

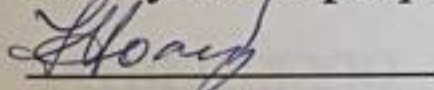
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТІ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”

Факультет біотехнології і біотехніки

Кафедра біоенергетики, біоінформатики та екобіотехнології

До захисту допущено:

Завідувач кафедри



Наталія ГОЛУБ

(підпис)

« 3 » червня 2025 р

Дипломний проект

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою «Біотехнології»

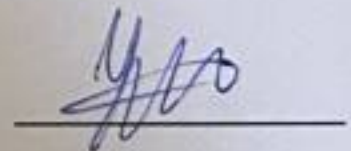
спеціальності 162 «Біотехнології та біоінженерія»

на тему: Технологія біометану з відходів великої рогатої худоби

Виконав (-ла):

студентка IV курсу, групи ББ-11

Поденежко Юлія Володимирівна



Керівник:

доцент, к.т.н.

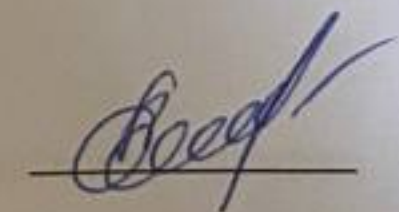
Козар Марина Юріївна



Консультант з проектування:

Професор., д.т.н, професор

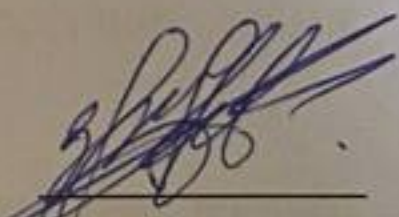
Саблій Лариса Андріївна



Рецензент:

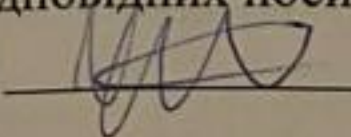
Ас. кафедри промислової біотехнології та

біофармації Зубик Павло Романович



Засвідчую, що у цьому дипломному
проекті немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент (-ка)



Київ – 2025

Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інституті імені Ігоря Сікорського”

Факультет біотехнології і біотехніки
Кафедра біоенергетики, біоінформатики та екобіотехнології

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 162 «Біотехнології та біоінженерія»

Освітньо-професійна програма «Біотехнології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Наталія ГОЛУБ

(підпис)

Наталія ГОЛУБ

«21» листопада 2025 р

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

Поденежко Юлії Володимирівни

Тема проєкту «Технологія біометану з відходів великої рогатої худоби» керівник проєкту Козар Марина Юріївна, доцент, к.т.н., затверджені наказом по університету від «29» травня 2025 р. № 1838-с

Термін подання студентом проєкту 03.06.2025

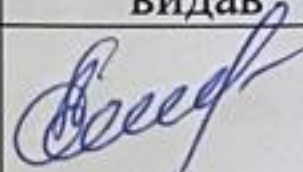

Вихідні дані до проєкту: поголів'я тварин 3000 штук

Зміст пояснювальної записки: характеристика сировини, біохімічні основи технологічного процесу, контроль виробництва, опис технологічної схеми, розрахунок обладнання для проведення технологічного процесу.

Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо): креслення загального вигляду метантенку – 1 арк.

A1, технологічна схема – 1 арк. A1, апаратурна схема 1 арк. A1.

Консультанти розділів проєкту

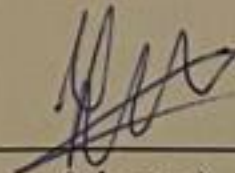
| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата | |
|---|---|---|---|
| | | завдання видав | завдання прийняв |
| Графічна частина дипломного проекту (проекткування) | д.т.н., проф. Саблій Л.А. |  24.04.25р. |  30.05.25р. |

Дата видачі завдання 21.04.2025

Календарний план

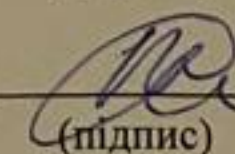
| № з/п | Назва етапів виконання дипломного проекту | Термін виконання етапів проекту | Примітка |
|-------|--|---------------------------------|----------|
| 1. | Характеристика сировини, біологічного агента. обґрунтування технології | 21.04.2025 | Виконано |
| 2. | Біохімічні основи технологічного процесу | 21.05.2025 | Виконано |
| 3. | Технологічна частина | 25.05.2025 | Виконано |
| 4. | Підбір та характеристика обладнання | 28.05.2025 | Виконано |
| 5. | Складання апаратурної схеми | 30.05.2025 | Виконано |
| 6. | Охорона праці та охорона довкілля | 01.06.2025 | Виконано |
| 7. | Оформлення пояснювальної записки | 03.06.2025 | Виконано |

Студент


(підпис)

Юлія ПОДЕНЕЖКО

Керівник проекту


(підпис)

Марина КОЗАР

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 61 с., 8 рис., 7 табл., 29 посилань.

Дипломний проєкт присвячено вдосконаленню технології виробництва біометану з відходів великої рогатої худоби. Запропоновано використовувати відходи великої рогатої худоби та підстилку з силосу кукурудзи для підвищення виходу біометану.

Проєкт передбачає опис технології виробництва біогазу з побічних продуктів утримання великої рогатої худоби та підстилки з силосу кукурудзи з використання двостадійної системи зброджування та очищення мембранними фільтрами для отримання біометану.

У проєкті розроблено технологічну та апаратурну схеми виробництва та наведено опис технологічної схеми виробництва біометану. Проведено розрахунки та виконано креслення метантенку. Запропонована технологія відповідає санітарним і екологічним нормам та наведеним вимогам охорони праці.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: БІОМЕТАН, МЕТАНТЕНК, ВРХ, СИЛОС
КУКУРУДЗИ

ABSTRACT

Explanatory note: 61 p., 8 figures, 7 tables, 29 references.

The diploma project is dedicated to improving the technology of biomethane production from cattle waste. It is proposed to use cattle waste and corn silage litter to increase the yield of biomethane.

The project provides a description of the technology of biogas production from cattle by-products and corn silage litter using a two-stage fermentation system and purification with membrane filters to obtain biomethane.

The project has developed a technological and equipment scheme of production and a description of the technological scheme of biomethane production. Calculations have been made and a drawing of a methane tank has been made. The proposed technology meets sanitary and environmental standards and the specified labor protection requirements.

KEYWORDS: BIOMETHANE, METHANE TANK, CATTLE, CORN SILO

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ВРХ – Велика рогата худоба

ДСТУ – державні стандарти України

ЄС – Європейський сою

| | | | | | | |
|-------------|-------------|-----------------|---------------|-------------|--------------------------|------|
| | | | | | <i>ДП ББ11.19.000 ПЗ</i> | Арк. |
| | | | | | | 6 |
| <i>Змн.</i> | <i>Арк.</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> | | |

ЗМІСТ

| | |
|--|----|
| ВСТУП..... | 8 |
| РОЗДІЛ 1. ХАРАКТЕРИСТИКА СИРОВИНИ, БІОЛОГІЧНОГО АГЕНТА. ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ..... | 10 |
| 1.1 Характеристика сировини..... | 10 |
| 1.2 Обґрунтування вибору технології..... | 15 |
| 1.3 Характеристика біологічного агента | 22 |
| РОЗДІЛ 2. БІОХІМІЧНІ ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ..... | 25 |
| 2.1 Перебіг процесу утворення біометану..... | 25 |
| 2.2. Характеристика кінцевого продукту..... | 34 |
| РОЗДІЛ 3. ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА..... | 39 |
| 3.1 Матеріали основні і допоміжні..... | 39 |
| 3.2. Контроль виробництва | 41 |
| 3.3 Матеріальний баланс виробництва..... | 43 |
| 3.4 Опис технологічного процесу..... | 46 |
| РОЗДІЛ 4. ПІДБІР ТА ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТАНТЕНКУ..... | 52 |
| РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ОХОРОНА ДОВКІЛЛЯ..... | 55 |
| 5.1 Охорона праці..... | 55 |
| 5.2 Охорона довкілля | 56 |

| | | | | | | | | |
|------------------|-------------|-----------------------|---------------|-------------|--------------------------------------|-------------|-------------|----------------|
| | | | | | <i>ДП ББ11.19.000 ПЗ</i> | | | |
| <i>Змн.</i> | <i>Арк.</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> | | | | |
| <i>Розроб.</i> | | <i>Поденежко Ю.В.</i> | | | <i>Зміст</i> | <i>Літ.</i> | <i>Арк.</i> | <i>Акрушіє</i> |
| <i>Перевір.</i> | | <i>Козар М.Ю.</i> | | | | 7 | 63 | |
| <i>Н. Контр.</i> | | | | | <i>КПІ ім. Ігоря Сікарського ФБТ</i> | | | |
| <i>Затверд.</i> | | | | | | | | |

ВСТУП

Сучасна енергетична криза, спричинена виснаженням традиційних джерел палива та зростанням негативного впливу викидів парникових газів на довкілля, актуалізує необхідність переходу до відновлюваних джерел енергії. Одним із найбільш перспективних напрямів у цьому контексті є виробництво біометану високоякісного газоподібного палива, отриманого шляхом очищення біогазу, який утворюється внаслідок анаеробного зброджування органічних відходів. Зокрема, значний потенціал у цьому напрямі мають відходи тваринництва, зокрема гній великої рогатої худоби, що є постійно поновлюваним і локально доступним ресурсом.

Анаеробне зброджування є багатоступеневим мікробіологічним процесом, в якому беруть участь групи спеціалізованих мікроорганізмів, зокрема метаногенні археї. В результаті цього процесу утворюється біогаз, основними компонентами якого є метан (CH_4) і вуглекислий газ (CO_2). Для подальшого використання в енергетиці та транспорті біогаз потребує глибокого очищення від CO_2 , H_2S , водяної пари та інших домішок з метою отримання біометану — палива, яке за енергетичними та фізико-хімічними властивостями відповідає природному газу. У країнах ЄС технології біометану вже інтегровані в енергетичну інфраструктуру, передбачаючи можливість його закачування в газотранспортну мережу, використання як моторного палива або генерації електроенергії.

Попри успіхи у впровадженні таких технологій, їх широке поширення гальмують низка технічних і економічних бар'єрів. Серед них — висока вартість очисного обладнання, складність стабілізації процесу зброджування при змінному складі субстрату, залежність ефективності метаногенезу від

| | | | | | | | | |
|------------------|-------------|-----------------------|---------------|-------------|--------------------------|--------------------------------------|-------------|----------------|
| | | | | | <i>ДП ББ11.19.000 ПЗ</i> | | | |
| <i>Змн.</i> | <i>Арк.</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> | | | | |
| <i>Розроб.</i> | | <i>Поденежка Ю.В.</i> | | | <i>Вступ</i> | <i>Літ.</i> | <i>Арк.</i> | <i>Акрушів</i> |
| <i>Перевір.</i> | | <i>Казар М.Ю.</i> | | | | | <i>8</i> | <i>63</i> |
| <i>Н. Контр.</i> | | | | | | <i>КПІ ім. Ігоря Сікарського ФБТ</i> | | |
| <i>Затверд.</i> | | | | | | | | |

температурного та рН- режимів, а також потреба в попередній обробці гною для зниження вмісту інгібіторів процесу. В Україні, попри наявність значних обсягів відходів великої рогатої худоби, потенціал цієї сировини досі використовується вкрай обмежено через нестачу сучасних біогазових установок, недостатню державну підтримку та відсутність ефективної нормативної бази.

Метою дипломного проєкту є обґрунтування та вибір технології отримання біометану з відходів ВРХ.

Завдання, які необхідно вирішити в рамках дипломного проєкту:

1. Навести характеристику сировини та біологічного агента;
2. Проаналізувати існуючі технології отримання біометану;
3. Розробити технологічну та апаратурну схеми виробництва біогазу, запроєктувати метантенк. Провести основні технологічні розрахунки;
4. Навести вимоги охорони праці та довкілля

| | | | | | | | |
|------------------|-------------|-----------------------|---------------|-------------|--------------------------|-------------|----------------|
| | | | | | <i>ДП ББ11.19.000 ПЗ</i> | | |
| <i>Змн.</i> | <i>Арк.</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> | | | |
| <i>Розроб.</i> | | <i>Поденежка Ю.В.</i> | | | <i>Літ.</i> | <i>Арк.</i> | <i>Акрушіє</i> |
| <i>Перевір.</i> | | <i>Козар М.Ю.</i> | | | | 9 | 63 |
| <i>Н. Контр.</i> | | | | | <i>Вступ</i> | | |
| <i>Затверд.</i> | | | | | | | |

РОЗДІЛ 1. ХАРАКТЕРИСТИКА СИРОВИНИ, БІОЛОГІЧНОГО АГЕНТА. ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ

1.1 Характеристика сировини

Потреба у виробництві біогазу обумовлена не лише прагненням до впровадження альтернативних джерел енергії, але й необхідністю ефективної утилізації органічних відходів. У цьому контексті доцільним є використання продуктів життєдіяльності сільськогосподарських тварин і птахів, що можуть комбінуватися з рослинними косубстратами з метою покращення біохімічного складу поживного середовища. До сировинної бази відносять:

- гній великої рогатої худоби (ВРХ), свиней, послід птиці;
- залишки овочевих культур (бадилля);
- некондиційні зразки зернових, цукрових буряків, кукурудзи;
- побічні продукти переробки буряків, такі як жом та меляса;
- залишки спиртового виробництва (барда);
- мучку, дробину, зернові домішки, зародки;
- пивну дробину, солодові проростки, осади білкового характеру;
- продукти переробки крохмалю і патоки;
- фруктові й овочеві вичавки;
- сироватку та маслянку [1].

Кількість різновидів субстратів, що застосовуються в одній біогазовій установці, може сягати від одного до десяти і більше позицій [2]. Серед найбільш часто використовуваних видів сировини виділяють гній ВРХ. Його ефективність пояснюється наявністю у травному тракті тварин представників метаногенної мікрофлори, що є ключовими агентами у процесі анаеробного бродіння [3].

Перед завантаженням до біореактора сировина проходить підготовку, яка включає розведення водою, а також механічне видалення сторонніх домішок, зокрема, неперетравленої соломи й дрібних мінеральних частинок. Послід птахів також може слугувати сировиною, однак у чистому вигляді не використовується

| | | | | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | Арк. |
| | | | | | | | | | 10 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | | | | |

ДП ББ11.19.000 ПЗ

через надмірну генерацію амонію, що пригнічує метаногенез. З цієї причини його вводять у суміші з гноєм інших тварин або рослинними залишками. Гній ВРХ є одним із найбільш енергетично вигідних субстратів: середній вихід біогазу становить 20–30 м³ з однієї тонни сировини. Його фізико-хімічна однорідність робить цей тип гною придатним для систем із безперервним режимом ферментації. У більшості випадків гній змішують з водою, видаляють надлишкову солому, щоб уникнути утворення кірки чи осаду. Наявність у складі сечі також позитивно впливає на вихід біогазу, тому рекомендується облаштувати стійлові приміщення бетонованими підлогами з гідрозливом, що дозволяє збирати усі рідкі фракції в приймальну ємність.

Такий субстрат зазвичай характеризується високим вмістом вуглеводів, однак саме білки є головним джерелом утворення метану. Крім того, у гної ВРХ функціонує природна буферна система, яка стабілізує рН під час перебігу ферментаційних процесів. Водночас його детальний хімічний склад є змінним і залежить від виду тварин, умов утримання, раціону годівлі та типу підстилкового матеріалу, що впливає на співвідношення макро- та мікроелементів [1].

Одним із критичних параметрів, що визначають ефективність біогазового процесу, є співвідношення вуглецю до азоту (С:N) у сировині. Оптимальний діапазон значень для забезпечення стабільного метаболізму мікроорганізмів становить від 10:1 до 20:1. Для гною ВРХ це співвідношення зазвичай коливається в межах 16,6–25:1, для свинячого гною – 6,2–12,5:1, а для пташиного посліду – 7,3–9,65:1.

У таблиці 1.1. наведено порівняльну характеристику сировини для зброджування з метою отримання біогазу та біометану.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
| | | | | | <i>ДП ББ11.19.000 ПЗ</i> | Арк. |
| | | | | | | 11 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

Таблиця 1.1. Вміст речовин у відходах сільського господарства[15]

| Компонент | Гній худоби | | |
|----------------|-------------|-----------|-----------|
| | ВРХ | Свиней | Курей |
| Органічна маса | 77-85 | 77-84 | 76-77 |
| Азот | 2,3-4,0 | 4,0-10,3 | 2,3-5,7 |
| Фосфор | 0,4-1,1 | 1,9-2,5 | 1,0-2,7 |
| Калій | 1,0-2,0 | 1,4-3,1 | 1,0-2,9 |
| Кальцій | 0,6-1,4 | - | 5,6-11,6 |
| Магній | 0,5-0,6 | - | 0,9-1,1 |
| Целюлоза | 27,6-50,3 | 19,5-21,4 | 13,0-17,8 |
| Сирий жир | 2,9-4,3 | 3,5-4,0 | 2,4-5,0 |
| Сирий протеїн | 9,3-20,7 | 16,4-21,5 | 20,5-42,1 |
| Лігнін | 16-30 | - | 9,6-14,3 |
| C:N | 9-15 | 9-15 | 9-15 |

Вміст різних мікроелементів та макромолекул в складі тваринних відходів залежить від виду корму та його складу. У таблиці 1.2. наведено порівняння виходу біогазу для різних типів побічних продуктів утримання тварин.

Таблиця 1.2. Вихід біогазу з відходів сільського господарства.[17]

| Субстрат | Вміст СР, % | Вихід біогазу, м ³ /т | Вихід метану, м ³ /т |
|----------------|-------------|----------------------------------|---------------------------------|
| Гній ВРХ | 20-25 | 80 | 44 |
| Гній свиней | 4-7 | 20-35 | 17 |
| Курячий послід | 40 | 140 | 90 |

Виходячи з даних таблиць 1.1 та 1.2 можна зробити висновок, що найефективніше використовувати саме відходи птахівництва, проте він хибний.[5]

Солома, як побічний продукт сільськогосподарського виробництва, широко використовується як підстилка для тварин, зокрема великої рогатої худоби. Після

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------|------|
| | | | | | ДП ББ11.19.000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 12 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

використання в якості підстилки, солома насичується гноем та сечею, утворюючи органічну суміш, що є перспективною сировиною для анаеробного зброджування з метою виробництва біогазу. [6] Однак, висока вологість та неоднорідність складу такої суміші можуть ускладнювати процес зброджування. Дослідження показують, що попередня обробка соломи, зокрема механічне подрібнення, може значно покращити її біодеградацію та підвищити вихід метану. [7]

Крім того, використання соломи як підстилки сприяє утилізації цього побічного продукту, зменшуючи потребу в його спалюванні або вивезенні на звалища, що, в свою чергу, знижує викиди парникових газів та покращує екологічну ситуацію.

Таким чином, інтеграція використання соломи як підстилки та сировини для біогазових установок є ефективною стратегією в рамках концепції циркулярної економіки. Солома має високий вміст вуглецю та низький вміст азоту, що може призводити до дисбалансу в процесі зброджування. Додавання азотовмісних матеріалів, таких як гній, або використання соломи після її використання як підстилки, може покращити це співвідношення та сприяти більш ефективному виробництву біогазу[7].

Гній ВРХ є цінним субстратом для виробництва біометану завдяки високому вмісту органічних речовин та наявності необхідної мікрофлори для процесу анаеробного зброджування. Застосування гною як основного або додаткового субстрату дозволяє зменшити викиди метану, які виникають при традиційному зберіганні гною, та покращити санітарно-епідеміологічну ситуацію в аграрних регіонах. Дослідження показують, що використання гною ВРХ у виробництві біометану може забезпечити значне зменшення викидів парникових газів порівняно з викопним природним газом. Проміжні культури, такі як жито, тритикале, сорго та інші, вирощуються між основними сільськогосподарськими культурами та використовуються для виробництва силосу, який служить сировиною для біогазових установок.

| | | | | | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------|--|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | | Арк. |
| | | | | | | | | | | 13 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | ДП ББ11.19.000 ПЗ | | | | | |

Цей підхід дозволяє ефективно використовувати аграрні землі протягом усього року, підвищуючи загальну продуктивність та сприяючи збереженню родючості ґрунтів. Згідно з дослідженнями, вирощування проміжних культур у системі послідовного землеробства не знижує врожайність основних культур та відповідає критеріям сталого розвитку, визначеним у статті 28(6) директиви RED II. Виробництво біометану з гною ВРХ та проміжних культур сприяє значному зменшенню викидів парникових газів. Зокрема, використання гною дозволяє уникнути викидів метану, які виникають при його традиційному зберіганні, а також зменшити потребу в мінеральних добривах завдяки використанню дигестату як органічного добрива. [7]

Крім того, вирощування проміжних культур сприяє поглинанню CO₂ з атмосфери та покращенню структури ґрунту, що додатково знижує загальний вуглецевий слід аграрного виробництва. Директива Європейського Парламенту та Ради (ЄС) 2018/2001 (RED II) [29] встановлює обов'язкові цілі щодо частки відновлюваних джерел енергії в загальному енергоспоживанні, зокрема, досягнення 32% до 2030 року. [8]

У контексті транспорту передбачено досягнення 14% частки відновлюваних джерел енергії. RED II також визначає критерії сталості для біопалив та біогазу, включаючи вимоги до зменшення викидів парникових газів та використання сировини, зазначеної в Додатку IX. [1]

Директива RED III, яка є оновленням RED II, посилює вимоги до сталості та передбачає збільшення частки відновлюваних джерел енергії до 40% до 2030 року. Вона також акцентує увагу на необхідності використання відходів та залишків як сировини для виробництва біопалив, що відповідає концепції використання гною ВРХ та проміжних культур. Виробництво біометану з гною ВРХ та проміжних культур відкриває можливості для експорту цього виду палива до країн ЄС, де існує попит на відновлювані джерела енергії. Завдяки відповідності критеріям сталості, визначеним у директивах RED II та RED III, та

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
| | | | | | <i>ДП ББ11.19.000 ПЗ</i> | Арк. |
| | | | | | | 14 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

використанню сировини з Додатку ІХ, такий біометан може отримати "зелену премію" — додаткову вартість на ринку за рахунок його екологічних переваг .

В Україні вже реалізуються проекти з виробництва біометану на основі гною та проміжних культур. Наприклад, біогазовий завод компанії "Галс Агро" в Чернігівській області виробляє 3 млн м³ біометану на рік, використовуючи гній, жом цукрових буряків та кукурудзяний силос. [9]

1.2 Обґрунтування вибору технології

Розроблено велику кількість технологій одержання біогазу з біомасових відходів у різних країнах світу, що зумовлює необхідність чіткого визначення потреб конкретного виробництва.

Біогазові установки можуть значно відрізнятись за рівнем складності — від найпростіших циліндричних конструкцій без рухомих елементів до високотехнологічних автоматизованих промислових систем. Системи біогазу класифікуються за основними експлуатаційними характеристиками, такими як температурний режим функціонування, спосіб культивування, вміст сухої речовини, кількість технологічних стадій та конструктивні особливості реактора.[1]

Схематичне зображення класифікації біогазових реакторів за конструктивними критеріями представлено на рисунку 1.1.

Анаеробне зброджування – один з найефективніших методів обробки органічних відходів з отриманням енергії. Принципова схема технології наведена на рис.1.2. Відходи збирають у накопичувачі, потім завантажують в метантенк, де сировина проходить всі стадії зброджування з виділенням біогазу. Отриманий біогаз йде на когенераційну установку, де використовується для отримання електроенергії, частина якої забезпечує обігрів метантенку. Дигестат, отриманий унаслідок анаеробного зброджування відділяють від води і можуть використовувати як добриво. Найпростіша система анаеробного зброджування містить один реактор, який відповідає за всі чотири етапи процесу. Його

| | | | | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | Арк. |
| | | | | | | | | | 15 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | ДП ББ11.19.000 ПЗ | | | | |

називають одноступеневою системою зброджування. Однак, поряд із розвитком науки та біотехнологій, вчені встановили, що кожен етап зброджування має різні оптимальні умови. Тому ідея фізичного розділення етапів процесу (багатоступеневе зброджування) має на меті оптимізувати кожен з них для досягнення найвищої продуктивності біотрансформації. [10]

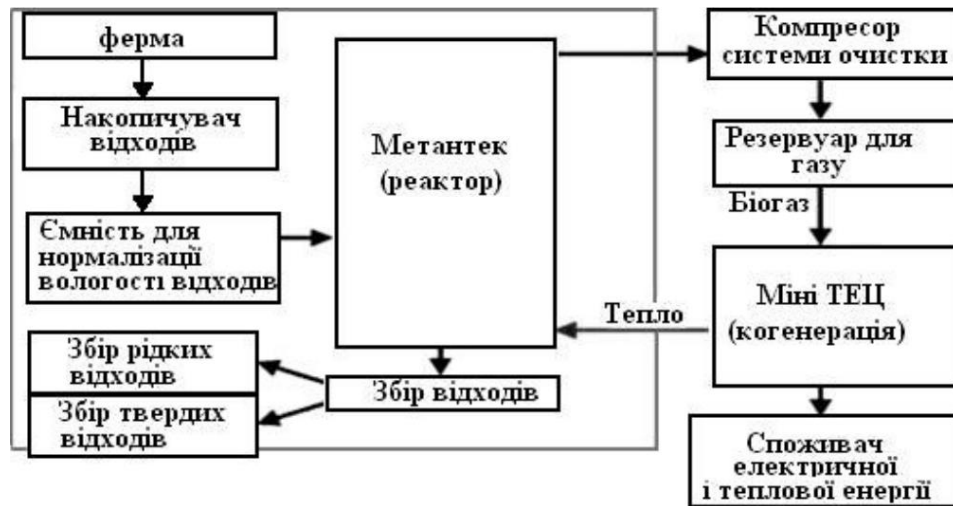


Рисунок 1.1 - Схема отримання біогазу з відходів [10]

Для функціонування реактора в режимі метантенка обов'язковою умовою є забезпечення повної герметичності конструкції, оскільки метаноутворювальні мікроорганізми належать до облигатних анаеробів і мають високу чутливість до присутності навіть незначних концентрацій кисню. Водночас конструкція реактора повинна передбачати можливість його внутрішнього технічного обслуговування, бути оснащеною надійною теплоізоляцією, мати просту й зручну систему завантаження та вивантаження субстрату, володіти стійкістю до дії агресивного середовища, а також містити ефективну вентиляційну систему для запобігання накопиченню шкідливих газів. Уся технологія одержання біогазу базується на процесах анаеробного зброджування органічної сировини під впливом метаногенних мікроорганізмів. [3]

В даний час багатоступеневі системи (рис.1.2) включають лише дво- та триступеневі системи. Дво- та триступеневі системи для виробництва біогазу

| | | | | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | Арк. |
| | | | | | | | | | 16 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | ДП ББ11.19.000 ПЗ | | | | |

передбачають розділення процесів гідролізу, ацидогенезу/ацетогенезу та метаногенезу в окремі реактори. Хоча таке розділення оптимальне для кожного виду бактерій, воно пов'язане зі значними додатковими витратами на обладнання та ускладнює технологічний процес. Для даного проекту було обрано конструкцію з основним метантенком та доброджувачем для збільшення виходу біогазу. [9]

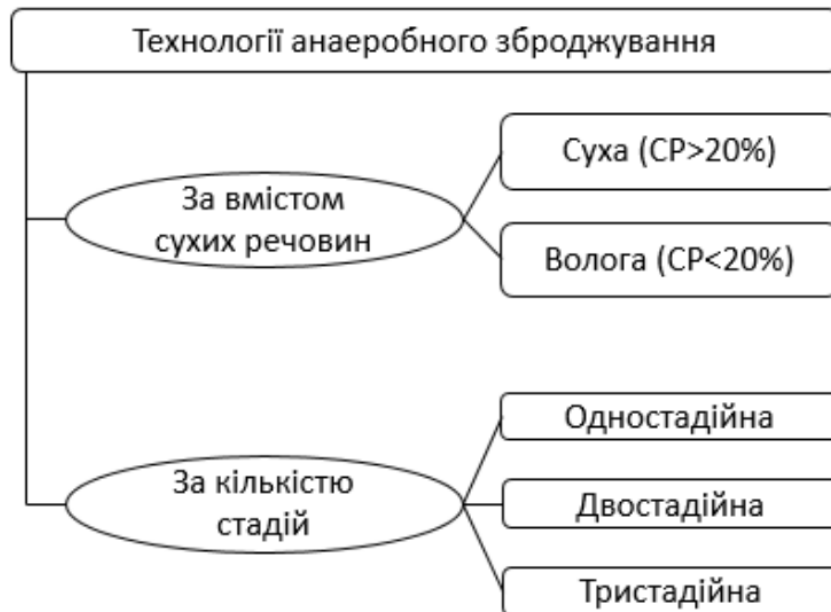


Рисунок 2.2 - Класифікація технологій анаеробного зброджування за вмістом сухих речовин та кількістю стадій [9]

Для реалізації ефективної та стабільної технології виробництва біометану з відходів великої рогатої худоби було обрано технологічну схему, яка включає основний ферментер — метантенк — та вторинний анаеробний реактор — доброджувач. Такий підхід є обґрунтованим як з точки зору мікробіологічної активності, так і з погляду оптимізації технічних процесів.

Технології одержання біогазу класифікують за температурним режимом функціонування на мезофільні, які працюють в діапазоні 30–40 °С, та термофільні — в межах 45–60 °С. Температури нижчі за 20 °С визначаються як психрофільні, але вони не придатні для промислового застосування через вкрай низьку швидкість перебігу метаболічних реакцій та неефективність перетворення органічної речовини в метан. Мезофільні установки вважаються

| | | | | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | Арк. |
| | | | | | | | | | 17 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | <i>ДП ББ11.19.000 ПЗ</i> | | | | |

технологічно стабільнішими і менш енерговитратними у порівнянні з термофільними системами. Водночас термофільні системи демонструють вищу продуктивність за рахунок прискорених реакцій бродіння. Проте, у країнах із помірним кліматом, зокрема в Україні, найчастіше надається перевага саме мезофільним системам, оскільки вони потребують менше теплової енергії для підтримання необхідного температурного режиму, що позитивно впливає на рентабельність проєктів. [4]

Процес культивування метаногенів у біореакторах може здійснюватися як у безперервному, так і в періодичному режимах. У безперервному процесі подача субстрату і відведення дигестату здійснюються поступово, забезпечуючи стабільність процесу і рівномірне газовиділення. Цей тип організації є типовим для більшості сучасних біогазових установок. [5] У періодичному режимі біореактори спочатку повністю заповнюються органічною сировиною, після чого починається цикл зброджування. По завершенні реактор спорожняється, і лише тоді здійснюється нове завантаження. Такий тип експлуатації є менш технологічно складним, дешевшим у реалізації, але має ряд істотних обмежень: нерівномірний вихід біогазу, зниження якості продукту в окремі періоди циклу, ускладнення герметизації конструкцій, обмеження у висоті реактора, необхідній для забезпечення ефективної інфільтрації субстрату. [6]

Для забезпечення ефективного метаногенезу критично важливим є також параметр вологості субстрату. Метаногени проявляють активність лише в умовах високої вологості середовища. В залежності від концентрації сухих речовин, біогазові технології поділяють на вологі (вміст твердих речовин до 16%), напівсухі та сухі (22–40%). Сухі системи мають переваги у вигляді меншої потреби в об'ємі реактора, зменшених енерговитрат і скороченого обсягу обробки відходів. Осад, що утворюється після сухого зброджування, характеризується низьким вмістом води, що значно полегшує його використання як органічного добрива. Однак, втілення сухих систем у практику

| | | | | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | Арк. |
| | | | | | | | | | 18 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | ДП ББ11.19.000 ПЗ | | | | |

пов'язане з певними труднощами, серед яких — потреба у періодичному режимі роботи, зі всіма притаманними йому недоліками. [7]

В умовах вологого зброджування для досягнення оптимального співвідношення вологи часто використовують додаткове зволоження сировини технічною водою. Рекомендований вміст сухих речовин для стабільної роботи реактора становить 3–12%. Наприклад, гній свиней має високу природну вологість (86–91%), однак при додаванні рослинних домішок загальна вологість субстрату знижується. У таких випадках суміш доводиться розбавляти, зокрема за рахунок повторного використання фільтрату зневодненого осаду. Але така вода часто містить високу концентрацію амонійного азоту (70–150 мг/дм³), що при регулярному застосуванні без попереднього очищення призводить до накопичення токсичних сполук, пригнічення метаногенів та зниження продуктивності установки. [11] За кількістю стадій процесу біогазові технології класифікуються як одно-, дво- та багатоступінчасті. Багатоступеневі схеми необхідні у випадках, коли різні етапи зброджування вимагають суттєво відмінних умов. Наприклад, гідроліз та ацидогенез найкраще проходять при одних параметрах температури і рН, тоді як метаногенез потребує зовсім інших умов. Багатоступінчасті реактори ефективніші при зброджуванні складної сировини, особливо рослинного

походження, і використовуються переважно у великих системах із річною продуктивністю понад 50 тис. тонн. Натомість одноступінчасті установки є простішими у реалізації та експлуатації, що робить їх популярним вибором для малих і середніх господарств та модульних децентралізованих систем. [9]

Правильно організований етап підготовки сировини має значний вплив на стабільність процесу метаногенезу і, відповідно, на якість та кількість біогазу. Відходи спершу накопичуються у спеціальних сховищах для забезпечення безперебійної подачі субстрату, особливо у безперервному режимі експлуатації. На цьому етапі важливо дотримуватись санітарних норм, зокрема — забезпечити належну вентиляцію приміщень для зменшення концентрації запахових компонентів. Важливою складовою підготовки є також подрібнення компонентів

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
| | | | | | <i>ДП ББ11.19.000 ПЗ</i> | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 19 |

субстрату, оскільки ступінь дисперсності впливає на доступність органічної речовини для мікроорганізмів.

Найбільш розповсюдженими є шнекові дробарки з ножовими механізмами, які забезпечують високу продуктивність (до 50 м³/добу) та можливість автоматичного управління. З метою підвищення ефективності процесу доцільно проводити подрібнення силосу кукурудзи, що дозволяє краще адаптувати параметри під конкретні властивості матеріалів і сприяє прискоренню ферментації в біореакторі. [14]

Метантенк виконує функцію первинного зброджувача, де відбуваються гідроліз, кислотогенез та початкова стадія метаногенезу. Основною перевагою використання метантенка є можливість підтримання контрольованих умов (температури, рН, швидкості перемішування), які є критично важливими для активності консорціуму мікроорганізмів. Однак через високий вміст інгібіторів (амоній, леткі жирні кислоти), властивий гною великої рогатої худоби, процес зброджування у метантенку потребує подовження часу утримання субстрату для повної стабілізації біохімічних реакцій. У зв'язку з цим, до технологічної лінії вводиться доброджувач — окремий резервуар, де відбувається завершення анаеробного розкладу органічної речовини та остаточне утворення метану. Це дозволяє зменшити навантаження на основний реактор, стабілізувати газовий вихід та покращити якість дигестату. Крім того, розділення процесу на дві фази підвищує гнучкість системи, дає змогу більш точно керувати мікробіологічними процесами та запобігає ризику закислення субстрату. Дослідження показали, що двостадійна ферментація дозволяє підвищити загальний вихід метану на 15–25% порівняно з однофазними системами, особливо при роботі з високоорганічними відходами тваринництва. [5] На етапі очищення біогазу до рівня паливного біометану (>96% CH₄) було обрано мембранну технологію сепарації. Мембранна очистка ґрунтується на селективному проникненні молекул крізь полімерну мембрану, яка затримує метан, тоді як CO₂, водень, азот та сірководень проходять через мембрану в іншому потоці. [9].

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
| | | | | | <i>ДП ББ11.19.000 ПЗ</i> | Арк. |
| | | | | | | 20 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

Цей метод має низку переваг у порівнянні з іншими способами очищення, зокрема водною абсорбцією, хімічною адсорбцією або криогенною сепарацією. Основні переваги мембранного очищення — це модульність, енергоефективність, відсутність потреби у хімічних реагентах та здатність працювати в безперервному режимі. Мембранні установки легко масштабуються, мають компактні габарити, що особливо актуально для агропромислових підприємств та фермерських господарств, де обмежено площу для технічної інфраструктури. До того ж мембранні системи демонструють високий ступінь селективності за метаном та мають низькі експлуатаційні витрати при середніх обсягах обробки газу. Тверда фракція дигестату, яка утворюється в результаті механічного розділення зброженої маси після анаеробного збродження органічних відходів, дедалі частіше розглядається як цінний ресурс у системах кругового біоекономічного виробництва. Одним із перспективних напрямів її повторного використання є застосування в якості підстилкового матеріалу для великої рогатої худоби з подальшим поверненням отриманої підстилки-гною до біогазової установки.

Така технологічна схема дозволяє створити замкнений цикл органічного ресурсу, в якому тверда фракція дигестату виконує функцію підстилки, поглинаючи рідкі екскременти, а після насичення органічними речовинами та вологою, знову потрапляє до метантенка в якості збагаченої біомаси. Згідно з дослідженнями, тверда фракція дигестату демонструє добрі гігроскопічні властивості, знижує витрати на закупівлю соломи або торфу, а також має антибактеріальні властивості, що позитивно впливає на санітарно-гігієнічний стан тваринницьких приміщень. [10]

Разом із тим, важливо враховувати ризики, пов'язані з повторним використанням твердої фракції. Зокрема, у деяких випадках може спостерігатися накопичення важких металів або патогенних мікроорганізмів, що залежить від складу первинного субстрату, температурного режиму збродження та ефективності гігієнізації. У зв'язку з цим, деякі дослідження рекомендують

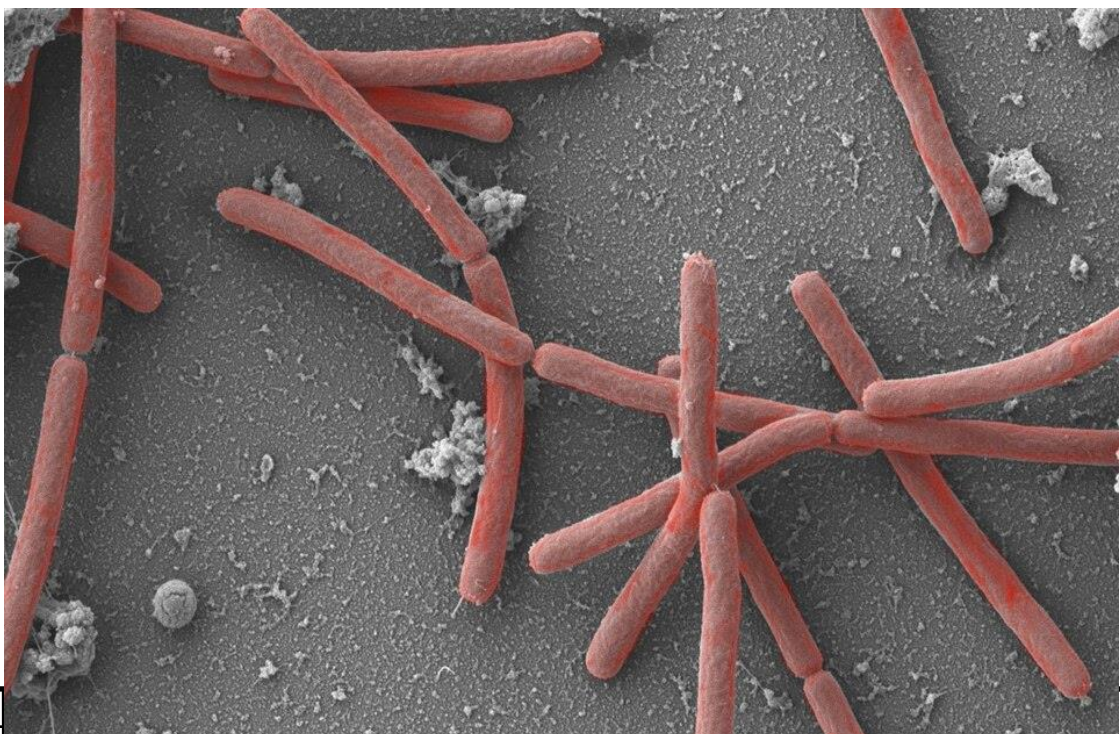
| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
| | | | | | <i>ДП ББ11.19.000 ПЗ</i> | Арк. |
| | | | | | | 21 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

попереднє компостування твердої фракції перед її використанням як підстилки, що дозволяє зменшити вміст патогенів і покращити структуру матеріалу. [14]

З енергетичної точки зору, тверда фракція після використання як підстилка не втрачає значної частки метаноутворювального потенціалу. За результатами досліджень, при повторному зброджуванні такої сировини можна досягти порівнянного або навіть вищого виходу метану, ніж при первинному зброджуванні, що обумовлено додатковим збагаченням фракції легкозброджуваними сполуками під час її використання в тваринництві. [8]

1.3 Характеристика біологічного агента

У процесі анаеробного зброджування органічних речовин, зокрема гною великої рогатої худоби, ключову роль відіграє консорціум анаеробних мікроорганізмів, серед яких особливе значення мають метаногенні археї (рис. 2.3) — облігатно анаеробні прокаріоти, здатні синтезувати метан як кінцевий продукт життєдіяльності. Сукупність мікроорганізмів, що беруть участь у перетворенні складних органічних сполук на метан і вуглекислий газ, загалом іменується як біологічний агент анаеробного зброджування.



ДІП ББ 11.19.000 113

| | | | | |
|------|------|----------|--------|------|
| | | | | |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |

Арк.

22

Рисунок 2.3 – *Methanobacterium* під мікроскопом

Біологічний агент представлений кількома трофічними групами мікроорганізмів, які послідовно реалізують чотири основні стадії анаеробного перетворення: гідроліз, кислотогенез, ацетогенез і метаногенез. На першому етапі гідролітичні бактерії (наприклад, *Clostridium*, *Bacteroides*) розщеплюють складні полімери (целюлозу, білки, ліпіди) до простіших мономерів — цукрів, амінокислот, жирних кислот. У процесі кислотогенезу факультативні анаероби (*Lactobacillus*, *Streptococcus*, *Enterobacter*) утворюють з цих проміжних метаболітів леткі жирні кислоти (оцтову, масляну, пропіонову), спирти, водень і вуглекислий газ. Ацетогенні бактерії (*Syntrophomonas*, *Syntrophobacter*) далі перетворюють ці речовини на оцтову кислоту, CO₂ та H₂, що вже безпосередньо використовуються метаногенами. Основними представниками метаногенних архей, що забезпечують кінцеву стадію перетворення, є роди *Methanobacterium*, *Methanosaeta*, *Methanosarcina* та *Methanospirillum*. Ці мікроорганізми здатні використовувати два основні шляхи метаногенезу: ацетокластичний (розщеплення ацетату до метану та CO₂) та воднеотрофний (редукція CO₂ воднем до метану). Відомо, що близько 70% метану в більшості біогазових реакторів формується саме ацетокластичними метаногенами, зокрема *Methanosaeta concilii*.

Життєдіяльність біологічного агента залежить від ряду фізико-хімічних параметрів: температури (оптимально для мезофільних архей — 35–38°C, для термофільних — 52–55°C), значення рН (оптимум 6.8–7.4), наявності інгібіторів (аміак, сульфіді, важкі метали) та співвідношення C:N (оптимально — 20:1...30:1). Важливу роль відіграє також ретельне перемішування середовища та анаеробні умови, що унеможливають наявність кисню, токсичного для облігатно анаеробних форм.

Особливістю використання біологічного агента на основі гною ВРХ є вже наявна природна мікрофлора гною, що містить активні популяції анаеробних бактерій і метаногенів. Це дозволяє запускати процес зброджування без

| | | | | | | | |
|----------------------------|------|----------|--------|------|--|--|------|
| додаткового інкубування ст | | | | | ронними культурами. Однак при впровадженні | | Арк. |
| | | | | | ДП ББ11.19.000 ПЗ | | 23 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | | |

двофазної технології (метантенк + доброджувач) рекомендованим є використання спеціально активованих культур з високим вмістом метаногенів, що дозволяє підвищити швидкість метаногенезу та покращити якість біогазу.

| | | | | | | |
|-------------|-------------|-----------------|---------------|-------------|--------------------------|------|
| | | | | | <i>ДП ББ11.19.000 ПЗ</i> | Арк. |
| | | | | | | 24 |
| <i>Змн.</i> | <i>Арк.</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> | | |

РОЗДІЛ 2. БІОХІМІЧНІ ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ

2.1 Перебіг процесу утворення біометану

Біогаз утворюється внаслідок розкладання органічних речовин з утворенням метану та інших сполук, переважно вуглекислого газу, сірководню, водню, тощо. Основні фази деградації органічних сполук з кінцевим одержанням метану наведені на рис. 2.1.



Рисунок 2.1 - етапи розкладу органічних сполуки в анаеробних умовах [8]

| | | | | | | | | |
|-----------|------|-----------------------|--------|------|---|---------------------------------------|------|---------|
| | | | | | <i>ДП ББ11.19.000 ПЗ</i> | | | |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | | | |
| Розроб. | | <i>Поденежка Ю.В.</i> | | | <i>БІОХІМІЧНІ ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ</i> | Літ. | Арк. | Акрушіє |
| Перевір. | | <i>Козар М.Ю.</i> | | | | | 25 | 63 |
| Н. Контр. | | | | | | <i>КПІ ім. Ізгоря Сікарського ФБТ</i> | | |
| Затверд. | | | | | | | | |

рахунок дії позаклітинних ферментів, що секретуються мікроорганізмами у навколишнє середовище. Зокрема, складні полімери, зокрема полісахариди, білки та ліпіди, піддаються ферментативному розщепленню за участі таких ферментів, як целюлаза, амілаза, протеаза та ліпаза. Білкові сполуки деградують до амінокислот, коротколанцюгових пептидів, аміаку та вуглекислого газу під впливом протеолітичних ферментів, продуцентами яких виступають представники родів *Bacteroides*, *Butyrivibrio*, *Clostridium*, *Fusobacterium*, *Selenomonas* та *Streptococcus*.

У процесі гідролізу полісахариди трансформуються у прості цукри (моно- та дисахариди). Крохмаль розщеплюється до глюкози, тоді як целюлоза піддається дії комплексу целюлаз, що також призводить до утворення глюкози (рис. 2.2). Геміцелюлоза, у свою чергу, гідролізується спеціалізованими ферментами з утворенням різноманітних моносахаридів, таких як глюкоза, галактоза, ксилоза, арабіноза та маноза.

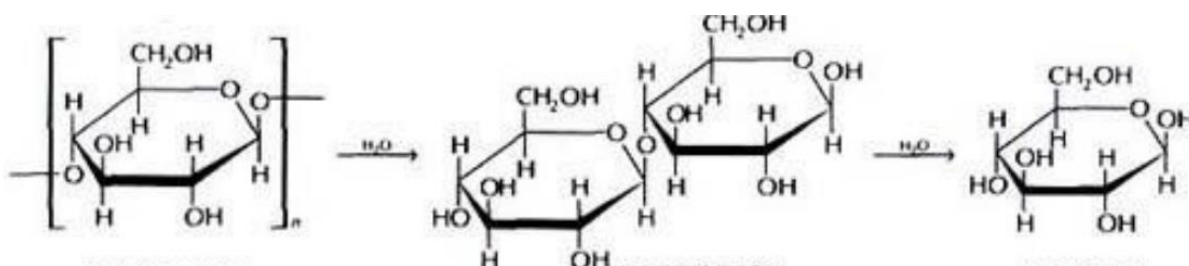


Рисунок 2.3 – схема гідролізу целюлози

Ліпідні сполуки в умовах анаеробного середовища піддаються гідролітичному розщепленню за участю ферментів ліпази та фосфоліпази, в результаті чого утворюються жирні кислоти з коротким та довгим ланцюгом. Існують припущення, що продукування позаклітинної ліпази забезпечується представниками родів *Clostridium* та *Micrococcus*.

Серед гідролітичних та ферментативно активних мікроорганізмів зустрічаються як облігатні, так і факультативні анаероби. Крім участі в розкладанні полімерів, ці мікроорганізми також здатні усувати залишковий кисень, який може надходити до біореактора при його заповненні.

У залежності від видового складу анаеробної мікрофлори та фізико-хімічних параметрів середовища всередині біореактора, подальше перетворення пірувату може призводити до утворення широкого спектра C_1 – C_4 сполук. Серед них переважають леткі жирні кислоти (ЛЖК), зокрема оцтова, пропіонова та масляна, а також інші органічні кислоти, як-от мурашина і молочна, разом із супутніми продуктами: спиртами, кетонами й альдегідами [8]. Крім того, амінокислоти можуть слугувати джерелами вуглецю та енергії для облігатних і факультативних анаеробів. Кислотогенез зазвичай є найдинамічнішою фазою в ланцюгу анаеробного розкладання складних органічних речовин. У стабільному функціонуванні системи провідними метаболічними маршрутами залишаються ті, що ведуть до утворення ацетату, CO_2 та H_2 — основних субстратів для подальшого синтезу метану. При підвищенні парціального тиску водню в середовищі спостерігається накопичення таких сполук, як лактат, етанол, пропіонат, бутират та вищі ЛЖК [19].

Концентрація та співвідношення окремих ЛЖК, що формуються на стадії кислотогенезу, мають суттєвий вплив на ефективність всього процесу анаеробного зброджування. Особливо значущими є оцтова й масляна кислоти, які виступають основними попередниками метаногенезу [20]. У двостадійних анаеробних системах процеси гідролізу й кислототворення відбуваються у першому реакторі, який називають кислотогенним. Саме тут відбувається розщеплення полімерів і часткове окиснення продуктів, необхідних для подальшого формування біогазу [21].

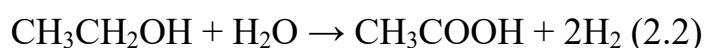
Наступним етапом є ацетогенез — процес, під час якого ацетогенні мікроорганізми конвертують пропіонову, масляну та валеріанову кислоти в ацетат, форміат, водень і діоксид вуглецю. Це перетворення має ключове значення, оскільки метаногенні археї не здатні безпосередньо утилізувати вищевказані кислоти [22].

Варто зазначити, що ацетогени характеризуються повільним темпом росту та підвищеною чутливістю до змін органічного навантаження і зовнішніх умов, що може негативно впливати на стабільність усього процесу.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
| | | | | | <i>ДП ББ11.19.000 ПЗ</i> | Арк. |
| | | | | | | 29 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

Таким чином, на ацетогенній стадії анаеробного бродіння відбувається формування ключових метаногенних субстратів — ацетату, молекулярного водню та діоксиду вуглецю. Перетворення метаболітів, утворених на попередньому (кислотогенному) етапі, забезпечується переважно облігатними протонредуючими або строго синтрофними мікроорганізмами, для метаболічної активності яких необхідна наявність партнерських популяцій, здатних споживати водень. Нижче наведено типові реакції, що характеризують метаболічну активність цих груп бактерій. [22].

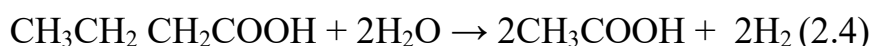
Реакції ацетогенної стадії, за участі ацетогенів, що утворюють H₂:



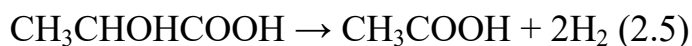
етанол ацетат



пропіонат ацетат



бутират ацетат



лактат ацетат

Реакції ацетогенної стадії, за участі ацетогенів, що використовують H₂:



Для забезпечення росту та метаболічної активності мікроорганізмів, необхідною умовою є наявність доступних поживних речовин, зокрема вітамінів, сполук, що містять азот, макро- і мікроелементів. Усі ці компоненти зазвичай присутні у достатній кількості в твердих і рідких формах гною.

Орієнтовні пропорції елементів у субстраті, придатному для ефективного анаеробного зброджування, можуть становити:

- C:N:P = 75:5:1 або 125:5:1
- C:N = 10:1 або 30:1

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
| | | | | | <i>ДП ББ11.19.000 ПЗ</i> | Арк. |
| | | | | | | 30 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

- N:P = 5:1

Відношення вуглецю до азоту (C:N) відображає баланс між органічними сполуками (вуглеводи) та азотовмісними речовинами. Оптимальним для мікробної активності вважається співвідношення C:N на рівні 30:1 або 10:1. Зниження цього показника до 8:1 вказує на надлишок амонійного азоту, що призводить до підвищення концентрації аміаку в середовищі, який пригнічує мікробіальний розвиток [21].

Крім того, для нормального функціонування бактеріальних клітин необхідна присутність слідових кількостей важких металів та мікроелементів. Водночас їх надлишок може мати інгібуючу або токсичну дію [21]. Особливе значення для ферментативної активності мають метали, зокрема нікель, кобальт, молібден, вольфрам і залізо, які входять до складу ключових ензимів.

Таким чином, процес біогазоутворення може відбуватись в умовах різного рівня концентрації поживних речовин, що підтверджується практичними спостереженнями: мікроорганізми здатні адаптуватися навіть до несприятливих умов. Варто враховувати, що багато мікроелементів утворюють нерозчинні сполуки з сіркою — сульфіди, що знижує їх біодоступність. Зокрема, дефіцит заліза може бути діагностований візуально за освітленням кольору субстрату [21]. Існує низка речовин, які здатні гальмувати або повністю блокувати метаболічні процеси та ріст мікроорганізмів. Механізми їх дії можуть включати пошкодження клітинної стінки або внутрішньоклітинних структур, а також інактивацію ферментативних систем, що беруть участь в обміні речовин. До таких речовин, зокрема, належать важкі метали та інші токсиканти [22].

Ступінь токсичності таких чинників визначається насамперед їх концентрацією: важливим є не абсолютна наявність речовини, а її кількісне співвідношення з іншими компонентами середовища.

Наявність кисню, який може потрапити до біореактора разом із недостатньо анаеробно стабілізованим субстратом, пригнічує активність метаногенних архей, що є облігатними анаеробами [21].

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
| | | | | | <i>ДП ББ11.19.000 ПЗ</i> | Арк. |
| | | | | | | 31 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

Антибіотики, хіміотерапевтичні та дезінфікуючі засоби. Застосування зазначених сполук у високих концентраціях здатне значно інгібувати або навіть повністю припинити процес метаногенезу. Особливо критичним є їх масове використання (наприклад, при обробці всього тваринницького поголів'я або дезінфекції приміщень), що може призвести до значного надходження токсикантів у біореактор. У таких випадках доцільним є тимчасове переключення потоку відходів на обхідний резервуар. Індивідуальне застосування ветеринарних препаратів зазвичай не викликає суттєвого негативного ефекту [21].

Органічні, карбонові та леткі жирні кислоти (ЛЖК). Накопичення органічних кислот, що є побічними продуктами гідролізу й кислотогенезу, може мати пригнічувальний вплив на мікрофлору. За стабільного функціонування системи загальна концентрація ЛЖК (в перерахунку на оцтову кислоту) не перевищує 2000 мг/дм³. Проте швидке дозування легкокорозкладних субстратів здатне викликати різке підвищення цього показника до 16 000 мг/дм³, що супроводжується порушенням балансу між оцтовою та пропіоновою кислотами [21].

Високі концентрації кислот спричиняють зниження рН середовища, що інгібує розвиток метаногенів і може зупинити весь процес біогазоутворення. Запобігти цьому можна шляхом значного зменшення інтенсивності подачі субстрату. Практика разового щоденного дозування субстратів також сприяє накопиченню кислот, хоч згодом вони частково метаболізуються [21].

Сірководень (H₂S). При анаеробному розкладанні білків, що містять сірку, утворюється сірководень — сполука з високою токсичністю для більшості мікроорганізмів. Його концентрація в біогазі зростає зі зниженням рН. Якщо вміст H₂S перевищує 2000 мг/кг, це може призвести до пригнічення мікробної активності. Крім того, деякі сірководновловальні бактерії конкурують з метаногенами за водень, що знижує загальну ефективність метаногенезу [21]. Водночас сірка є незамінним макроелементом, необхідним для синтезу бактеріальних біомолекул і підтримання клітинного метаболізму [21].

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
| | | | | | <i>ДП ББ11.19.000 ПЗ</i> | Арк. |
| | | | | | | 32 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

Розкладання полімерів біологічного походження здійснюється за участі ферментів, які каталізують гідролітичні реакції. Так, пептидази та протеази забезпечують деградацію білкових молекул до амінокислот шляхом розщеплення ковалентного пептидного зв'язку типу $-CO-NH-$, унаслідок чого утворюються вільні амінокислоти. Полісахариди, у свою чергу, піддаються дії ферментів, таких як целюлази, целобіази та амілази, які руйнують глікозидні зв'язки (зокрема α -1,4, α -1,6, β -1,4 тощо), з утворенням мономерних сполук, представлених моно- та дисахаридами — глюкозою, фруктозою, сахарозою, мальтозою та іншими. Жири гідролізуються під впливом ліпаз, що призводить до їхнього розпаду на багатоатомний спирт гліцерол і жирні кислоти, які є карбоновими кислотами з довгими вуглецевими ланцюгами. Таким чином, на початковому етапі анаеробного розщеплення органічної речовини задіяні звичайні гідролітичні ферменти, які продукуються бактеріями, характерними для мікрофлори шлунково-кишкового тракту.

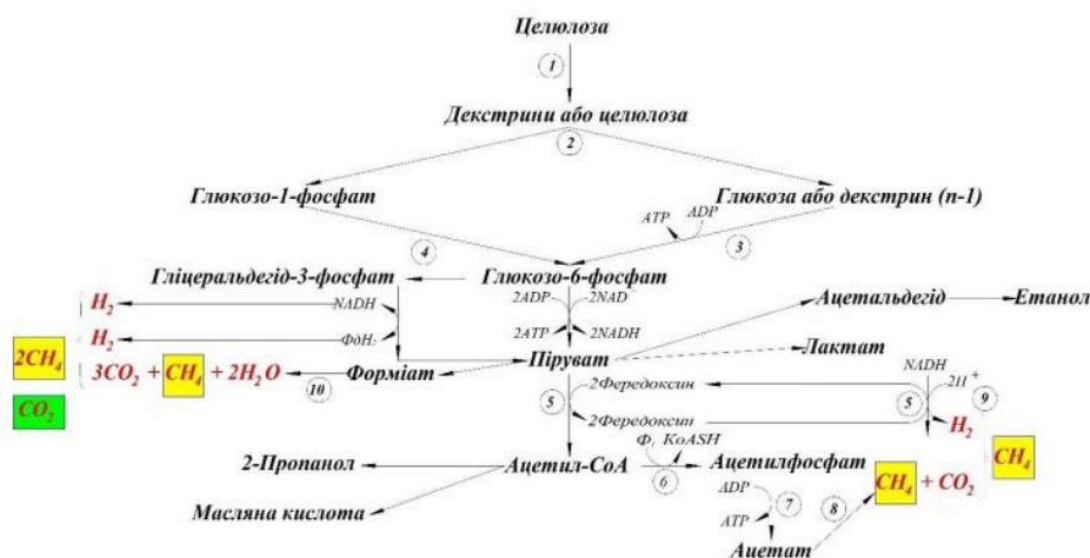


Рисунок 2.2 - Схема перетворення високомолекулярних сполук з утворенням метану: 1 – ендо-1,4- β -глюканази та екзо-1,4- β -глюканази (екзо-целобіогідролази), 2 – екзо-1,4- β -глюкозидази і целобіази (β -глюкозидази), 3 – глюкокіназа, 4 – фосфоглюкомутаза, 5 – пірувасинтаза, 6 – фосфатацетилтрансфераза, 7 – ацетаткіназа, 8 – коензим-М, 9 – NADH: ферредоксиноксидоредуктаза + гідрогеназа, 10 – форміатдегідрогеназа

| | | | | |
|------|------|----------|--------|------|
| | | | | |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |

2.2. Характеристика кінцевого продукту

Кінцевим продуктом процесу є біометан комунально-побутового призначення, який шляхом відповідної технологічної обробки доводиться до параметрів, встановлених стандартом ДСТУ ISO 13443:2015 «Гази горючі природні для промислового і комунального використання». Очищений біометан є безбарвним та позбавлений запаху [30].

Виробництво біогазу відбувається у спеціалізованих герметичних реакторах — метантенках, що мають високу стійкість до корозії та, як правило, мають циліндричну форму. Основою процесу є анаеробне зброджування органічної речовини — багатоступенева біохімічна трансформація, здійснювана мікроорганізмами в умовах відсутності кисню.

Цей процес включає чотири послідовні стадії:

1. Гідроліз — розщеплення складних біополімерів до простих органічних сполук у присутності води;
2. Ацидогенез — ферментативне перетворення продуктів гідролізу на леткі жирні кислоти, спирти, CO_2 та H_2 ;
3. Ацетогенез — подальше розщеплення жирних кислот з утворенням оцтової кислоти, водню та вуглекислого газу;
4. Метаногенез — біоконверсія оцтової кислоти, водню та CO_2 у метан (CH_4) та воду за участі метаногенних архей.

Оптимальне функціонування метантенка забезпечується підтримкою мезофільного температурного режиму ($34\text{--}36\text{ }^\circ\text{C}$), а також регулярним перемішуванням субстрату з метою рівномірного розподілу мікроорганізмів та забезпечення стабільної ферментації.

Склад біогазу, що утворюється в процесі, включає в середньому:

- метан (CH_4) — $40\text{--}70\%$,

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
| | | | | | <i>ДП ББ11.19.000 ПЗ</i> | Арк. |
| | | | | | | 34 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

- вуглекислий газ (CO₂) — 30–60%,
 - сірководень (H₂S) — до 1%,
 - а також незначні домішки азоту (N₂), водню (H₂), аміаку (NH₃), ароматичних та галогенованих вуглеводнів.
- Об’ємна теплота згоряння біогазу становить приблизно 22 МДж/м³.

Біогаз має широкі можливості для практичного застосування:

- безпосереднє використання як паливо на місці генерації;
- виробництво теплової та електричної енергії, з можливістю повторного використання відхідного тепла;
- потенціал децентралізованого енергозабезпечення, що є особливо актуальним для великих сільськогосподарських підприємств України;
- після очищення до рівня природного газу — інтеграція в газорозподільну мережу, яка забезпечує ефективне транспортування до споживачів або акумулювання у вигляді енергії.

На відміну від нестабільних джерел енергії, як-от сонячна та вітрова, використання біометану через наявну газову інфраструктуру дозволяє уникати втрат енергії при транспортуванні та акумулюванні, забезпечуючи більш гнучку модель енергозабезпечення.

Фізико-хімічні параметри горючих газів повинні відповідати вимогам, наведеним у нормативно-технічній документації (табл. 2.1).

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
| | | | | | <i>ДП ББ11.19.000 ПЗ</i> | Арк. |
| | | | | | | 35 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

Таблиця 2.1 – Характеристики біометану

| Параметр | Одиниця виміру | Граничні значення ^a | | Метод випробування (довідковий) |
|---|-------------------|--------------------------------|---------------------------|--|
| | | Мін. | Макс. | |
| Загальний уміст летких сполук кремнію (у перерахунку на Si) | мг/м ³ | | Від 0,3 до 1 ^b | EN ISO 16017-1:2000 TDS-GC-MS |
| Уміст компресорних олив | | c | | ISO 8573-2:2007 |
| Уміст домішок пилу | | c | | ISO 8573-4:2001 |
| Уміст хлоровмісних сполук | | - | d, e | EN 1911:2010 |
| Уміст фторовмісних сполук | | | d | NF X43-304:2007 ISO 15713:2006 |
| Молярна частка монооксиду вуглецю (CO) | % моль | - | 0,1 ^f | EN ISO 6974- серії |
| Масова частка аміаку (NH ₃) | мг/м ³ | | 10 | NEN 2826:1999 або VDI 3496 Blatt 1:1982–04 NF X43–303:2011 |
| Уміст амінів | мг/м ³ | | 10 | VDI 2467 Blatt 2:1991–08 |

^a Граничні значення є абсолютними, кількість знаків після коми не накладає вимог щодо точності методів випробування.

^b Для цього стандарту пропонують діапазон граничних значень силоксанів. Дослідження показали, що безперервна дія 100 % біометану протягом 15 років передбачає встановлення нижнього рівня вмісту летких сполук кремнію 0,1 мг/м³. Однак межа, встановлена на цьому рівні, буде спричиняти труднощі з погляду аналітичних вимірювань (поточні межі кількісного визначення кремнію становлять у кращому разі 0,10 мг/м³, що передбачає встановлення межі на рівні 0,30 мг/м³). Крім того, це не враховує пом'якшувальну дію розбавлення біометану, що закачується, природним газом. Тому пропонують, щоб граничне

| | | | | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | Арк. |
| | | | | | | | | | 36 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | ДП ББ11.19.000 ПЗ | | | | |

значення, яке будуть застосовувати (в угоді про доступ до мережі), було узгоджено між виробником біометану та транс-портувальником газу (оператором мережі) з урахуванням як ефективності існуючих аналітичних методів, так і можливостей розведення, наприклад, дослідженням потужностей.

^c Біометан не повинен містити домішок, крім «мінімальних» рівнів домішок компресорної оливи та домішок пилу. У контексті цього стандарту «мінімальних» означає кількість, яка не робить біометан непридатним для транспортування та використання кінцевими користувачами.

^d Див. CEN/TR Proposed limit values for contaminants in biomethane based on health assessment criteria (WI 00408007).

^e Алкілгалогеніди є основними речовинами в тому сенсі, що задане граничне значення для галогенідів автоматично забезпечує задовільне граничне значення фтор- та хлорвмісних сполук – межа встановлюється за галогенідами.

^f Межу 0,1 % було взято із CLP-Regulation (EC) No 1272/2008.

Окрім зазначених показників, границя спалахування у повітрі має бути в межах 6-12%, температура займання – 650-750°C, критичний тиск – 7,5 МПа, критична температура – -2,5°C, нормальна густина – 1,2 кг/м³.

Транспортування біометану, який за своїми характеристиками відповідає стандартам природного газу, здійснюється за допомогою газопровідної інфраструктури через газорозподільні станції та пункти відповідно до вимог Державних будівельних норм України ДБН В.2.5-20:2010 «Газопостачання». Подача природного палива споживачам може здійснюватися як безпосередньо з об'єктів видобутку або переробки (газопереробних підприємств, підземних сховищ, магістральних газопроводів), так і через систему розподільчих станцій та вузлів.

Регламентування правил зберігання природного газу на території України здійснюється відповідно до чинного нормативного акта — «Типового договору на зберігання (закачування, зберігання, відбір) природного газу», затвердженого відповідно до пункту 15 частини третьої статті 4 Закону України «Про засади

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
| | | | | | <i>ДП ББ11.19.000 ПЗ</i> | Арк. |
| | | | | | | 37 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

функціонування ринку природного газу» та підпункту 5 пункту 4 Положення про Національну комісію, що здійснює державне регулювання у сфері енергетики, затвердженого Указом Президента України від 23 листопада 2011 року № 1059.

| | | | | | | |
|-------------|-------------|-----------------|---------------|-------------|--------------------------|------|
| | | | | | <i>ДП ББ11.19.000 ПЗ</i> | Арк. |
| | | | | | | 38 |
| <i>Змн.</i> | <i>Арк.</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> | | |

РОЗДІЛ 3. ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

3.1 Матеріали основні і допоміжні

Основні та допоміжні матеріали при виробництві біогазу з відходів ВРХ наведені у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 Характеристика сировини, матеріалів та напівпродуктів при виробництві біогазу з відходів ВРХ

| Найменування | Категорія, якою регламентується сировина | Обов'язкові для перевірки показники та їх значення | Примітка |
|----------------------------|--|--|---|
| 1. Основна сировина | | | |
| 1.1 Гній ВРХ | ВНТП-АПК-09.06 | Вологість 91%, рівень рН та ін. | Сировина для отримання біометану |
| 1.2 Вода питна | СТ-Н МОЗУ 42-3.7:2013 | Нітрати – <0,00002%; важкі метали – <0,00001%; загальний вуглець – <0,5 мг/л та інше згідно з ДСанПіН | Для миття; для генерації насиченої пари |

| | | | | | | | | |
|-----------|------|-----------------------|--------|------|--------------------------------------|------|------|---------|
| | | | | | <i>ДП ББ11.19.000 ПЗ</i> | | | |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | | | |
| Розроб. | | <i>Поденежка Ю.В.</i> | | | <i>ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА</i> | Літ. | Арк. | Акрушіє |
| Перевір. | | <i>Козар М.Ю.</i> | | | | | 39 | 63 |
| Н. Контр. | | | | | <i>КПІ ім. Ігоря Сікарського ФБТ</i> | | | |
| Затверд. | | | | | | | | |

| | | | | | |
|-----------------------|------------------------------------|----------------------|------|--|---|
| 2. Допоміжні речовини | | | | | |
| 2.1 | Карбонат кальцію CaCO ₃ | ДСТУ 8253-79 | ГОСТ | Масова частка вуглекислого кальцію не менше 99% та інші показники згідно з ГОСТ | Для нейтралізації рН |
| 2.2 | Дезактин | ГОСТ 12.1.007-76 | | Відповідає вимогам «Система стандартів безпеки праці. Шкідливі речовини» та вимогам ГОСТ | Для дезінфекції приміщень, обладнання та комунікацій. |
| 2.3 | Біомий | ТУ 22902465.005-96 | У | Відповідає вимогам, наведеним у ТУ | Для миття приміщень, обладнання, тари тощо |
| 2.4 | Спирт етиловий | ГОСТ 5962-97 | | Масова частка спирту (70%) | Для дезінфекції |
| 3. Матеріали | | | | | |
| 3.1 | Балони для біогазу | ГОСТ 15860-84 | | Згідно з ГОСТ | Для зберігання біогазу |
| 3.2 | Мішки для твердого біодобрива | ГОСТ 23954-80 | | Згідно з ГОСТ | Для зберігання біодобрив |
| 4. Напівпродукти | | | | | |
| 4.1 | Біометан | ДСТУ EN 16723-1:2023 | | Згідно з ГОСТ | Для отримання очищеного біометану |
| 4.2 | Зброджена суміш | Згідно з ТУ | | Вологість більше 70% | Для отримання біодобрив |

Таким чином, в процесі виробництва до основної сировини відносять гній ВРХ, водопровідну воду, допоміжні речовини включають мийні засоби (біомой, дезактин, етиловий спирт), матеріали включають тару для біогазу та біодобрив, а також фільтри для очистки вентиляційного повітря. До напівпродуктів належать зброджена суміш, з якої робляться біодобрива, а також неочищений біогаз.

| | | | | | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|--|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | | Арк. |
| | | | | | | | | | | 40 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | <i>ДП ББ11.19.000 ПЗ</i> | | | | | |

3.2. Контроль виробництва

Параметри контролю для кожної контрольної точки та виду контролю, а також норми технологічного режиму занесені в таблицю 3.2.

Таблиця 3.2 - Точки і параметри контролю виробництва

| № п/п | Назва стадії процесу, місце заміру параметра або відбору проби | Параметр, що контролюється | Частота контролю | Норми технологічного режиму та допустимі відхилення | Методи контролю | Метод контролю параметра, тип приладу |
|-------|--|-------------------------------------|----------------------|---|------------------------|---|
| 1 | ДР 1. Підготовка приміщень | Наявність залишків бруду та біомаси | Перед початком зміни | Повна відсутність залишків органіки | Візуальний огляд | Візуальний контроль за допомогою ліхтаря та маркера |
| 2 | ДР 2.1 Фільтрування води | Температура; Тиск; | Постійно | 15–25 °С | Термометр; Манометр | Термометр цифровий з термопарою типу К; Манометр ЕКМ-1У; |

| | | | | | | |
|---|--|---|---------------------------------|---|---|---|
| 3 | ДР 2.2 Підігрів промивно ї води | Температу ра | Постійно | 15– 25 °С | Термометр | Термометр біметалевий радіальний ТБУ-63-100 |
| 4 | ДР 2.3 Подача в сорочку | Температу ра | Постійно | 15– 25 °С | Термометр | Термометр біметалевий радіальний ТБУ-63-100 |
| 5 | ДР 3.1 Подрібне ння кукурудз и | Вологість, температу ра, перемішув ання | Перед подачею в метантенк | W=90 %, T=30 ° С, n=30– 40 об/хв | Вологомір, термометр, тахометр | PORTABLE HYGRO, ТБУ-63, цифровий тахометр |
| 6 | ТП 4.1 Завантаж ення і підігрів сировини | Температу ра, рН, обертання мішалки | Постійно | T=40– 50 °С, рН=6. 8–7.4, n=30– 40 об/хв | рН-метр, термометр, тахометр | METTLER TOLEDO, ТБУ-63, цифровий тахометр |
| 7 | ТП 4.2 Зброджує ання у доброджу вачі | Температу ра, рН, обертання | Постійно | T=40– 45 °С, рН=6. 8–7.4, t=10– 30 діб, n=80 об/хв | рН-метр, термометр, таймер, тахометр | PORTAMES S, ТБУ-63, годинник, тахометр |

Арк.

ДП ББ11.19.000 ПЗ

42

Змн. Арк. № докум. Підпис Дата

| | | | | | | |
|----|---|------------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------|------------------------------|
| 8 | ТП 5.1 Видалення вологи конденсацією | Температура точки роси | Постійно | T=10 ° С | Вимірювач точки роси | DEW POINT SENSOR |
| 9 | ТП 5.2 Очищення від CO ₂ | Частка метану | Після мембранного поділу | >96% CH ₄ | Газоаналіз | Аналізатор газів типу ГАНК-4 |
| 10 | ПВ 6.3 Очищення фільтрів | Температура, вологість | Після промивки | T=130 °С, W=10 -15% | Термометр, вологомір | ТБУ-63, PORTABLE HYGRO |

3.3 Матеріальний баланс виробництва

- Поголів'я тварин N=3000 тварин ВРХ.
- Вихід гною на 1 тварину на добу $m_{ТВ}=35$ кг
- Відносна початкова вологість гною $W_B=85\%$, вміст сухих речовин $W_C=15\%$
- Система гноєвидалення – самосплав.

Вихід гною за добу:

$$m_{\text{доб}} = N \cdot m_{\text{ТВ}} = 3000 \cdot 35 = 105000 \text{ кг/добу}$$

Вважаємо, що густина гною становить $\rho=1020$ кг/м³

Об'єм гною ВРХ:

$$V_{\text{доб.т}} = \frac{m_{\text{доб}}}{\rho} = \frac{105000}{1020} = 102,94 \text{ м}^3/\text{добу}$$

Маса гною з вологістю 90% становить:

$$m_{90\%} = \frac{m_{\text{доб}} \cdot W_C}{1 - 0,9} = \frac{10500 \cdot 0,15}{1 - 0,9} = 157500 \text{ кг/добу}$$

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
| | | | | | <i>ДП ББ11.19.000 ПЗ</i> | Арк. |
| | | | | | | 43 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

Отже, для заданої вологості необхідно додати $157500 - 105000 = 52500$ кг води.

$$V_{\text{доб}} = V_{\text{доб.т}} + V_{\text{в}} = 102,94 + 52500/1000 = 102,94 + 52,5 = 155,4 \text{ м}^3/\text{добу}$$

Таким чином, густина гною ВРХ з вологістю 90%:

$$\rho_{\text{с}} = \frac{m_{90\%}}{V_{\text{доб}}} = \frac{157500}{155,4} = 1013,52 \text{ кг/добу}$$

В результаті виробництва отримується 42450 кг твердих біодобрих, 6705 кг біогазу (8046 м^3) на основі 105000 кг гною ВРХ.

| Використано | | | | Отримано | | | |
|---|----------------|----|-------|--|----------------|----|------|
| Назва сировини, матеріалів та напівпродуктів | Кількість | | | Назва кінцевого продукту або напівпродук ту, відходів та втрат | Кількість | | |
| | м ³ | шт | кг | | м ³ | шт | кг |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| ДР 3.1 Приготування розчину дезактину | | | | | | | |
| Дезактин | | | 0,025 | | | | 0,99 |
| Вода очищена | | | 0,975 | | | | 0,01 |
| Всього | 1 | | | Всього | 1 | | |
| ДР 3.2. Приготування розчину біомію | | | | | | | |
| Біомій (порошок) | | | 0,005 | Біомій (0,5%) | | | 0,99 |
| Вода очищена | | | 0,995 | Втрати (1%) | | | 0,01 |
| Всього | 1 | | | Всього | 1 | | |

ДР 3.3. Приготування розчину 70%-ого етилового спирту

| | | | | | | | |
|----------------------|--------|--|--------|----------------------|--------|--|--------|
| Етиловий спирт (96%) | 0,675 | | | Етиловий спирт (70%) | 0,99 | | |
| Вода очищена | 0,325 | | | Втрати (1%) | 0,01 | | |
| Всього | 1 | | | Всього | 1 | | |
| Гній ВРХ | | | 157495 | Зброджений осад | | | 150700 |
| | | | | Біогаз | | | 6710 |
| | | | | Втрати сировини | | | 85 |
| Всього | 157495 | | | Всього | 157495 | | |

ТП 6.1. Очищення газу від H₂S

| | | | | | | | |
|--------------|------|--|------|-----------------|------|--|------|
| Біогаз | | | 6710 | Очищений біогаз | | | 5650 |
| Вода очищена | | | 3000 | Сірководень | | | 207 |
| | | | | Вуглекислий газ | | | 850 |
| | | | | Втрати (1%) | | | 3 |
| Всього | 6710 | | | Всього | 6710 | | |

ПВ 7.1. Розділення субстрату після ферментації на фракції

| | | | | | | | |
|-----------------|--------|--|--------|----------------|--------|--|--------|
| Зброджений осад | | | 150700 | Конденсат | | | 2388 |
| | | | | Рідке добриво | | | 146980 |
| | | | | Тверде добриво | | | 1313 |
| | | | | Втрати | | | 19 |
| Всього | 150700 | | | Всього | 150700 | | |

ПВ 7.3. Упарювання рідких відходів

| | | | | |
|------|------|----------|--------|------|
| | | | | |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |

ДП ББ11.19.000 ПЗ

Арк.

45

| | | | | | | | |
|---|--------|----|--------|-------------------|--------|-------|--------|
| Рідке добриво | | | 146980 | Упарене добриво | | | 102870 |
| | | | | Надлишкова волога | | | 44100 |
| | | | | Втрати сировини | | | 10 |
| Всього | 146980 | | | Всього | 146980 | | |
| ПВ 7.5. Сушіння біодобрива | | | | | | | |
| Тверде добриво | | | 1313 | | | | 985 |
| | | | | | | | 320 |
| | | | | | | | 8 |
| Всього | 1313 | | | Всього | 1313 | | |
| ПМВ 8.2. Пакування та маркування твердого біодобрива | | | | | | | |
| Висушене біодобриво | | | 985 | | | 39 | 985 |
| Мішки по 25 кг | | 39 | | | | | 10 |
| Всього | 985 | | | Всього | 985 | | |
| ПМВ 8.3. Пакування та маркування рідкого біодобрива | | | | | | | |
| Упарене добриво | | | | Тара з добривом | | 10286 | 102860 |
| Тара (по 10 л) | | | | Втрати | | | 10 |
| Всього | 102870 | | | Всього | 102870 | | |

3.4 Опис технологічного процесу

ДР 1 – Підготовка приміщень

Здійснюється санітарна обробка технологічних приміщень, миття обладнання, дезінфекція поверхонь. Метою є запобігання контамінації процесу сторонньою мікрофлорою на початковій стадії виробництва.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
| | | | | | <i>ДП ББ11.19.000 ПЗ</i> | Арк. |
| | | | | | | 46 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

ДР 2 – Підготовка очищеної води

ДР 2.1 – Фільтрація

Видалення механічних домішок (пісок, іржа, частки ґрунту, волокна) з водопровідної води або води з технічної свердловини перед подачею в технологічні лінії.

ДР 2.2 – Пом'якшення промивної води

Зниження жорсткості та мінералізації води, яка використовується для промивання обладнання, фільтрів та очищення мембран.

ДР 2.3 – Подача теплоносія

Забезпечення нагріву технічної води до 40 °С та її подача в теплообмінники або сорочки для підтримки температурного режиму.

ДР 3 – Підготовка сировини

ДР 3.1 – Подрібнення підстилки

Підстилка з кукурудзи подрібнюється до структури, яка забезпечує належну проникність субстрату. Вологість маси становить 90%, подрібнення триває 30 хвилин зі швидкістю 30–40 обертів за хвилину. Така механічна обробка дозволяє зменшити розміри частинок, покращити гомогенність та забезпечити ефективне змішування з іншими компонентами. У результаті утворюється розпушена маса, яка рівномірно перемішується у загальному потоці та покращує газообмін під час анаеробного зброджування.

ДР 3.2 – Підготовка гноївки

Підготовка гноївки полягає в змішуванні гною великої рогатої худоби з очищеною водою для отримання однорідної суспензії з вологістю 90%. Процес триває 30 хвилин зі швидкістю перемішування 30–40 об/хв. Додавання води знижує в'язкість суміші, сприяє рівномірному розподілу твердих і рідких компонентів, а також створює сприятливе середовище для діяльності

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
| | | | | | <i>ДП ББ11.19.000 ПЗ</i> | Арк. |
| | | | | | | 47 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

метаногенних мікроорганізмів у подальшому процесі зброджування.

ТП 4 – Метанове зброджування

ТП 4.1 – Завантаження і підігрів сировини

На етапі метанового зброджування підготовлена сировинна суміш завантажується до метантенка, де підтримується оптимальна температура 40 °С. У метантенку здійснюється анаеробна ферментація органічної маси без доступу кисню, що забезпечує життєдіяльність метаногенних мікроорганізмів. Суміш постійно переміщується зі швидкістю 30–40 обертів за хвилину для підтримання однорідності середовища та запобігання утворенню застійних зон. Значення рН контролюється в межах 6,8–7,4, що відповідає нейтральному або слабколужному середовищу, необхідному для активності ферментів бактерій. Процес триває протягом 10 діб, протягом яких органічні речовини розщеплюються на метан (СН₄), вуглекислий газ (СО₂) та інші побічні продукти.

ТП 4.2 – Зброджування в дозброджувачі

Після основної фази зброджування біомаса подається до дозброджувача, де підтримуються ті самі умови: температура 40 °С, рН 6,8–7,4, тривалість 10 діб і швидкість перемішування 30–40 об/хв. Ця стадія дозволяє доокислити залишкові органічні речовини та підвищити вихід біогазу. Завдяки ретельному контролю технологічних параметрів досягається максимальна ефективність процесу зброджування та стабільна якість кінцевого дигестату..

ТП 5 – Збір, очистка і зберігання біогазу

ТП 5.1 – Видалення вологи конденсацією

Отриманий у процесі зброджування біогаз надходить до системи очищення. На першому етапі біогаз охолоджується до температури 10 °С, що забезпечує видалення вологи шляхом конденсації. Завдяки цьому знижуються корозійні ризики в обладнанні та запобігається утворенню кислот під час подальшого використання газу.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
| | | | | | <i>ДП ББ11.19.000 ПЗ</i> | Арк. |
| | | | | | | 48 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

ТП 5.2 – Осушення біогазу

Після зневоднення біогаз очищується від домішок, зокрема від силоксанів, які поглинаються активованим вугіллям у спеціальних колонках. Цей процес також здійснюється при температурі 10 °С та передбачає заміну або регенерацію фільтрів після насичення.

ТП 5.3 – Очищення від силоксанів

Після зневоднення біогаз очищується від домішок, зокрема від силоксанів, які поглинаються активованим вугіллям у спеціальних колонках. Цей процес також здійснюється при температурі 10 °С та передбачає заміну або регенерацію фільтрів після насичення.

ТП 5.4 – Десульфуризація

Окремо здійснюється десульфуризація — видалення сірководню (H_2S) — за допомогою абсорбційної колонки з вологими реагентами або адсорбційними матеріалами. Це необхідно для запобігання утворенню сірчаної кислоти при спалюванні та для забезпечення безпечної подальшої утилізації або продажу біометану.

ТП 5.5 – Мембранне очищення

Остаточне очищення біогазу з відокремленням CO_2 . За температури 20–30°C та тиску 0,4 МПа метан концентрується до $\geq 96\%$.

ПВ 6 – Переробка дигестату

ПВ 6.1 – Розділення на фракції

Після завершення метанового зброджування утворюється залишкова маса — дигестат, який підлягає подальшій утилізації. На етапі ПВ 6 ця маса проходить розділення на тверду й рідку фракції. Спочатку відбувається механічне розділення дигестату, яке виконується на установках із застосуванням фільтрувального матеріалу або стрічкових пресів. Тверда фракція

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
| | | | | | <i>ДП ББ11.19.000 ПЗ</i> | Арк. |
| | | | | | | 49 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

відокремлюється від рідкої, що дозволяє зменшити загальний об'єм відходів та підготувати матеріал до подальшого зневоднення..

ПВ 6.2 – Зневоднення

При температурі 60 °С її вологість знижується до 10–15%. Такий рівень зневоднення досягається шляхом термічної обробки або використання спеціального обладнання, що працює на основі теплоносія. Це дозволяє отримати більш щільний, сухий продукт, придатний для подальшої утилізації або використання як органічне добриво.

ПВ 6.3 – Знезараження вапном

У процесі до твердої фракції додається вапно у концентрації 5%, після чого суміш витримується при значенні рН менше 12 протягом 2 годин. Така обробка забезпечує нейтралізацію патогенних мікроорганізмів і стабілізацію маси, що робить її безпечною для транспортування та подальшого використання.

ПВ 6.4 – Очистка фільтрів

Очищення фільтрів на стадії ПВ 6.4 здійснюється з метою повторного використання технологічних матеріалів, зокрема фільтрів та бельтингової тканини, які застосовувались на попередніх етапах (ДР 2.1, ТП 5.2, ТП 5.3, ПВ 6.1). Для промивання використовується гаряча вода з температурою 60 °С, що надходить із системи ДР 2.2. Під час процесу фільтрувальні елементи звільняються від залишкових органічних частинок, біомаси та механічних домішок. Завдяки температурному впливу також відбувається часткове зневоднення матеріалів — вологість очищених компонентів знижується до рівня 10–15%.

ПМВ 7 – Знешкодження відходів

Після зневоднення та знезараження дигестату на попередніх стадіях, утворений твердий продукт підлягає пакуванню та маркуванню на етапі ПВ 7. Отримане органічне добриво, яке має стабільну консистенцію та вологість 10–15%,

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
| | | | | | <i>ДП ББ11.19.000 ПЗ</i> | Арк. |
| | | | | | | 50 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

фасується у мішки масою по 25 кг. Для цього використовуються стандартні тари зі складу — поліпропіленові або паперові мішки, стійкі до вологи та механічних пошкоджень.

ЗВ 8. – Знешкодження відходів

ЗВ 8.1 – Утилізація твердих відходів

Здійснюється утилізація твердих відходів, зокрема використаних фільтрувальних матеріалів, залишків бельтингової тканини та механічних частинок, що були вилучені на етапах очищення. Ці матеріали, непридатні для повторного використання, спрямовуються на централізоване збирання та подальше вивезення на полігони для побутових чи промислових відходів.

ЗВ 8.2 – Утилізація рідких відходів

проводиться утилізація рідких відходів, які утворюються після зневоднення біогазу (ТП 5.1, ТП 5.2), а також після промивання фільтрів. Такі стоки знезаражуються відповідно до екологічних вимог та після цього можуть бути скинуті в господарсько-побутову каналізацію або спрямовані на подальшу очистку в локальних очисних спорудах.

ЗВ 8.3 – Утилізація газових відходів

Виконується утилізація газових відходів, що утворюються під час очищення біогазу (зокрема, після видалення силоксанів і сірководню на етапах ТП 5.3–5.4). Газоподібні забруднення знезаражуються шляхом фільтрації, абсорбції або спалювання у факельних установках. Знешкожене повітря з допустимими викидами виводиться в атмосферу відповідно до нормативних показників.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
| | | | | | <i>ДП ББ11.19.000 ПЗ</i> | Арк. |
| | | | | | | 51 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

РОЗДІЛ 4. ПІДБІР ТА ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТАНТЕНКУ

Для відділення виробничого біосинтезу розраховуємо метантенк. Розрахунки проводяться відповідно до матеріального балансу, наведеного в таблиці 5.1.

Об'єм метантенку:

$$V_p = \frac{V_{\text{доб}} \cdot 100}{D_{\text{зав}}} = \frac{155,4 \cdot 100}{10} = 1544 \text{ м}^3$$

Значення параметру $D_{\text{зав}}$ (доза завантаження сировини за добу) приймається рівним 10%. Отже, загальний об'єм метантенка становить 1544 м³, тому обираємо два метантенки ФЕРП 09-02-061-01 об'ємами $V_{\phi}=1000 \text{ м}^3$, внаслідок чого маємо коефіцієнт заповнення 0,7. Обирається пропелерна мішалка для перемішування субстрату. Внутрішній діаметр $D=12,5 \text{ м}$. Висота верхнього конуса $H_{\text{вк}}=1,9 \text{ м}$, нижнього конуса $H_{\text{вк}}=2,15 \text{ м}$, висота циліндричної частини $H_{\text{ц}}=6,5 \text{ м}$, об'єм нижнього конусу $V_{\text{нк}}=2,15 \text{ м}^3$.

Фактична доза навантаження:

$$D_{\phi} = \frac{V_p \cdot D}{V_{\phi} \cdot n} = \frac{1544 \cdot 10}{1000 \cdot 2} = 7.72\%$$

Відповідно основні співвідношення для реактора з пропелерною мішалкою:

| Вид мішалки: пропелерна | Основні співвідношення |
|-------------------------|---|
| | $D/d_M=3/4;$ $h/d_M=0,4/1;$ $b/d_M=0,4/1;$ $\xi_M = 0,56.$ |

| | | | | |
|--|------|----------------|---------------|------|
| <i>ДП ББ11.19.000 ПЗ</i> | | | | |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |
| Розроб. | | Поденежка Ю.В. | | |
| Перевір. | | Козар М.Ю. | | |
| Н. Контр. | | | | |
| Затверд. | | | | |
| ПІДБІР ТА ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТАНТЕНКУ | | | Літ. | Арк. |
| | | | | 52 |
| | | | Акрушів 63 | |
| КПІ ім. Ігоря Сікорського ФБТ | | | | |

Нехай $D/d_M=4$, $h/d_M=0,4 \div 1,0$; тоді

Діаметр мішалки:

$$d_M = \frac{D_B}{4} = \frac{12500}{4} = 3125 \text{ мм}$$

Висота днища:

$$h = d_M \cdot (0,4 \div 1,0) = 3125 \cdot (0,4 \div 1,0) = (1250 \div 3125) \text{ мм}$$

Об'єм газгольдера:

Вихід за добу біогазу відповідно до матеріального балансу складає 6705 м^3 /добу. Біогаз зберігається в газгольдері 4,5 год. Тобто обираємо 3 газгольдери об'ємом 600 м^3 . Внутрішній діаметр 11,48 м.

Тепловий розрахунок

Теплота, необхідна для підігрівання субстрату влітку:

$$Q_{\text{під}} = m_{90\%} \cdot C_c (t_{\text{пр}} - t_{\text{зем1}}) \frac{1}{\eta} = 157500 \cdot 4,07 \cdot 10^{-3} (308 - 298) \frac{1}{0,7} \\ = 9,16 \text{ МДж}$$

Де $C_c=4,07 \cdot 10^{-3} \text{ МДж/кг} \cdot \text{К}$ – середня теплоємність субстрату [22];

$t_{\text{пр}}=308 \text{ К}$ (35°C) – температура ферментації;

$t_{\text{заг}}=298 \text{ К}$ (25°C) – температура землі влітку та взимку;

$\eta=0,7$ – ККД.

Теплота, що втрачається через стінку метантенку:

$$Q_{\text{суб1}} = k \cdot F \cdot (t_{\text{пр}} - t) = 1 \cdot 424,8 \cdot (308 - 289) = 8,07 \text{ кВт/год}$$

$$Q_{\text{суб2}} = k \cdot F \cdot (t_{\text{пр}} - t) = 1 \cdot 424,8 \cdot (308 - 276) = 13,6 \text{ кВт/год}$$

$$Q_{\text{суб}} = (Q_{\text{суб1}} + Q_{\text{суб2}}) / 2 = (8,07 + 13,6) / 2 = 10,835 \text{ кВт/год}$$

Де $k=1 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ – коефіцієнт тепловіддачі;

$t=289$ і 276 К – температура землі;

$$F = \pi \cdot 2R \cdot H_{\text{ц}} + \pi \cdot 2 \cdot \sqrt{(R^2 + H_{\text{ц}}^2)} + \pi \cdot R \cdot \sqrt{(R^2 + H_{\text{в}}^2)} = 3,14 \cdot 2 \cdot 6,25 \cdot 6,5 + \\ 3,14 \cdot 2 \cdot \sqrt{(6,25^2 + 2,15^2)} + 3,14 \cdot 6,25 \cdot \sqrt{(6,25^2 + 1,9^2)} = 424,8 \text{ м}^2$$

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
| | | | | | <i>ДП ББ11.19.000 ПЗ</i> | Арк. |
| | | | | | | 53 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

Де $R=6,25$ м – радіус метантенка

Кількість теплоти, що втрачається на нагрівання метантенку відрізняється влітку та взимку, оскільки верхня частина метантенка знаходиться над землею, а нижня – під землею на глибині до 10 м. Для розрахунку приймаємо усереднене значення температури на глибині 1,6 м: $t_{зем} = 16^{\circ}\text{C}$ (влітку) і $t_{зем} = 3^{\circ}\text{C}$ (взимку).

Загальна витрата енергії на добу:

$$Q_{заг} = Q_{під} + Q_{суб} + Q_{мех} = 9,16 + 10,835 + 144 = 164 \text{ МДж}$$

Де $Q_{мех}=144$ МДж – витрати енергії на роботу перемішуючого пристрою.

Кількість отриманої енергії біогазу на добу:

$$Q_6 = V_6 + C_6 = 6705 \cdot 1,2 \cdot 22 = 177012 \text{ МДж}$$

$$\text{Де } V_6 = m_6 \cdot \rho_6 = 6705 \text{ кг} \cdot 1,2 \text{ кг/м}^3 = 8046 \text{ м}^3;$$

$C_6=22$ МДж/м³ – теплотворна здатність біогазу.

Енергетичний ефект

$$E_6 = Q_6 - Q_{заг} = 177012 - 164 = 176848 \text{ МДж}$$

Отже, згідно проведених обчислень, обираємо 2 метантенки ФЕРП 09-02- 061-01 з наступними характеристиками:

- $V_{\phi}=1000$ м³
- коефіцієнт заповнення 0,7
- пропелерна мішалка
- внутрішній діаметр $D=12,5$ м
- висота верхнього конуса $H_{вк}=1,9$ м
- висота нижнього конуса $H_{нк}=2,15$ м
- висота циліндричної частини $H_{ц}=6,5$ м
- об'єм нижнього конусу $V_{нк}=2,15$ м³

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
| | | | | | <i>ДП ББ11.19.000 ПЗ</i> | Арк. |
| | | | | | | 54 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ОХОРОНА ДОВКІЛЛЯ

5.1 Охорона праці

Організація охорони праці у виробництві біометану є невід'ємною складовою системи безпечного функціонування технологічного комплексу. Біогазова установка, що базується на анаеробному зброджуванні органічної сировини, належить до об'єктів підвищеної небезпеки через наявність вибухонебезпечних газів, токсичних компонентів, високих температур, тиску та мікробіологічної активності. Ефективне впровадження заходів з охорони праці забезпечує не лише збереження здоров'я персоналу, а й стабільність технологічного процесу. На біогазовій установці наявні такі небезпечні фактори, як метан (CH_4) і сірководень (H_2S), які є вибухонебезпечними і токсичними, високі температури у метантенку, обертові частини насосів, наявність лугів, кислот, а також мікробіологічні ризики, що пов'язані з біомасою. Також враховуються шкідливі умови праці, серед яких – підвищена вологість, біоаерозолі та шумове навантаження. Для запобігання небезпекам встановлюється система припливно-витяжної вентиляції з кратністю повітрообміну не менше 6 на годину. Окрім того, використовуються газоаналізатори, що постійно моніторять концентрації вибухонебезпечних газів, і у випадку їх перевищення активують системи безпеки та тривоги. Засоби індивідуального захисту є обов'язковими для всього персоналу і включають респіратори, захисні окуляри, спеціальний одяг, рукавички, протишумові навушники та діелектричне взуття. Усі працівники проходять попередні та періодичні інструктажі, медичні огляди та навчання діям у надзвичайних ситуаціях. [25]

| | | | | | | | |
|------------------|-------------|-----------------------|---------------|-------------|---------------------------------------|-------------|----------------|
| | | | | | <i>ДП ББ11.19.000 ПЗ</i> | | |
| <i>Змн.</i> | <i>Арк.</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> | | | |
| <i>Розроб.</i> | | <i>Поденежка Ю.В.</i> | | | <i>Літ.</i> | <i>Арк.</i> | <i>Акрушів</i> |
| <i>Перевір.</i> | | <i>Козар М.Ю.</i> | | | | 55 | 63 |
| <i>Н. Контр.</i> | | | | | <i>ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА</i> | | |
| <i>Затверд.</i> | | | | | | | |
| | | | | | <i>КПІ ім. Ізгоря Сікарського ФБТ</i> | | |

системи, що не допускають потрапляння токсичних речовин у навколишнє середовище. [27]

Очищена вода після промивання фільтрів проходить етапи біологічної та хімічної нейтралізації. Крім того, дигестат, що утворюється як залишковий продукт ферментації, не утилізується як відхід, а використовується як добриво. Завдяки низькому вмісту патогенів і стабільній структурі він повністю відповідає санітарним вимогам і не несе загрози ґрунтовим чи поверхневим водам. Для недопущення витоку стічних рідин та запобігання забрудненню підземних вод передбачено бетоновані або пластикові резервуари з ізоляцією, а також системи перехоплення фільтрату. Усі джерела викидів контролюються відповідно до нормативів, а персонал проходить екологічний інструктаж. Таким чином, реалізація даної технології забезпечує не лише енергетичну ефективність, а й високий рівень екологічної безпеки, що відповідає принципам сталого розвитку та збереження природного середовища для майбутніх поколінь. [28]

| | | | | | | |
|-------------|-------------|-----------------|---------------|-------------|--------------------------|------|
| | | | | | <i>ДП ББ11.19.000 ПЗ</i> | Арк. |
| | | | | | | 57 |
| <i>Змн.</i> | <i>Арк.</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> | | |

ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз сировини та допоміжних матеріалів. Розглянуто біологічні агенти, зокрема специфіку функціонування гідролітичних, ацетогенних і метаногенних мікроорганізмів, які здійснюють анаеробну переробку коров'ячого гною.
2. Ферментація відбувається в анаеробних умовах у метантенках протягом 15 діб за нейтрального рівня рН та у межах мезофільного температурного діапазону, що відповідає фізіологічним вимогам метаногенних архей.
3. Для реалізації проєкту обрано два метантенки типу ФЕРп 09-02-061-01 об'ємом по 1000 м³ кожен (при робочому коефіцієнті заповнення 0,7), а також газгольдер місткістю 600 м³. Запланований добовий обсяг виробництва біогазу становить 8046 м³.
4. Розглянуто комплекс організаційно-технічних заходів, спрямованих на забезпечення безпечних умов праці, охорону здоров'я персоналу та мінімізацію впливу виробництва на довкілля при експлуатації біометанових установок, що функціонують на основі переробки гною ВРХ.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
| | | | | | <i>ДП ББ11.19.000 ПЗ</i> | Арк. |
| | | | | | | 58 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. De Vries J. W., Groenestein C. M., De Boer I. J. M. Environmental consequences of processing manure to produce mineral fertilizer and bio-energy. *Journal of Environmental Management*, 2012, Vol. 102, pp. 173–183.
2. Названо ТОП-6 виробників біогазу в Україні. Agravery. Електронний ресурс. URL: <https://agravery.com/uk/posts/show/nazvano-top-6-virobnikiv-biogazu-vukraini>
3. Гелетуха Г. Г., Кучерук П. П., Матвєєв Ю. Б., Куций Д. В., Гелетуха А. І. Перспективи виробництва і використання біогазу в Україні. *Журнал НАН України “Промислова теплотехніка”*. 2013, т. 35, № 6
4. Berglund M., Börjesson P. Assessment of energy performance in the life-cycle of biogas production. *Biomass and Bioenergy*, 2006, Vol. 30(3), pp. 254–266.
5. Баадер В. Біогаз теория и практика. Колос. М. 1982. 148 с.
6. Щурська К. О, Кузьмінський Є. В. Біоенергетика: підручник для студ. спеціальності 162 «Біотехнології та біоінженерія» Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 304 с.
7. Lebuhn, M.; Bauer, C.; Gronauer, A.: Probleme der Biogasproduktion aus nachwachsenden Rohstoffen im Langzeitbetrieb und molekularbiologische Analytik. *VDLUFA-Schriftenreihe* 64, 2008, S. 118–125
8. Wilkinson, J. M., Rinne, M. Highlights of silage research in Finland and the UK. *Grass and Forage Science*, 2018. – Vol. 73(1). – P. 40–51.
9. Ghosh, P. K., Ramesh, P., Bandyopadhyay, K. K., et al. Cover cropping and green manuring in sustainable agriculture. In: *Soil Management and Climate Change* (1st ed.), Academic Press, 2020. – С. 201–224.
10. Виробництво і використання біогазу в Україні. Рада з питань біогазу з.т. Biogasrat e.V. 2012. 74 с

| | | | | | | | |
|------------------|-------------|-----------------------|---------------|-------------|--------------------------------------|-------------|----------------|
| | | | | | <i>ДП ББ11.19.000 ПЗ</i> | | |
| <i>Змн.</i> | <i>Арк.</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> | | | |
| <i>Розроб.</i> | | <i>Поденежко Ю.В.</i> | | | <i>Літ.</i> | <i>Арк.</i> | <i>Акрушіє</i> |
| <i>Перевір.</i> | | <i>Козар М.Ю.</i> | | | 59 | 63 | |
| <i>Н. Контр.</i> | | | | | <i>КПІ ім. Ігоря Сікорського ФБТ</i> | | |
| <i>Затверд.</i> | | | | | | | |

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

11. Козловець О. А. Біотехнологія одержання біогазу при коферментації посліду птахів. Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук . 2018. 24 с.
12. Лановенко О. Г., Остапішина О. О. Метантенк. Словник-довідник з екології : навч.-метод. посіб. Херсон : ПП Вишемирський В. С., 2013. С. 122.
13. Інформаційний звіт Про результати виконання досліджень, що фінансуються за рахунок коштів державного бюджету, за перше півріччя 2015 року. Інститут Сільського Господарства Карпатського Регіону НААН. 2015 р.
14. Handbook of Hydrocarbon and Lipid Microbiology / Sieber J.R. and other. Berlin: Springer, 2010. 270 p
15. Дубровін В. О. Біогаз : навч.-метод. посібник. Київ: ЮНІДО, 2015. 47 с.
16. Поводзинський В.М. Основи проектування: Конспект лекцій для студ. спец. 6.092900 “Промислова біотехнологія” та 6.092902 “Біотехнологія біологічно активних речовин”, напряму 0929 “Біотехнологія” ден. форми навч. – К.: НУХТ, 2005. – 90 с.
17. Орябінська Л. Б. Загальна мікробіологія та вірусологія: Конспект лекцій для студ. спец. 6.092900 “Промислова біотехнологія”, напряму 0929 “Біотехнологія” ден. форми навч. – К.: КПІ, 2021.
18. 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
19. Уминський С. Технології одержання біогазу і органічних добрив в агровиробництві. Аграрний вісник Причорномор'я. Технічні науки. 2013. №67. С. 167–176
20. Кузнецов А.Е., Градова Н.Б., Лушников С.В. и др. Прикладная экобиотехнология. Учебное пособие. 2012. 629 с.
21. Юрченко Е. В. Технологія виробництва біоспорину у флаконах. Дільниця сушіння продукту : автореф. дипломна робота: 162. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського». Київ. 2020. 137 с.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
| | | | | | <i>ДП ББ11.19.000 ПЗ</i> | Арк. |
| | | | | | | 60 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

- 22.Скροцька О. І., Старовойтова С. О., Пенчук Ю. М., Гавриш Я. В. Використання рекомбінантних мікроорганізмів для створення сучасних пробіотичних препаратів. Національний університет харчових технологій. 2012. 10 с.
- 23.Поводзинський В.М. Основи проектування: Конспект лекцій для студ. спец. 6.092900 “Промислова біотехнологія” та 6.092902 “Біотехнологія біологічно активних речовин”, напряму 0929 “Біотехнологія” ден. форми навч. Київ: НУХТ, 2005. 90 с.
- 24.Семент, А. П. Виробництво біогазу з відходів життєдіяльності ВРХ та міскантусу як косубстрату : дипломний проєкт ... бакалавра : 162 Біотехнології та біоінженерія / Семент Анастасія Павлівна. Київ, 2020. 73 с.
- 25.Буткова, П. В. Технологія виробництва біогазу з відходів свиноферми : дипломний проєкт бакалавра : 162 Біотехнології та біоінженерія. Київ, 2021. 54 с.
- 26.Бахарєва Г.Ю. Небезпека газоподібних викидів метану як беззаперечний фактор для створення технологій для боротьби із цими викидами. Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». Харків. 2015.
- 27.Семененко И. В. Проектирование биогазовых установок. Сумы: ПФ «МакДен», ИПП «Мрия-1» ЛТД, 1996. – 347 с.
- 28.Kaiser, A. G., Piltz, J. W., Burns, H. M., Griffiths, N. W. Successful silage. New South Wales Department of Primary Industries, 2022. – 5th edition. – 152 с.
- 29.ДИРЕКТИВА ЄВРОПЕЙСЬКОГО ПАРЛАМЕНТУ І РАДИ (ЄС) 2018/2001 : ДИРЕКТИВА від 11.12.2018.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
| | | | | | <i>ДП ББ11.19.000 ПЗ</i> | Арк. |
| | | | | | | 61 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |