організаційні заходи

- інструктажі та навчання обов'язково проводяться з вступного, первинного, повторного та позапланового інструктажу з охорони праці та навчання працівників діям у разі аварійних ситуацій;

- контроль доступу до робочих зон із підвищеною небезпекою повинен бути обмежений для сторонніх осіб та забезпечення маркування небезпечних зон та попереджувальних знаків.

#### 5. Екстрені заходи та аварійна безпека

- аварійні виходи в приміщеннях повинні бути обладнані з чітким маркуванням та шляхи евакуації повинні бути вільними від перешкод.

- система аварійного оповіщення у разі пожежі, витоку газу чи інших надзвичайних ситуацій.

- засоби пожежогасіння у вигляді вогнегасників, піску, азбестових ковдр у робочих зонах та працівники повинні бути навчені правилам користування вогнегасниками.

#### 6. Медичні заходи

- Обов'язкові медичні огляди для працівників для виявлення професійних захворювань та забезпечення першої медичної допомоги у разі травм чи отруєнь, наявність аптечок першої допомоги на кожному робочому місці.

#### 7. Екологічна безпека

-утилізація відходів , що залишаються після зброджування, відповідно до екологічних норм, організація збору та утилізації відходів; моніторинг навколишнього середовища, контроль за можливим впливом виробництва біогазу на ґрунт, воду та повітря.

Організація робочого місця з дотриманням зазначених вимог забезпечує безпеку працівників, зниження ризиків аварій, а також дотримання стандартів екологічної та промислової безпеки.

### **4.3. Забезпечення нормативних значень показників мікроклімату і чистоти повітря**

Організація виробництва біогазу вимагає дотримання санітарних норм і створення умов для безпечної та комфортної роботи. Мікроклімат і якість

повітря в робочій зоні впливають на здоров'я працівників та ефективність виробничого процесу.

### 1. Нормативні показники мікроклімату

- Мікрокліматичні умови (температура, вологість, швидкість руху повітря) на виробництві повинні відповідати державним санітарно-гігієнічним нормам для промислових підприємств. Температура повітря має оптимальні значення: 18–24 °С (для робіт середньої важкості), допустимі відхилення: 16–28 °С залежно від сезону. Відносна вологість повітря має оптимальні показники: 40–60%., допустимий максимум: 75%. Швидкість руху повітря не більше 0,3 м/с у холодний період року та не більше 0,5 м/с у теплий період року. Температура поверхонь обладнання не повинна перевищувати 45 °С у робочій зоні.

### 2. Контроль чистоти повітря

При виробництві біогазу можуть утворюватися шкідливі гази (метан, сірководень, аміак, вуглекислий газ), які потребують постійного контролю. Концентрація цих речовин не повинна перевищувати допустимих рівнів згідно з гігієнічними нормами:

Гранично допустимі концентрації (ГДК): метан (CH<sub>4</sub>) не більше 5000 мг/м<sup>3</sup>, сірководень (H<sub>2</sub>S): не більше 10 мг/м<sup>3</sup>, аміак (NH<sub>3</sub>): не більше 20 мг/м<sup>3</sup>, вуглекислий газ (CO<sub>2</sub>): не більше 9000 мг/м<sup>3</sup>, пил органічного походження (з залишків субстрату) не більше 5 мг/м<sup>3</sup>. Окисно-відновний потенціал (ОВП) повинен підтримуватися на рівні, що забезпечує ефективну роботу метаногенних мікроорганізмів, зазвичай у діапазоні від –250 до –450 мВ.

### 3. Технічні заходи забезпечення мікроклімату і чистоти повітря.

Системи вентиляції та кондиціонування використовує припливно-витяжну вентиляцію для постійного оновлення повітря у виробничих приміщеннях. Застосування локальної витяжки над ферментаторами, насосами та іншими джерелами шкідливих газів. Системи кондиціонування для підтримання комфортної температури і вологості. Фільтрація та очищення повітря

відбувається за рахунок установки фільтрів для видалення пилю, аерозолів та систем для нейтралізації сірководню, аміаку та інших токсичних газів.

Забезпечення нормативних значень показників мікроклімату та чистоти повітря є ключовим аспектом безпечної організації виробництва біогазу, що сприяє підвищенню продуктивності працівників і зниженню ризику професійних захворювань.

#### **4.4. Освітлення робочого місця, заходи і засоби для забезпечення нормованих показників освітлення**

Забезпечення належного освітлення робочих місць на біогазових установках є важливим аспектом охорони праці, що впливає на безпеку, продуктивність праці та здоров'я працівників.

##### **1. Вимоги до освітлення**

Нормативні показники освітлення згідно з ДБН В.2.5-28-2006 (Україна) або іншими національними стандартами, рівень освітленості повинен відповідати вимогам до типу робіт – це загальне освітлення має бути не менше 200 лк (люкс) для приміщень з автоматизованим обладнанням та місцеве освітлення: не менше 500 лк для робіт із високою точністю або обслуговування обладнання. Освітлення аварійних виходів та евакуаційних шляхів – не менше 50 лк.

За типами освітлення поділяють на природне освітлення, яке використовується максимально у денний час та відношення площі вікон до площі підлоги – не менше 1:10, та штучне освітлення, що використовується у разі недостатнього природного освітлення і джерела світла, це – світлодіодні або люмінесцентні лампи з мінімальним рівнем пульсації. Рівномірність освітлення відбувається за рахунок співвідношення максимальної та мінімальної освітленості у робочій зоні – не більше 3:1 і освітлення повинно бути рівномірним, без різких тіней чи зон затемнення.

##### **2. Джерела світла та обладнання**

Джерелами світла є світлодіодні лампи (LED), які є енергоефективними та мають тривалий термін служби. Мінімальний рівень пульсації (менше 10%), що забезпечує комфорт для очей. Люмінесцентні лампи підходять для загального освітлення та забезпечують рівномірний світловий потік.

Для вибухонебезпечних зон (категорія приміщень А, Б) забезпечують спеціальні вибухозахищені світильники. У звичайних зонах – світильники із захистом від пилу та вологи (клас захисту IP65 або вище). Автоматизація освітлення здійснюється датчиками руху та рівня освітленості для зниження енергоспоживання за рахунок втоматичних систем ввімкнення/вимкнення світла залежно від часу доби.

### 3. Засоби забезпечення нормованих показників освітлення

1. Розрахунок і проектування при проведенні світлотехнічних розрахунків для визначення оптимальної кількості та розташування світильників, і забезпечення відповідності світлотехнічних параметрів нормам ДСТУ та ДБН.

2. Монтаж освітлення при розташуванні світильників у зоні, що мінімізує тіні та сліпучий ефект і використанні розсіювачів для рівномірного розподілу світла.

3. Регулярне обслуговування за періодичної перевірки рівня освітленості за допомогою люксометрів та заміни несправних ламп та очищення світильників від пилу.

4. Додаткові заходи при встановленні аварійного освітлення з незалежним джерелом живлення та використанні переносних світильників для роботи у важкодоступних або тимчасових зонах.

#### 4. Заходи для зниження негативного впливу освітлення, це:

- Уникнення сліпучого ефекту при використанні антивідблискових світильників та розташуванні джерел світла поза межами прямої видимості працівника.

- Мінімізація пульсації за використання стабілізаторів напруги для світильників і вибору ламп із низьким рівнем мерехтіння.

-Контроль спектрального складу при виборі джерел світла з теплим білим або нейтральним спектром (3000–5000 К) для комфортного сприйняття.

5. Організаційні заходи включають навчання персоналу, ознайомлення працівників із правилами використання додаткового освітлення, навчання з технічного обслуговування освітлювального обладнання. Для аудиту та контролю здійснюють регулярний моніторинг освітленості у приміщеннях та перевірку відповідності освітлення діючим нормативам.

Нормовані показники освітлення на біогазових виробництвах забезпечуються шляхом проектування відповідних систем освітлення, використання енергоефективних світильників, регулярного обслуговування обладнання та контролю за дотриманням норм. Це дозволяє створити безпечні та комфортні умови праці, що підвищують продуктивність і знижують ризик травматизму.

#### **4.5. Заходи і засоби для забезпечення нормованих значень шуму та вібрації**

Виробництво біогазу супроводжується роботою механічного обладнання (насоси, компресори, мішалки), що генерує шум і вібрацію. Зниження їхнього рівня до нормованих значень забезпечує комфортні й безпечні умови праці для персоналу.

1. Нормативними вимогами рівнів шуму є гранично допустимий рівень шуму на робочих місцях (згідно з ДСН 3.3.6.037-99), який не повинен перевищувати 80 дБА для загального шуму, 50–60 дБА для приміщень із тривалою роботою персоналу. Для рівнів вібрації застосовуються параметри, що нормовані згідно з ГОСТ 12.1.012-2004 (або відповідними міжнародними стандартами). Допустимі рівні залежать від частоти та тривалості впливу і складають для локальної вібрації – 2 м/с<sup>2</sup>, для загальної вібрації – 0.8 м/с<sup>2</sup>.

2. Джерела шуму та вібрації

Основними джерелами шуму є насоси для перекачування субстрату, компресори для подачі газу, мішалки в ферментаторах, вентилятори та системи обігріву. Основними джерелами вібрації є обертові частини насосів і компресорів, двигуни та мішалки, технологічне обладнання з нерівномірним навантаженням.

3. Заходами для зниження шуму є конструктивні заходи, що включають використання обладнання з низьким рівнем шуму (акустично оптимізовані двигуни та компресори), монтаж звукоізоляційних кожухів на обладнанні, установка демпферів або глушників на вихлопних системах компресорів та використання звукоізолюючих матеріалів у стінах, стелях та підлогах виробничих приміщень.

Організаційними заходами є оптимізація розташування шумного обладнання в ізольованих приміщеннях, зменшення часу роботи обладнання за рахунок автоматизації процесів, регламентація часу перебування персоналу у зонах із підвищеним шумом.

Індивідуальними засобами захисту (ІЗЗ) є використання протишумових навушників або берушів для працівників та забезпечення обов'язкового носіння ІЗЗ у зонах із рівнем шуму понад 80 дБА.

#### 4. Заходи для зниження вібрації

-Технічними заходами є використання обладнання з балансуванням обертових частин, встановлення віброізоляційних подушок, амортизаторів або пружинних опор під обладнанням, застосування антивібраційних матеріалів для фундаментів обладнання, використання дистанційних приводів для зменшення локальної вібрації.

-Контроль стану обладнання полягає в регулярному технічному обслуговуванні для запобігання зносу елементів, що створюють вібрацію.

#### 5. Додаткові заходи

-Моніторинг рівнів шуму та вібрації полягає в регулярному проведенні замірів шуму та вібрації за допомогою шумомірів і віброметрів, веденні журналу контролю параметрів для оцінки їх відповідності нормам.

-Навчання працівників це – ознайомлення персоналу з техніками зниження впливу шуму та вібрації та інструктаж щодо правил роботи з обладнанням.

-Планування приміщень полягає у розташуванні шумного та віброактивного обладнання на спеціальних майданчиках, ізольованих від основних робочих зон та установці бар'єрів або перегородок із шумопоглинаючих матеріалів.

Зниження шуму та вібрації при виробництві біогазу досягається комплексним підходом: модернізацією обладнання, організаційними заходами, використанням засобів індивідуального захисту та дотриманням нормативів. Це сприяє створенню безпечних умов праці та підвищенню загальної ефективності виробництва.

#### **4.6. Забезпечення необхідного санітарного стану виробництва**

Виробництво біогазу пов'язане з обробкою органічних відходів, які можуть створювати ризики забруднення навколишнього середовища та порушення санітарного стану. Для забезпечення санітарної безпеки та підтримки належного рівня гігієни необхідно впроваджувати комплексні заходи.

1. Основними вимогами до санітарного стану є гігієна робочих зон, яка включає регулярне очищення приміщень від залишків сировини, пилу, бруду та інших забруднень та знезараження поверхонь, обладнання та зон контакту із відходами. Контроль за відходами, тобто належне зберігання органічних відходів у герметичних резервуарах та швидка обробка сировини для запобігання її гниттю та утворенню неприємних запахів. Вентиляція, що забезпечує ефективний повітрообмін в приміщеннях для запобігання накопиченню шкідливих газів, зокрема метану, сірководню, аміаку. Забезпечення водопостачання та водовідведення дає достатню кількість чистої

води для миття обладнання та персоналу та організації систем збору та очищення стічних вод.

## 2. Основні заходи для підтримання санітарного стану

-Очищення обладнання та приміщень полягає в щоденному очищенні технологічного обладнання після робочих змін та використанні миючих, дезінфікуючих засобів для запобігання розвитку патогенної мікрофлори і встановлення систем для автоматичного промивання резервуарів та трубопроводів.

-Контроль за утворенням неприємних запахів полягає у використанні біофільтрів або хімічних фільтрів для очищення повітря від запахів, герметизації резервуарів для зберігання сировини та продуктів ферментації, регулярному вивезенню та обробці осаду, який утворюється після ферментації.

-Утилізація побічних продуктів полягає у використанні залишків ферментації (дигестату) як органічного добрива після додаткової обробки та організації безпечного транспортування та зберігання дигестату.

-Запобігання розповсюдженню мікроорганізмів при використанні високотемпературного оброблення (пастеризації) сировини для знищення патогенів та регулярній санітарній обробці зон зберігання сировини.

-Забезпечення персоналу засобами гігієни у вигляді робочого одягу, рукавичок, захисних масок або респіраторів , встановлення місць для миття рук із гарячою водою та антисептиками та забезпечення працівників санітарними кімнатами (туалети, душові).

## 3. Організаційні заходи

1.Інструктаж персоналу проведення навчання працівників щодо правил гігієни та безпечної роботи з відходами та ознайомлення з порядком дій у разі забруднення приміщень або обладнання.

2.Моніторинг санітарного стану полягає у регулярних перевірках санітарного стану виробничих приміщень та робочих зон. ведення документації щодо заходів із підтримки чистоти.

Зрозділення зон необхідно для відокремлення чистих зон від зон обробки органічних відходів та організація спеціальних місць для зберігання спецодягу та засобів індивідуального захисту.

#### **4. Технічні засоби**

1. Системи вентиляції це – установка витяжних систем для видалення забрудненого повітря та встановлення фільтрів для очищення викидів в атмосферу.

2. Обладнання для санітарної обробки промивальних станцій для дезінфекції резервуарів та мобільні установки для миття підлоги та стін.

3. Системи збору та утилізації рідких відходів при використанні сепараторів для відділення твердих часток від рідких та очищенні стічних вод у локальних очисних спорудах.

Забезпечення необхідного санітарного стану при виробництві біогазу є ключовою умовою безпечного та ефективного функціонування підприємства. Це досягається впровадженням системного підходу, що включає регулярне очищення, дезінфекцію, герметизацію технологічних процесів, вентиляцію та навчання персоналу. Дотримання цих заходів сприяє мінімізації ризиків для здоров'я працівників і навколишнього середовища.

#### **4.7. Заходи і засоби для захисту працюючих від ураження електричним струмом**

На виробництві біогазу використовується велика кількість електрообладнання: насоси, мішалки, вентиляційні системи, датчики та автоматизовані системи управління. Для забезпечення безпеки персоналу необхідно вживати заходів, спрямованих на мінімізацію ризиків ураження електричним струмом.

##### **I. Технічні заходи захисту**

1. Заземлення та занулення:

- встановлення заземлення всіх металевих частин електрообладнання, які можуть опинитися під напругою у разі пошкодження ізоляції;

- використання занулення для створення шляхів зниження напруги до безпечного рівня.

2. Захисне відключення (ПЗВ) установка пристроїв захисного відключення, які миттєво розривають електричний ланцюг у разі витoku струму на корпус або землю.

3. Ізоляція проводів:

- використання проводів та кабелів з подвійною ізоляцією.

- регулярна перевірка стану ізоляції, заміна пошкоджених елементів.

4. Система захисту від перенапруги:

- установка реле захисту від перевантажень і короткого замикання.

- використання пристроїв для захисту від блискавки (грозозахист).

5. Безпечне розміщення електрообладнання:

- встановлення електрообладнання у місцях, недоступних для контакту з водою, вологим середовищем або корозійними елементами.

- винесення електрощитів у спеціально облаштовані сухі приміщення.

6. Використання низьковольтного обладнання для цього

- застосування обладнання, що працює при зниженій напрузі (до 42 В), у вологих зонах або при роботі у вузьких просторах.

## II. Організаційні заходи захисту

1. Розробка інструкцій та навчання це – розробка інструкцій з безпечної експлуатації електрообладнання та проведення регулярних навчань персоналу з питань електробезпеки.

2. Допуск до роботи надається на роботу з електрообладнанням лише для працівників із відповідною кваліфікацією та групою з електробезпеки та здійснюється контроль виконання робіт відповідальними особами.

3. Огляд і тестування електрообладнання потребує періодичної перевірки та випробування електроустановок. фіксації результатів огляду в спеціальних журналах.

4. Організація зон безпеки полягає в позначенні зон з високою електричною небезпекою та забороні доступу стороннім особам у небезпечні зони.

III. Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ) це – ізолюючий одяг та взуття діелектричні рукавички, чоботи і килимки, одяг з антистатичними властивостями, ізольовані інструменти для роботи з електрообладнанням, щитки і окуляри для захисту очей при виконанні електротехнічних робіт.

#### IV. Контроль і моніторинг

1. Система аварійного відключення складається з установки кнопок аварійного відключення електропостачання в доступних місцях та автоматичного моніторингу стану мережі.

2. Регулярний аудит полягає у проведенні регулярних перевірок стану електромережі незалежними експертами та оцінка відповідності обладнання стандартам безпеки.

3. План дій у надзвичайних ситуаціях це– розробка плану евакуації та алгоритмів дій у разі ураження електричним струмом і наявність аптечок і засобів для надання першої допомоги.

Захист працівників від ураження електричним струмом при виробництві біогазу забезпечується комплексним підходом, який включає технічні, організаційні заходи, використання ЗІЗ, а також системний моніторинг і аудит стану електрообладнання. Дотримання цих вимог мінімізує ризики та сприяє створенню безпечних умов праці.

### **4.8. Забезпечення пожежовибухобезпеки при виробництві біогазу**

Процес виробництва біогазу пов'язаний з використанням легкозаймистих і вибухонебезпечних речовин, таких як метан, водень, сірководень. Для мінімізації ризиків пожежі та вибуху необхідно дотримуватись комплексу технічних, організаційних заходів і використовувати спеціалізоване обладнання.

## 1. Технічні заходи забезпечення пожежовибухобезпеки

1. Герметичність обладнання полягає у забезпеченні герметичності реакторів, газгольдерів, трубопроводів та з'єднань для запобігання витокам газу та використанні ущільнювачів і матеріалів, стійких до дії агресивного середовища.

2. Системи контролю газу у встановленні газоаналізаторів для моніторингу концентрації метану, сірководню та інших вибухонебезпечних газів у робочій зоні та автоматичне відключення обладнання у разі перевищення допустимих рівнів газів.

3. Вентиляція приміщень примусовими вентиляційними системами для видалення вибухонебезпечних газів та забезпечення постійного обміну повітря для зниження концентрації газів до безпечного рівня.

4. Система блискавкозахисту у встановленні зовнішнього блискавкозахисту для запобігання потраплянню блискавки у газові установки і використанні пристроїв захисту від перенапруги.

5. Антистатичний захист полягає в застосуванні антистатичних матеріалів для запобігання накопиченню електростатичного заряду та забезпеченні заземлення обладнання.

6. Іскробезпечне обладнання використовуються іскробезпечні електродвигуни, вентилятори, насоси та інших пристрої у вибухонебезпечних зонах.

## 2. Організаційні заходи

-Зонування територій полягає в поділі території виробництва на зони з різним ступенем вибухонебезпечності і обмеженні доступу до вибухонебезпечних зон для несанкціонованих осіб.

-Навчання персоналу з питань пожежної безпеки та проведення тренувань з евакуації та ліквідації наслідків аварій.

-Режим обслуговування полягає в регулярному огляді, обслуговуванні та тестуванні обладнання для виявлення несправностей, а також в заміні зношених елементів, герметизації стиків та з'єднань.

### 3. Засоби пожежогасіння

-Первинні засоби пожежогасіння це – розміщення вогнегасників (вуглекислотних, порошкових) у вибухонебезпечних зонах та обладнання пожежних кранів із шлангами у приміщеннях.

-Автоматичні системи пожежогасіння полягають в установленні систем аерозольного або газового пожежогасіння у зонах високої небезпеки та використанні датчиків температури та диму для автоматичного виявлення займання.

-Протипожежні перешкоди це – використання протипожежних дверей і перегородок між зонами та резервуари для зберігання газу повинні бути оснащені системами відсічення полум'я.

### 4. Додаткові заходи

- Система аварійного відключення складається з установки кнопок аварійного відключення обладнання у доступних місцях та автоматичному перекритті подачі газу при аварійних ситуаціях.

-План евакуації потребує в розробці та розміщенню планів евакуації у всіх приміщеннях та забезпечення чітких вказівок на евакуаційних виходах.

-Моніторинг стану об'єкта полягає в постійному контролі стану систем протипожежного захисту та оперативному реагуванні на сигнали про перевищення допустимих концентрацій газів.

Забезпечення пожежовибухобезпеки при виробництві біогазу досягається комплексним підходом, який включає технічні, організаційні та профілактичні заходи. Дотримання нормативних вимог і використання сучасних засобів контролю та захисту дозволяє мінімізувати ризики і створювати безпечні умови для працівників та навколишнього середовища.

## РОЗДІЛ 5

### ЦИВІЛЬНИЙ ЗАХИСТ

Виробництво біогазу, як сучасна енергоефективна технологія, потребує дотримання заходів цивільного захисту через низку потенційних ризиків, пов'язаних із роботою обладнання, зберіганням газу та переробкою органічних відходів. Розробка та впровадження технологій мають забезпечувати безпеку працівників, населення та навколишнього середовища.

Основні ризики та заходи цивільного захисту:

- Ризиками вибуху та пожежі є метан, що становить основну складову біогазу, і є легкозаймистим і вибухонебезпечним газом.

- Заходами безпеки є використання вибухозахищеного обладнання, контроль герметичності систем, наявність систем автоматичного газоаналізу та сигналізації, дотримання пожежних норм при зберіганні біогазу.

1. Токсичність та ризик отруєння.

Високі концентрації сірководню, що містяться в біогазі, можуть спричинити токсичний вплив. Заходами безпеки є регулярний моніторинг концентрації газів, використання засобів індивідуального захисту (маски, фільтри), провітрювання робочих приміщень. Дія сірководню на організм людини залежно від концентрації наведена у таблиці 5.1.

2. Ризик забруднення довкілля.

Неправильне поводження з органічними відходами та дигестатом може призвести до забруднення ґрунту та водних ресурсів. Заходами безпеки є організація герметичних сховищ для відходів і дигестату та контроль за вивозом і використанням перероблених матеріалів.

3. Техногенні аварії

Несправності в роботі обладнання або перевантаження систем можуть спричинити аварії. Заходами безпеки є регулярне технічне обслуговування

обладнання, проведення навчань для персоналу щодо дій у надзвичайних ситуаціях та розробка плану дій у разі аварій, включаючи евакуацію.

Таблиця 5.1 – Токсична дія сірководню

Концентрація в повітрі	Дія
0,03 – 0,15 ppm	Запах протухлих яєць
15 – 75 ppm	Подразнення очей, головний біль, нудота
150 – 300 ppm (0,015-0,03%)	Параліч нервів
>375 ppm (0,038%)	Протягом декількох годин смерть від отруєння
>750 ppm (0,075%)	Протягом 30-60 хв смерть від зупинки дихання
>1000 ppm (0,1%)	Протягом декількох хвилин смерть від паралічу органів дихання
ppm – частинок на мільйон (з англ. parts per million); 1 ppm= 0,0001%	

#### 4. Біологічна безпека.

Органічні відходи можуть містити патогени або токсини, небезпечні для людей. Заходами безпеки є дезінфекція відходів перед їх переробкою та впровадження систем знезараження.

Рекомендації щодо підвищення рівня безпеки:

- розробка детальних інструкцій і протоколів безпеки для кожного етапу технологічного процесу;
- постійний моніторинг та оновлення нормативно-правової бази з урахуванням нових ризиків та технологій;
- проведення регулярних тренувань та інструктажів для персоналу з питань цивільного захисту;
- забезпечення належного фінансування для оснащення біогазових станцій сучасними системами безпеки.

Дотримання заходів цивільного захисту при виробництві біогазу є критично важливим для запобігання техногенним аваріям, забезпечення екологічної безпеки та охорони здоров'я людей. Інтеграція технологій безпеки у всі етапи процесу дозволяє не лише мінімізувати ризики, а й зробити виробництво біогазу екологічно й соціально відповідальним.

## ВИСНОВКИ

1. Визначено найбільш ефективні види відходів тваринництва для виробництва біогазу проведений аналіз їх доступності.

2. Проаналізовано етапи анаеробного бродіння та їх параметри, температура, вологість, рН.

3. Охарактеризовано гній ВРХ і силос кукурудзи як сировину для виробництва біогазу, зокрема за такими показниками: вологість, вміст сухої речовини, співвідношення С:N, а також вміст азоту та фосфору. Ці показники важливі для оцінки ефективності використання сировини у процесі анаеробного зброджування.

4. Використано силос кукурудзи як косубстрат для зброджування гною ВРХ, що дозволяє збільшити відношення С:N і запобігти інгібуванню процесу аміаком. Це допомагає оптимізувати умови для ефективного виробництва біогазу. Для досягнення оптимальних показників сировини для виробництва біогазу було визначено співвідношення гною ВРХ та силосу кукурудзи.

5. Наведено технологічні рішення для реалізації процесу анаеробного зброджування, що враховують основні етапи процесу та необхідні умови, такі як температура, вологість, рН та інші фактори, що впливають на ефективність процесу.

6. Описано різновиди біогазових установок та допоміжного обладнання, а також обрано технологію для отримання біогазу. Це включає вибір відповідної технології та обладнання, які забезпечують ефективний процес зброджування та максимальний вихід біогазу.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Біогаз: навч.-метод. посібник / В. О. Дубровін та ін. Київ: ЮНІДО, 2015. 47 с.
2. Біогазові технології в Україні. Встановлення та робота біогазових установок. Центр біогазових технологій : веб-сайт <http://biogascenter.googlepages.com>
3. Біотехнологічні основи виробництва біогазу / В. М. Поліщук та ін. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування: зб. наук. праць. Київ, 2013. № 185, ч. 2. С. 289-296
4. Г. А. Голуб, СМ Кухарець Газова автономія. The Ukrainian Farmer. 2016. С. 181-182.
5. Голуб Г.А., Дубровіна О.В., Войтенко В.О., Гох В.В. Аналіз метаноутворення в біогазових установках. Сучасні проблеми збалансованого природокористування – Збірник наукових праць / Подільський державний аграрнотехнічний університет (ПДАТУ) / Науковий редактор: Бахмат М.І. – Кам'янецьПодільський, – 2012. – Спеціальний випуск до VII науково-практичної конференції. – 334 с. – С. 141-145.
6. Джеджула В. В., Ратушняк Г. С.. Інтенсифікація теплообміну та термостабілізація біореакторів // Вісник ВП, 2006. – № 2 – С. 26 – 31
7. ДСТУ 7721:2015 «Газоподібне паливо. Біогаз. Технічні вимоги і методи контролю». Прийнятий наказом № 45 від 28.05.2015. Діючий
8. Кухарець С. М., Голуб Г. А. Сировинна база та ефективність біогазу. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. 2015. № 212, ч. 1. С. 11-21.
9. Органічна кукурудза / за ред. А. Кравченко, Н. Прокопчук. Київ: Дослідний інститут органічного сільського господарства, 2014. 12 с.
10. Пляцук Л.Д. Черниш. Є.Ю. ЕКОЛОГІЧНА БІОТЕХНОЛОГІЯ: принципи створення біотехнологічних виробництв // Навчальний посібник. – Суми: СумДУ, 2018. – С. 250 – 252

20. Stepanenko, S., Kuzmych, A., Borys, A., Dnes, V., Kharchenko, S., Rogovskii, I., Golub, G., Berezovyi, M., Lutsiuk, A. (2025). Substantiating the YOLO11 architecture for determining the fractional composition of winter wheat grain mixtures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (2 (136)), 81–92. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.338124> Q3.
21. Golub, G., Tsyvenkova, N., Rogovskii, I., Chuba, V., Nadykto, V., Omarov, I., Yarosh, Y., Chuba, I. (2025). Determining the influence of design features in agrivoltaics systems on tracking efficiency. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (8 (135)), 14–22. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.329837>
22. Mushtruk Mikhailo, Rogovskii Ivan, Illiashenko Ivan, Melnik Viktoria, Melnik Valentina. Technological solutions for increasing the resource of crushers. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2025. Springer, Cham. DSMIE 2025, LNME, P. 47-59. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-95218-0\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-031-95218-0_5) Scopus.
23. Tarelnyk V.B., Haponova O.P., Tarelnyk N.V., Rogovskii I.L. Improvement of surface layer quality parameters of steel parts after nitrocarburizing by electrospark alloying method. Part 1. Features of the structural state and topography of steel surfaces after nitrocarburizing. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2025. Volume 2025, Issue 2, pp. 131-137. <https://doi.org/10.46813/2025-156-131>. Q4.
24. Nadiia Reznik, Ivan Rogovskii, Volodymyr Havrylyuk, Inna Riepina, Volodymyr Khodakyvskyy, Tetyana Demchenko, Valerii Kotliarov. (2025). Engineering and security management of technological transformation trends of agrotronics. *Studies in Big Data*. Springer. volume 164. pp 289–298 [https://doi.org/10.1007/978-3-031-75095-3\\_23](https://doi.org/10.1007/978-3-031-75095-3_23). Scopus. WoS. [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-75095-3\\_23](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-75095-3_23). Q3.
25. Yablonskyi P., Rogovskii I., Virchenko G., Borek K., Volokha M., Golova O. Geometric modeling of disc furrow profile. *Journal of Engineering Sciences (Ukraine)*, (2025). Vol. 12(1), pp. E1–E9. [https://doi.org/10.21272/jes.2025.12\(1\).e1](https://doi.org/10.21272/jes.2025.12(1).e1). Scopus. WoS. Q4.
26. Ivan Rogovskii, Valerii Kotliarov, Valerii Bondarenko, Volodymyr Havrylyuk, Chen Gaojiang & Li Zehao. (2024). Engineering and security management of Smart technology of agrotronics of crop production. *Contributions to Finance and*

Accounting. Springer, Cham. Part F4082. pp 93–102 [https://doi.org/10.1007/978-3-031-75960-4\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-031-75960-4_10). Scopus. WoS. Q4

27. Malanchuk, O., Tryhuba, A., Rogovskii, I., Titova, L., Berezova, L., Korobko, M. (2024). Differential-symbolic approach and tools for management of medical support projects for the population of communities. *Project Management: Industry Specifics*. P. 105–134. <https://doi.org/10.15587/978-617-8360-03-0.CH4>. Scopus. Q3

28. Sheichenko, V., Rogovskii, I., Skoriak, Y., Petrachenko, D., Shevchuk, M., Sheichenko, D., Titova, L., Sivak, I. (2024). Defining patterns in the intensification of hemp stalk retting processes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (1 (132)), 50–63. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.3150>. Scopus. Q3

29. Sheichenko, V., Petrachenko, D., Rogovskii, I., Dudnikov, I., Shevchuk, V., Sheichenko, D., Derkach, O., & Shatrov, R. (2024). Determining patterns in the separation of hemp seed hulls. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(1 (130)), 54–68. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.309869> Q3

30. Aulin, V., Rogovskii, I., Lyashuk, O., Tykhyi, A., Kuzyk, A., Dvornyk, A., Derkach, O., Lysenko, S., Banniy, O., & Hrynkiv, A. (2024). Revealing patterns of change in the tribological efficiency of composite materials for machine parts based on phenylone and polyamide reinforced with arimide-t and fullerene. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(12 (129)), 6–18. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.304719> Q3

31. Rogovskii, I., Sivak Igor, Shatrov Ruslan, Nadtochiy Oleksandr. Agroengineering studies of tillage and harvesting parameters in soybean cultivation. *Engineering of Rural Development*. 2024. Vol. 23. P. 965-970. DOI: 10.22616/ERDev.2024.23.TF195. Scopus. WoS. Q3

32. Yablonskyi P., Rogovskii, I., Sobczuk H., Virchenko G., Volokha M., Vorobiov O. Computational approach to geometric modeling of plow bodies. *Journal of Engineering Sciences (Ukraine)*, Vol. 11(1), 2024, pp. E9–E18. [https://doi.org/10.21272/jes.2024.11\(1\).e2](https://doi.org/10.21272/jes.2024.11(1).e2), Scopus Q4.

33. Sheichenko, V., Petrachenko, D., Koropchenko, S., Rogovskii, I., Gorbenko, O., Volianskyi, M., & Sheichenko, D. (2024). Substantiating the rational

parameters and operation modes for the hemp seed centrifugal dehuller. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(1 (128), 34–48. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.300174>. Q3

34. Aulin, V., Rogovskii, I., Lyashuk, O., Titova, L., Hrynkiv, A., Mironov, D., Volianskyi, M., Rogatynskiy, R., Solomka, O., & Lysenko, S. (2024). Comprehensive assessment of technical condition of vehicles during operation based on Harrington's desirability function. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(3 (127), 37–46. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.298567>. Q3

35. Rogovskii, I., Reznik, N.P., Druzhynin, M.A., Titova, L.L., Nychay, I.M., Nikulina, O.V. Non-uniform field of concrete deformations of circular cross-section columns under cross bending applying digital image correlation method. *Intelligent Systems, Business, and Innovation Research. Studies in Systems, Decision and Control*, vol 489. pp 939–951. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-36895-0\\_79](https://doi.org/10.1007/978-3-031-36895-0_79). Scopus. Q2

36. Rogovskii, I., Reznik N.P., Osadchuk N.V., Ivanova T.M., Zinchenko M.M., Ryzhakova H. Institutional aspects of development of budget system: theory and practice of Ukraine. *Intelligent Systems, Business, and Innovation Research. Studies in Systems, Decision and Control*, vol 489. pp 925–937. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-36895-0\\_78](https://doi.org/10.1007/978-3-031-36895-0_78). Scopus. Q2

37. Volokha M., Rogovskii I., Fryshev S., Sobczuk H., Virchenko G., Yablonskyi P. (2023). Modeling of transportation process in a technological complex of beet harvesting machines. *Journal of Engineering Sciences (Ukraine)*, Vol. 10(2), pp. F1–F9. DOI: 10.21272/jes.2023.10(2).f1. DOI: 10.21272/jes.2023.10(2).f1 Q4

38. Romaniuk W., Rogovskii I., Polishchuk V., Titova L., Borek K., Shvorov S., Roman K., Solomka O., Didur V., Biletskii V. Study of technological process of fermentation of molasses vinasse in biogas plants. *Processes*. 2022. Vol. 10. Issue 10. P. 2011. <https://doi.org/10.3390/pr10102011>. Q2.

39. Romaniuk W., Rogovskii I., Polishchuk V., Titova L., Borek K., Wardal W.J., Shvorov S., Dvornyk Y., Sivak I., Drahnev S., Derevjanko D. Study of methane fermentation of cattle manure in the mesophilic regime with the addition of crude

glycerine. *Energies*. 2022. Vol. 15. Issue 9. P. 3439. <https://doi.org/10.3390/en15093439>. Scopus. Q1.

40. Rogovskii I., Titova L., Sivak I., Berezova L., Vyhovskyi A. Technological effectiveness of tillage unit with working bodies of parquet type in technologies of cultivation of grain crops. *Engineering for Rural Development*. 2022. Vol. 21. P. 884-890. <https://doi.org/10.22616/ERDev.2022.21.TF279>. Q3

41. Rogovskii I., Titova L., Shatrov R., Bannyi O., Nadtochiy O.: Technological effectiveness of machine for digging seedlings in nursery grown on vegetative rootstocks. *Engineering for Rural Development*. 2022, Vol. 21, pp. 924-929. <https://doi.org/10.22616/ERDev.2022.21.TF290>. Q3

42. Rogovskii, I., Lyubarets, B., Borek, K. Analyticity of non-stationary processes of change in diagnostic parameters of hydrostatic transmissions of harvesters. *Machinery and Energetics*, 2022, 13(1), pp. 67–76 Q4

43. Kresan, T., Pylypaka, S., Ruzhylo, Z., Rogovskii, I., Trokhaniak, O. Construction of conical axoids on the basis of congruent spherical ellipses. *Archives of Materials Science and Engineering*, 2022, 113(1), pp. 13–18.