

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Факультет біотехнології і біотехніки
Кафедра біоенергетики, біоінформатики та екобіотехнології

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

Наталія ГОЛУБ

(підпис)

« 2 » червня 2026 р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою «Біотехнології»

спеціальності 162 «Біотехнології та біоінженерія»

на тему: «Отримання біогазу з низьким вмістом сірководню з відходів
м'ясопереробки»

Виконала:

студентка IV курсу, групи ББ-21

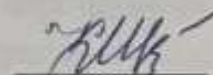
Неділько Олександра Василівна



Керівник:

Доцент, к.т.н, доцент

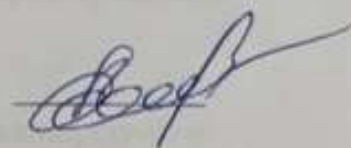
Щурська Катерина Олександрівна



Консультант з проєктування:

Професор, д.т.н, професор

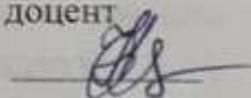
Саблій Лариса Андріївна



Рецензент:

Доцент кафедри промислової біотехнології та біофармації, к.т.н., доцент

Клечак Інна Рішардівна



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

Студентка



Київ – 2026 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут 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)

(ім'я, прізвище)

«14» травня 2026р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

Неділько Олександрі Василівні

1. Тема проєкту «Отримання біогазу з низьким вмістом сірководню з відходів м'ясопереробки»

керівник проєкту к.т.н, доцент Щурська Катерина Олександрівна,

затверджені наказом по університету від «14» травня 2026 р. № 194/с

2. Термін подання студентом проєкту 02.06.2026

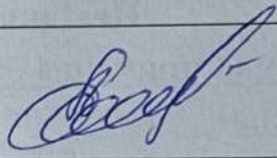
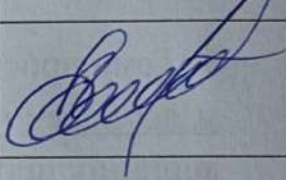
3. Вихідні дані до проєкту: птахофабрика, що спеціалізується на вирощуванні бройлерних порід курей обсягом 250 000 голів; компоненти субстрату – послід курей, флотаційний шлам очисних споруд стічних вод підприємства, відходи забійного цеху та солома пшениці; проточний метод зброджування, мезофільний режим при температурі $38 \pm 2^\circ\text{C}$.

4. Зміст пояснювальної записки: характеристика відходів м'ясопереробки, основних технологій анаеробного зброджування, знесірчення біогазу та обґрунтування обраної технології отримання біогазу з низьким вмістом сірководню; опис біологічного агенту процесу анаеробного зброджування та процесу знесірчення в крапельному біофільтрі; опис біохімічних процесів метаногенезу та утворення сірководню, окиснення сірководню в крапельному біофільтрі; матеріальний баланс технології; опис технологічного процесу отримання біогазу з відходів м'ясопереробки; розрахунок кількості субстрату, метантенків, доброджувачів та основних конструктивних параметрів

біофільтра; охорону праці та довкілля під час роботи на біогазових комплексах; висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо): технологічна схема отримання біогазу з низьким вмістом сірководню з відходів м'ясопереробки (A1), апаратурна схема отримання біогазу з низьким вмістом сірководню з відходів м'ясопереробки (A1), креслення загального вигляду крапельного біофільтра для знесірчення біогазу (A1).

6. Консультанти розділів проекту:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Графічна частина дипломного проекту (проекткування)	Д.т.н., професор Саблій Л.А.		

7. Дата видачі завдання: 14.04.2026

Календарний план

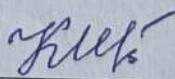
№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Вступ	17.04.2026	Виконано
2	Розділ 1	24.04.2026	Виконано
3	Розділ 2	01.05.2026	Виконано
4	Розділ 3	08.05.2026	Виконано
5	Розділ 4	15.05.2026	Виконано
6	Розділ 5	19.05.2026	Виконано
7	Виконання графічної частини проекту	29.05.2026	Виконано
8	Висновки	01.06.2026	Виконано

Студент


(підпис)

Олександра НЕДІЛЬКО

Керівник проекту


(підпис)

Катерина ЩУРСЬКА

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 109 с., 10 рис., 10 табл., 116 посилань.

В дипломному проєкті обрано технологію отримання біогазу з низьким вмістом сірководню з відходів м'ясопереробки. Як сировину для анаеробного зброджування використано послід курей, відходи забійного цеху, флотаційний шлам споруд очистки стічних вод підприємства та соломку пшениці як ко-субстрат. Технологія отримання біогазу передбачає допоміжні роботи з підготовки повітря, пари та сировини, технологічний процес метаногенезу в метантенках та доброджувачах, знесірчення біогазу в крапельних біофільтрах, осушення в чиллерах та спалювання в когенераційних установках. Окрему частину становить комплексна переробка дигестату з отримання гранул, рідкого концентрату та розчину сульфату амонію. Охарактеризовано основні біохімічні процеси та біологічних агентів анаеробного зброджування та знесірчення біогазу. Розроблено відповідну технологічну та апаратурну схеми, виконано їх креслення. Розраховано та спроектовано крапельний біофільтр для біологічного знесірчення, виконано його креслення.

БІОГАЗ, ВІДХОДИ М'ЯСОПЕРЕРОБКИ, СІРКОВОДЕНЬ,
АНАЕРОБНЕ ЗБРОДЖУВАННЯ, ДИГЕСТАТ, ЗНЕСІРЧЕННЯ,
КРАПЕЛЬНИЙ БІОФІЛЬТР

ABSTRACT

Explanatory note: 109 p., 10 fig., 10 tables, 116 references.

This thesis project focuses on a technology for producing low-hydrogen-sulfide biogas from meat processing waste. The raw materials used for anaerobic digestion include chicken manure, slaughterhouse waste, flotation sludge from the wastewater treatment facilities and wheat straw as a co-substrate. The biogas production technology involves auxiliary operations for the preparation of air, steam, and raw materials; the methanogenesis process in digesters and postdigesters, biogas desulfurization in trickle biofilters, drying in chillers and combustion in cogeneration units. A separate component involves the comprehensive processing of digestate to produce pellets, liquid concentrate and ammonium sulfate solution. The main biochemical processes and biological agents involved in anaerobic digestion and biogas desulfurization are characterized. Corresponding process and equipment flow diagrams have been developed, and their drawings have been prepared. A trickle biofilter for biological desulfurization has been calculated and designed, and its drawings have been prepared.

BIOGAS, MEAT PROCESSING WASTE, HYDROGEN SULFIDE,
ANAEROBIC DIGESTION, ANAEROBIC DIGESTATE, DESULFURIZATION,
TRICKLE BIOFILTER

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

БГУ – біогазова установка

ВРХ – велика рогата худоба

ЕПМ – екзополісахаридна матриця

Ррm – з англ. «parts per million», мільйонна частка

КГУ – когенераційна установка

ЛОС – леткі органічні сполуки

НТД – науково-технічна документація

СОР – суха органічна речовина

ЗМІСТ

ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1. ХАРАКТЕРИСТИКА СИРОВИНИ, БІОЛОГІЧНОГО АГЕНТА. ОБГРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ	12
1.1. Характеристика сировини	12
1.1.1. Основні характеристики сировини, що використовується для отримання біогазу.....	13
1.1.2. Характеристика відходів м'ясопереробки.....	15
1.2. Обґрунтування вибору технології.....	20
1.2.1. Огляд основних технологій отримання біогазу.....	20
1.2.2. Технології очищення біогазу від сірководню	28
1.2.3 Обґрунтування обраної технології отримання біогазу	32
1.3. Характеристика біологічного агента	38
1.3.1 Характеристика асоціації мікроорганізмів, що беруть участь в процесі анаеробного зброджування.....	38
1.3.2. Характеристика асоціації мікроорганізмів, що беруть участь в очищенні біогазу від сірководню у крапельному біофільтрі	39
РОЗДІЛ 2. БІОХІМІЧНІ ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ	44
2.1. Схема перебігу процесів	44
2.1.1. Схема біохімічних перетворень процесу утворення метану та сірководню в процесі анаеробного зброджування	44
2.1.2. Схема біохімічних перетворень процесу окиснення сірководню в краплинному біофільтрі	47
2.2. Характеристика кінцевого продукту.....	48
РОЗДІЛ 3. ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА	52
3.1. Матеріали основні і допоміжні	52
3.2. Контроль виробництва	54

					ДП ББ21.11.000 ПЗ		
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розробив	Неділько О.В.				Зміст	Літ.	Аркш
Перевірив	Щурська К.О.						7
Т. Контр.						КПІ ім. Ізгоря Сікорського, ФБТ	
Н. Контр.							
Затверд.	Щурська К.О.						

3.3.	Матеріальний баланс.....	58
3.4.	Опис технологічного процесу	60
РОЗДІЛ 4. ПІДБІР ТА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЛАДНАННЯ.....		71
4.1.	Розрахунок обсягів утвореної сировини	71
4.2.	Розрахунок виходу біогазу та необхідної кількості метантенків, доброжувачів	75
4.3.	Розрахунок крапельного біофільтра	77
РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ОХОРОНА ДОВКІЛЛЯ		81
ВИСНОВКИ.....		84
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ		87
ДОДАТОК А		103

ВСТУП

На теперішній день Україна є одним з лідерів серед країн Європи у виготовленні м'яса птиці та яєць, де провідними є такі українські агрохолдинги, як «Миронівський хлібопродукт (МХП)» (із загальною потужністю в 432 пташники на 24 млн голів курей станом на 2024 рік [1]) та AVANGARDCO IPL [2] із поголів'ям курей-несучок обсягом в 11,2 млн [3]. Вирощування тварин, переробка м'яса та виготовлення м'ясних продуктів на всіх етапах виробничого циклу зумовлює утворення та накопичення значної кількості відходів тваринного походження, які є різноманітними за складом та характеристиками. Нераціональне поводження з такими відходами може спричинити поширення інфекційних захворювань та патогенних організмів, забруднення поверхневих та підземних вод, зменшення родючості ґрунтів через неконтрольоване внесення гною, а також викиди парникових газів в атмосферу (метан, вуглекислий газ, сірководень, оксиди азоту, амоній та ін.) [4].

Згідно з законодавством України одним зі способів переробки відходів тваринного походження є технологія їхнього анаеробного зброджування для отримання біогазу, що є цінним джерелом електричної та теплової енергії. Крім цього, в результаті переробки утворюється зброджений залишок – дигестат, що є багатим на поживні речовини та мікроелементи та може бути використаний як безпечне добриво для сільськогосподарських угідь. Дана технологія дозволяє створити замкнений цикл виробництва з утворенням цінних побічних продуктів, дотримуючись цілей сталого розвитку та концепції циркулярної економіки [5]. Важливим також є зменшення негативного впливу на навколишнє середовище, зокрема факторів наведених вище.

					ДП ББ21.11.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив	Неділько О.В.				ВСТУП	Літ.	Аркш	Архивш
Перевірив	Щурська К.О.						9	109
Т. Кантр.						КПІ ім. Ізгоря Сікорського, ФБТ		
Н. Кантр.								
Затверд.	Щурська К.О.							

Біогаз складається переважно з метану, вуглекислого газу та інших залишкових сполук, таких як сірководень, водяна пара та інші. Технологія виробництва біогазу передбачає його очищення від даних баластних речовин перед безпосереднім спалюванням для отримання теплової та електричної енергії. Сірководень та інші сполуки сірки є одними з найнебезпечніших речовин присутніх в біогазі, що можуть спричиняти серйозний негативний вплив на здоров'я і життя людини та навколишнє середовище, а також зумовлювати пошкодження двигуна та комплектуючих когенераційних установок. Навіть невеликі концентрації сірководню, зокрема декілька відсотків, можуть спричинити серйозні наслідки. Для біогазу вміст сірководню може сягати від 1 до 5,7 % (1000-57000 ppm) [6].

Сучасні методи очищення від сірководню передбачають використання вугільних фільтрів або ж інших хімічних способів очистки, що потребують дорогих реагентів та обладнання. Крім цього, в більшості з цих методів не передбачено регенерацію витратних матеріалів після закінчення терміну їхньої експлуатації, що зумовлює накопичення додаткової кількості відходів та суттєво підвищує вартість обслуговування біогазового комплексу. Альтернативою даним способам є технологія біологічного знесірчення біогазу з використанням крапельних біофільтрів, які дозволяють очистити біогаз від сірководню з високою ефективністю та характеризуються низькими витратами на обладнання і подальшу експлуатацію. Крім цього, важливим є майже повна відсутність утворення відходів та побічних продуктів, а також отримання сірковмісного добрива.

Отже, враховуючи наведені вище фактори, актуальним на сьогоднішній день є розробка та впровадження технології біологічного знесірчення біогазу, отриманого з відходів м'ясопереробки з використанням крапельних біофільтрів.

Метою даного дипломного проєкту є вибір та обґрунтування технології отримання біогазу з низьким вмістом сірководню з відходів м'ясопереробки.

					ДП ББ21 11.000 ПЗ	Адк.
						10
Зм.	Адк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Відповідно до мети було поставлено такі завдання:

1. Проаналізувати особливості утворення та провести аналіз складу відходів м'ясопереробних підприємств.
2. Провести аналіз технологій отримання біогазу та основних методів його знесірчення.
3. Обрати та обґрунтувати технологію отримання біогазу з відходів м'ясопереробки з використанням біологічного знесірчення за допомогою крапельних біофільтрів.
4. Охарактеризувати основні біохімічні процеси утворення біогазу та біологічного знесірчення, а також основних біологічних агентів, що беруть в них участь.
5. Охарактеризувати основні вимоги та правила щодо охорони праці та довкілля при роботі біогазового комплексу.
6. Розробити технологічну та апаратурну схему отримання біогазу з відходів м'ясопереробки з використання біологічного знесірчення.
7. Виконати розрахунок основних параметрів крапельного біофільтра та розробити його креслення.

					ДП ББ21 11.000 ПЗ	Адк.
						11
Зм.	Адк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1. ХАРАКТЕРИСТИКА СИРОВИНИ, БІОЛОГІЧНОГО АГЕНТА. ОБГРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ

1.1. Характеристика сировини

Згідно із законом України «Про альтернативні види палива», біогаз – це газ, що отриманий з біомаси та використовується як паливо. Відповідно до цього ж закону, біомаса – це невикопна біологічно відновлювана речовина органічного походження, здатна до біорозкладу, у вигляді продуктів, відходів та залишків лісового, сільського та рибного господарства і пов’язаних з ними галузей промисловості, а також складова промислових або побутових відходів [7].

Відповідно до визначення Європейської біогазової асоціації біогаз – це відновлюваний газ, отриманий в результаті анаеробного зброджування органічної речовини, такої як сільськогосподарські рештки, послід та гній тварин, харчові відходи, осади стічних вод та інші відходи, що підлягають біологічному розкладанню [8]. Отже, загалом біогаз – це газ, що отриманий в результаті анаеробного зброджування біомаси та використовується як паливо.

Як було сказано вище, значний вплив на вихід та склад біогазу, а також на присутність в ньому тих чи інших залишкових сполук, відіграє тип сировини, що використовується для його отримання. Сировина, що використовується для анаеробного зброджування з метою отримання біогазу, охоплює широкий спектр органічних субстратів, що класифікуються в залежності від походження, складу та вмісту сухих речовин та мають свої особливості та характеристики.

					ДП ББ21.11.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Характеристика сировини, біологічного агента. Обґрунтування технології	Літ.	Аркцш	Аркцшів
Розробив	Неділько О.В.						12	109
Перевірив	Щурська К.О.					КПІ ім. Ігоря Сікорського, ФБТ		
Т. Контр.								
Н. Контр.								
Затверд.	Щурська К.О.							

1.1.1. Основні характеристики сировини, що використовується для отримання біогазу

До основних характеристик, що суттєво впливають на технологію та процес зброджування, можна віднести співвідношення C:N, вмісту сухих та сухих органічних речовин, а також потенціал виходу біогазу з одиниці такого субстрату. Крім цього, важливим є доступність такої сировини та необхідність її транспортування, що суттєво впливає на економічну складову та рентабельність впровадження такої технології [9].

Оптимальним для анаеробного зброджування вважається співвідношення C:N в межах 20-30. Так, карбон є основним джерелом енергії для мікроорганізмів, синтезу їх ключових метаболітів та утворення метану під час зброджування, а нітроген важливий для метаболізму та росту даних мікроорганізмів, так як входить до складу білків та інших сполук. Відповідно, якщо співвідношення між карбоном та нітрогеном є високим, виникає дефіцит азоту, що спричиняє гальмування метаболізму клітин та зупинку процесу бродіння. Якщо співвідношення є, навпаки, низьким, надлишок азоту може спричинити накопичення амонійного азоту в реакторі [10, 11]. Це в свою чергу може призвести до пригнічення метаногенезу в зв'язку зі зміною рівня pH, інгібування ацетокластичних метаногенів, накопичення коротколанцюгових жирних кислот (пропіонова, масляна та оцтова кислоти), зміни чисельності мікроорганізмів та морфології їх клітин [12].

Також, важливими є вміст сухих та сухих органічних речовин, що визначає потенційний вихід біогазу з одиниці певної сировини та впливає на подальший вибір і розрахунок технології зброджування. Суха речовина визначається шляхом висушування субстрату до постійної маси при температурі 105°C та показує масу речовини вільну від вологи. Суха органічна речовина показує масу речовини вільну від вологи та неорганічного залишку, визначається висушуванням при 105°C з подальшим озоленням при температурі 600°C та є основним джерелом утворення біогазу [13, 14].

					ДП ББ21 11.000 ПЗ	Адк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

Потенціал виходу біогазу та біометану дозволяє визначити їх вихід з одиниці певного субстрату. Важливим для проєктування біогазових комплексів є не лише потенційний вихід біогазу, а й вихід біометану, оскільки він становить переважну енергетичну цінність отриманого в результаті біогазу. Дані показники отримують теоретично або ж експериментально. Теоретичний розрахунок можна провести знаючи хімічний склад сировини за стехіометричною формулою Басвелла та Хетфілда або ж за формулою Бойля, якщо відомо елементний склад. Проте, дані результати можуть бути неточними, оскільки розпад біомаси не є повним, як вважається при розрахунках [15].

Вихід біогазу та біометану також можна оцінити практично за допомогою лабораторного аналізу для визначення біохімічного потенціалу метану – максимального об'єму біометану, який утворюється з граму сухої органічної речовини та дає можливість спрогнозувати потенціал виходу біометану з одиниці певної сировини [16].

На потенціал виходу біогазу та вмісту в ньому метану суттєво впливає вміст білків, ліпідів та вуглеводів. Так, максимальний теоретичний вихід біометану з кожного компоненту наведено в таблиці 1.1.1.1 нижче. Бачимо, що найвищий вихід біометану можна отримати з відходів з високим вмістом ліпідів та білка. Проте, занадто високий вміст даних компонентів може спричинити інгібування процесу зброджування через накопичення довголанцюгових жирних кислот та аміаку і сполук амонію, що утворюються в результаті їх розпаду [9].

Таблиця 1.1.1.1. Максимальний теоретичний вихід біометану [9]

Компонент	Вихід метану, м ³ /кг СОР
Білки	0,5
Ліпіди	1,01
Вуглеводи	0,42

Отже, при виборі сировини та розробці технології зброджування важливими є врахування кожної з описаних вище характеристик, оскільки це напряду впливає на ефективність процесу та якість отриманого продукту.

1.1.2. Характеристика відходів м'ясопереробки

До відходів харчових виробництв входять відходи м'ясопереробних підприємств. М'ясопереробна промисловість займається забоєм худоби з метою отримання первинної продукції (така як туші, обрізки та ін.) та певного переліку інших цінних побічних продуктів. В результаті перевезення та утримання худоби до забою, а також під час виробничих процесів утворюється значна кількість відходів, що не призначені для харчових цілей. Крім цього, до відходів м'ясопереробки можна віднести екскременти та інші побічні продукти життєдіяльності тварин. При цьому, отримана в результаті забою тварин маса побічних продуктів часто перевищує 50% живої ваги тварин [17].

Згідно із законом України «Про поводження з побічними продуктами тваринного походження» їх поділяють на 3 категорії залежно від ступеня ризику для здоров'я людини чи тварин. В залежності від категорії, до якої входять певні тип відходів, здійснюється їх подальша переробка чи утилізація.

Так, до I категорії відносять відходи з найвищим ступенем ризику зараження хворобами, що передаються людині чи іншим тваринам, зокрема трансмісивна губчаста енцефалопатія. До II категорії відносять відходи, що можуть бути потенційно заражені інфекційними хворобами. До обох категорій відносять відходи, що місять перевищення щодо допустимих норм вмісту забруднюючих речовин чи ветеринарних препаратів, визначені переліком даного закону, а також залишки, отримані в результаті очищення стічних вод підприємств, що працюють з даним типом відходів.

До III категорії можна віднести залишки тварин, що не заражені інфекційними хворобами, проте не можуть бути використані для споживання людиною у зв'язку з комерційними цілями, а також залишки, що з певних причин не є придатними для їжі (копита, пір'я, хутро). Відходи II та III категорії

					ДП ББ21 11.000 ПЗ	Адк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

є придатними для отримання біогазу з їх попередньою обробкою, що включає стерилізацію під тиском чи пастеризацію, або ж без неї [18,19].

Початковим етапом м'ясопереробних процесів є забій тварин, що включає знекровлення, потрошіння, миття та розбирання туші. Частина, призначена для харчових та комерційних цілей направляється на подальше виробництво. Інша частина, що не призначена для жодної з цих цілей видаляється як побічні продукти та може включати кістки, кров, обрізки жиру та шкіри, внутрішні органи, нутрощі, роги, копита, пір'я, череп, іноді туші мертвих тварин, молочні продукти, яєчна шкаралупа та інші. Їхній склад залежить переважно від виду худоби, що переробляється [20].

Загалом, тверді відходи, отримані в результаті забою тварин, містять переважно білки та жири. В таблиці нижче наведено типовий склад таких відходів.

Таблиця 1.1.2.1 Типовий склад відходів м'ясопереробки
різного виду худоби [20]

Тип відходів	СОР, %	Білки, %СР	Ліпіди, %СР
Відходи ВРХ			
- Нутрощі	93,2	19,8	57,4
- Флотаційний шлам	81,9	1,9	33,7
- М'які відходи	98,6	26,5	58,1
Свині			
- Кров	16,8	83,1	0,28
- Жир	99,2	0	100
- кістки	41,6	43,8	12,2
Птахи			
- пір'я	80	80	3
- кров	-	95	-
- м'які відходи	78,4-90	43,7-62,7	18,0-28,2

Традиційні методи їх переробки включають захоронення, спалювання, компостування або ж переробку з отриманням цінних матеріалів, таких як кісткове борошно, кормові добавки чи екстраговані жири для використання як сировини в олеохімічній промисловості для виробництва мила, мийних засобів, фармацевтичних препаратів та біодизелю [20].

В даній роботі прийнято використання як субстрату для анаеробного зброджування відходи м'ясопереробки курячих птахофабрик. До таких відходів можна віднести послід курей, що утворюється в результаті вирощування та утримання тварин до забою; обрізки м'яса, жиру, внутрішні органи, кров, що непередбачені для використання в харчових чи технічних цілях; а також флотаційний шлам, утворений в результаті роботи флотаційних установок на очисних спорудах стічних вод підприємства. При цьому споруди очистки функціонують окремо, а для анаеробного зброджування використовуються лише відходи флотаційних установок.

Пташиний послід в залежності від методу утримання тварин може бути підстилковим з вмістом вологи до 50%, нативним з вологістю близько 88% та рідким з вмістом вологи майже 96% [21].

Послід птахів має нижче співвідношення C:N (переважно 5-10), вищий вміст сухих речовин, високий вміст білкових сполук (понад 25-30% від загальної сухої речовини) та сечової кислоти, що призводить до утворення високих концентрацій амонійного азоту під час зброджування [22]. Високий вміст білкових сполук, особливо сірковмісних амінокислот (метіонін, цистеїн), в раціоні курей в результаті спричиняє підвищений вміст сірководню в біогазі [23].

Як було сказано вище, флотаційний шлам утворюється в результаті очищення стічних вод м'ясопереробного підприємства, де здійснюється його збір з флотаційних установок. Він характеризується високим вмістом жирів (тригліцеридів, довголанцюгових жирних кислот з кількістю атомів карбону вище 16), а також нітрогену та фосфору, що утворюються переважно в результаті розпаду білків та фосфоровмісних сполук, присутніх в крові тварин.

					ДП ББ21 11.000 ПЗ	Адк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

Флотаційний шлам має високий потенціал утворення метану з показниками в діапазоні 475-675 дм³ CH₄/кг СОР [24].

До відходів м'ясопереробки також відносяться відходи забійних цехів, а саме обрізки м'яса, шкіри, залишки внутрішніх органів, самі внутрішні органи, кров та ін. Процес утворення таких відходів наведений на рисунку 1.1.2.1.

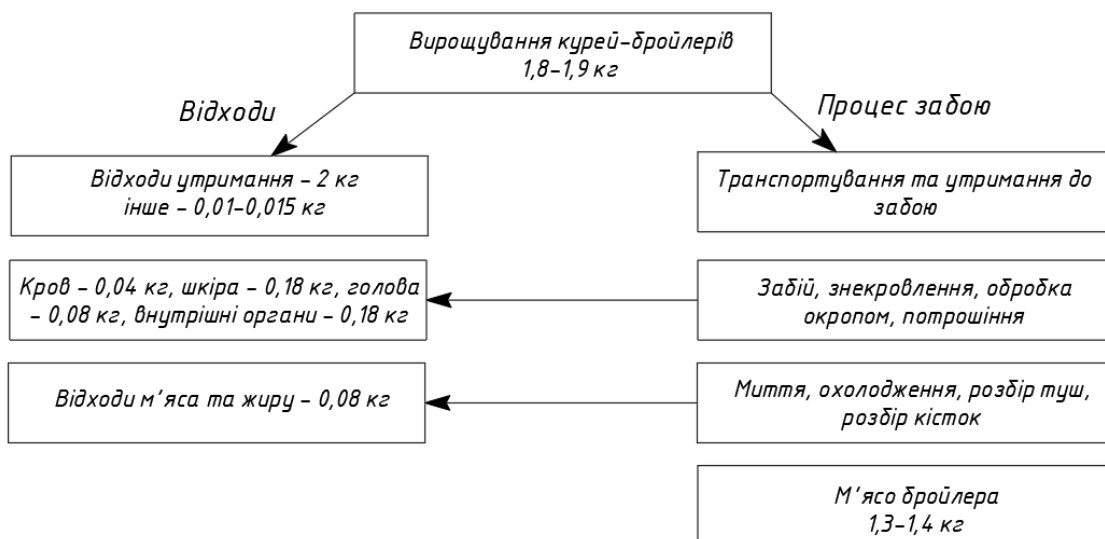


Рисунок 1.1.2.1 Процес утворення відходів забою курей-бройлерів [25]

Співвідношення С:N у відходах бойні та птахівництва коливається від 7 до 10. Крім цього, вони характеризуються високим вмістом білкових сполук та ліпідів, що можуть спричинити інгібування процесу метаногенезу. Зокрема, підвищений вміст ліпідів у субстраті призводить до вищого накопичення летких жирних кислот, хоча і є субстратом з високим потенціалом виходу біогазу. Це пригнічує утворення біогазу шляхом зниження рівня рН в реакторі, що призводить до інгібування метаногенних мікроорганізмів [25]

Оскільки, даний тип відходів характеризується високим вмістом нітрогену та ліпідів, що може спричинити інгібування процесу зброджування, пропонується використання ко-субстрату для стабілізації співвідношення С:N та зменшення негативного впливу високого вмісту азоту та жирів. Переважними ко-субстратами, що використовуються в біогазових технологіях є силос кукурудзи, солома та пожнивні рештки з високим вмістом карбону.

Крім складу таких відходів важливим є економічна доцільність їх використання. А саме доступність, необхідність купівлі та транспортування безпосередньо до біогазового комплексу. Найбільш рентабельним для птахофабрик є використання соломи як побічного продукту землеробства на власних полях, що використовуються для вирощування зерна [26].

Пшенична солома складається переважно з целюлози, геміцелюлози та лігніну, що робить її структуру жорсткою та більш стійкою до розкладання. В зв'язку з цим така сировина потребує попередньої обробки, що може бути здійснена за допомогою хімічних, термічних, механічних чи біологічних методів. Хімічні включають переважно кислотну або лужну обробку, суть яких полягає в гідролізі складної лігноцелюлозної структури соломи шляхом зміни їх структури. При обробці кислотою рН зменшується та сприяє більш ефективному процесу солубілізації лігніну та геміцелюлози. Під час обробки лугом відбувається руйнування зв'язків між лігніном та геміцелюлозою та розширення волокон целюлози, що додатково збільшує пори в щільній структурі соломи. Це покращує процес гідролізу соломи завдяки підвищенню доступності вуглеводів для мікроорганізмів [26].

Термічні методи передбачають обробку парою, часто з підвищеним тиском в системі, що спричиняє механічне руйнування волокон в структурі соломи, чим підвищує її доступність для бактерій. Біологічна обробка полягає у внесенні спеціальних ферментних препаратів на основі грибів чи бактерій, які теж спричиняють частковий гідроліз соломи. Хімічні методи підвищують біометановий потенціал соломи на 43%, термічні на 30% та біологічні на 20% [27].

Механічна обробка полягає в подрібненні соломи на дрібні частинки за допомогою спеціальних приладів. Це збільшує площу поверхні контакту частинок субстрату шляхом зменшення їх розміру. В залежності від способу подрібнення та розміру частинок, що утворюються в результаті, біометановий потенціал соломи підвищується на 16-99,5% за різними дослідженнями. Хоча хімічні, термічні та біологічні методи також характеризуються високою

					ДП ББ21 11.000 ПЗ	Адк.
						19
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ефективністю, використання великої кількості реагентів, потреба у їх видаленні чи нейтралізації, необхідність дії високих температур та тиску зумовлюють підвищення вартості такого виробництва [28].

Загальна характеристика відходів м'ясопереробних підприємств птахофабрики та ко-субстратів, що використовуються найчастіше наведені в таблиці нижче.

Таблиця 1.1.2.2 Характеристика відходів м'ясопереробки курячих птахофабрик та ко-субстратів, що використовуються для їх зброджування [21, 24, 25, 29, 30]

Сировина	Вміст сухих речовин, %	Вміст СОР, % СР	Співвідношення C:N	Потенціал виходу біогазу, м ³ /т	Вміст СН ₄ в біогазі, %
Послід курей безпідстилковий	20-24	70-85	3-12	90-100	58-60
Флотаційний шлам	3,5	80	25-40	900	55-60
Інші відходи м'ясопереробки	20-30	22	-	260	-
Силос кукурудзи	30-40	95	40-80	212	52-54
Солома пшениці	30	90	40-100	162	-

Отже, для отримання біогазу було обрано використання як субстрату відходів м'ясопереробки, а саме посліду курей, флотаційного шламу очисних споруд стічних вод, відходів забійного цеху та соломи пшениці як ко-субстрату.

1.2. Обґрунтування вибору технології

1.2.1. Огляд основних технологій отримання біогазу

Загалом, процес отримання біогазу можна розділити на декілька основних етапів:

- Підготовка сировини
- Процес зброджування
- Збір та очищення біогазу
- Спалювання біогазу з отриманням енергії
- Переробка відходів, зокрема дигестату.

Процес підготовки сировини включає її збір, видалення механічних домішок, накопичення та попередню обробку. Попередня підготовка сировини необхідна для підвищення ефективності процесу зброджування та кількості отриманого біогазу. Її суть полягає у руйнуванні структури субстрату та зменшенні розмірів частинок, що робить його більш доступним для гідролітичних мікроорганізмів. Це в свою чергу зменшує час гідролізу – початкової стадії метаногенезу, що часто є лімітуючою в загальному процесі бродіння. Крім цього, підвищується розпад органічної речовини, пришвидшується процес утворення біогазу та зменшується загальна кількість сухих речовин в дигестаті, що залишається в результаті бродіння. Також, попередня обробка зменшує гідравлічний час утримання субстрату, що дозволяє використовувати менший об'єм реактора [31].

Методи попередньої обробки поділяють на фізичні, термічні, хімічні та біологічні. Фізичні методи передбачають відсутність використання хімічних речовин та включають механічне подрібнення, мікрохвильову та ультразвукову обробку. До хімічних методів відноситься лужна та кислотна обробка, що передбачає відповідно обробку розчинами лугів та кислот різної концентрації. Даний спосіб часто використовується для підготовки біомаси з високим вмістом лігноцелюлози. До термічних можна віднести обробку сировини парою під тиском або ж гарячою водою [32].

Окремим методом є біологічна обробка, що передбачає використання бактерій, найпростіших та грибів з метою часткового гідролізу субстрату. На цей час, проводяться дослідження мікрофлори рубця у ВРХ з метою дослідження мікроорганізмів, що здійснюють травлення субстратів з високим

					ДП ББ21 11.000 ПЗ	Адк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

вмістом лігноцелюлози, та їх подальшого використання для обробки сировини для отримання біогазу [33].

Після підготовки сировина подається в реактор для здійснення безпосереднього процесу анаеробного зброджування. Даний етап характеризується багатьма параметрами та в залежності від них різними технологіями його проведення. Основними факторами, що впливають на процес зброджування є температура, показник рН, органічне навантаження, співвідношення C:N, тривалість утримання субстрату, вміст летких жирних кислот тощо.

Відповідно до температури за якої здійснюється процес зброджування, існує декілька режимів: мезофільний (оптимум при 35°C) та термофільний (оптимум при 55°C). Термофільний режим потребує більшої кількості енергії для підтримання відповідної температури, проте це суттєво пришвидшує процес розпаду органічної речовини та відповідно утворення біогазу, крім цього відбувається знищення переважної більшості патогенних мікроорганізмів [34].

У зв'язку зі швидшим розпадом органічних речовин при термофільному режимі необхідний постійний ретельний контроль процесу зброджування, оскільки існує ймовірність накопичення великої кількості довголанцюгових жирних кислот та відповідно зупинки метаногенезу. Мезофільний режим характеризується нижчою швидкістю утворення біогазу, але і відповідно нижчою потребою в енергії для підігріву та вищою стабільністю процесу [35].

Тривалість утримання – це середній час, протягом якого органічні речовини перебувають в реакторі. Він залежить від температурного режиму, складу сировини та органічного навантаження [32]. Визначення оптимального тривалості утримання дозволяє отримати максимально можливий вихід біогазу, підібрати необхідний період завантаження сировини та її об'єм, а також визначити необхідний розмір реактора.

Органічне навантаження – це кількість субстрату, що завантажуються в метантенк, виражена в одиницях сухої органічної речовини. Для кожного

					ДП ББ21 11.000 ПЗ	Адк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

субстрату та об'єму метантенка необхідно визначати оптимальний показник органічного завантаження. Неправильний підбір може спричинити накопичення летких жирних кислот через перевантаження реактора сировиною, що в свою чергу пригнічує діяльність метаногенних мікроорганізмів [34].

Показник рН та вміст летких жирних кислот характеризують процес, що відбувається в реакторі безпосередньо під час зброджування та потребують постійного моніторингу. Так, оптимальним для метаногенів є діапазон рН від 6,8 до 7,2, тоді як для ацидогенів цей показник становить близько 5 [36]. На рН впливає вміст летких жирних кислот, об'єм утвореного в результаті бродіння вуглекислого газу та концентрація бікарбонатів [32].

В залежності від вмісту сухих речовин в субстраті процес зброджування може здійснюватися за «сухою» (вологість субстрату становить 50-60%) та «мочною» (вологість субстрату близько 85-95%) технологією. «Мокра» технологія передбачає здійснення процесу зброджування в анаеробному резервуарі – метантенку, з постійним введенням та вилученням рідкого субстрату, а також встановленням спеціального обладнання для перемішування з метою запобігання утворення кірки. «Суха» технологія дозволяє зменшити об'єми метантенка та площі біогазової установки відповідно завдяки меншому вмісту вологи в сировині. Крім цього, технологія обслуговування таких установок є простішою та менш вартісною. Проте, на сьогоднішній день, найбільш поширеними є установки, що працюють за «мочною» технологією [37].

В залежності від способу подачі сировини виокремлюють метод порційної подачі субстрату та проточний метод. В першому варіанті завантаження субстрату здійснюється одноразово, а зброджування проходить від початку завантаження до самого вилучення субстрату без внесення додаткових порцій. Після завершення бродіння отриманий зброджений залишок повністю вилучається. Даний метод характеризується нерівномірним утворенням газу та необхідністю створення великих запасів субстрату.

					ДП ББ21 11.000 ПЗ	Адк.
Зм.	Адк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

Принцип проточного методу полягає в постійній порційній подачі свіжого субстрату з паралельним вилученням такої ж кількості збродженого залишку. Цей метод характеризується стабільним процесом утворення біогазу та поступовою подачею сировини, що дозволяє здійснювати її неперервну переробку без необхідності великого накопичення [38].

Як було зазначено вище, процес зброджування здійснюється в спеціальних реакторах різної конструкції, де основними вимогами є висока герметичність конструкції, можливість виробляти значні об'єми біогазу та можливість керувати процесом з високим органічним навантаженням за меншого гідравлічного часу утримання сировини задля зменшення об'ємів реактора [39].

До найбільш поширених на сьогоднішній день конструкцій можна віднести реактор з безперервним потоком та перемішуванням (з англ. continuous stirred tank reactors (CSTR)), анаеробні реактори з поршневым потоком (з англ. anaerobic plug-flow reactors, (APFRs)), анаеробний реактор з перегородками (з англ. anaerobic baffled reactor (ABR)), реактори з висхідним потоком осаду (з англ. up-flow anaerobic sludge blanket (UASB)) та інші [40].

Реактор з безперервним потоком та перемішуванням характеризується постійним потоком субстрату та високою інтенсивністю перемішування, що підвищує ефективність процесу бродіння. Приклад конструкції такого реактора наведено на рис. 1.3.1 нижче. Оскільки, здійснюється постійна подача субстрату в одній частині реактора, з іншої відбувається вивантаження такої ж самої кількості збродженого залишку. Це зумовлює низьку тривалість утримання та нижчий вихід біогазу із відповідного субстрату. Тому часто такі конструкції можуть включати декілька ступенів зброджування або ж впровадження рециклу збродженого залишку, тобто його часткового повернення назад в реактор.

Анаеробні реактори з поршневым потоком складаються з довгої горизонтальної ємності у формі циліндра вздовж якої рухається субстрат. Перемішування майже не відбувається, а вивантаження здійснюється з іншої

					ДП ББ21 11.000 ПЗ	Адк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

сторони циліндра. Для такого типу реактора більш характерним є довший гідравлічний час утримання та відповідно вища ступінь розпаду сировини і вихід біогазу [41].



Рис. 1.2.1.1 Схематичне зображення реактора з безперервним потоком та перемішуванням та анаеробного реактора з поршневим потоком [41]

Анаеробний реактор з перегородками складається з герметичного резервуару, що розділений спеціальними перегородками на декілька відділень, які з'єднані між собою. Субстрат рухається вздовж відділень по мірі заповнення резервуарів та його подачі. Розділення на секції дозволяє розділити процес зброджування на стадії метаногенезу в одній конструкції, що сприяє економії коштів та підвищення ефективності зброджування. Використовується переважно для сировини з низьким вмістом сухих речовин [40].

Як було згадано вище, також розроблено багатоступеневі технології анаеробного зброджування, що полягають в розділенні проходження фаз метаногенезу на декілька окремих реакторів. Найпоширенішими є двоступеневі системи, де фази гідролізу та ацидогенезу проходять в окремому реакторі, що дозволяє підтримувати оптимальний для даного етапу рН близько 5. Ацетогенез та метаногенез відбувається в іншому реакторі з вищим рН (близько 6,5-8). Така технологія дозволяє зменшити інгібуючий вплив зміни рН на мікроорганізми, що беруть участь в кожній із стадій, та відповідно підвищити ефективність утворення біогазу [39].

Необхідним для здійснення процесу зброджування є встановлення систем перемішування субстрату всередині реактора, що дозволяє підтримувати гомогенність субстрату, рівномірне розподілення біомаси і теплоти та запобігання утворення донних відкладень та плаваючого шару. Для

цього можна застосовувати механічний, гідравлічний чи пневматичний спосіб. Механічний полягає у перемішуванні за допомогою механічних мішалок різного типу та способів установа в реакторах. Гідравлічний спосіб здійснюється завдяки постійному перекачуванню суміші всередині реактора за допомогою насосів. Принцип пневматичного способу полягає у впорскуванні частини утвореного біогазу в суміш через спеціальні розпилюючі пристрої на дні реактора. Гідравлічний та пневматичний методи підходять для малов'язких субстратів, що легко перекачуються та не схильні до утворення кірки та піни на поверхні. Механічний спосіб є найбільш поширеним та підходить для різноманітної кількості та виду субстратів [42].

Для збору біогазу використовують спеціальні ємності різноманітних конструкцій – газгольдини. Вони можуть бути розташовані безпосередньо над реактором збродження чи окремо від нього, мати жорстку або гнучку структуру. Прикладами найбільш поширених конструкцій є жорстка оболонка або ж гнучка мембрана безпосередньо над реактором. Одним з варіантів є гнучка двошарова мембрана теж безпосередньо над реактором, де в простір між двома шарами газодувками нагнітається повітря, що створює сферичний каркас. Всередині іншої накопичується біогаз, а завдяки зовнішньому тиску повітря здійснюється постійна підтримка тиску всередині, що важливо для стабільності подачі газу далі.

Рівень заповнення біогазом внутрішньої мембрани обов'язково контролюється за допомогою різних методів. Це може бути натягнутий від вершини куполу трос, що фіксує його підйом, або вимірювання за рівнем рідини в трубці. Більш сучасні методи включають ультразвукові датчики [43].

Перед подачею біогазу для спалювання його необхідно очистити від сірководню та осушити від вологи. Очищення від сірководню може здійснюватися різними способами та більш детально описано в наступному пункті розділу. Осушення біогазу від вологи є важливим для запобігання корозії основних деталей обладнання та КГУ. Найбільш поширеним є осушення шляхом відділення конденсату при охолодженні біогазу. Даний

					ДП ББ21 11.000 ПЗ	Адк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

спосіб може бути реалізовано шляхом прокладання труб для подачі біогазу під землею, що забезпечує необхідний рівень охолодження. Для збору конденсату обов'язково встановлюються конденсатовідвідники [38]. На цей час поширеними на БГУ є біогазові чиллери, що є окремим пристроєм для осушення газу шляхом його охолодження. Вони дозволяють осушувати великі об'єми біогазу без необхідності прокладати довгі трубопроводи під землею [44].

Наступним етапом є спалювання біогазу в когенераційній установці з метою отримання теплової та електричної енергії, що може бути використана для власних потреб підприємства.

Заключним етапом є переробка збродженого залишку – дигестату. Загалом, дигестат – це продукт біоконверсії органічних матеріалів у процесі метанового бродіння, в результаті чого комплексна органічна речовина розпадається до більш простих органічних сполук, мінералізованих речовин, мікробної біомаси та біогазу. Дигестат містить комплекс макро- та мікроелементів, має нейтральний рівень рН, збалансоване співвідношення С/Н (20-30), близько 60-70% загального азоту перебуває в легкодоступній для рослин амонійній формі та не містить насіння бур'янів та інших патогенів. Перелічені фактори роблять його ідеальним для використання в якості органічного добрива. Його внесення на поля часто здійснюють без попередньої обробки, проте можливе його розділення на рідку та тверду фракції та використання кожної окремо [45].

Для даного проекту обрано використання «микрої» технології зброджування з вмістом вологи в субстраті 92% в реакторі з безперервним потоком та механічним перемішуванням зі встановленням доброжувача після основного реактора для максимального виходу біогазу. Для збору біогазу встановлюються двомембранні газгольдери з подачею повітря в міжмембранний простір, а також використання біогазових чиллерів для осушення отриманого біогазу. Обробка дигестату полягає в розділенні на

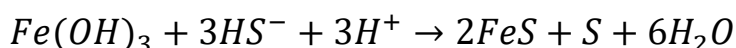
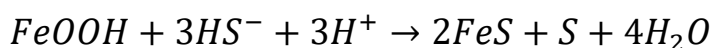
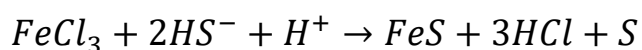
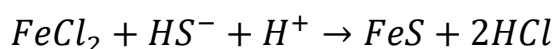
					ДП ББ21 11.000 ПЗ	Адк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

тверду та рідку фракцію та їхню подальшу обробку задля отримання біодобрих.

1.2.2. Технології очищення біогазу від сірководню

Як було зазначено вище, очищення біогазу від сірководню є важливим етапом перед його спалюванням з метою запобігання пошкодження деталей та двигуна КГУ. Для цього використовують хімічні, фізико-хімічні та біологічні методи.

Хімічні та фізико-хімічні методи передбачають використання певних хімічних сполук та фізичних явищ з метою зменшення або запобігання утворення сірководню ще безпосередньо в реакторі або ж для його вловлювання в окремих апаратах. Так, одним з хімічних методів є перетворення розчинених сульфідів в нерозчинні сполуки сульфідів металів або в елементарну сірку. Для цього використовують двовалентні або тривалентні солі заліза, а саме $FeCl_2$, $FeCl_3$, $FeO(OH)$, $Fe(OH)_3$. Осадження сульфідів відбувається згідно рівняння реакцій:



В результаті отримують нерозчинні сполуки сульфиду заліза та елементарну сірку, що виводиться з реактора разом зі збродженим залишком. Дана технологія потребує постійного дозування дорогих реагентів часто в досить великих об'ємах, що є одним з основних недоліків. Крім цього, існує високий ризик утворення осадів, що накопичуються в реакторі та спричиняють подальше засмічення трубопроводів [46].

До фізико-хімічних технологій можна віднести процеси абсорбції та адсорбції. Як відомо, адсорбція – це процес поглинання газів поверхневим шаром твердого тіла чи рідини. Принцип даного методу для очищення від сірководню полягає у пропусканні біогазу через фільтрувальну колону, що заповнена спеціальною адсорбуючою речовиною, яка поглинає сірководень.

					ДП ББ21 11.000 ПЗ	Адк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

Як адсорбенти використовують активоване вугілля, цеоліти або матеріали на основі оксиду заліза [47].

Процеси адсорбції за способом зв'язування сполук адсорбентами можна поділити на фізичні та хімічні. Принцип фізичної адсорбції полягає у зв'язуванні сполук за рахунок сил Ван-дер-Ваальса, що є досить слабкими. Це дозволяє здійснювати регенерацію таких фільтрувальних матеріалів з вилученням сполук сірки. Прикладом фізичної адсорбції є використання активованого вугілля або цеолітів. Хімічна адсорбція заснована на зв'язуванні сполук ковалентними зв'язками, що робить майже неможливим процес регенерації адсорбента. До такого типу відноситься використання хімічних сполук для просочення фільтрувального матеріалу з метою покращення процесу адсорбції [46]. Для цього використовують розчини NaOH, KOH та Na_2CO_3 .

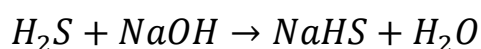
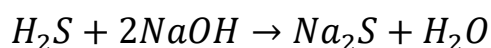
Методи адсорбції є досить ефективними та дозволяють здійснити очищення біогазу від сірководню на 99%, завдяки чому є досить поширеними у промисловості. Проте активоване вугілля та цеоліти є досить дорогими матеріалами, їх регенерація здійснюється за високих температур та тиску, а якщо вони додатково просочені хімічними речовинами, тоді регенерація є майже неможливою. Відповідно їх використання, особливо для біогазу з високим вмістом сірководню, є економічно не вигідним, оскільки такі адсорбенти потребують частої заміни та поновлення [47].

Принцип процесу адсорбції для очищення біогазу полягає у пропусканні його через водний скруббер, зазвичай під тиском, що покращує його розчинність у воді. Конструкція працює таким чином: встановлюється циліндрична колона в яку зверху форсунками розпилюється вода, а знизу здійснюється подача біогазу. Задля збільшення площі поверхні контакту фаз між рідиною та газом колона заповнюється спеціальним пакувальним матеріалом. За рахунок різниці в розчинності сірководню та метану, сірководень розчиняється у воді та виводиться з колони у вигляді водного

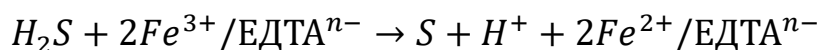
					ДП ББ21 11.000 ПЗ	Адк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

розчину. Далі здійснюється регенерація отриманого розчину з вилученням сполук сірки та його повторне використання [48].

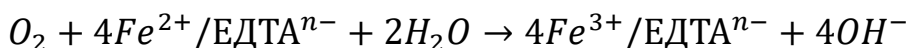
З метою покращення вилучення сірководню та зменшення використання води в скруберах використовують органічні розчинники (метанол, диметиліві ефіри пропіленгліколю) або ж водні розчини NaOH, FeCl₂, Fe(OH)₃, Fe³⁺/ЕДТА, що сприяють кращому зв'язуванню сірководню. Найбільш поширеним є використання розчину NaOH, де утворюються наведені за рівнянням реакції нижче сполуки:



При використанні хелату заліза (Fe³⁺/ЕДТА) відбуваються приведені нижче реакції з утворенням елементарної сірки:



Та реакція регенерації сполуки хелату:

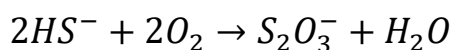
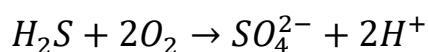
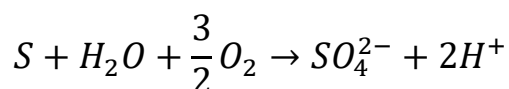
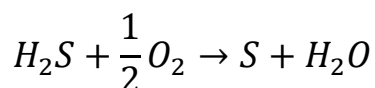


Даний спосіб є досить перспективним, оскільки є можливість регенерації хелату заліза шляхом продування повітрям. Проте така технологія все ще залишається дорогою в установці та експлуатації, особливо за високого вмісту сірководню в біогазі. Загалом, процес абсорбції дозволяє очистити біогаз з ефективністю в 98-99%, проте передбачає використання великої кількості води або ж дорогих реагентів, а також додаткового апаратурного забезпечення для їх регенерації та вилучення сполук сірки [46].

Біологічні методи видалення сірки з біогазу можна розділити на *ex-situ* та *in-situ* технології. Принцип технології *in-situ* полягає в подачі невеликої кількості кисню безпосередньо під купол реактора, де в результаті діяльності сульфід-окиснювальних бактерій сірководень перетворюється на осад елементарної сірки, тіосульфат чи сульфати [49].

В даному процесі беруть участь такі види бактерій: *Acidithiobacillus thiooxidans*, *Thiomonas intermedia* та *Thiomonas perometabolis*. При цьому відбуваються наведені нижче перетворення:

					ДП ББ21 11.000 ПЗ	Арк.
						30
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Даний метод є досить поширеним та дозволяє видаляти сірководень з ефективністю до 90% при відносно низьких експлуатаційних витратах. Проте існує ряд недоліків, що обмежують його використання, а саме ризик утворення вибухонебезпечної суміші метану з киснем в реакторі; пригнічення метаногенних мікроорганізмів, які є строгими анаеробами; утворення сульфатної кислоти, що може призвести до корозії матеріалів всередині реактора; накопичення осаду сірки в реакторі та трубопроводах; потрапляння азоту (N₂) до складу біогазу, якщо аерація здійснюється повітрям з атмосфери, що в свою чергу погіршує його якість [46].

Суть технології *ex-situ* полягає в очищенні від сірки в окремій споруді за принципом, що схожий з *in-situ*. Для цього використовують біофільтри, крапельні біофільтри (з англ. biotrickle bed reactor) та біоскрубери. Біофільтри та крапельні біофільтри працюють за схожим механізмом, що полягає у подачі біогазу в колону зі спеціальним завантаженням, на якому формується біоплівка з сіркоокиснювальних мікроорганізмів, які окиснюють сірководень до елементарної сірки чи сульфатів. Крім цього, здійснюється подача невеликої кількості повітря, оскільки процес відбувається за участі кисню, відповідно до рівнянь реакцій наведених вище. Схематичне зображення роботи крапельного біофільтра наведено нижче на рисунку 1.3.1.1. Принципова різниця між біофільтрами та крапельними фільтрами полягає у відмінностях завантаження, де в перших це органічний матеріал, а в других – інертний неорганічний матеріал, який є стійким до дії кислот та корозії.

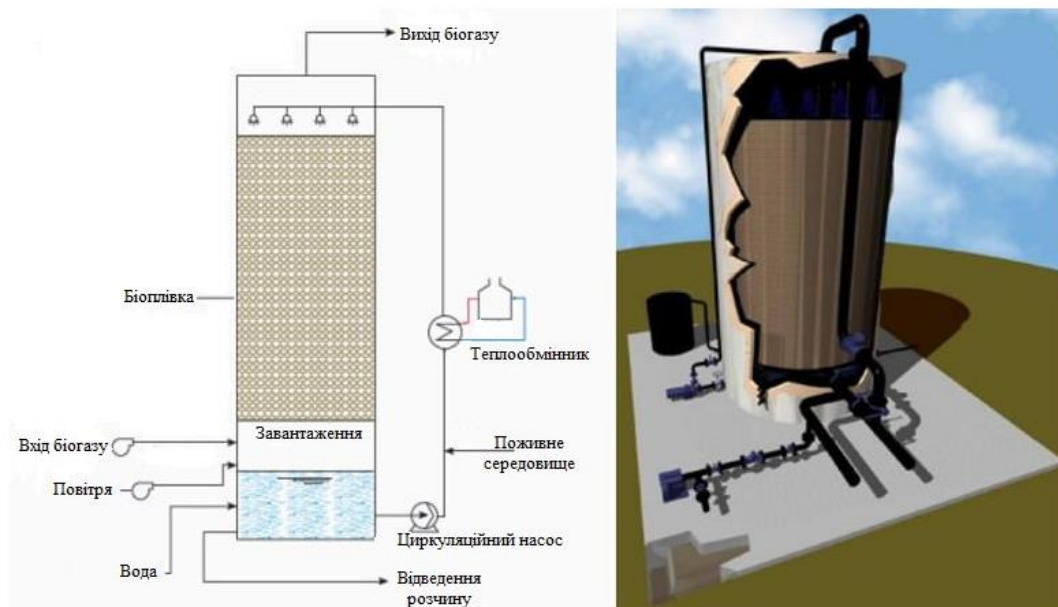


Рис. 1.3.1.1 Схематичне зображення крапельного біофільтра
а – схематичне зображення роботи крапельного біофільтра; б – 3D
модель конструкції біофільтра [47]

Крім цього, в крапельних фільтрах здійснюється постійна циркуляція поживного середовища вздовж інертного заповнення. Обидві технології характеризуються високою ефективністю видалення сірководню, що становить близько 95%.

Біоскрубери працюють за схожою до водних скрубєрів технологією, проте відпрацьована рідина направляється в окремий реактор, де здійснюється її регенерація та окиснення сірководню за участі сульфат-окиснювальних мікроорганізмів за тим самим механізмом, що і в біофільтрах. Це дозволяє повторно використовувати воду, проте потребує вищих експлуатаційних витрат, оскільки необхідним є розміщення та керування додатковою спорудою [46].

В даному проєкті прийнято використання технології біологічного знесірчення біогазу в крапельних біофільтрах.

1.2.3 Обґрунтування обраної технології отримання біогазу

Для отримання біогазу в даній роботі прийнято використання відходів м'ясопереробки та ко-субстрат, а саме послід курей, флотаційний шлам з

флотаційних установок, м'ясні відходи та солома пшениці. Відповідно, необхідно передбачити окремі лінії їх підготовки, подачі та змішування.

Початково вся сировина завантажується в приймальні бункери для кожного типу окремо, звідки транспортується трубопроводами або ж шнековими транспортерами до стадії підготовки.

Так, м'ясні відходи від забійного цеху направляються на подрібнення до часток не більше 50 мм та стерилізацію під тиском при температурі вище 133 °С протягом не менш як 20 хвилин без перерви при абсолютному тиску не менш як 0,3 МПа, відповідно до вимог законодавства України [18].

Для попередньої підготовки соломи було обрано механічну обробку з метою зменшення використання великої кількості реагентів та відповідно вартості виробництва. Окремо здійснюється подрібнення соломи на шнекових дробарках. Таким чином, це дозволить здійснити додаткову обробку соломи для підвищення виходу біогазу та зменшити об'єм метантенка для зброджування через зменшення гідравлічного часу утримання соломи в реакторі.

Флотаційний шлам та послід курей подається безпосередньо до змішувача готової сировини разом із соломою та м'ясними відходами після стерилізації. В змішувачі здійснюється перемішування та контроль необхідної вологості для зброджування в діапазоні 92%. Розведення субстрату до необхідного рівня вологості здійснюється водою та відпрацьованою вторинною парою з вакуум випарних установок після упарювання дигестату [50].

Після змішування субстрат подається до реактора для безпосереднього процесу анаеробного зброджування. Для цього було обрано реактор з безперервним потоком та перемішуванням, в якому здійснюється постійна подача вихідної сировини та відповідно відведення такої самої кількості зброженого залишку. З метою запобігання утворення кірки на поверхні суміші та покращення процесу масообміну встановлюються системи механічного перемішування. Для цього встановлюються мішалка типу Паддл-

					ДП ББ21 11.000 ПЗ	Адк.
Зм.	Адк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

гігант, що розроблена спеціально для перемішування субстратів в анаеробних реакторах біогазової галузі німецькою компанією Buschmann Güllerührwerke [51].

Режим зброджування обрано мезофільний в діапазоні температур $38 \pm 2^\circ\text{C}$. Для підтримання необхідних температур встановлюються теплообмінні пристрої. Для літньої пори року, коли температура може бути значно вищою за необхідну, встановлюються теплообмінні пристрої для відведення зайвого тепла. Також в основних реакторах встановлюються оглядові вікна для візуального контролю за процесом зброджування.

Для забезпечення максимального виходу біогазу з наявної сировини встановлюються доброджувачі, що за своєю конструкцією ідентичні до основних реакторів, проте в них відсутня подача свіжої сировини, а лише здійснюється завантаження збродженої біомаси з реакторів [52].

Збір газу здійснюється безпосередньо над реакторами та доброджувачем в газгольдерах у вигляді гнучкої двошарової мембрани, що змінює свій розмір в залежності від виділеного обсягу біогазу. Обов'язково здійснюється контроль заповнення газгольдера за допомогою ультразвукових датчиків, та в разі максимального заповнення його спалювання на газовому факелі.

Зібраний біогаз подається на очищення перед безпосереднім спалюванням. Початковим етапом є його знесірчення у біофільтрі з крапельним зрошенням. В даному апараті біогаз пропускається через колону заповнену інертним матеріалом, на поверхні якого знаходиться біоплівка з сіркоокиснювальних бактерій. Сірководень з біогазу поглинається рідкою фазою, що постійно зрошує поверхню заповнення, де сіркобактерії окиснюють її до елементарної сірки. Для проходження реакції необхідний кисень, що забезпечується регульованою подачею повітря у фільтр за допомогою повітродувки. Біогаз змішується з повітрям та подається безпосередньо у біофільтр. Концентрація кисню після очищення становить не більше 0,5% [47].

					ДП ББ21 11.000 ПЗ	Арк.
						34
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Важливим для біофільтра є тип його заповнення. До вимог для насадок, що використовуються для його заповнення можна віднести перелік наведений нижче:

- висока пористість, що забезпечує кращий контакт між газовою та рідкою фазами, при цьому розмір пор має бути достатнім для вимивання надлишкової біоплівки, вільного стікання зрошувальної рідини та запобігання їх забиванню;
- висока питома площа поверхні насадок, що збільшує площу утворення біоплівки та дозволяє зменшити габаритні розміри біофільтра;
- кислотостійкість матеріалу, з якого виготовлені насадки, оскільки існує ймовірність утворення сульфатної кислоти в процесі очищення;
- забезпечення ефективного процесу масопереносу з газової фази в рідку.

Найбільш поширеними типами насадок для такого типу біофільтрів є поліуретанові піни, кільця Палля, насадки типу HD Q-PAC (з англ. High-Density Quintessential Packing) та поліестерові волокна. В таблиці 1.2.3.1 наведено їх порівняльну характеристику [53].

Таблиця 1.2.3.1 Порівняльна характеристика насадок для біофільтра [53, 54, 55]

Тип насадки	Ефективність видалення H_2S , %	Питома площа поверхні, m^2/m^3	Вільний об'єм, %
Поліуретанова піна	>99	600	97
Кільця Палля	80-90	60-320	88-96
Насадки типу HD Q-PAC	90-95	430	88
Поліестерові волокна	>95	859	-

Для здійснення оптимального вибору необхідно врахувати співвідношення між всіма наведеними факторами. Так, при високій питомій

площі поверхні та вільному об'єму, в поліуретановій піні існує високий ризик забивання пор через їх дрібні розміри. Для поліестерових волокон існує високий ризик їх злежування та забивання надлишковою біоплівкою, що стікає разом з зрошувальною рідиною. Відповідно, найбільш оптимальними варіантами виступають кільця Палля (рис. 1.2.3.1) та насадки типу HD Q-PAC (рис. 1.2.3.2).

Як бачимо, з рисунку насадка типу HD Q-PAC є суцільним блоком, що вставляється в колону біофільтра. Це значно ускладнює процес їх заміни, оскільки при забиванні чи поломці необхідно зупиняти біофільтр та замінювати весь блок. Крім цього, даний тип наповнення є більш дорогівартісним.

Кільця Палля є оптимізованою модифікацією кілець Рашига зі збільшеною питомою площею поверхні. Кільця Палля можуть бути виготовлені з нержавіючої сталі, поліпропілену та кераміки. Вони є більш доступними на ринку України, забезпечують високу інтенсивність масообміну завдяки поперечним перегородкам, високу ефективність видалення сірководню та мають високий відсоток вільного об'єму, що зменшує ризик забиття пор, а також є простішими в експлуатації з можливістю часткової заміни та промивання в разі критичного забиття пор. Тому в даній роботі прийнято використання поліпропіленових кілець Палля як насадку для завантаження біофільтра.

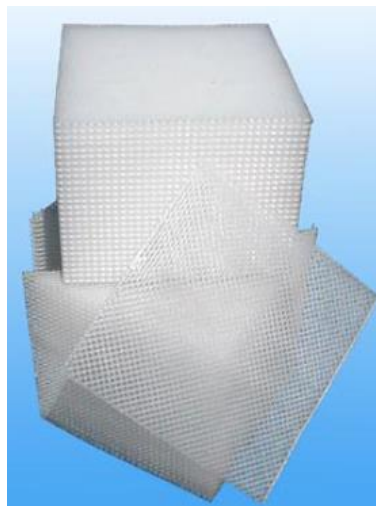


Рис. 1.2.3.1 Насадка типу HD Q-PAC [54]

					ДП ББ21 11.000 ПЗ	Авк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36



Рис. 1.2.3.2 Кільця Палля [55]

Для забезпечення життєдіяльності бактерій необхідно здійснювати зрошення біофільтра поживним середовищем крапельним способом за допомогою розпилюючих форсунок, що розташовані зверху біофільтра. В такому біофільтрі здійснюється рециркуляція поживного середовища, після проходження завантаження його збирають та повертають назад.

Як поживне середовище в даній роботі пропонується використовувати розведену рідку фракцію дигестату, що утворюється після його механічної сепарації. Дигестат містить всі необхідні компоненти для росту сіркобактерій, а його використання дозволяє зменшити витрати на обслуговування біофільтра та забезпечити замкнений цикл на виробництві.

Оптимальними умовами роботи біофільтра є рН 7-8 та температура в діапазоні 28-32°C. Контроль даних параметрів здійснюється за допомогою вбудованих датчиків рН та температури. В разі зниження рН здійснюється подача розчину NaOH. Також контролюється рівень заповнення біофільтра за допомогою датчика рівня, де в разі перевищення здійснюється частковий злив зрошувальної суспензії [56].

Після очищення біогазу від сірководню здійснюється його осушення від вологи за допомогою спеціального пристрою – чиллера. Як відомо, для осушення біогазу використовують його охолодження в трубах для утворення конденсату та відповідно його збір. Проте часто для забезпечення безперебійної роботи КГУ та перешкодження пошкоджень двигуна цього

					ДП ББ21 11.000 ПЗ	Арк.
						37
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

недостатньо, тому встановлюються чиллери. Принцип їх роботи теж заснований на утворенні конденсату при охолодженні біогазу до температури $+5^{\circ}\text{C}$, що крім цього забезпечує встановлення необхідної температури біогазу для подачі на КГУ. Таке рішення дозволяє суттєво підвищити ефективність осушення біогазу та відкидає необхідність у прокладанні додаткових трубопроводів [44].

Після осушення біогаз подають для спалювання на когенераційну установку. Біогаз потрапляє у газопоршневий двигун, де в результаті згорання приводить в рух поршкову групу, звідки механічна енергія через вал передається до генератора, що виробляє електричну енергію. В результаті охолодження двигунів КГУ за допомогою теплообмінників утворюється також тепла енергія, що відводиться за допомогою теплообмінників для використання на потреби біогазового комплексу [57].

Зброджений залишок, або дигестат, після доброжувачів направляється на розділення за допомогою шнекових сепараторів на тверду та рідку фракцію. Тверда фракція складається з деякої кількості органічної речовини, містить велику кількість целюлози та лігніну, близько 20-30% сухих речовин, а також вищий вміст фосфору. Після розділення вона подається на гранулювання та використовується в подальшому як добриво. Рідка ж фракція містить більш розчинні форми азоту, фосфору та калію, що краще засвоюються рослинами. Частина рідкої фракції використовується як зрошувальний розчин в біофільтрі для очищення біогазу від сірководню. Залишок рідкої фракції використовується як добриво [58].

1.3. Характеристика біологічного агента

1.3.1 Характеристика асоціації мікроорганізмів, що беруть участь в процесі анаеробного збродження

Процес утворення біогазу включає 4 основні стадії: гідроліз, ацидогенез, ацетогенез і метаногенез та здійснюється завдяки спільній дії гідролітично-ацидогенних бактерій, синтрофних ацетогенних бактерій та метаногенних археїв.

					ДП ББ21 11.000 ПЗ	Адк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

Перший етап анаеробного зброджування – гідроліз, здійснюється гідролітичними та ферментативними бактеріями родів *Clostridium*, *Bacteroides*, *Ruminococcus* та *Fibrobacter*. Вони виділяють комплекс гідролітичних екзоферментів за допомогою яких здійснюється розщеплення складних полімерних сполук, білків, жирів та вуглеводів до їх мономерів.

Наступною стадією є ацидогенез, де отримані в результаті гідролізу органічні сполуки перетворюються на леткі жирні кислоти, невелику частку вуглекислого газу, води та водню за участі цілого консорціуму бактерій переважно родів *Clostridium*, *Lactobacillus*, *Enterobacter* та *Bacteroides*.

Далі здійснюється процес ацетогенезу – синтезу оцтової кислоти, де як субстрат використовується леткі органічні кислоти з попереднього етапу. Даний процес здійснюється синтрофними ацетогенними бактеріями родів *Syntrophomonas* та *Syntrophobacter* [59].

Бактерії, що беруть участь в ацидо- та ацетогенезі є переважно факультативними та облігантними анаеробами.

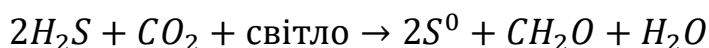
Заключною стадією є безпосередньо метаногенез. Залежно від типу субстрату метаногени зазвичай класифікують на три групи: гідрогенотрофні метаногени, ацетокластичні метаногени та метилотрофні метаногени [60]. Ацетокластичний метаногенез здійснюється переважно археями родів *Methanosaeta* та *Methanosarcina*, які перетворюють ацетат на CH_4 та CO_2 , тоді як гідрогенотрофний метаногенез здійснюється такими родами, як *Methanobacterium*, *Methanospirillum* та *Methanococcus*, які відновлюють CO_2 за допомогою H_2 . Метилотрофні метаногени використовують як субстрат метанол та метильовані сполуки, проте цей тип найменш поширений [59].

1.3.2. Характеристика асоціації мікроорганізмів, що беруть участь в очищенні біогазу від сірководню у крапельному біофільтрі

Сіркобактерії відносяться до грамнегативних бактерій, що за способом живлення поділяють на фотоавтотрофів та хемолітотрофів. Фотоавтотрофні сіркобактерії використовують світло як джерело енергії та включають види

					ДП ББ21 11.000 ПЗ	Адк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

Thiobacillus aquaesulis, *Thiomicrospira thvasirae*, *Thiobacillus novellus*, *Paracoccus denitrificans*, *Thiobacillus acidophilus*. Вони використовують сірководень як донор електронів в процесі фотосинтезу. За умови достатньої кількості сірководню та високої інтенсивності джерела світла утворюється елементарна сірка за рівнянням реакції наведеним нижче.



Якщо сірководню недостатньо утворюються переважно сульфати [53]:



Фотоавтотрофні сіркобактерії є потенційними біологічними агентами, що можна застосовувати для знесірчення, проте для їх життєдіяльності необхідний постійний доступ світла, що часто є обмеженим для реалізації в умовах щільного завантаження біофільтра.

Хемолітотрофні сіркобактерії використовують сірководень, сульфати та тіосульфати як донора електронів. Проте, акцептором електронів виступає кисень, якщо бактерії аеробні, або ж нітрити чи нітрати в анаеробних організмів.

В процесі очищення біогазу від сірководню в крапельних фільтрах беруть участь сіркобактерії переважно родів *Thiobacillus sp.* та *Acidithiobacillus sp.* [61].

Хемолітотрофні сіркобактерії – це грамнегативні, паличкоподібні, неспороутворюючі аеробні або анаеробні мікроорганізми, що можуть рости за температури від 4 до 90°C та діапазону рН 1-9. Температурний оптимум знаходиться у мезофільному та термофільних режимах.

Загалом, хемолітотрофних тіобактерій можна розділити на таксономічно та морфологічно різні групи: малого розміру короткі палички роду *Thiobacillus* (такі як *T. thioparus*, *T. denitrificans* та *T. thiooxidans*) та довгі, нитчасті бактерії родів *Beggiatoa* та *Thiothrix*. Залежно від джерела Карбону та енергії, їх можна розділити на 3 групи: облігантні хемолітотрофи (*Thiobacillus*, *Thiomicrospira*), факультативні хемолітотрофи (*Paracoccus denitrificans*, багато

					ДП ББ21 11.000 ПЗ	Адк.
						40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

видів *Thiobacillus*, *Thermotrix* та *Sulfolobus*) та хемолітогетеротрофні або міксотрофні мікроорганізми (*Beggiatoa*) [62].

Таксономічно після більш ретельного дослідження в 1990 роках, тіобактерії було розподілено на 6 класів на основі аналізу 16S рРНК: бета-, гамма-, альфа-, дельта-, зета- та епсилонпротеобактерії; частину з бактерій було вилучено та додано до інших класів та родів [63].

Рід *Thiobacillus* – рід грамнегативних бетапротеобактерій, що є найбільш поширеним та добре вивченим. До нього відносять декілька видів грамнегативних, паличкоподібних, неендоспорових, екзоспорових та цистоутворюючих бактерій, таких як *T. thioparus*, *T. denitrificans*, *T. neopolitanus*, *T. thiooxidans*, *T. intermedius* та *T. novellus*. *T. denitrificans* та *T. Novellus* з оптимумом рН 6-8. Більшість представників цього роду є суворими аеробами, зокрема види *T. thiooxidans*, *T. novellus* та *T. Thioparus*, проте є факультативні анаероби *T. denitrificans* та *T. ferrooxidans* [62].

Thiobacillus spp. можуть зростати у широкому діапазоні умов навколишнього середовища, завдяки чому їх використовують для очищення біогазу від сірководню. В залежності від вмісту кисню в результаті утворюється елементарна сірка або ж сульфати [64].

Рід *Acidithiobacillus* раніше було віднесено до роду *Thiobacillus*, проте в 2000 році було перекласифіковано. Це грамнегативні хемолітотрофні бактерії, що належать до класу гаммапротеобактерій *Acidithiobacillia* та здатні витримувати екстремально низькі значення рН. *Acidithiobacillus* можна розділити на 2 групи в залежності від субстратів, які вони використовують для отримання енергії: *Acidithiobacillus thiooxidans*, *A. caldus*, та *A. albertensis* використовують виключно сполуки сірки, тоді як *A. ferrooxidans*, *A. ferrivorans*, *A. ferriphilus*, та *A. ferridurans* можуть окиснювати сірковмісні сполуки та сполуки заліза [62].

Характерним для біофільтрів є формування біоплівки з мікроорганізмів на поверхні завантажуючого матеріалу. До її складу входять переважно представники роду *Thiobacillus*, а саме *Thiobacillus thioparus* (рис.1.3.2.1), та

					ДП ББ21 11.000 ПЗ	Адк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

роду *Acidithiobacillus*, виду *Acidithiobacillus thiooxidans*. Також в низьких кількостях можуть бути присутні гриби та бактерії, нітрифікуючі мікроорганізми.

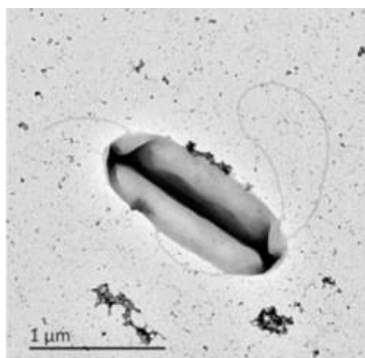


Рис. 1.3.2.1 Трансмисійна електронна
мікрофотографія *Thiobacillus thioparus* [65]

Біоплівка формується за участі асоціації бактерій, що з'єднуються між собою та з поверхнею завантаження за допомогою екзополісахаридної матриці (ЕПМ), де вона становить 79-90% складу всієї біоплівки, а клітини бактерій лише 10-25%. ЕПМ складається з білків та полісахаридів, які додатково захищають клітини від несприятливих умов середовища або ж різких змін. Крім цього, складовою ЕПМ є глікокалікс, що містить заряджені групи в полісахаридах, що виконує функцію іонобмінної системи та концентрує необхідні для сіркобактерій мікроелементи. При цьому на початкових етапах формування біоплівки бактерії утримуються на поверхні твердого матеріалу за допомогою переважно електростатичної взаємодії, лише з часом відбувається збільшення клітинної біомаси та формування біоплівки з ЕПМ [53].

На зображенні нижче представлено сканувальні електронні мікрофотографії біоплівки на поверхні полімерних кілець, сформованої переважно з *T. thioparus*. На рис. 1.3.2.2 а представлено гомогенну поверхню біоплівки, що свідчить про вищу біодоступність поживних речовин та кисню, на рис. 1.3.2.2 б, 1.3.2.2 с показано біоплівку з вкрапленнями кристалів сірки, що утворилась в результаті окиснення сірководню бактеріями. Також, на трьох зображеннях бачимо присутність екзополісахаридної матриці, що з'єднує клітини між собою [66]

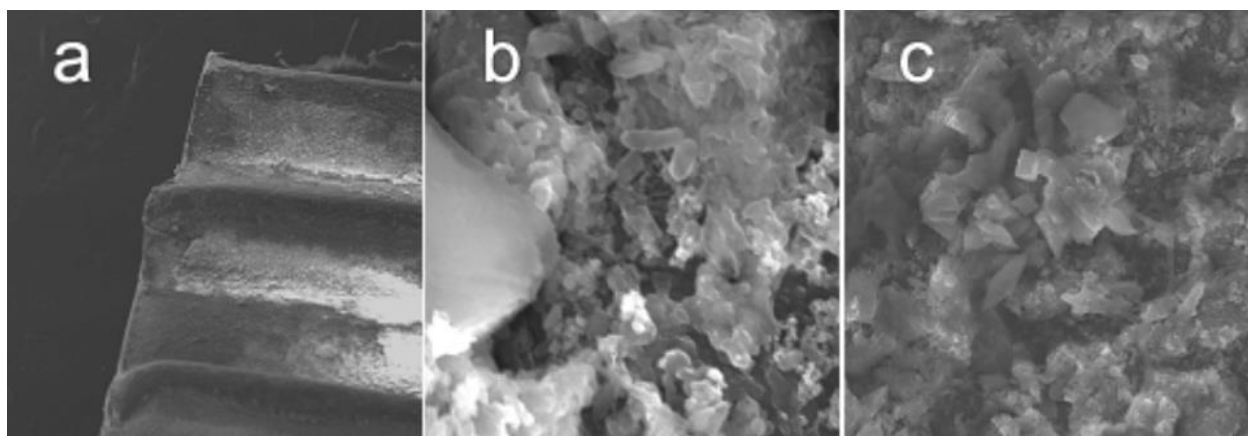


Рис. 1.3.2.2 Сканувальна електронна мікрофотографія біоплівки сформованої на поверхні полімерних кілець за участі *T. thioparus*; а – гомогенна біоплівка на поверхні кільця; б, с – поверхня біоплівки з кристалами елементарної сірки октаедричної форми [66]

В залежності від рівня рН в системі переважають різні види мікроорганізмів, де при рН 7-8 переважають *T. thioparus*, а при нижчих показниках рН 1-3 – *Acidithiobacillus thiooxidans*. За допомогою рН можна контролювати переважний склад мікроорганізмів у біофільтрі. Для більш стабільного процесу оптимальний рівень рН становить 7-8 [53].

Отже, основним біологічним агентом процесу біологічного знесірчення біогазу в крапельних біофільтрах є сіркоокиснювальні бактерії *T. thioparus*, що формують біоплівку на поверхні фільтруючого завантаження та з оптимальним рН для їх росту 7-8.

РОЗДІЛ 2. БІОХІМІЧНІ ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ

2.1. Схема перебігу процесів

2.1.1. Схема біохімічних перетворень процесу утворення метану та сірководню в процесі анаеробного зброджування

Основним продуктом анаеробного зброджування є метан, що утворюється в процесі метаногенезу. Метаногенез є багатоетапним процесом, що класифікується залежно від субстрату на ацетокластичний та гідрогенотрофний. Крім цього, є ще метилтрофний шлях, що є найменш поширеним. Субстратом для ацетокластичного метаногенезу є оцтова кислота, для гідрогенотрофного – водень та вуглекислий газ, для метилтрофного – метильовані сполуки.

Найпоширенішим є гідрогенотрофний метаногенез, оскільки він є більш енергетично вигідним для метаногенних археїв [67]. Так для гідрогенотрофного шляху вільна енергія Гіббса становить -131 кДж/моль, а для ацетокластичного -36 кДж/моль, тим не менш 2/3 всього метану утворюється за участі ацетокластичних метаногенів в зв'язку з більшою доступністю ацетату [68].

Як було сказано вище, субстратом для цього процесу виступає водень та вуглекислий газ з яких шляхом біохімічних перетворень в процесі циклу Вульфа утворюється метан. Даний цикл тісно пов'язаний з циклом Вуда-Юнгаля. На рисунку 2.1.1.1 представлено цикл Вульфа, що був названий циклом лише в 2012 році, до цього ж його вважали лінійним процесом перетворень.

Першим етапом є фіксація вуглекислого газу на метанофурані (MFR) за участі 2 протонів та відновленого фередоксину ($\text{Fd}_{\text{red}2+}$). Наступним етапом є перенесення формільної групи на тетрагідрометаноптерин ($\text{CHO-H}_4\text{MPT}$), після чого вона відновлюється через метенільний ($\text{CH=H}_4\text{MPT}$)

					ДП ББ21.11.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата	Біохімічні основи технологічного процесу	Літ.	Аркцш	Аркцшів
Розробив	Неділько О.В.						44	109
Перевірив	Щурська К.О.							
Т. Контр.						КПІ ім. Ігоря Сікорського, ФБТ		
Н. Контр.								
Затверд.	Щурська К.О.							

та метиленовий ($\text{CH}_2\text{-H}_4\text{MPT}$) проміжні продукти до метильної групи ($\text{CH}_3\text{-H}_4\text{MPT}$). $\text{CH=H}_4\text{MPT}$ є попередником для синтезу пуринових основ, а $\text{CH}_2\text{-H}_4\text{MPT}$ використовується для синтезу тимідилату та коферменту А. Після утворення $\text{CH}_3\text{-H}_4\text{MPT}$ шлях розгалужується, звідки незначна частина направляється на синтез метіоніну та ацетил-КоА, це є і відгалуженням до циклу Вуда-Юнгаля.

Далі відбувається перенесення метильної групи з $\text{CH}_3\text{-H}_4\text{MPT}$ на тіолову групу коферменту М з утворенням $\text{CH}_3\text{-S-CoM}$, що пов'язане зі створенням натрієвого електрохімічного потенціалу, енергія якого використовується потім для відновлення ферредоксину ($\text{Fd}_{\text{red}2+}$) за участі водню. $\text{CH}_3\text{-S-CoM}$ реагує з CoB-SH за участі метил коферменту М редуктази з утворенням метану та гетеродисульфиду (CoM-S-S-CoB). Гетеродисульфід розщеплюється за участі водню та цитоплазматичного ферментного комплексу, звідки 2 електрони витрачаються на регенерацію CoB-SH та CoM-SH , а 2 інших для відновлення ферредоксину за допомогою флавін-залежного електронного розгалуження. На цьому етапі цикл замикається, а відновлений ферредоксин використовується повторно для фіксації вуглекислого газу [69].

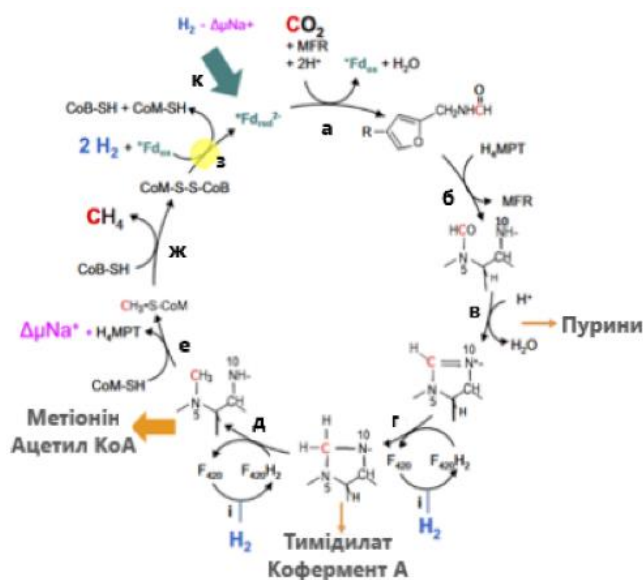


Рисунок 2.1.1.1. Схематичне зображення циклу Вульфа.

Ферменти (відповідно до буквеного позначення з рисунку):

а – формілметанофуран дегідрогеназа; б – формілметанофуран

формілтрансфераза; в – метеніл H_4MPT циклогідролаза; г – метилен H_4MPT дегідрогеназа; д – метилен H_4MPT редуктаза; е – кофермент М редуктаза; ж – метил кофермент М редуктаза; з – електрон-розгалужувальна гідрогеназа-гетеросульфід редуктазний комплекс; і – F_{420} -відновлювальна редуктаза; к - гідрогеназа, що каталізує відновлення фередоксину за участі H_2 [69]

Для ацетокластичного метаногенезу ключовим субстратом виступає оцтова кислота. На початку ацетат перетворюється на ацетил-КоА, де потім за участі ацетил-КоА декарбоксилази ацетильна група розділяється на метильну та карбонільну групи. Метильна група переноситься на H_4MPT з утворенням $\text{CH}_3\text{-H}_4\text{MPT}$ та проходить аналогічний цикл перетворень за участі CoB-SH , CoM-SH та CoM-S-S-CoB , що і під час гідрогенотрофного механізму. Карбонільна група окиснюється до вуглекислого газу, а електрони, що вивільняються використовуються для відновлення фередоксину. Загальний механізм представлено на рисунку 2.1.1.2.

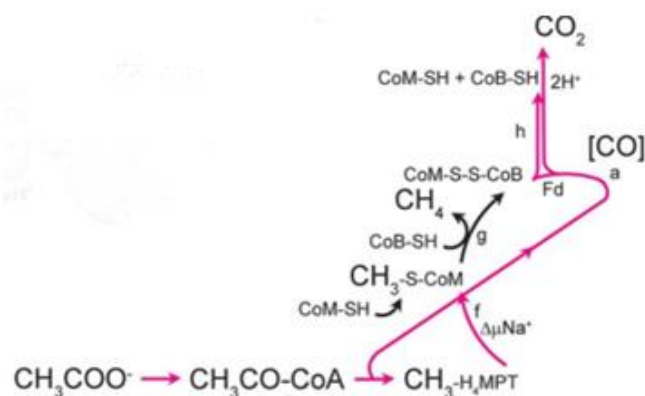


Рисунок 2.1.1.2 Схематичне зображення біохімічних перетворень в ході ацетокластичного метаногенезу [70]

Крім метану, в процесі зброджування утворюється певна частина сірководню з сульфатів за участі сірковідновлювальних мікроорганізмів, переважно *Desulfovibrio* spp. [71]. Для відновлення сульфатів до сірководню бактерії використовують водень та ацетат, в зв'язку з чим виступають конкурентами за субстрат з гідрогенотрофними метаногенами. Крім цього, процес відновлення сульфатів є термодинамічно більш вигідним, ніж метаногенез, де величина вільної енергії Гіббса з використанням для цього

водню становить -151,9 кДж/моль, а з використанням ацетату -47,6 кДж/моль. Також сульфатвідновлювальні мікроорганізми є більш спорідненими до водню, тому за високого вмісту сульфатів та водню у середовищі, утворення сірководню переважатиме. Таким чином, використання в процесі зброджування сировини з підвищеною кількістю сірковмісних сполук спричиняє накопичення сульфатів, що в свою чергу сприяє утворенню сірководню та зменшення вмісту метану в біогазі [72].

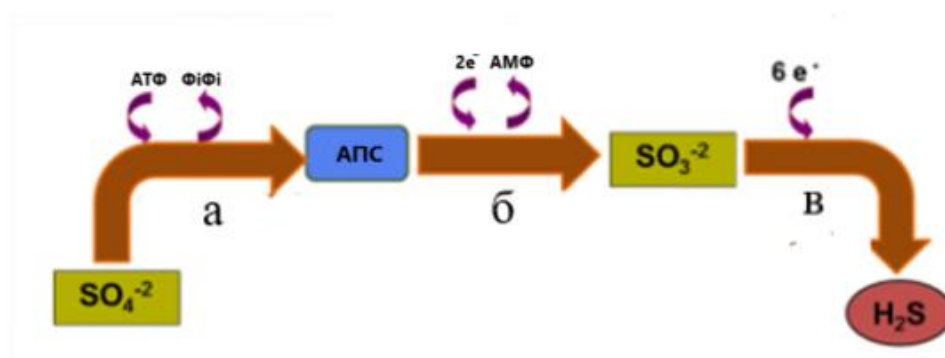


Рисунок 3. Схематичне зображення біохімічного процесу утворення сірководню в процесі анаеробного зброджування

Ферменти (відповідно до буквеного позначення з рисунку):

а – АТФ-сульфурилаза; б – редуктаза; в – бісульфіт редуктаза; АПС – аденозин-5'-фосфосульфат [73]

Загалом, схема процесу відновлення сульфатів наведена на рисунку вище. Спочатку відбувається активація сульфату за участі АТФ-сульфурилази з утворенням аденозинілу сульфату (АПС). Після цього відбувається відновлення аденозинілу сульфату за участі редуктази з виділенням АМФ, та сульфіту, який далі відновлюється за участі бісульфіт редуктази до сірководню. В цілому для процесу утворення сірководню використовується 4 молекули водню. Крім цього, сульфатвідновлювальні бактерії використовують ацетат, як донор електронів та джерело карбону [74].

2.1.2. Схема біохімічних перетворень процесу окиснення сірководню в краплинному біофільтрі

В процесі очищення в крапельних біофільтрах сірководень з біогазу розчиняється у рідкій фазі, що постійно циркулює всередині апарату, та за

					ДП ББ21 11.000 ПЗ	Арк.
						47
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

нейтрального рН перебуває у формі HS^- . Далі відбувається процес його окиснення за участі сіркоокиснювальних бактерій.

Сірководень окиснюється до елементарної сірки за допомогою 2 ферментних комплексів: сульфід-хінон оксиредуктази та флавоцитохром оксиредуктази. Сірководень за участі флавоцитохром оксиредуктази окиснюється з паралельним відновленням цитохрому С в периплазмі. Сульфід-хінон оксиредуктаза зв'язує сірководень та переносить електрони на кофермент ФАД, звідки вони передаються в електрон-транспортний ланцюг в пул убіхінону. Окиснений сірководень перетворюється в елементарну сірку та випадає в осад [75].

Як акцептор електронів використовується кисень, при чому його об'ємна концентрація суттєво впливає на форму кінцевого продукту. Так, за співвідношення $\text{O}_2/\text{H}_2\text{S} > 2$ утворюються переважно сульфати, а за концентрацій $\text{O}_2/\text{H}_2\text{S} < 0,5$ утворюються переважно елементарна сірка [64].

2.2. Характеристика кінцевого продукту

Кінцевим продуктом є газоподібне паливо, а саме біогаз, що відповідає вимогам ДСТУ 7721:2015 Газоподібне паливо. Біогаз. Технічні вимоги та методи контролювання. Відповідно до даного стандарту біогаз – це суміш газів, що утворилася внаслідок анаеробного метанового збродження субстрату і складається з метану (55-75) %, діоксиду вуглецю (25-45) %, сірководню та домішок водню, аміаку, оксидів азоту й інших газів. Вимоги до якості цього біогазу залежать від технології його подальшого використання у котлах, когенераційних установках чи газових плитах для побутових цілей. В даній роботі прийнято спалювання біогазу в когенераційній установці з метою отримання теплової та електричної енергії, що й визначає основні вимоги до його кінцевого складу [76].

Склад біогазу варіюється в залежності від типу сировини, що використовується, та інших параметрів процесу його отримання в залежності від обраної технології. Основними компонентами біогазу є метан (CH_4) і вуглекислий газ (CO_2) та в меншій кількості вода (H_2O), кисень (O_2), азот (N_2),

					ДП ББ21 11.000 ПЗ	Арк.
						48
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

аміак (NH_3), сполуки сірки (H_2S , меркаптани, сульфіді тощо), сполуки кремнію (силоксани, силани), аміаку, галогенвмісні та інші леткі органічні сполуки (далі - ЛОС) [77]

ДСТУ 7721:2015 біогаз, що використовується для отримання теплової та/або електричної енергії повинен відповідати основним фізико-хімічним характеристикам, що приведені в таблиці 2.2.1 [76].

Таблиця 2.2.1. Основні фізико-хімічні характеристики біогазу відповідно до ДСТУ 7721:2015 Газоподібне паливо. Біогаз. Технічні вимоги та методи контролювання та усереднені значення для біогазу з різних типів сировини [76, 77]

Назва показника	Усереднені значення	Біогаз, згідно вимог ДСТУ 7721:2015
Об'ємна частка метану, %	50-75	55-70
Об'ємна частка діоксиду вуглецю, %	19-50	30-47
Об'ємна частка сірководню, %	0,1-1	Не більше ніж 3
Нижча теплотворна здатність, МДж/м ³	20,5-23	20-23
Об'ємна частка кисню, %	<2	0,0-0,5
Уміст аміаку, ppm	<1	0,0-100
Об'ємна частка водню, %	0,3	0,0-0,1
Уміст хлору загального (у перерахунку на Cl, мг/м ³)	-	0,0-5,0

Важливою характеристикою біогазу, як і інших палив є нижча теплотворна здатність – кількість теплоти, що утворюється при повному згорянні палива без врахування теплоти конденсації водяної пари. Бачимо, що для біогазу, згідно ДСТУ, даний показник становить 20-23 МДж/м³. Для порівняння, нижча теплотворна здатність згорання природного газу становить

33,51-35,61 МДж/нм³. Така різниця зумовлена вищим вмістом метану в природному газу, що є його основною горючою складовою (близько 80-98%) [79]. Відповідно, збагачення біогазу до біометану шляхом видалення вуглекислого газу суттєво покращує його теплотворну здатність.

Метан та вуглекислий газ є основними компонентами біогазу проте, як було зазначено вище, метан є його основним горючим компонентом. Утворюються переважно на 4 стадії метаногенезу за участі ацетокластичних та гідрогенотрофних метаногенів. Їх концентрація та співвідношення між ними суттєво залежить від початкового складу і способу обробки сировини, технології зброджування та основних параметрів процесу.

Всі інші компоненти біогазу можна віднести до залишкових або баластних сполук. Збільшення їх концентрації відповідно значно погіршує паливні властивості біогазу. Так, одними з найбільш поширених забруднюючих сполук в біогазі є сполуки сірки, до яких можна віднести сірководень, карбоніл сульфід, диметилсульфід та меркаптани. На біогазових установках постійно здійснюється моніторинг концентрації сірководню в біогазі через його високу корозійну здатність та токсичність. Вимірювання більшістю приладів проводиться в мільйонних частках (ppm). Найвищі показники вмісту сірководню містить біогаз отриманий з відходів тваринного походження, через високу концентрацію сірковмісних білкових сполук, зокрема, вміст H₂S може сягати декілька десятків тисяч мільйонних часток [80].

Сполуки сірки навіть у досить низьких концентраціях є токсичними для людини (можуть викликати подразнення шкіри, слизової оболонки очей та дихальних шляхів, включно з кашлем) та призводять до швидкого зношення і корозійних пошкоджень генераторів, газоводяних теплообмінників, запірно-регулюючої арматури [81]. Також висока концентрація сірководню може спричиняти підкислення мастила в двигунах внутрішнього згорання когенераційної установки та відповідно погіршення його якості [80].

					ДП ББ21 11.000 ПЗ	Арк.
						50
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висока вологість біогазу може спричинити корозію деталей установки. Тому перед подачею в двигун біогаз охолоджується, волога конденсується і видаляється. При цьому видаляються також деякі шкідливі речовини [82].

ЛОС до яких належать алкани, спирти, галогени та ароматичні сполуки, зазвичай містяться в досить низьких концентраціях та не потребують попереднього очищення, за винятком очищення біогазу до біометану, де вміст цих сполук також контролюється [83].

Отже, кінцевий продукт – біогаз повинен відповідати вимогам ДСТУ 7721:2015, що дозволяє використовувати його для отримання теплової та електричної енергії в результаті спалювання в когенераційних установках.

					ДП ББ21 11.000 ПЗ	Арк.
						51
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3. ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

3.1. Матеріали основні і допоміжні

Основні характеристики сировини, матеріалів та напівпродуктів, що використовуються в ході технологічного процесу, а також відповідна НТД, що регламентує їх перевірку наведені в таблиці 3.1.1.

Таблиця 3.1.1 – Характеристика сировини, матеріалів та напівпродуктів

Найменування	Категорія і номер НТД, згідно якого перевіряється сировина	Показники, що обов'язкові для перевірки та їх нормативне значення	Примітки
1	2	3	4
1. Основна сировина			
1.1. Послід курей	ДСТУ 7527:2014 Послід птиці. Технології біологічного перероблення. Загальні вимоги	Показники відповідно до вимог технології: вміст сухої речовини, золи	
1.2. Флотаційний шлам	ЗАКОН УКРАЇНИ Про побічні продукти тваринного походження, не призначені для споживання людиною	Показники відповідно до вимог технології: вміст сухої речовини, золи	
1.3. Солома пшениці	Згідно з технологічним регламентом	Показники відповідно до вимог технології: вміст сухої речовини, золи	
1.4. Побічні продукти тваринного походження	ЗАКОН УКРАЇНИ Про побічні продукти тваринного походження, не призначені для споживання людиною	Показники відповідно до вимог технології: вміст сухої речовини, золи	

					ДП ББ21.11.000 ПЗ		
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата			
Розробив	Неділько О.В.				Технологічна частина		
Перевірив	Щурська К.О.						
Т. Контр.							
Н. Контр.							
Затверд.	Щурська К.О.						
						Літ.	Архиш
							52
						Архивіш	
						109	
						КПІ ім. Ізгоря Сікорського, ФБТ	

2. Допоміжна сировина			
2.1. Вода технічна	ДСТУ 7525:2014 Вода питна. Вимоги та методи контролювання якості	Завислі речовини >1,5 мг/л, вміст вільного хлору 0,3-0,5 мг/дм ³ , рН = 6,5-7,5	
2.2 Розчин NaOH	Згідно технологічного регламенту	Концентрація	
2.3.Розчин сірчаної кислоти	Згідно технологічного регламенту	Концентрація	
2.4 Розчин хлористого натрію	Згідно технологічного регламенту	Концентрація	
3. Матеріали			
3.1. Мішки для гранульованого добрива	ДСТУ EN 277:2022 Мішки для транспортування продовольчої допомоги. Мішки з тканого поліпропіленового полотна (EN 277:1995, IDT)	Відповідно до ДСТУ	
3.2. Цистерни для рідкого добрива	ДСТУ EN 13406:2013 Сільськогосподарські машини. Цистерни та розбризкувальні пристрої для рідких органічних добрив. Вимоги щодо захисту довкілля та методи випробування на точність розбризкування (EN 13406:2002, IDT)	Відповідно до ДСТУ	
4. Напівпродукти			
4.1. Зброджений залишок (дигестат)	ДСТУ CEN/TS 17730:2022 Властивості компосту та дигестату у разі використання як добрива (CEN/TS 17730:2022, IDT)	Відповідно до ДСТУ	
4.2. Розчин сульфату амонію 25%	ДСТУ ISO 3332:2008 Амонію сульфат технічний. Визначення вмісту амонійного азоту	Відповідно до ДСТУ	

	титриметричним методом після дистиляції (ISO 3332:1975, IDT)		
4.3. Сірка елементарна	ДСТУ 2318-93 Сірка та сірковмісні продукти. Терміни та визначення	Відповідно до ДСТУ	
4.4. Біогаз	ДСТУ 7721:2015 Газоподібне паливо. Біогаз. Технічні вимоги та методи контролювання	Відповідно до ДСТУ	

3.2. Контроль виробництва

З метою забезпечення відповідної якості та відповідності вимог національних та міжнародних стандартів отриманих в ході технологічного процесу продуктів проводиться поточний контроль на кожній із стадій виробництва. Перелік відповідних точок та параметрів, що контролюються в ході процесу, а також відповідні норми та методи їх контролю наведені в таблиці 3.2.1.

Таблиця 3.2.1 Точки і параметри контролю виробництва

№ п/п	Найменування стадії процесу, місце заміру параметра або відбору проби	Параметр, що контролюється	Частота контролю	Норми технологічного режиму та допустимі відхилення	Методи контролю параметра, тип приладу
1	ДР 2.2 Фільтрування технологічного повітря	Перепад тиску на фільтрі; ефективність	Постійно	$\Delta P = 250$ Па; $E = 90\%$	Манометр перепаду тиску повітря ELECALL (-500-500 ПА)
2	ДР 2.3 Стиснення технологічного повітря	Тиск стисненого повітря	Постійно	$P = 0,16$ МПа	Манометр електроконтактний МП-3С 250 кПа
3	ДР 4.2. Генерація пари	Температура насиченої водяної пари	Постійно	$T = 133^{\circ}\text{C}$	Термопара ТХА (тип К)
4	ДР 5.1.1 Накопичення посліду курей	Рівень заповнення; тривалість	Постійно	$K_3 = 0,8$; $t = 24$ год	Ультразвуковий датчик рівня ULT30

5	ДР 5.2.1 Накопичення соломи пшениці	Рівень заповнення; тривалість	Постійно	$K_3 = 0,8$; $t = 24$ год	Ультразвуковий датчик рівня ULT30
6	ДР 5.3.1 Накопичення відходів забійного цеху	Рівень заповнення; тривалість	Постійно	$K_3 = 0,8$; $t = 24$ год	Ультразвуковий датчик рівня ULT30
7	ДР 5.3.2 Стерилізація відходів забійного цеху та флотаційного шламу	Температура; тиск; тривалість	Під час кожного циклу стериліза ції	$T = 133^{\circ}\text{C}$; $P = 300$ кПа; $t = 20$ хв	Термопара ТХА (тип К); манометр електроконтактн ий МП-3С 400 кПа
8	ДР 5.4. Накопичення флотаційного шламу	Рівень заповнення; тривалість	Постійно	$K_3 = 0,8$; $t = 24$ год	Ультразвуковий датчик рівня ULT30
9	ТП 6. Змішування сировини для анаеробного зброджування	Температура; вологість; рН; частота перемішування; рівень заповнення	Постійно; рН щодня	$T = 38 \pm 2^{\circ}\text{C}$; рН 6,8-7,4; $n = 40$ об/хв; $W = 92\%$	Термопара ТХА (тип К); потоківий вологомір; автоматичний титратор (для рН); ультразвуковий датчик рівня ULT30
10	ТП 7. Анаеробне зброджування	Температура; вологість; рН; частота перемішування; показник FOS/TAC; тиск; рівень заповнення	Постійно; показник рН та FOS/TAC щодня	$T = 38 \pm 2^{\circ}\text{C}$; рН 6,8-7,4; $n = 40$ об/хв; $W = 92\%$; $P = 2-5$ кПа; FOS/TAC = 0,3-0,4 $K_3 = 0,8$	Термопара ТХА (тип К); потоківий вологомір; автоматичний титратор (для рН та FOS/TAC); манометр електроконтактн ий МП-3С 500 кПа; ультразвуковий датчик рівня ULT30
11	ТП 8. Дозброджування	Температура; вологість; рН; частота перемішування;	Постійно; показник FOS/TAC щодня	$T = 38 \pm 2^{\circ}\text{C}$; рН 6,8-7,4; $n = 40$ об/хв; $W = 92\%$;	Термопара ТХА (тип К); потоківий вологомір;

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДП ББ21 11.000 ПЗ

Арк.

55

		показник FOS/TAC; тиск; рівень заповнення		$P = 2-5$ кПа; FOS/TAC = 0,3-0,4; $K_3 = 0,8$	автоматичний титратор (для рН та FOS/TAC); манометр електроконтактн ий МП-3С 500 кПа; ультразвуковий датчик рівня ULT30
12	ТП 9.1. Очищення біогазу в крапельному біофільтрі	Температура; витрата біогазу; витрата повітря; вміст кисню в суміші з біогазом; вміст сірководню в біогазі	Постійно	$T = 28-30^{\circ}\text{C}$; $V_{\text{біогазу}} =$ 480,3 м ³ /год; $V_{\text{повітря}} = 6,14$ м ³ /год; $C_{\text{H}_2\text{S.п}} = 5000$ ppm $C_{\text{H}_2\text{S.к}} = 150$ ppm	Багатоканальний газоаналізатор постійної дії; термопара ТХА (тип К);
13	ТП 9.2. Збір зрошувального розчину	Температура; рН; витрата на зрошення	Постійно	$T = 28-30^{\circ}\text{C}$; рН 7-8; $V_{\text{зр.р-ну}} = 0,17$ м ³ /год	Термопара ТХА (тип К); промисловий рН-метр рН- 101П; ротаметр FM 0,05
14	ТП 10. Осушення біогазу в чиллерах	Температура біогазу на вході та виході; вміст вологи	Постійно	$T_{\text{вх}} = 28-$ 30 [°] C; $T_{\text{вих}} = 10^{\circ}\text{C}$; $W = 30-50\%$	Термопара ТХА (тип К); потоківий вологомір; багатоканальний газоаналізатор постійної дії
15	ТП 11. Спалювання біогазу в когенераційних установках	Вміст метану; потужність	Постійно	$C_{\text{CH}_4} = 60-$ 65% $P_{\text{електр.}} =$ 1200 кВт; $P_{\text{тепл.}} = 1189$ кВт	Багатоканальний газоаналізатор постійної дії
16	ПВ 12. Механічна сепарація дигестату	Вміст сухих речовин	Щодня	$CP_{\text{тв.фр.}} = 15-$ 20% $CP_{\text{рід.фр.}} = 5\%$	Потоковий вологомір
17	ПВ 13.1 Збір твердої фракції дигестату	Рівень заповнення	Постійно	$K_3 = 0,8$	Ультразвуковий датчик рівня ULT30

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДП ББ21 11.000 ПЗ

Арк.

56

18	ПВ 13.2. Сушіння твердої фракції дигестату	Вміст сухих речовин; температура; насипна щільність	Кожного циклу	$CP_{п.} = 15-20\%$; $CP_{к} = 85-90\%$; $T = 150^{\circ}C$; $\rho_{нас.} = 250-350 \text{ кг/м}^3$	Вологомір лабораторний; термопара ТХА (тип К)
19	ПВ 13.3. Гранулювання твердої фракції	Насипна щільність	Кожного циклу	$\rho_{нас.} = 700-750 \text{ кг/м}^3$	Лабораторний аналіз
20	ПВ 14.1. Збір рідкої фракції дигестату	Рівень заповнення; рН	Постійно	$K_3 = 0,8$; рН 9-10	Ультразвуковий датчик рівня ULT30
21	ПВ 14.2.1 Вилучення аміаку в десорбційній колоні	Температура	Постійно	$T = 50-60^{\circ}C$;	Термопара ТХА (тип К)
22	ПВ 14.2.2. Вловлювання аміаку в абсорбційній колоні	рН; концентрація сірчаної кислоти	Постійно	рН 7; $C_{H_2SO_4} = 30\%$	Промисловий рН-метр рН-101П
23	ПВ 14.3. Упарювання рідкої фракції дигестату	Вміст сухих речовин; температура; тиск	Кожного циклу	$CP_{п.} = 5\%$; $CP_{к} = 25-30\%$; $T = 45-70^{\circ}C$; $P = 10-20 \text{ кПа}$	Вологомір лабораторний; термопара ТХА (тип К); манометр електроконтактний МП-3С 100 кПа;
24	ПМВ 15.1 Пакування та маркування гранул дигестату	Вага; рівень заповнення мішків	Щоразу під час заповнення	$m = 1000 \text{ кг}$; $K_3 = 0,9$	Ваги платформні до 5 тонн; візуальний контроль
25	ПМВ 15.2 Пакування та маркування концентрату дигестату	Об'єм; рівень заповнення цистерн	Щоразу під час заповнення	$V = 1 \text{ м}^3$; $K_3 = 0,9$	Електромагнітний витратомір MFM-2300 MC608 2; візуальний контроль
26	ПМВ 15.3 Пакування та	Об'єм; рівень заповнення цистерн	Щоразу під час	$V = 1 \text{ м}^3$; $K_3 = 0,9$	Електромагнітний витратомір MFM-2300

					ДП ББ21 11.000 ПЗ	Арк.
						57
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

	маркування сульфату амонію		заповненн я		МС608 2; візуальний контроль
--	----------------------------	--	----------------	--	---------------------------------

3.3. Матеріальний баланс

Інформацію про основні сировинні матеріали, допоміжні речовини, кінцеві та напівпродукти наведено в таблиці 3.3.1.

Таблиця 3.3.1 Матеріальний баланс виробництва з отримання біогазу з низьким вмістом сірководню з відходів м'ясопереробки

Використано					Отримано			
Стадія	Назва сировини, матеріалів та напівпродуктів	Кількість			Назва сировини, матеріалів та напівпродуктів	Кількість		
		кг	м ³	шт		кг	м ³	шт
ДР 5	Послід курей	28125			Гомогенізований субстрат	357939		
	Флотошлам	2791						
	Відходи забійного цеху	1786						
	Солома	12500						
	Вода технічна	312737						
Всього:		357939			Всього:	357939		
ТП 7	Гомогенізований субстрат	357939			Біогаз неочищений	11041,6	9221	
					Зброджений залишок	344136		
					Втрати сировини	2761		
Всього:		357939			Всього:	357939		
ТП 8	Зброджений залишок				Біогаз неочищений	2760	2305	
					Зброджений залишок	341376		
Всього:		344136			Всього:	344136		
ТП 9	Біогаз неочищений	13803	1152 7		Біогаз очищений	13715	11429	

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДП ББ21 11.000 ПЗ

Арк.

58

	Поживне середовище	27	27		Сірка елементарна	87		
	Повітря	190	147		Повітря	150		
					Втрати сировини	68		
Всього:		14020			Всього:	14020		
ТП 10	Біогаз очищений	13715	11429		Біогаз осушений	13029	10857	
					Конденсат	686		
Всього:		13715			Всього:	13715		
ТП 12	Зброджений залишок	341376			Тверда фракція	68275,12		
					Рідка фракція	273100,5		
Всього:		341376			Всього:	341376		
ТП 13	Тверда фракція	68275			Гранули дигестату	61448		
					Конденсат	6828		
Всього:		68275			Всього:	68275		
ТП 14	Рідка фракція	273100			Концентрат дигестату	190214		
	Сірчана кислота 30%	15931			Сульфат амонію 25%	25726		
	Технічна вода	8430			Конденсат	81520		
Всього:		297461			Всього:	297461		
ТП 15	Гранули дигестату	61448			Біг-беги з гранулами	61572		62
	Концентрат дигестату	190214			Цистерни з концентратом	200664		190
	Сульфат амонію	25726			Цистерни з сульфатом амонію	26936		22
	Цистерни, 1 м ³	11660		212				
	Поліетиленові мішки (біг-беги), 1000 кг	124		62				
Всього:		289172		274	Всього:	289172		274

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДП ББ21 11.000 ПЗ

Арк.

59

3.4. Опис технологічного процесу

ДР 1. Підготовка обладнання та комунікацій

Перед початком роботи, перед запуском технологічної лінії чи після проведення ремонтних робіт здійснюється візуальний огляд апаратури, трубопроводів, з'єднань, перевірка їх на герметичність та відсутність візуальних пошкоджень.

ДР 2. Підготовка технологічного повітря

Технологічне повітря використовується на стадії збору біогазу в газгольдерах для нагнітання його повітродувками між двома мембранами, для подачі в крапельний біофільтр при очищенні від сірководню, для спалювання біогазу в когенераційних установках, на стадії сушіння твердої фракції дигестату.

ДР 2.1. Забір повітря з атмосфери

Забір атмосферного повітря здійснюється на висоті 10 м над рівнем землі за допомогою системи трубопроводів через повітрозабірник Пз-1.

ДР 2.2. Фільтрування повітря

Після повітрозабірника повітря направляється на фільтрування для очищення від механічних домішок на фільтрах попередньої очистки Ф-2. При цьому з повітря видаляються великі частки пилу розміром 5-10 мкм. Для цього використовуються панельні фільтри грубої очистки класу G4 з ефективністю видалення механічних домішок 90%. Заміна фільтруючого матеріалу здійснюється при перепаді тиску в 250 Па, що контролюється манометрами. Відпрацьовані фільтри направляються на стадію ЗВ 16.

ДР 2.3. Стиснення технологічного повітря

Повітря подається на стиснення до тиску не менше 0,2 МПа. Для цього використовуються повітродувки П-3 з витратою 190 м³/год та тиском на виході 0,16 МПа [84]. Стиснене повітря подається на стадію ТП 9 для нагнітання повітродувками між мембранами газгольдера Г-33 та Г-37, ТП 10.1 для подачі в біофільтр Бф-40 очищення від сірководню, ТП 12 для спалювання в КГУ-50.

					ДП ББ21 11.000 ПЗ	Арк.
						60
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДР 3. Підготовка гарячого теплоносія

В індивідуальному тепловому пункті (котельні) ІТП-4 здійснюється перерозподіл гарячого теплоносія, що утворюється в результаті охолодження двигунів когенераційної установки. Крім цього, здійснюється підігрів гарячої води в теплообмінниках для нагріву повітря в калорифері К-56 перед стрічковою сушаркою С-55. Гарячий теплоносій використовується для підігріву сировини в змішувачі Зм-29 на ТП 6, метантенка М-32 на стадії ТП 7, доброжувача Д-36 на ТП 8, біофільтра Бф-40 на ТП 9.1, для підігріву дигестату перед віддувкою аміаку на ПВ 14.2 та для стрічкової сушарки С-55 на ПВ 13.2. Відпрацьований теплоносій від перелічених стадій використовують повторно. Для поповнення необхідного об'єму води використовують технічну воду зі скважини. Здійснюється контроль температури води.

ДР 4. Підготовка пари на технічні потреби

ДР 4.1. Підготовка технічної пом'якшеної води

Для цього використовується технічна вода, яку попередньо фільтрується на сітчастих фільтрах Ф-6 від механічних домішок та очищується від іонів кальцію та магнію на промислових установках пом'якшення води – фільтрах іонітних проточних ФІПа-І ІО-8 з продуктивністю 130 м3/год, оскільки при нагріванні води зі скважин до високих температур є ризик утворення накипу в парогенераторі П-11. Натрій-катіонітові фільтри містять катіонообмінну смолу, що затримує іони кальцію та магнію, натомість віддаючи іони натрію в розчин. Регенерація фільтрів здійснюється промиванням розчином NaCl зі складу. Пом'якшена вода накопичується в збірнику Зб-9, де здійснюється контроль рівня. Відпрацьовані сітчасті фільтри направляються до ЗВ 16.

ДР 4.2. Генерація пари

Здійснюється підготовка водяної пари з пом'якшеної води в промисловому парогенераторі П-11, що необхідна для подальшого процесу стерилізації відходів м'ясопереробки та флотаційного шламу. Для нагріву використовується електрична енергія від КГУ-50. Здійснюється контроль

					ДП ББ21 11.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

температури 133°C. Готова пара подається в сорочку підігріву котла на стадію ДР 5.3.3, звідки повертається конденсат для повторного використання.

ДР 5. Підготовка сировини для анаеробного зброджування

Процес підготовки сировини передбачає збір та попередню обробку всіх компонентів.

ДР 5.1. Підготовка посліду курей

ДР 5.1.1. Накопичення посліду курей

Послід курей від птахофабрики транспортується вантажівками та накопичується 24 години в приймальному резервуарі Зб-12, що обладнаний датчиками рівня. Здійснюється контроль рівня заповнення резервуару.

ДР 5.1.2. Подрібнення посліду курей

Курячий підстилковий послід містить 60% сухих речовин та подрібнюється за допомогою дробарки Др-14 до частинок розміром не більше 10 мм для підвищення ефективності процесу зброджування та руйнування великих грудок. Послід від дробарки подається в збірник ЗБ-15 та потім шнековим транспортером Ш-16 на стадію ТП 6. Здійснюється контроль розміру частинок.

ДР 5.2. Підготовка соломи пшениці

ДР 5.2.1. Накопичення соломи пшениці

Солома пшениці з сіносковища вантажівками подається у накопичувач соломи Зб-17 протягом 24 годин. Здійснюється контроль рівня заповнення резервуару.

ДР 5.2.2. Подрібнення соломи пшениці

З накопичувача шнековим транспортером Ш-18 солома пшениці подається на подрібнення за допомогою молоткової дробарки Др-19 до частинок розміром 8-10 мм, звідки подрібнена солома направляється у збірник Зб-20 та на етап змішування сировини. Здійснюється контроль розміру подрібненої сировини. Подрібнена солома подається шнековим транспортером Ш-21 до ТП 6.

ДР 5.3. Підготовка відходів м'ясопереробки

					ДП ББ21 11.000 ПЗ	Арк.
						62
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДР 5.3.1. Накопичення відходів забійного цеху

Відходи м'ясопереробки від забійного цеху вантажівками по трубопроводам транспортуються до герметичного контейнера 3б-22, де здійснюється їх накопичення протягом 24 годин. Контейнер для накопичення оснащений механічною мішалкою для періодичного перемішування з метою запобігання утворення кірки та датчиком рівня заповнення. З контейнера здійснюється порційна подача субстрату шнековим транспортером Ш-23 для подрібнення в залежності від добового використання.

ДР 5.3.2. Подрібнення відходів забійного цеху

З накопичувального контейнера відходи шнековим транспортером Ш-23 подаються до подрібнювача Др-24 для їх подрібнення на частинки розміром 10 мм. Здійснюється контроль розміру частинок.

ДР 5.3.3. Стерилізація відходів забійного цеху

Після подрібнення відходи м'ясопереробки здійснюється їх стерилізація протягом 20 хвилин під тиском 0,3 МПа за температури не менше 133°C в герметичному горизонтальному котлі С-25 із сорочкою підігріву. Здійснюється подача пари від парогенератора П-11 від ДР 4.2. Проводиться контроль температури, тиску. Відпрацьована охолоджена вода подається повторно на стадію парогенерації до ДР 4.2. Простерилізовані відходи та флотаційний шлам подають шнековим транспортером Ш-26 на стадію ТП 6.

ДР 5.4. Накопичення флотаційного шламу

Флотаційний шлам від очисних споруд подається в герметичний збірник 3б-27, що оснащений механічною мішалкою для запобігання розшарування. Зі збірника шлам в залежності від витрати поступово подається відцентровим насосом Н-28 до ДР 5.3.3 для стерилізації разом з відходами забійного цеху.

ТП 6. Змішування сировини

Компоненти субстрату від субстрату подаються від ДР 5.1.2, ДР 5.2.2, ДР 5.3.3 у змішувач сировини Зм-29 для гомогенізації та доведення до необхідного ступеня вологості 92%. Розведення здійснюється технічною водою та водою, що утворилась після упарювання дигестату на ПВ 14.3. Проводиться контроль

					ДП ББ21 11.000 ПЗ	Арк.
						63
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

заповнення резервуару, вологості субстрату, температури. З метою забезпечення мезофільного режиму зброджування в реакторах, в змішувачі здійснюється контроль температури та підігрів або охолодження субстрату за необхідності до 33-35°C гарячим теплоносієм від ДР 3. Відпрацьовану воду направляють для повторного використання до ДР 3. В змішувачі встановлено механічні мішалки для перемішування субстрату.

ТП 7. Анаеробне зброджування

Готовий субстрат подається безпосередньо у метантенк М-32 для проведення процесу анаеробного зброджування. Подача субстрату здійснюється періодично за допомогою перекачування відцентровими насосами Н-30 з паралельним вивантаженням такої самої кількості зброженого залишку до ТП 8 в доброжувач Д-36. Періодична подача добового субстрату здійснюється з метою стабільності процесу та попередження перевантаження реактора сировиною. Періодично здійснюється перемішування субстрату механічними мішалками для попередження утворення кірки на поверхні та для рівномірного розподілу субстрату зі частотою 40 об/хв. Режим зброджування мезофільний за температури $38 \pm 2^\circ\text{C}$ в анаеробних умовах. Підігрів метантенку здійснюється за допомогою зміювика, в який подається гарячий теплоносій від ДР 3. Холодний теплоносій подається на стадію ДР 3 для повторного використання.

Щоденно здійснюється контроль рН та співвідношення FOS/TAC вивантаженого зброженого залишку перед подачею першої порції сировини. Постійно відбувається моніторинг температури, тиску та рівня заповнення в реакторі за допомогою датчиків встановлених в реакторі, звідки дані передаються до автоматизованої комп'ютерної системи управління установкою. Також для даного субстрату характерний високий ризик піноутворення, тому встановлюються датчики рівня піни та за потреби вноситься силіконовий піногасник на основі поліметилсилоксану. Два рази на місяць здійснюється вимірювання та контроль вмісту амонійного азоту субстрату в реакторі з метою попередження інгібування процесу. Регулювання

					ДП ББ21 11.000 ПЗ	Арк.
						64
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

стабільності системи через підвищення тиску при подачі сировини в реактор здійснюється за допомогою рухомого газгольдера Г-33.

Зброджений залишок перекачується насосом в доброжувач Д-36, утворений біогаз накопичується в газгольдері Г-33, що розташований безпосередньо над реактором. Здійснюється контроль рівня заповнення газгольдерів, тиску ($P = 0,2-0,5$ МПа). Купол складається з двох мембран, в простір між якими подається повітря від ДР 2.3 повітродувками П-31, що створює жорсткий каркас зверху з рухомою мембраною для накопичення біогазу знизу. Це дозволяє здійснювати регуляцію тиску в газгольдері та загалом в анаеробному реакторі. Склад біогазу вимірюється автоматичними газоаналізаторами, контролюється відсутність в системі кисню. Вимірювання складу біогазу також можливе вручну через спеціальні клапани за допомогою стаціонарного газоаналізатора. На виході з газгольдерів встановлюються лічильники для вимірювання об'єму утвореного біогазу. На випадок аварійних ситуацій для перешкоджання пошкодження газгольдера встановлюється скидний клапан; у випадку надлишкового утворення біогазу, що не спалюється на КГУ-50, його подають до ЗВ 17 для спалювання на факельній установці Ф-75.

ТП 8. Доброджування біомаси

Зброджений залишок, що перекачується з реакторів накопичується в доброжувачі Д-36, що за своєю конструкцією відповідає метантенку, де відбувається його доброжування без подачі свіжої сировини з метою максимального виходу біогазу. Здійснюється контроль всіх параметрів, що і на стадії ТП 7. Періодично здійснюється перемішування субстрату механічними мішалками з частотою 40 об/хв. Утворений біогаз накопичується в газгольдері Г-37 безпосередньо над реактором, що працюють за принципом як в основних метантенках. Дигестат направляється на стадію ПВ 13. Біогаз подається газодувками Г-39 на стадію ТП 9.1 для його очищення.

ТП 9. Очищення біогазу від сірководню

ТП 9.1. Очищення біогазу в крапельному біофільтрі

					ДП ББ21 11.000 ПЗ	Арк.
						65
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Біогаз від газгольдерів від ТП 8 газодувками Г-39 подається для очищення від сірководню на крапельний біофільтр Бф-40 з витратою 480,3 м³/год. Біогаз подається в нижню частину колони, де попередньо при вході змішується з технологічним повітрям від ДР 2.3 з витратою 6,14 м³/год (об'ємна концентрація кисню в отриманій суміші з біогазом становить менше 0,5%, що є безпечним). Перед подачею біогазу та на виході з біофільтра встановлений датчик для вимірювання початкової та кінцевої концентрації сірководню та кисню. Крапельний біофільтр за конструкцією подібний до насадкового абсорбера, де на поверхні насипного завантаження утворюється біоплівка з сіркобактерій роду *Thiobacillus*, що здійснюють окиснення сірководню до елементарної сірки в присутності кисню як акцептора електронів. При цьому спочатку відбувається розчинення сірководню в рідкій фазі на поверхні насипного завантаження, а потім здійснюється його окиснення мікроорганізмами. В якості завантажувального матеріалу використовуються кільця Палля розміром 50×50×5 мм з висотою насадкового шару в біофільтрі 2,5 м. Здійснюється контроль температури на рівні 28-30°C. Підігрів здійснюється гарячим теплоносієм від ДР 3, відпрацьований теплоносій повертають до ДР 3. Регенерація завантаження здійснюється шляхом тимчасового промивання зрошувальним розчином з вищою витратою. Інокуляція біофільтра здійснюється з внесенням комерційних препаратів відповідного роду сіркобактерій та поступового нарощення біоплівки.

ТП 9.2. Збір зрошувального розчину

Зверху насадкового шару постійно здійснюється крапельне зрошення сумішшю рідкої фракції дигестату від ПВ 12 та водопровідної води зі скважин, як поживного середовища. В нижній частині колони здійснюється збір зрошувального розчину в окремий резервуар Зб-44, де здійснюється регуляція рН 7, в разі підкислення середовища здійснюється подача лугу NaOH. Витрата зрошувального розчину становить 1,13 м³/год, де постійно відбувається злив 10% надлишкового розчину з подачею 10% свіжого. Оскільки розчин постійно циркулює всередині біофільтра для запобігання забивання пор завантаження

					ДП ББ21 11.000 ПЗ	Арк.
						66
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

здійснюється постійна подача свіжого середовища зі зливом надлишкового, що відводиться до ПВ 12. Здійснюється контроль витрати зрошувального розчину.

ТП 10. Осушення біогазу в чиллерах

Від біофільтра біогаз по трубопроводах подається в охолоджувальну установку Ч-48 для видалення вологи. Біогаз охолоджується від 28-30°C на вході до температури +10°C, внаслідок чого вода конденсується та відводиться на стадію ТП 6. Здійснюється контроль вмісту вологи 30-50%.

ТП 11. Спалювання біогазу в когенераційних установках

Очищений від сірководню та вологи біогазу трубопроводом газодувками Г-49 подається на спалювання в КГУ-50. Здійснюється подача повітря від ДР 2.3. Здійснюється контроль тиску, складу біогазу автоматичним газоаналізатором. В результаті роботи системи охолодження двигуна КГУ утворюється теплова енергія, що дозволяє здійснювати нагрів води та використання її як гарячого теплоносія для ДР 3. Електрична енергія подається в електромережу. Утворений гарячий теплоносій подається на стадію ДР 3 до ІТП 4 для розподілу на потреби станції.

ПВ 12 Механічна сепарація дигестату

Здійснюється механічне розділення дигестату за допомогою шнекового сепаратора ШС-51 на 2 фракції: рідку та тверду. Рідка фракція з вмістом СР до 5% направляється на стадію ПВ 14.1 в збірники ЗБ-60 дигестату. Тверда фракція з вмістом СР 15-20% подається шнековим транспортером Ш-52 на стадію ПВ 12.2. Здійснюється контроль вмісту сухих речовин у отриманих фракціях.

ПВ 13 Обробка твердої фракції дигестату

ПВ. 13.1 Збір твердої фракції дигестату

Тверда фракція накопичується в спеціальних накопичувачах ЗБ-53 для її подальшого сушіння та гранулювання. Здійснюється контроль заповнення резервуару.

ПВ 13.2 Сушіння твердої фракції дигестату

					ДП ББ21 11.000 ПЗ	Арк.
						67
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Тверда фракція дигестату з вмістом сухих речовин 15-20% після сепарації висушується у стрічковій сушарці С-55 за температури 150°C до вмісту СР 85-90%. Насипна щільність 250-350 кг/м³. Для сушіння використовується технологічне повітря від ДР 2.3, що підігрівається гарячим теплоносієм від ДР 3, в калорифері К-56. Відпрацьований теплоносій подається на стадію ДР 3. Відпрацьоване охолоджене повітря подається повторно в калорифер для нагріву.

ПВ 13.3 Гранулювання твердої фракції дигестату

Після висушування тверда фракція подається шнековим транспортером Ш-57 для пресування в грануляторі Г-58 у форму гранул з насипною щільністю 700-750 кг/м³, що значно спрощує її транспортування та зберігання. Використовується електрична енергія від КГУ-50 від ТП 12. Гранули дигестату направляються на пакування до ПМВ 15.1.

ПВ 14 Обробка рідкої фракції дигестату

ПВ 14.1. Збір рідкої фракції дигестату

Накопичення рідкої фракції здійснюється в збірниках 3б-60. Для наступних стадій необхідне значення рН дигестату становить 9, тому здійснюється подача розчину NaOH зі складу. Даний етап необхідний для переведення амонійного азоту в більш леткий аміак. Контролюється рівень заповнення та рН [85].

ПВ 14.2 Обробка дигестату перед упарюванням

Дигестат містить значну кількість аміаку, що при його упарюванні потрапляє в пару та потім в конденсат. Тому для його відділення використовується віддувка повітрям за технологією амонійного стріпінгу [86].

ПВ 14.2.1 Вилучення аміаку в десорбційній колоні

Попередньо підігрітий в пластинчастому теплообміннику Т-61 дигестат розпилюється в десорбційній колоні С-63, куди знизу також розпилюється повітря, що нагнітається повітродувкою П-64 від ДР 2. Леткий аміак з дигестату вловлюється повітряним потоком та подається на стадію ПВ 14.2. Очищений від аміаку дигестат подається в збірник 3б-65 та далі на стадію

					ДП ББ21 11.000 ПЗ	Арк.
						68
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПМВ 15.2. Здійснюється контроль температури дигестату на вході в апарат 50-60°C.

ПВ 14.2.2 Вловлювання аміаку в десорбційній колоні

Вловлювання аміаку з газового потоку здійснюється в насадковому скрубєрі С-66, куди подається 30% розчин сірчаної кислоти. Відбувається реакція нейтралізації аміаку сульфатною кислотою з утворенням сульфату амонію, що використовується як добриво. Для доведення до необхідної концентрації 25% розчин сульфату амонію розводять технічною водою. Готовий розчин відцентровим насосом Н-68 подається до ПМВ 15.3. Здійснюється контроль рН 7.

ПВ 14.3. Упарювання рідкої фракції дигестату

Рідка фракція дигестату після очищення від аміаку з вмістом СР до 5% подається на упарювання у вакуум-випарну установку з винесеною гріючою камерою. В результаті зниження тиску до 10-40 кПа температура кипіння знижується до 40-75°C, упарений концентрат з вмістом СР 25-30% направляється до ПВ 15.2. Вторинна пара направляється на повторне використання для розведення субстрату до ТП 6, де її охолодження та конденсація відбувається в теплообмінниках. Здійснюється контроль тиску та температури. Концентрат дигестату направляється до ПМВ 15.2.

ПМВ 15. Пакування та маркування отриманих добрив

ПМВ 15.1 Пакування та маркування гранул твердого біодобрива

Отримане тверде біодобриво у вигляді гранул пакується у поліетиленові мішки (біг-беги) по 1000 кг та маркується відповідно до вимог законодавства. Готові запаковані мішки з гранулами подають на склад для зберігання та подальшої утилізації.

ПМВ 15.2 Пакування та маркування концентрованого біодобрива

Концентроване біодобриво від ПВ 14.3 пакується та маркується у цистернах по 1 м³, після чого відправляється на склад для зберігання та подальшої реалізації.

ПМВ 15.3 Пакування та маркування розчину сульфату амонію

					ДП ББ21 11.000 ПЗ	Арк.
						69
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розчин сульфату амонію від ПВ 14.2.2 пакується у цистерни по 1м³ та маркується відповідно до вимог, звідки відправляється на склад для зберігання та подальшої реалізації.

ЗВ 16. Знешкодження відпрацьованих матеріалів та розчинів

Здійснюється збір та відвантаження використаних деталей, інструментів та приладів, відпрацьованих фільтрів від ДР 2.2, ДР 4.1.

ЗВ 17. Аварійне спалювання біогазу на факельній установці

В разі аварійних ситуацій здійснюється спалювання біогазу від ТП 8 на факельних установках Ф-75, до складу яких входять факельні труби, регулююча арматура та сепаратор для збору конденсату. За необхідності спрацьовує запобіжний клапан подачі газу на факел, на який подається іскра для запалювання, здійснюється спалювання біогазу, доки клапан відкритий [87].

					ДП ББ21 11.000 ПЗ	Арк.
						70
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 4. ПІДБІР ТА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЛАДНАННЯ

Вихідні дані

Прийнято розробку біогазової установки для птахофабрики, що спеціалізується на вирощування бройлерних порід курей обсягом 250 000 голів, що вирощують у 10 пташниках по 25 000 в кожному.

4.1. Розрахунок обсягів утвореної сировини

Середній період вирощування бройлерів становить 42 дні [88].

Зазвичай, здійснюється забій відразу всього пташника з перервою в 10-14 днів для обробки приміщень та стерилізації обладнання. Відповідно, протягом року здійснюється в середньому 6,5 циклів вирощування бройлерів на 1 пташник:

$$n = \frac{365}{42 + 14} \approx 6,5 \text{ циклів} \quad (4.1.1)$$

Враховуючи це, протягом року здійснюється 6,5 циклів вирощування бройлерів в 10 пташниках, тобто 65 циклів із сумарною кількістю 1 629 464 курей на рік [89]. Для середньої кількості робочих днів на рік, а саме 250 днів, тривалість одного циклу забою повинна становити 4 дні з врахуванням миття та дезінфекції обладнання [90], де за 1 день здійснюється забій 26 071 голів курей, тобто 1 повний пташник з продуктивністю близько 3 000 голів/годину (робочий день тривалістю 8 годин):

$$n_{\text{днів}} = \frac{250}{6,5 \cdot 10} \approx 4 \text{ дні} \quad (4.1.2)$$

$$P_{\text{денна}} = \frac{1\,629\,464 \cdot 4}{250} = 26071 \frac{\text{голів}}{\text{день}} \quad (4.1.3)$$

$$P_{\text{годинна}} = \frac{26071}{3} = 3259 \frac{\text{голів}}{\text{год}} \quad (4.1.4)$$

Отже, на птахофабриці встановлено 10 пташників та 1 забійний цех з продуктивністю 3 259 голів/годину.

					ДП ББ21.11.000 ПЗ		
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Підбір та характеристика обладнання		
Розробив	Неділько О.В.						
Перевірив	Щурська К.О.						
Т. Контр.							
Н. Контр.							
Затверд.	Щурська К.О.				КПІ ім. Ігоря Сікорського, ФБТ		
					Літ.	Аркцш	Аркцшів
						71	109

В результаті їх діяльності утворюється послід, м'ясні відходи та флотаційний шлам очисних споруд. Оскільки дані відходи утворюються нерівномірно, а протягом року щодня не всі з пташників працюють, розрахунок сировини здійснюємо за рік. Середній річний вихід посліду з одного бройлера становить близько 0,15 кг/добу, що становить за рік [91]:

$$P_{\text{послід,рік}} = 0,15 \cdot 1\,629\,464 = 10265625 \frac{\text{кг}}{\text{рік}} = 10256,6 \frac{\text{т}}{\text{рік}} \quad (4.1.5)$$

Отже, кожного дня необхідно зброджувати таку кількість посліду:

$$P_{\text{послід,доб.}} = \frac{10\,256,6}{365} = 28,1 \frac{\text{т}}{\text{добу}} \quad (4.1.6)$$

Середня кількість відходів, що утворюються при забої птиці становить 25-30% її живої маси, де вага бройлера становить в середньому 2,5 кг [92].

Відповідно, кількість таких відходів від забою одного пташника:

$$n = 2,5 \cdot 0,25 \cdot 25000 = 15625 \text{ кг} \quad (4.1.7)$$

Загальна кількість таких відходів на рік:

$$n = 15625 \cdot 65 = 1\,018\,415 \text{ кг} = 1\,018 \frac{\text{т}}{\text{рік}} \quad (4.1.8)$$

В зв'язку з нерівномірністю здійснення забою, частина відходів накопичується в спеціальних контейнерах, звідки поступово подається на зброджування. Відповідно, усереднивши даний показник на рік, враховуючи безперервну роботу біогазового комплексу:

$$P_{\text{відходи}} = \frac{1\,018}{365} \approx 2,8 \frac{\text{т}}{\text{добу}} \quad (4.1.9)$$

Вихід флотаційного шламу становить близько 1-2% загальної кількості утворених стічних вод. В середньому для забою одного бройлера використовується 20 л води, де для забою 1 пташника використовують:

$$n = 20 \cdot 25000 = 500000 \text{ л} = 500 \text{ м}^3 \quad (4.1.10)$$

З яких флотаційний шлам становить:

$$n_{\text{фл.шлам}} = 500 \cdot 0,02 = 10 \text{ м}^3 \quad (4.1.11)$$

Відповідно в результаті забою всіх пташників протягом року утворюється:

					ДП ББ21 11.000 ПЗ	Арк.
						72
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$n = 65 \cdot 10 = 651,8 \frac{\text{м}^3}{\text{рік}} \quad (4.1.12)$$

Усереднивши даний показник та прийнявши усереднену густину 1 т/м^3 , продуктивність становить:

$$P_{\text{фл.шлам}} = \frac{651,8}{365} \approx 1785,7 \frac{\text{м}^3}{\text{день}} = 1,8 \frac{\text{т}}{\text{добу}} \quad (4.1.13)$$

Отже, загальна кількість відходів, що необхідно зброджувати за день становить:

$$P_{\text{заг}} = 28,1 + 2,8 + 1,8 = 32,7 \frac{\text{т}}{\text{добу}} \quad (4.1.14)$$

Отримані відходи м'ясопереробки характеризуються низьким співвідношенням C/N, де для відходів бойні 3-4, для птахівництва становить 7-10, для флотаційного шламу – 25-40. Загальне співвідношення в суміші таких відходів розраховується за вмістом сухої речовини та відсотковим вмістом Нітрогену і Карбону в кожній [93].

Таблиця 4.1.1 Вміст Карбону та Нітрогену в сировині [94, 95, 96]

Тип сировини	Загальний органічний Карбон, % СР	Загальний органічний Нітроген, % СР
Послід курей	40,00	3,00
Відходи забійного цеху	60,24	2,12
Флотаційний шлам	55,51	7,04
Солома пшениці	75,00	0,79

Проведемо розрахунок співвідношення C:N згідно формули, наведеної нижче:

$$\frac{C}{N} = \frac{P_1(\text{СР} \cdot \text{ТОС}) + P_2(\text{СР} \cdot \text{ТОС}) + \dots + P_n(\text{СР} \cdot \text{ТОС})}{P_1(\text{СР} \cdot \text{ТОН}) + P_2(\text{СР} \cdot \text{ТОН}) + \dots + P_n(\text{СР} \cdot \text{ТОН})} \quad (4.1.15)$$

Де P_1, P_2, P_n – маса сировини, т; СР – вміст сухих речовин, %; ТОС – загальний органічний карбон, у % перерахунку на СР; ТОН – загальний органічний азот, у перерахунку на СР.

$$\frac{C}{N} = \frac{P_{\text{послід}}(0,6 \cdot 0,4) + P_{\text{відходи}}(0,25 \cdot 0,6) + P_{\text{шлам}}(0,35 \cdot 0,55)}{P_{\text{послід}}(0,6 \cdot 0,05) + P_{\text{відходи}}(0,25 \cdot 0,02) + P_{\text{шлам}}(0,35 \cdot 0,07)} =$$

$$\frac{28,1 \cdot (0,6 \cdot 0,4) + 2,8 \cdot (0,25 \cdot 0,6) + 1,8 \cdot (0,35 \cdot 0,55)}{28,1 \cdot (0,6 \cdot 0,03) + 2,8 \cdot (0,25 \cdot 0,02) + 1,8 \cdot (0,35 \cdot 0,07)} =$$

$$= \frac{7,2}{0,5} \approx 14,4 \quad (4.1.16)$$

Отже, співвідношення C:N у відходах птахокомплексу становить близько 14,4:1. Для даного проєкту обрано співвідношення C:N 25:1, відповідно потрібно додати близько 12 тонн Карбону в сухій речовині для урівноваження балансу. Оскільки, вміст СР в соломі пшениці становить 88%, тоді її об'єм становить 8 тонн. Перевіримо розрахунок:

$$\frac{C}{N} = \frac{14,4 + 12,5 \cdot (0,88 \cdot 0,85)}{0,5 + 12,5 \cdot (0,88 \cdot 0,0079)} = \frac{15,453}{0,611} \approx 25,29 \quad (4.1.17)$$

Отже, кількість щоденного субстрату для анаеробного зброджування становить:

- курячий послід – 28,1 т/добу;
- відходи забійного цеху – 2,8 т/добу;
- флотаційний шлам – 1,8 т/добу;
- солома пшениці – 12,5 т/добу.

Вміст сухої, сухої органічної сировини, потенціал виходу біогазу для кожного субстрату взято з теоретичних даних згідно таблиці 1.1.2.2 (розділ 1, пункт 1.1.2).

Звідки, загальний об'єм сировини становить:

$$V_{\text{заг}} = 28,1 + 2,8 + 1,8 + 12,5 = 45,2 \frac{\text{т}}{\text{добу}} \quad (4.1.18)$$

Загальний вміст сухої речовини становить:

$$V_{\text{загСР}} = 28,1 \cdot 0,6 + 2,8 \cdot 0,25 + 1,8 \cdot 0,035 + 12,5 \cdot 0,88 = 28,6 \text{ т} \frac{\text{СР}}{\text{добу}} \quad (4.1.19)$$

Загальний вміст сухої органічної речовини становить:

$$V_{\text{загСОР}} = 28,1 \cdot 0,6 \cdot 0,75 + 2,8 \cdot 0,25 \cdot 0,22 + 1,8 \cdot 0,035 \cdot 0,8 + 12,5 \cdot$$

$$\cdot 0,88 \cdot 0,9 = 22,8 \text{ т} \frac{\text{СОР}}{\text{добу}} \quad (4.1.20)$$

					ДП ББ21 11.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		74

Розрахуємо вологість отриманого субстрату:

$$W_{\text{сер}} = 100 \cdot \left(1 - \frac{V_{\text{сух}}}{V_{\text{заг}}}\right) = 100 \cdot \left(1 - \frac{28,6}{45,2}\right) = 36,7\% \quad (4.1.21)$$

Прийнята у проєкті вологість субстрату для зброджування становить 92%, відповідно необхідно перед зброджуванням здійснювати розведення субстрату водопровідною водою. Розрахуємо об'єм води необхідної для розведення:

$$\begin{aligned} & 28,6 \text{ т/добу} - 8 \% \\ & x \text{ т/добу} - 100 \% \\ & x = \frac{28,6 \cdot 1}{0,08} = 357,5 \frac{\text{т}}{\text{добу}} \end{aligned} \quad (4.1.22)$$

Звідки, об'єм води (приймаємо, що густина води становить 1000 кг/м³):

$$V_{\text{води}} = 357,5 - 45,2 = 312,3 \text{ м}^3 = 312,3 \text{ т} \quad (4.1.23)$$

Отже, на стадії змішування субстрату перед подачею в метантенк необхідно подати додатково 312,3 м³ води для досягнення необхідної вологості субстрату.

4.2. Розрахунок виходу біогазу та необхідної кількості метантенків, доброджувачів

Добова кількість біомаси згідно розрахунку з п.1 становить 45,2 т/добу та 241 т/добу води.

Робочий об'єм метантенка визначається за формулою:

$$V_{\text{мет}} = \frac{100 \cdot V_{\text{заг.}}}{D} = \frac{100 \cdot 357,5}{5} = 7150 \text{ м}^3 \quad (4.2.24)$$

де D - добова доза завантаження осаду в метантенк, % , приймаємо 1/20, тобто 5% (добова доза завантаження залежить від часу утримання сировини в реакторі, приймаємо 20 діб, тоді D = 1/20) [97]; V_{заг} – загальна витрата субстрату, 357,5 м³/добу [п.4.1].

Приймаємо режим зброджування – мезофільний.

Кількість метантенків приймається не менше двох, обидва робочі.

					ДП ББ21 11.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		75

Приймаються 3 метантенки за типовим проєктом компанії ZORG Biogas, а саме сталеві емальовані з об'ємом 2448 м³, діаметром 23,05 м та висотою 5,87 м [98].

Загальний об'єм метантенків становить:

$$W_{\text{заг}} = 3 \cdot 2448 = 7344 \text{ м}^3 \quad (4.2.25)$$

Вихід біогазу розраховуємо за потенціалом виходу біогазу за добу для кожного типу сировини [99] за формулою:

$$V_{\text{біогаз}} = \sum_{i=1}^x V_{\text{COP}i} \cdot P_i \quad (4.2.26)$$

Де $V_{\text{COP}i}$ – об'єм сировини, т COP/добу; P_i – потенціал виходу біогазу для даного типу сировини, м³/т COP; i – кількість типів сировини.

$$\begin{aligned} V_{\text{біогаз}} &= 12,7 \cdot 425 + 0,2 \cdot 900 + 0,05 \cdot 900 + 9,9 \cdot 600 = \\ &= 11526,5 \text{ м}^3 / \text{добу} \end{aligned} \quad (4.2.27)$$

Під час зброджування 80% всього біогазу утворюється в основних реакторах та 20% в доброжувачах, в які надходить лише зброджений залишок. Для розрахунку об'єму доброжувачів приймемо як субстрат – дигестат з основних реакторів. Проте, необхідно врахувати масові втрати біогазу в реакторах, тобто 80% від загального виходу. Густина біогазу становить близько 1,22 кг/м³, тоді маса 80% від загального об'єму [100]:

$$m_{\text{біогазу}} = 11526,5 \cdot 1,22 \cdot 0,8 = 11285 \frac{\text{кг}}{\text{добу}} = 11,29 \frac{\text{т}}{\text{добу}} \quad (4.2.28)$$

Відповідно, об'єм збродженого залишку після первинних реакторів становить:

$$V_{\text{збр.зал.}} = 357,5 - 11,29 = 346,2 \frac{\text{т}}{\text{добу}} \quad (4.2.29)$$

Далі проведемо розрахунок за тим принципом, що і первинні реактори, проте з меншою добовою дозою завантаження, оскільки субстрат частково зброджений:

$$V_{\text{мет}} = \frac{100 \cdot V_{\text{заг.}}}{D} = \frac{100 \cdot 346,2}{10} = 3462 \text{ м}^3 \quad (4.2.30)$$

					ДП ББ21 11.000 ПЗ	Арк.
						76
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Приймається 1 доброжувач за типовим проектом компанії ZORG Biogas, а саме сталеві емальовані з робочим об'ємом 3491 м³, діаметром 27 м та висотою 6,6 м.

4.3. Розрахунок крапельного біофільтра

Для розрахунку біофільтра необхідно визначити початковий вміст сірководню в біогазі. Загальна витрата біогазу становить 11526,5 м³/добу, згідно довідникових даних вміст сірководню в біогазі після переробки відходів птахокомплексів становить 5000 ppm (~0,5%). Для спалювання в КГУ максимально допустиме значення вмісту сірководню становить не більше 150 ppm [101].

Основними параметрами краплинних біофільтрів є навантаження за забруднювачем (з англ. inlet load), що показує масу сірководню, яка надходить в одиницю об'єму завантаження (фільтрувального шару) за годину; ефективність видалення сірководню (з англ. Removal Efficiency); очисна здатність (з англ. Elimination Capacity), що характеризує кількість сірководню, що можна очистити в даному біофільтрі; час утримання в порожньому шарі завантаження (з англ. Empty Bed Retention Time) [102].

Для початку необхідно перевести концентрацію сірководню в г/м³ за стандартних умов (0°C, 1 атмосфера):

$$C_{\text{п}} = \frac{C_{\text{ppm}} \cdot M_{\text{H}_2\text{S}}}{V_m} = \frac{5000 \cdot 34}{22,4 \cdot 1000} = 7,59 \text{ г/м}^3 \quad (4.3.31)$$

Де C_{ppm} – концентрація сірководню виражена в мільйонних частках; $M_{\text{H}_2\text{S}}$ – молярна маса сірководню, г/моль; V_m – молярна частка газу за нормальних умов л/моль.

Необхідна концентрація сірководню на виході з апарату:

$$C_{\text{к}} = \frac{150 \cdot 34}{22,4 \cdot 1000} = 0,23 \text{ г/м}^3 \quad (4.3.34)$$

Визначимо необхідну ефективність очищення в біофільтрі для досягнення необхідної для спалювання концентрації сірководню [102]:

$$E = \frac{C_{\text{п}} - C_{\text{к}}}{C_{\text{п}}} \cdot 100\% = \frac{7,59 - 0,23}{7,59} \cdot 100\% = 97\% \quad (4.3.35)$$

					ДП ББ21 11.000 ПЗ	Арк.
						77
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розрахуємо погодинний об'єм утвореного біогазу:

$$V_{\text{біогаз.год}} = \frac{V_{\text{біогаз}}}{24} = \frac{11526,5}{24} = 480,3 \text{ м}^3/\text{год} \quad (4.3.36)$$

Визначимо об'єм завантаження біофільтра відповідно до погодинного обсягу сірководню в біогазі:

$$V_{\text{зав}} = \frac{V_{\text{біогаз.доб}} \cdot C_{\text{п}}}{EC} \quad (4.3.37)$$

Де, $V_{\text{зав}}$ – об'єм завантаження біофільтра, м^3 ; $V_{\text{біогаз.доб}}$ – об'єм біогазу, $\text{м}^3/\text{год}$; $C_{\text{п}}$ – початкова концентрація сірководню, $\text{г}/\text{м}^3$. Приймаємо значення очисної здатності $EC = 135 \text{ г}/\text{м}^3 \cdot \text{год}$ при ефективності очищення 98% [103].

Тоді

$$V_{\text{зав}} = \frac{480,3 \cdot 7,59}{135} = 27 \text{ м}^3 \quad (4.3.38)$$

При цьому час утримання в шарі завантаження становить:

$$EBRT = \frac{V_{\text{зав}}}{V_{\text{біогаз.доб}}} = \frac{27}{480,3} = 0,056 \text{ год} = 3,36 \text{ хв} = 201,6 \text{ с}$$

Дане значення дозволяє здійснити очищення біогазу з ефективністю до 97% [104].

Геометричні параметри колони розраховуються за прикладом розрахунку насадкового абсорбера, що за своєю конструкцією відповідає біотриклінг фільтру.

Як насадку було прийнято використання кільця Паля поліпропіленові розмірами $50 \times 50 \times 5 \text{ мм}$, що відповідно до довідкових значень мають питому поверхню насадки $\sigma = 110 \text{ м}^2/\text{м}^3$ та вільний об'єм насадки $\epsilon_c = 0,93 \text{ м}^3/\text{м}^3$ [105].

Розрахункова площа поперечного перерізу колони з умови поверхневої швидкості газу, де $w_{\text{біогаз}}$, оптимальні значення для даного типу фільтрів становить $0,1-0,15 \text{ м}/\text{с}$, приймається $0,12 \text{ м}/\text{с}$:

$$A = \frac{V_{\text{біогаз.с}}}{w_{\text{біогаз}}} = \frac{0,133}{0,12} = 1,1 \text{ м} \quad (4.3.39)$$

Де $V_{\text{біогаз.с}}$ – об'ємна витрата біогазу, $\text{м}^3/\text{с}$.

Розрахуємо об'ємну витрату біогазу за секунду:

					ДП ББ21 11.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		78

$$V_{\text{біогаз.с}} = \frac{V_{\text{біогаз.год}}}{3600} = \frac{480,3}{3600} = 0,133 \text{ м}^3/\text{с} \quad (4.3.40)$$

Розрахуємо діаметр колони за формулою:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1,1}{3,14}} = 1,18 \text{ м} \quad (4.3.41)$$

Приймається діаметр обичайки D зі стандартного ряду 1,2 м [105].

Уточнена площа поперечного перерізу:

$$A_{\text{факт}} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 1,2^2}{4} = 1,13 \text{ м} \quad (4.3.42)$$

Уточнена поверхнева швидкість газу:

$$w_{\text{біогаз.факт.}} = \frac{V_{\text{біогаз.с}}}{A_{\text{факт}}} = \frac{0,133}{1,13} = 0,117 \frac{\text{м}}{\text{с}} \quad (4.3.43)$$

Розрахуємо висоту насадки шару за методом висоти одиниці переносу (ВОП) та числа одиниці переносу (ЧОП).

Число одиниці переносу:

$$N_g = \ln \frac{C_{\text{п}}}{C_{\text{к}}} = \ln \frac{7,59}{0,23} = 3,49 \quad (4.3.44)$$

Середня висота одиниці переносу для обраних кілець Паля та даної системи становить $h_g = 0,65 \text{ м}$.

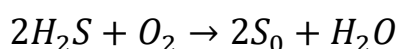
Звідки розрахункова висота насадкового шару становить:

$$H_{\text{розр}} = N_g \cdot h_g = 3,49 \cdot 0,65 = 2,27 \text{ м} \quad (4.3.45)$$

Враховуючи коефіцієнт 10% на можливу нерівномірність зрошення форсунками біля стінок апарату, приймаємо остаточну висоту шару насадки [106, 107, 108]:

$$H_{\text{розр}} = 2,27 + (2,27 \cdot 0,1) = 2,497 \approx 2,5 \text{ м} \quad (4.3.46)$$

Витрата повітря розраховується згідно стехіометрії процесу окиснення сірководню:



Молекулярна маса сірководню 34 г/моль, відповідно для перетворення 2 моль сірководню необхідно 1 моль кисню, тобто для окиснення 68 г сірководню необхідно 32 г кисню.

Маса сірководню, що очищується в апараті за годину становить:

$$M_{H_2S} = V_{\text{біогаз.год}}(C_{\text{п}} - C_{\text{к}}) = 480,3(7,59 - 0,23) = 3535 \frac{\text{г}}{\text{год}} \quad (4.3.47)$$

Відповідно для окиснення такої кількості сірководню протягом години необхідно здійснювати подачу кисню в такій кількості:

$$M_{O_2} = \frac{3535 \cdot 32}{68} = 1663,5 \frac{\text{г}}{\text{год}} = 1,663 \frac{\text{кг}}{\text{год}} \quad (4.3.48)$$

Густина повітря за нормальних умов становить 1,29 кг/м³. Оскільки аерація здійснюється повітрям, об'ємна частка кисню в повітрі становить 21% [109].

Тоді об'ємна витрата повітря становить:

$$V_{\text{повітря}} = \frac{M_{O_2}}{0,21 \cdot \rho_{\text{повітря}}} = \frac{1,663}{0,21 \cdot 1,29} = 6,14 \frac{\text{м}^3}{\text{год}} \quad (4.3.49)$$

Витрата рідини для зрошування становить:

$$V_{\text{рідини}} = q_{\text{зр}} \cdot A_{\text{факт}} = 0,15 \cdot 1,13 = 0,17 \frac{\text{м}^3}{\text{год}} \quad (4.3.50)$$

Де $q_{\text{зр}}$ - оптимальна щільність зрошення, приймається 0,15 м²/м³·год.

Враховуючи, що протягом години утворюється 3,5 кг елементарної сірки, частина розчину постійно відводиться, приймаємо постійне внесення 10% свіжого розчину протягом години та видалення 10% для перешкоджання забивання пор фільтру та постійного видалення сірки з апарату.

					ДП ББ21 11.000 ПЗ	Арк.
						80
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ОХОРОНА ДОВКІЛЛЯ

Технологічний процес отримання біогазу з відходів м'ясопереробки здійснюється на біогазових комплексах безпосередньо поруч з птахопереробним підприємством та включає значну кількість факторів та чинників, що можуть становити небезпеку як для здоров'я людини, так і для навколишнього середовища.

Біогаз – безбарвний горючий газ, що характеризується високою токсичністю та вибухонебезпечністю. Неочищений біогаз в зв'язку з вмістом сірководню може спричинити задишку, нудоту, втрату свідомості, подразнення слизових та навіть смерть за високої концентрації. Очищений біогаз також становить небезпеку через нестачу кисню, а метан пригнічує роботу центральної нервової системи та викликає порушення координації рухів. Відповідно, при роботі з біогазом основним джерелом небезпеки є його токсичність та вибухонебезпечність [110].

Також, небезпечні ситуації, що можуть виникнути під час експлуатації біогазової установки:

- витік біогазу з місць його збору, розподілу, очищення чи спалювання;
- витік з резервуарів зберігання, змішувача чи біореакторів сировини для зброджування;
- високий ризик утворення вибухонебезпечних сумішей біометану з повітрям;
- високий ризик отруєння сірководнем та вуглекислим газом в результаті витоку біогазу;
- підвищений рівень шуму в окремих частинах установки [111].

Крім цього, існує підвищений ризик виникнення небезпечних ситуацій в зв'язку з роботою з обладнанням, що працює під тиском, електричними приладами, трубопроводами та обертовими частинами [110].

					ДП ББ21.11.000 ПЗ		
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата			
Розробив	Неділько О.В.				Охорона праці та охорона довкілля	Літ.	Аркцш
Перевірив	Щурська К.О.						Аркцшів
Т. Контр.							81
Н. Контр.							109
Затверд.	Щурська К.О.					КПІ ім. Ізгоря Сікорського, ФБТ	

Небезпеку для навколишнього середовища становить витік газових або ж рідких викидів, таких як біогаз з усіма небезпечними компонентами та дигестат. Це може спричинити викиди парникових газів в атмосферу, забруднення навколишньої екосистеми та водних джерел, загибель флори та фауни, розповсюдження потенційно небезпечних для людини мікроорганізмів [112].

Таким чином, робота на БГУ має суворо контролюватись з дотриманням відповідних правил та норм. Працівники, що працюють на БГУ повинні бути старше 18 років та обов'язково проходити щорічний медичний огляд, інструктажі з охорони праці і безпеки життєдіяльності, суворо дотримуватись всіх зазначених правил та робочих інструкцій. При розробці проєктів БГУ необхідно впроваджувати спеціальні заходи безпеки при роботі виробничого персоналу відповідно до чинного законодавства України

Всі БГУ повинні бути обладнані системами аварійного захисту з відповідними датчиками і відключенням в разі низького або високого тиску, перегріву системи, витоку газів, пожежі, збою в роботі вентиляційних систем. Зона діаметром 1 м навколо реакторів та 5 м навколо газгольдерів вважається вибухонебезпечною, тому все електричне обладнання та техніка виконуються вибухозахищені. По всій території станції встановлюються засоби пожежогасіння [110].

Всі приміщення повинні бути обладнані вентиляційною системою та регулярно провітрюватись. Регулярно здійснюється перевірка газових труб на герметичність візуально, витік газу перевіряють за допомогою мильної суміші. Реактор обладнують гідрозатворами та засувками для скиду біогазу в разі надлишкового тиску в системі. Все електричне обладнання повинно бути заземлене [111].

Системи збору біогазу мають бути стійкими до механічного навантаження та обов'язково під'єднані до аварійної факельної установки спалювання біогазу.

					ДП ББ21 11.000 ПЗ	Арк.
						82
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Системи збору дигестату, його рідкої та твердої фракції повинні бути герметичними з метою запобігання викиду парникових газів, витоку в ґрунт чи водойми, запобігання поширення неприємних запахів та токсичних летких речовин.

Під час пусконаладжувальних чи ремонтних робіт безпосередньо в зоні всередині спорожненого біореактора необхідно використовувати засоби індивідуального захисту зі страхуванням та в кількості не менше 2 осіб, наглядаючого та спостерігаючого. Перед цим обов'язково здійснюється провітрювання приміщення та контроль вмісту кисню, сірководню, метану в реакторі [112].

Крім зазначених вище правил та норм техніки безпеки, під час роботи на біогазовому комплексі необхідно дотримуватись правил охорони праці при роботі з посудинами, що працюють під тиском. Всі апарати, що працюють під тиском обов'язково обладнують манометрами для вимірювання тиску та встановлюють запобіжні клапани, запірну та запірно-регулювальну арматуру. Перед їх запуском проводять гідравлічні випробування. Робота парових котлів здійснюється відповідно до НПАОП 0.0011.08194. «Правила будови і безпечної експлуатації парових та водогрійних котлів».

Під час установа та в ході експлуатації когенераційної установки необхідно забезпечити ізоляцію всіх проводів та з'єднань, а також обов'язкове заземлення. Постійно здійснюється перевірка справності та відсутності пошкоджень обладнання [113].

В ході технологічного процесу також використовуються сильні кислоти такі, як сірчана кислота 30%. Під час роботи з нею необхідно суворо дотримуватись правил техніки безпеки, використовувати засоби індивідуального захисту з обов'язковим захистом органів дихання, очей та шкіри. Сірчана кислота повинна зберігатись в закритих гумованих або ж футерованих ємностях, що виготовлені зі сталі. Приміщення для зберігання повинні бути сухими, добре вентильованими та захищеними від прямих сонячних променів [114]

					ДП ББ21 11.000 ПЗ	Арк.
						83
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

В ході виконання дипломного проєкту з розробки технології отримання біогазу з низьким вмістом сірководню з відходів м'ясопереробки було:

1. Обґрунтовано вплив таких основних характеристик сировини, як рН, співвідношення C:N, вміст сухих та сухих органічних речовин, потенціал виходу біогазу та біометану з одиниці такої сировини, на оптимальний підбір та розробку технології анаеробного зброджування
2. Проведено аналіз джерел утворення відходів м'ясопереробки птахопереробних комплексів, їх основних характеристик та особливостей складу. Для балансування співвідношення C:N в межах 25-30:1 прийнято використання соломи пшениці як ко-субстрату.
3. Проведено аналіз сучасних технологій отримання біогазу. Відповідно до здійсненого аналізу було обрано технологію отримання біогазу проточним методом за мезофільного режиму при температурі $38 \pm 2^\circ\text{C}$ в метантенках з використанням доброджувачів для максимального виходу біогазу. Запропоновано використання двомембранних газгольдерів розташованих безпосередньо над реактором для збору біогазу, а також впровадження для осушення біогазу в чиллерах та його спалювання в когенераційних установках з отриманням теплової та електричної енергії.
4. Проведено аналіз сучасних технологій знесірчення біогазу, а саме хімічних, фізичних та біологічних методів. Відповідно до аналізу, було прийнято використання біологічного знесірчення з використанням краплинних біофільтрів з отриманням елементарної сірки. Біологічним агентом виступають аеробні сіркоокиснювальні бактерії *Thiobacillus thioparus*, що утворюють біоплівку на поверхні насипного завантаження біофільтра. Передбачено постійну циркуляція зрошувального розчину зі

					ДП ББ21.11.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Висновки	Літ.	Аркш	Аркшів
Розробив	Неділько О.В.						84	109
Перевірив	Щурська К.О.					КПІ ім. Ізгоря Сікорського, ФБТ		
Т. Контр.								
Н. Контр.								
Затверд.	Щурська К.О.							

збірника в біофільтр з паралельним вилученням надлишкового розчину та подачею свіжого.

5. На основі проведеного аналізу визначено, що ключовими під час анаеробного зброджування є 4 основні стадії метаногенезу, які здійснюється консорціумом гідролітичних, ацетогенних та метаногенних мікроорганізмів. При цьому основними біохімічними механізмами утворення метану в ході анаеробного зброджування є ацетокластичний та гідрогенотрофний метаногенез. Встановлено, що біохімічний процес утворення сірководню в ході анаеробного зброджування здійснюється за участі мікроорганізмів *Desulfovibrio spp.* переважно шляхом відновлення сульфатів. Механізм знесірчення біогазу в крапельному біофільтру полягає в окисненні сірководню за участі аеробних сіркоокиснювальних мікроорганізмів *Thiobacillus thioparus*.
6. Розроблено технологічну та апаратурну схеми технології отримання біогазу з низьким вмістом сірководню з відходів м'ясопереробки, що передбачає здійснення процесу анаеробного зброджування в метантенках та доброджувачах, використання технології біологічного знесірчення біогазу в крапельних біофільтрах та комплексну переробку дигестату з отриманням цінних біодобрив, а саме гранул, рідкого концентрату та розчину сульфату амонію.
7. Проведено розрахунок основної кількості субстратів, що утворюються в результаті діяльності птахокомплексу, та відповідно сировини, що використовується для анаеробного зброджування. Встановлено необхідну кількість ко-субстрату соломи пшениці для отримання оптимального співвідношення C:N=25:1 та технічної води для отримання вологості субстрату 92%. Відповідно до обсягу субстрату прийнято використання 3 метантенків та 1 доброджувача. Для біологічного знесірчення розраховано крапельний біофільтр з висотою завантаження 2,5 м та діаметром апарату 1,2 м. Ефективність очищення сірководню в апараті становить 97%.

					ДП ББ21 11.000 ПЗ	Адк.
Зм.	Адк.	№ докум.	Підпис	Дата		85

8. Відповідно до проведеного розрахунку виконано креслення загального вигляду крапельного біофільтра на аркуші формату А1. Запропоновано використання поліпропіленових кілець Палля як насадки для завантаження біофільтра та зрошення розчином води та рідкої фракції дигестату.
9. Охарактеризовано основні вимоги та правила щодо безпечної експлуатації біогазових комплексів з метою забезпечення необхідних умов праці та відсутності негативного впливу на навколишнє середовище.

					ДП ББ21 11.000 ПЗ	Адк.
Зм.	Адк.	№ докум.	Підпис	Дата		86

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Миронівська птахофабрика. *Latifundist.com*. URL: <https://latifundist.com/kompanii/1415-mironovskaya-ptitsefabrika> (дата звернення: 20.05.2026).
2. Служба новин. МХП і Avangardco зберегли лідерство у Європі за виробництвом птиці та яєць, на світовому ринку вони змінили позиції. *Latifundist.com*. URL: <https://latifundist.com/novosti/68832-mhp-i-avangardco-zberegli-liderstvo-u-yevropi-za-virobnitstvom-ptitsi-ta-yayets-na-svitovomu-rinku-voni-zminili-pozitsiyi#>: (дата звернення: 18.05.2026).
3. Звернення Голови Ради директорів: Agroholding Avangard. *Agroholding Avangard - Агрохолдинг Авангард: Agroholding Avangard*. URL: <https://avangardco.ua/about/address-director-general/> (дата звернення: 18.05.2026).
4. Аналітична записка. *Екологія Право Людина*. URL: https://epl.org.ua/wp-content/uploads/2021/06/vidhody_tvarynnztva.pdf (дата звернення: 18.05.2026).
5. 17 Цілей сталого розвитку | Global Compact. *Global Compact*. URL: <https://globalcompact.org.ua/tsili-stijkogo-rozvytku/> (дата звернення: 20.05.2026).
6. Мисак Й., Шумський Т. МЕТОДИ ОЧИЩЕННЯ БІОГАЗУ ВІД БАЛАСТОВИХ ДОМІШОК. *Теплоенергетика*. 2005. С. 3–9. URL: <https://ena.lpnu.ua/bitstreams/5f1e245a-9c5f-490c-9d55-bcaaa8f47e64/download> (дата звернення: 19.05.2026).
7. Про альтернативні види палива : Закон України від 14.01.2000 № 1391-IV : станом на 11 берез. 2026 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1391-14#Text> (дата звернення: 21.05.2026).

					ДП ББ21.11.000 ПЗ		
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розробив	Неділько О.В.				Перелік використаних джерел	Літ.	Аркш
Перевірив	Щурська К.О.						87
Т. Контр.						КПІ ім. Ізгоря Сікорського, ФБТ	
Н. Контр.							
Затверд.	Щурська К.О.						

- 8.
9. Biogases explained - European Biogas Association. *European Biogas Association*. URL: <https://www.europeanbiogas.eu/our-dna/about-biogas-and-biomethane/> (дата звернення: 08.05.2026) Czeaka W., Nowak M., Bojarski W. Characteristics of Substrates Used for Biogas Production in Terms of Water Content. *Fermentation*. 2023. Т. 9, № 5. С. 449. URL: <https://doi.org/10.3390/fermentation9050449> (дата звернення: 06.05.2026).
10. Uddin M. M., Wright M. M. Anaerobic digestion fundamentals, challenges, and technological advances. *Physical Sciences Reviews*. 2022. URL: <https://doi.org/10.1515/psr-2021-0068> (дата звернення: 06.05.2026).
11. Trace Elements in Anaerobic Biotechnologies / ред.: F. G. Fermoso та ін. IWA Publishing, 2019. URL: <https://doi.org/10.2166/9781789060225> (дата звернення: 06.05.2026).
12. Ammonia inhibition in anaerobic digestion of organic waste: a review / J. Yang та ін. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2024. URL: <https://doi.org/10.1007/s13762-024-06029-1> (дата звернення: 06.05.2026).
13. Technical Biogas Terms | Simple explained | IBBK - The Biogas Network. *IBBK - The Biogas Network*. URL: <https://ibbk-biogas.com/technical-terms/> (дата звернення: 05.05.2026).
14. Abubakar A. M., Yunus M. U. Reporting Biogas Data from Various Feedstock. 2021. URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.7875505> (дата звернення: 06.05.2026).
15. Achinas S., Euverink G. J. W. Theoretical analysis of biogas potential prediction from agricultural waste. *Resource-Efficient Technologies*. 2016. Т. 2, № 3. С. 143–147. URL: <https://doi.org/10.1016/j.reffit.2016.08.001> (дата звернення: 06.05.2026).

					ДП ББ21 11.000 ПЗ	Арк.
						88
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

16. Jingura R. M., Kamusoko R. Methods for determination of biomethane potential of feedstocks: a review. *Biofuel Research Journal*. 2017. Т. 4, № 2. С. 573–586. URL: <https://doi.org/10.18331/brj2017.4.2.3> (дата звернення: 07.05.2026).
17. Ресурсоефективне та чисте виробництво у м'ясній промисловості / А.Й. Клещов, Х. Хогі, Д. Хенгервосс, М.М. Масліков. – К. : Центр ресурсоефективного та чистого виробництва, 2018. – 68 с.
18. Про побічні продукти тваринного походження, не призначені для споживання людиною : Закон України від 07.04.2015 № 287-VIII : станом на 2 берез. 2026 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/287-19#Text> (дата звернення: 10.05.2026).
19. Toldrá F., Reig M., Mora L. Management of meat by- and co-products for an improved meat processing sustainability. *Meat Science*. 2021. Т. 181. С. 108608. URL: <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2021.108608> (дата звернення: 11.05.2026).
20. Sustainable valorization of slaughterhouse solid waste: a review of characterization, conditioning, hydrolysis and biotransformation strategies / M. Jiménez-Urpi та ін. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2025. С. 118879. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.118879> (дата звернення: 11.05.2026).
21. Санжара Р. А., Лесновська О. В. Технологія переробки відходів сільськогосподарського виробництва: навч. посібник. Дніпро, 2024. 144 с.
22. Microbiological and Technological Insights on Anaerobic Digestion of Animal Manure: A Review / Y. Song та ін. *Fermentation*. 2023. Т. 9, № 5. С. 436. URL: <https://doi.org/10.3390/fermentation9050436> (дата звернення: 11.05.2026).
23. Бомко В.С., Сиваченко Є.В., Сметаніна О. В. Корми і кормові добавки та ефективність їх використання в годівлі тварин: навч. посібник. – Біла Церква, 2023. – 225с.

					ДП ББ21 11.000 ПЗ	Арк.
						89
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

24. Semi-continuous anaerobic co-digestion of flotation sludge from broiler chicken slaughter and sweet potato: Nutrients and energy recovery / F. M. Damaceno та ін. *Science of The Total Environment*. 2019. Т. 683. С. 773–781. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.314> (дата звернення: 11.05.2026).
25. Mozhiarasi V., Natarajan T. S. Slaughterhouse and poultry wastes: management practices, feedstocks for renewable energy production, and recovery of value added products. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2022. URL: <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02352-0> (дата звернення: 12.05.2026).
26. Anaerobic co-digestion of poultry droppings and briquetted wheat straw at mesophilic and thermophilic conditions: Influence of alkali pretreatment / M. A. Rahman та ін. *Renewable Energy*. 2018. Т. 128. С. 241–249. URL: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.05.076> (дата звернення: 12.05.2026).
27. Biogas production from wheat straw and manure – Impact of pretreatment and process operating parameters / K. Risberg та ін. *Bioresource Technology*. 2013. Т. 149. С. 232–237. URL: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.09.054> (дата звернення: 12.05.2026).
28. Victorin M., Davidsson Å., Wallberg O. Characterization of Mechanically Pretreated Wheat Straw for Biogas Production. *BioEnergy Research*. 2020. Т. 13, № 3. С. 833–844. URL: <https://doi.org/10.1007/s12155-020-10126-7> (дата звернення: 12.05.2026).
29. Таблиця виходу біогазу з 1 тонни субстрату. *AC-GROUP*. URL: <https://ac-group.in.ua/> (дата звернення: 15.05.2026).
30. Які біогазові проекти є найбільш перспективними в Україні?. *Get Market*. URL: <https://getmarket.com.ua/ua/news/yaki-biogazovi-proekti-ye-najbil-sh-perspektivnimi-v-ukrayini> (дата звернення: 14.05.2026).

					ДП ББ21 11.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		90

31. A critical review of pretreatment technologies to enhance anaerobic digestion and energy recovery / M. R. Atelge та ін. *Fuel*. 2020. Т. 270. С. 117494. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117494> (дата звернення: 10.05.2026).
32. Emerging technologies for biogas production: A critical review on recent progress, challenges and future perspectives / F. Sher та ін. *Process Safety and Environmental Protection*. 2024. Т. 188. С. 834–859. URL: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.05.138> (дата звернення: 15.05.2026).
33. Tamilselvan R., Immanuel Selwynraj A. Enhancing biogas generation from lignocellulosic biomass through biological pretreatment: Exploring the role of ruminant microbes and anaerobic fungi. *Anaerobe*. 2024. Т. 85. С. 102815. URL: <https://doi.org/10.1016/j.anaerobe.2023.102815> (дата звернення: 15.05.2026).
34. Sawyerr N., Trois C., Workneh T. S., Okudoh V. An Overview of Biogas Production: Fundamentals, Applications and Future Research // *International Journal of Energy Economics and Policy*. 2019. Vol. 9, No. 2. P. 105–116. URL: <https://doi.org/10.32479/ijeep.7375> (дата звернення: 15.05.2026).
35. Biogas and Biomethane Production and Usage: Technology Development, Advantages and Challenges in Europe / J. Pavičić та ін. *Energies*. 2022. Т. 15, № 8. С. 2940. URL: <https://doi.org/10.3390/en15082940> (дата звернення: 16.05.2026).
36. Kabeyi M. J. B., Olanrewaju O. A. Biogas Production and Applications in the Sustainable Energy Transition. *Journal of Energy*. 2022. Т. 2022. С. 1–43. URL: <https://doi.org/10.1155/2022/8750221> (дата звернення: 16.05.2026).
37. Гуменюк О., Семенюк Н. ВИРОБНИЦТВО БІОГАЗУ – НОВА РИНКОВА НІША ДЛЯ ПОБУДОВИ ВИСОКОРЕНТАБЕЛЬНОГО БІЗНЕСУ, СКЛАДОВА РОЗВИТКУ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ГАЛУЗІ УКРАЇНИ. *Технічні науки*. 2012. № 6. С. 69–74. URL: https://journals.khnu.km.ua/vestnik/pdf/tech/2012_6/25gum.pdf.

					ДП ББ21 11.000 ПЗ	Адж.
Зм.	Адж.	№ докум.	Підпис	Дата		91

38. Біоенергетика : підручник для студ. спеціальності 162 «Біотехнології та біоінженерія» / К. О. Щурська, Є. В. Кузьмінський ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 304 с.
39. Banerjee S., Prasad N., Selvaraju S. Reactor Design for Biogas Production- A Short Review. *Journal of Energy and Power Technology*. 2021. Т. 4, № 1. С. 1. URL: <https://doi.org/10.21926/jept.2201004> (дата звернення: 16.05.2026).
40. The most important technologies and highlights for biogas production worldwide / B. C. G. Rodrigues та ін. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 2024. URL: <https://doi.org/10.1080/10962247.2024.2393192> (дата звернення: 16.05.2026).
41. Shoshaa R., Ghanimeh S., Almomani F. Recent advances in plug flow reactors for anaerobic digestion and in-depth evaluation of mixing approaches: A review. *Fuel*. 2024. Т. 377. С. 132711. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.132711> (дата звернення: 16.05.2026).
42. Скляр О., Скляр Р. АНАЛІЗ СПОСОБІВ ТА ЗАСОБІВ ДЛЯ ПЕРЕМІШУВАННЯ СУБСТРАТУ В МЕТАНТЕНКАХ БІОГАЗОВИХ УСТАНОВОК. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. 2019. Т. 10, № 4. С. 19–26.
43. Kube J. Management of Gas Storages in Biogas Plants. *Chemical Engineering & Technology*. 2018. Т. 41, № 4. С. 702–710. URL: <https://doi.org/10.1002/ceat.201700395> (дата звернення: 16.05.2026).
44. Зорг Біогаз ГмбХ Каталог | Чиллер біогазу. ZORG. URL: <https://zorg-biogas.com/uk/katalog-oborudovaniya/osushiteli-gaza> (дата звернення: 17.05.2026).
45. ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ДИГЕСТАТУ БІОГАЗОВИХ УСТАНОВОК / В. Поліщук та ін. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. 2019. Т. 11, № 4. С. 107–115.

					ДП ББ21 11.000 ПЗ	Арк.
						92
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

46. Okoro O. V., Sun Z. Desulphurisation of Biogas: A Systematic Qualitative and Economic-Based Quantitative Review of Alternative Strategies. *ChemEngineering*. 2019. T. 3, № 3. С. 76. URL: <https://doi.org/10.3390/chemengineering3030076> (дата звернення: 17.05.2026).
47. Bailon Allegue L., Hinge J. Biogas upgrading Evaluation of methods for H₂S removal. Danish technological institute, 2014.
48. Raw Biogas Desulphurization Using the Adsorption-Absorption Technique for a Pilot Production of Agricultural Biogas from Pig Slurry in Poland / M. Kapłan та ін. *Energies*. 2021. T. 14, № 18. С. 5929. URL: <https://doi.org/10.3390/en14185929> (дата звернення: 19.05.2026).
49. Muller C., Liebetrau J., Nelles M. A review of the practical application of micro-aeration and oxygenation for hydrogen sulfide management in anaerobic digesters // *Process Safety and Environmental Protection*. 2022. Vol. 165. P. 126–137. URL: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.07.009>. (дата звернення: 19.05.2026).
50. ДСТУ 7527:2014. ПОСЛІД ПТИЦІ ТЕХНОЛОГІЇ БІОЛОГІЧНОГО ПЕРЕРОБЛЮВАННЯ Загальні вимоги. Чинний від 2015-02-01. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2017.
51. Paddel-Profi - Buschmann Güllerührwerke. *Startseite - Buschmann Güllerührwerke*. URL: <https://www.guelleruehrwerke.com/en/mixer-technology/mixer-technology-for-elevated-tanks/paddle-profi-biogas-built-in-agitator.html> (дата звернення: 21.05.2026).
52. Основні комплектуючі БГУ. *AC-GROUP*. URL: <https://ac-group.in.ua/> (дата звернення: 20.05.2026).
53. Huynh Nhut H., Le Thi Thanh V., Tran Le L. Removal of H₂S in biogas using biotrickling filter: Recent development. *Process Safety and Environmental Protection*. 2020. T. 144. С. 297–309.

					ДП ББ21 11.000 ПЗ	Арк.
						93
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

URL: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.07.011> (дата звернення: 20.05.2026).

54. Lantec Products | HD Q-PAC. *Lantec Products*. URL: <https://www.lantecp.com/products/hd-q-pac/> (дата звернення: 20.05.2026).

55. Pall Rings - Plastic - The Pall Rings Company. *The Pall Rings Company*. URL: <https://www.pallrings.co.uk/products/pall-rings-plastic/> (дата звернення: 20.05.2026).

56. Ухаль О. ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ МІКРООРГАНІЗМІВ В ПРОЦЕСІ ОЧИСТКИ БІОГАЗУ В УМОВАХ ВП «БІОГАЗ ЛАДИЖИН» ТОВ «ВІННИЦЬКА ПТАХОФАБРИКА» ВІННИЦЬКОЇ ОБЛАСТІ : Бакалаврська робота. Миколаїв, 2024. 49 с.

57. Когенерація KTS Engineering®. *KTS Engineering*. URL: <https://www.kts-eng.com/solutions/kogeneraciya/> (дата звернення: 22.05.2026).

58. Nowak M., Czekala W. Sustainable Use of Digestate from Biogas Plants: Separation of Raw Digestate and Liquid Fraction Processing. *Sustainability*. 2024. Т. 16, № 13. С. 5461. URL: <https://doi.org/10.3390/su16135461> (дата звернення: 22.05.2026).

59. Pilarski K., Pilarska A. A. Kinetics and Energy Yield in Anaerobic Digestion: Effects of Substrate Composition and Fundamental Operating Conditions. *Energies*. 2025. Т. 18, № 23. С. 6262. URL: <https://doi.org/10.3390/en18236262> (дата звернення: 22.05.2026).

60. Домбровський О. Г., Тракслер І. С., Потапова М. В. БІОМЕТАНУВАННЯ ВОДНЮ IN-SITU: ОПТИМІЗАЦІЯ ВИРОБНИЦТВА БІОМЕТАНУ ТА ОЧИЩЕННЯ БІОГАЗУ ВІД CO₂. *Vidnovluvana energetika*. 2024. № 4(79). С. 140–144. URL: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.4\(79\).140-144](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.4(79).140-144) (дата звернення: 22.05.2026).

61. Aerobic desulfurization of biogas by acidic biotrickling filtration in a randomly packed reactor / A. M. Montebello та ін. *Journal of Hazardous*

					ДП ББ21 11.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		94

Materials. 2014. Т. 280. С. 200–208.
 URL: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.07.075> (дата звернення: 22.05.2026).

62. Sulfur Oxidizing Bacteria in Agro ecosystem and Its Role in Plant Productivity - A Review / P. Ranadev та ін. *Journal of Applied Microbiology*. 2023. URL: <https://doi.org/10.1093/jambio/txad161> (дата звернення: 22.05.2026).

63. Ghosh W., Dam B. Biochemistry and molecular biology of lithotrophic sulfur oxidation by taxonomically and ecologically diverse bacteria and archaea. *FEMS Microbiology Reviews*. 2009. Т. 33, № 6. С. 999–1043. URL: <https://doi.org/10.1111/j.1574-6976.2009.00187.x> (дата звернення: 22.05.2026).

64. Hydrogen Sulfide Capture and Removal Technologies: A Comprehensive Review of Recent Developments and Emerging Trends / A. Pudi та ін. *Separation and Purification Technology*. 2022. С. 121448. URL: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.121448> (дата звернення: 22.05.2026).

65. Permanent draft genome of *Thiobacillus thioparus* DSM 505T, an obligately chemolithoautotrophic member of the Betaproteobacteria / L. P. Hutt та ін. *Standards in Genomic Sciences*. 2017. Т. 12, № 1. URL: <https://doi.org/10.1186/s40793-017-0229-3> (дата звернення: 22.05.2026).

66. Comparison on the removal of hydrogen sulfide in biotrickling filters inoculated with *Thiobacillus thioparus* and *Acidithiobacillus thiooxidans* / G. Aroca та ін. *Electronic Journal of Biotechnology*. 2007. Т. 10, № 4. С. 0. URL: <https://doi.org/10.2225/vol10-issue4-fulltext-6> (дата звернення: 22.05.2026).

67. Methanogenesis—General Principles and Application in Wastewater Remediation / A.-K. Marić та ін. *Energies*. 2024. Т. 17, № 21. С. 5374. URL: <https://doi.org/10.3390/en17215374> (дата звернення: 25.05.2026).

					ДП ББ21 11.000 ПЗ	Адж.
Зм.	Адж.	№ докум.	Підпис	Дата		95

68. Mand T. D., Metcalf W. W. Energy Conservation and Hydrogenase Function in Methanogenic Archaea, in Particular the Genus *Methanosarcina*. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*. 2019. Т. 83, № 4. URL: <https://doi.org/10.1128/membr.00020-19> (дата звернення: 25.05.2026).
69. Thauer R. K. The Wolfe cycle comes full circle: Fig. 1. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2012. Т. 109, № 38. С. 15084–15085. URL: <https://doi.org/10.1073/pnas.1213193109> (дата звернення: 25.05.2026).
70. Buan N. R. Methanogens: pushing the boundaries of biology. *Emerging Topics in Life Sciences*. 2018. Т. 2, № 4. С. 629–646. URL: <https://doi.org/10.1042/etls20180031> (дата звернення: 25.05.2026).
71. A Comparative Genomic Analysis of Energy Metabolism in Sulfate Reducing Bacteria and Archaea / I. A. C. Pereira та ін. *Frontiers in Microbiology*. 2011. Т. 2. URL: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2011.00069> (дата звернення: 25.05.2026).
72. Paulo L. M., Stams A. J. M., Sousa D. Z. Methanogens, sulphate and heavy metals: a complex system. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*. 2015. Т. 14, № 4. С. 537–553. URL: <https://doi.org/10.1007/s11157-015-9387-1> (дата звернення: 25.05.2026).
73. Microbial pathways in colonic sulfur metabolism and links with health and disease / F. Carbonero та ін. *Frontiers in Physiology*. 2012. Т. 3. URL: <https://doi.org/10.3389/fphys.2012.00448> (дата звернення: 25.05.2026).
74. Biochemistry of dissimilatory sulphate reduction. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences*. 1982. Т. 298, № 1093. С. 443–466. URL: <https://doi.org/10.1098/rstb.1982.0091> (дата звернення: 25.05.2026).

					ДП ББ21 11.000 ПЗ	Арк.
						96
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

75. Biological desulfurization of biogas: A comprehensive review on sulfide microbial metabolism and treatment biotechnologies / C. R. Cattaneo та ін. *Science of The Total Environment*. 2023. С. 164689. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164689> (дата звернення: 25.05.2026).
76. ДСТУ 7721:2015. Газоподібне паливо. Біогаз. Технічні вимоги та методи контролювання. Чинний від 2016-08-01. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016.
77. Biogas composition from agricultural sources and organic fraction of municipal solid waste / A. Calbry-Muzyka та ін. *Renewable Energy*. 2022. Т. 181. С. 1000–1007. URL: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.09.100> (дата звернення: 25.05.2026).
78. Kramar V. G. BIOGAS UPGRADING TECHNOLOGIES AND THEIR CHARACTERISTICS. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*. 2023. Т. 45, № 1. С. 64–74. URL: <https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2023.8> (дата звернення: 25.05.2026).
79. Енерготехнологія хіміко-технологічних процесів у виробництві кераміки та скла. Паливо і його характеристики. Розрахунки горіння палива. [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 161 «Хімічні технології та інженерія» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: Н. В. Жданюк, М.М. Племянніков. – Електронні текстові дані (1 файл: 922 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 62 с.
80. Trace contaminants in biogas: biomass sources, variability and implications for technology applications / L. Pera та ін. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2024. С. 114478. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.114478> (дата звернення: 25.05.2026).
81. Очищення біогазу. AC-GROUP. URL: <https://ac-group.in.ua/> (дата звернення: 25.05.2026).

					ДП ББ21 11.000 ПЗ	Арк.
						97
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

82. Виробництво енергії з біомаси в Україні: технології , розвиток, перспективи / Ін-т технічної теплофізики НАН України; за ред. Г. Гелетуки. - Київ: Академперіодика, 2022. - 373 с
83. Werkneh A. A. Biogas impurities: Environmental and health implications, removal technologies and future perspectives. *Heliyon*. 2022. С. e10929. URL: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10929> (дата звернення: 26.05.2026).
84. Сидоров Ю.І., Влязло Р.Й., Любів В.П. Процеси і апарати мікробіологічної промисловості. Технологічні розрахунки. Приклади і задачі. Основи проектування виробництв: навч. посібник. У 3 ч. – Ч. 1. Ферментація. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2004. – 158 с.
85. Limoli A., Langone M., Andreottola G. Ammonia removal from raw manure digestate by means of a turbulent mixing stripping process. *Journal of Environmental Management*. 2016. Т. 176. С. 1–10. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.03.007> (дата звернення: 27.05.2026).
86. UABIO - Біоенергетична асоціація України. URL: <https://uabio.org/wp-content/uploads/2023/11/10.-Kucheruk-P.-P.-Metody-obrobky-ta-vykorystannya-dygestatu-biogazovyh-ustanovok.pdf> (дата звернення: 27.05.2026).
87. Друкований М., Яремчук О., Брянський В. ВИБІР ТЕХНОЛОГІЧНОГО КОМПЛЕКСУ ПЕРЕРОБКИ БІОМАСИ В БІОГАЗУ ТА ОРГАНІЧНИХ БІОЛОГІЧНИХ ДОБРИВ. *Вінницький національний аграрний університет. Збірник наукових праць*. 2009. № 8. С. 48–53.
88. Пташиний послід: вихід, хімічний склад та основні способи переробки [Електронний ресурс] // Державна дослідна станція птахівництва НААН. – URL: <http://avianua.com/index.php/poultry/12-laboratoriya-pitaniya-selskokhozyajstvennoj-ptitsy-i-mikotoksikologii> (дата звернення: 27.05.2026).

					ДП ББ21 11.000 ПЗ	Адж.
Зм.	Адж.	№ докум.	Підпис	Дата		98

89. Про затвердження Ветеринарно-санітарних правил для птахівничих господарств і вимог до їх проектування : Наказ Голов. держ. інспектора вет. медицини України від 03.07.2001 № 53 : станом на 8 квіт. 2025 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0565-01#Text> (дата звернення: 27.05.2026).
90. Про затвердження Ветеринарно-санітарних правил для боєнь, забійно-санітарних пунктів господарств та подвірного забою тварин : Наказ Держ. департаменту вет. медицини від 14.01.2004 № 4 : станом на 8 квіт. 2025 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0121-04#Text> (дата звернення: 27.05.2026).
91. Методичні вказівки до курсового та дипломного проектування «Розрахунок біогазової установки для сільськогосподарської ферми» за курсом «Нетрадиційні та поновлюванні джерела енергії» для студентів спеціальностей 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» та 144 «Теплоенергетика» всіх форм навчання / уклад. : О. В. Кошельнік, В. Г. Павлова, О. В. Долобовська. – Харків : НТУ «ХПІ», 2019. – 22 с.
92. Технологія виробництва продукції птахівництва : курс лекцій / Л. С. Патрєва, О. А. Коваль. - Миколаїв: МНАУ, 2018. - 248 с
93. Impact of C/N ratios and organic loading rates of paper, cardboard and tissue wastes in batch and CSTR anaerobic digestion with food waste on their biogas production and digester stability / M. Shahbaz та ін. *SN Applied Sciences*. 2020. Т. 2, № 8. URL: <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03232-w> (дата звернення: 28.05.2026).
94. Sugarcane juice improves energy production in the anaerobic co-digestion with flotation sludge from broiler slaughter / J. C. P. S. Restrepo та ін. *Fuel*. 2022. Т. 330. С. 125577. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125577> (дата звернення: 28.05.2026).

					ДП ББ21 11.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		99

95. Organic acid accumulation under flooded soil conditions in relation to the incorporation of wheat and rice straws with different C:N ratios / Y. Shan та ін. *Soil Science and Plant Nutrition*. 2008. Т. 54, № 1. С. 46–56. URL: <https://doi.org/10.1111/j.1747-0765.2007.00218.x> (дата звернення: 28.05.2026).
96. Cycles of carbon, nitrogen and phosphorus in poultry manure management technologies – environmental aspects / М. Kasprzak та ін. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 2022. С. 1–25. URL: <https://doi.org/10.1080/10643389.2022.2096983> (дата звернення: 28.05.2026).
97. Скляр О., Скляр Р. ОСНОВИ БІОГАЗОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ПАРАМЕТРИ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОЦЕСА ЗБРОДЖУВАННЯ. *Таврійський державний агротехнологічний університет*. URL: <https://elar.tsatu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/9a735927-bc4b-42da-80e8-c344e51d8a4f/content> (дата звернення: 28.05.2026).
98. Сталевий емальований біогазовий реактор 2500 м3. ZORG. URL: https://zorg-biogas.com/uk/katalog-oborudovaniya/reaktor_ukr/reactor-hor-ua (дата звернення: 28.05.2026).
99. Sánchez Nocete E., Pérez Rodríguez J. A Simple Methodology for Estimating the Potential Biomethane Production in a Region: Application in a Case Study. *Sustainability*. 2022. Т. 14, № 23. С. 15978. URL: <https://doi.org/10.3390/su142315978> (дата звернення: 28.05.2026).
100. Комплексний розрахунковий аналіз використання біогазу як палива для парового котла "Invest" / О. Власенко та ін. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*. 2026. Т. 5, № 1. С. 8–19.
101. Когенераційні установки – Eurodiesel. *Eurodiesel*. URL: <https://eurodiesel.com.ua/products/kogeneratsiyni-ustanovki/> (дата звернення: 29.05.2026).
102. Ramirez M. Advances in Biogas Desulfurization. Spain : University of Cadiz, 2020.

					ДП ББ21 11.000 ПЗ	Арк.
						100
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

103. Kennes C., Veiga M. C. Air Pollution Prevention and Control: Bioreactors and Bioenergy. Wiley & Sons, Limited, John, 2013. 576 с.
104. Eric Dumont E. H₂S removal from biogas using bioreactors: a review. *International Journal of Energy and Environnement*. 2015. Т. 6, № 5. С. 479-498.
105. Процеси та обладнання хімічних технологій. Частина 2. Практикум [Електронний ресурс]: навч. посіб. для ступеня бакалавра за освіт. програмою «Комп'ютерноінтегровані технології проектування обладнання хімічної інженерії» спец. 133 Галузе машинобудування / Корнієнко Я.М., Степанюк А.Р., Гулієнко С.В., Гайдай С.С., Семінський О.О. – Електрон. текст. дані (1 файл). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. – 520 с.
106. Поджарський М.А. Теоретичні основи процесів сорбції: Конспект лекцій. – Д.: РВВ ДНУ, 2007. – 40 с.
107. Методичні вказівки до виконання курсового проекту з курсу “Основні процеси та апарати хімічної технології”. Розділ «Абсорбція» для студентів III-V курсів усіх спеціальностей і форм навчання / Укл.: О.О. Тертишний, С.О. Опарін, П.В. Рябік. – Дніпропетровськ: ДВНЗ УДХТУ, 2010. – 45 с.
108. Методичні вказівки до виконання практичних робіт студентів з дисципліни «Процеси, апарати та машини галузі – 3. Масообмінні процеси та апарати» для студентів напрямку підготовки 6.050503 – «Машинобудування», спеціальності – Обладнання фармацевтичних та біотехнологічних виробництв. Електронне видання / Уклад. Ружинська Л.І., Буртна І.А., Фесенко С.В. – К. НТУУ «КПІ», 2016 – 82 с.
109. Air Mass/Density | NASA Earthdata. *NASA Earthdata*. URL: <https://www.earthdata.nasa.gov/topics/atmosphere/air-mass-density> (дата звернення: 29.05.2026).
110. Мальцева А., Евтушенко О., Сирик А. БЕЗПЕКА ПРАЦІ ПРИ РОБОТІ БІОГАЗОВИХ УСТАНОВОК НА ПІДПРИЄМСТВАХ

					ДП ББ21 11.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		101

ХАРЧОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ. *SWorldJournal*. 2018. № 11-01. С. 46–51. URL: <https://doi.org/10.30888/2663-5712.2022-11-01-070> (дата звернення: 30.05.2026).

111. Лемешев М. С. Вимоги безпеки під час роботи з установкою для отримання біогазу [Електронний ресурс] / М. С. Лемешев, А. Д. Майданюк // Матеріали Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції “Інноваційні технології в процесі підготовки фахівців”, 3-4 квітня 2016 р. - Вінниця, 2016. - С. 104-107.
112. Biogas Safety First! Guidelines for the Safe Use of Biogas Technology / G. Bontempo та ін. Germany : Fachverband Biogas e. V., 2016. 68 с.
113. Основи охорони праці: Підручник. 21ге видання, доповнене та перероблене. / К. Н. Ткачук, М. О. Халімовський, В. В. Зацарний, Д. В. Зеркалов, Р. В. Сабарно, О. І. Полукаров, В. С. Коз’яков, Л. О. Мітюк. За ред. К. Н. Ткачука і М. О. Халімовського. - К.: Основа, 2006 - 448 с
114. ПАСПОРТ БЕЗПЕЧНОСТІ СІРЧАНА КИСЛОТА. Чинний від 2004-05-28. Вид. офіц. Суми. URL: <https://sumykhimprom.com.ua/wp-content/uploads/2024/05/sernaya-kislota-1.6-ukr.-new.pdf> (дата звернення: 30.05.2026).
115. Зубченко Л., Козар М., Левтун І. БАКАЛАВРСЬКИЙ ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ ОРГАНІЗАЦІЯ ВИКОНАННЯ ТА ЗАХИСТУ, ВИМОГИ ДО СТРУКТУРИ, ЗМІСТУ ТА ОФОРМЛЕННЯ Навчальний посібник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 47 с.
116. Ружинська Л.І. Апаратурні схеми фармацевтичних та біотехнологічних виробництв. Порядок складання та вимоги до оформлення. Посібник. Електронне видання/ Укладачі: Л.І. Ружинська, В.М. Поводзинський, В.Ю. Шибецький, І.А. Буртна – К.: НТУУ «КПІ», 2012 – 139с.

					ДП ББ21 11.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		102

ДОДАТОК А

Специфікація обладнання та контрольно-вимірювальних приладів

Позиція	Найменування	К-сть	Маса, кг	Примітки
1	2	3	4	5
ПЗ-1	Повітрозабірник, висота труби 10 м, діаметр труби 300 мм.	1		Збірний
Ф-2	Фільтри панельні фільтри для попередньої очистки повітря класу G4 з ефективністю видалення механічних домішок 90%	1		Збірний
П-3, П-31, П-35, П-64	Повітродувки з продуктивністю від 190 м³/хв зі стисненням повітрям до 0,16 МПа	4		Збірний
ІТП-4	Індивідуальний тепловий пункт для розподілу гарячого теплоносія від КГУ	1		Збірний
Н-5, Н-10, Н-28, Н- 30, Н-34, Н-38, Н- 47, Н-62, Н-68, Н- 70, Н-73	Насос відцентровий	13		Збірний
Ф-6	Фільтр для очищення води від механічних домішок сітчастий з діаметром пор 130 мкм, продуктивність 100 м³/год	1		Збірний
Д-7, Д-45, Д-59, Д-67	Дозатор об'ємно-ваговий	4		Нерж. сталь 12Х18Н10Т

					ДП ББ21.11.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ доким.	Підпис	Дата				
Розробив	Неділько О.В.				Додаток А	Літ.	Аркш	Аркшів
Перевірив	Щурська К.О.						103	109
Т. Контр.						КПІ ім. Ігоря Сікорського, ФБТ		
Н. Контр.								
Затверд.	Щурська К.О.							

1	2	3	4	5
36-9, 36-12, 36-17, 36-20, 36-22, 36-27, 36-44, 36-53, 36-60, 36-65	Збірник для накопичення твердих, рідких та пастоподібних компонентів	9		Нерж. сталь 12X18H10T
П-11	Електричний парогенератор продуктивністю 120 кг/год. Тиск пари 0,5-1,5 МПа	1		Збірний
Ш-13, Ш-16, Ш-18, Ш-21, Ш-23, Ш-26, Ш-52, Ш-54, Ш-57	Шнековий транспортер із нержавіючої сталі типу ШТН для транспортування сипучих, гранульованих або пастоподібних матеріалів. Діаметр шнека 500 мм. Продуктивність 5000 кг/год	10		Збірний
Др-14, Др-19, Др-24	Дробарка. Продуктивність - 350 кг/год. Металевий корпус	3		Збірний
С-25	Котел-деструктор з сорочкою призначений для стерилізації відходів під тиском 0,3 МПа, за температури 130-140°C. Подача пари в сорочку апарата	1		Збірний
Зм-29	Змішувач з встановленим змішувачем для підігріву субстрату. Оснащений мішалкою з мотор-редуктором і насосом для відкачування сировини.	1		Збірний
М-32	Метантенк сталевий емальований з об'ємом 2448 м ³ , діаметром 23,05 м та висотою 5,87 м з механічним перемішування субстрату	3		

Зм.	Адк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДП ББ21 11.000 ПЗ

Адк.

104

1	2	3	4	5
Г-33, Г-37	Газгольдер двомембранний з зовнішньою полістирольною плівкою покритою ПВХ та внутрішньою PELD мембраною. Повітря нагнітається в простір між газгольдером і зовнішнім куполом, створюючи тиск на внутрішню мембрану. Тиск біогазу в газгольдері 0,2-0,5 кПа. Об'єм – 1105 м³.	2		Збірний
Д-36	Доброжувач сталевий емальований з об'ємом 3491м³, діаметром 27 м та висотою 6,6 м з механічним перемішування субстрату	1		Збірний
Г-39, Г-49	Газодувка для перекачування біогазу з максимальною продуктивністю 915 м³/год, тиск 25-42,5 кПа.	3		Збірний
Бф-40	Крапельний біофільтр від сірководню з продуктивністю 500 м³/год	1		Збірний
Н-41, Н-42, Н-43, Н-45	Насос регулювальний (змінної продуктивності) з нереверсивним потоком	5		Збірний
Ч-48	Чиллер для осушення біогазу з пропускною спроможністю 500 Нм³/год, температура газу на вході до +35°C, температура газу на виході до +5 °C, тиск газу на вході 10-50 кПа	1		Збірний
КГУ-50	Когенераційна установка для комбінованого виробництва теплової та електричної енергії з газопоршневим двигуном; електрична	1		Збірний
Зм.	Адк.	№ докум.	Підпис	Дата
ДП ББ21 11.000 ПЗ				Адк. 105

	потужність 1200 кВт, тепла потужність – 1189 кВт			
ШС-51	Шнековий прес-сепаратор для розділення дигестату на тверду та рідку фракції продуктивністю 20 м³/год.	1		Нерж. сталь 12Х18Н10Т
С-55	Стрічкова сушарка для сушіння твердої фракції дигестату з продуктивністю 1000 кг/год, температура сушильного агента 60-110°C	1		Збірний
К-56	Водяний калорифер для нагріву повітря перед подачею в стрічкову сушарку	1		Збірний
Г-58	Гранулятор ГKM-10. Матриця: 8 мм. Діагональ матриці 100 мм. Вироблений обсяг до 30 кг на годину.	1		Збірний
Т-61	Теплообмінник рекуператор розбірний пластинчатого типу на консольній рамі. Загальна поверхня теплообміну 100 м². Поверхня одної пластини 0,5м²	1		Нерж. сталь 12Х18Н10Т
С-63	Стрипер (десорбційна колона) для повітряного видування аміаку з дигестату	1		Збірний
С-65	Насадковий скруббер для абсорбції аміаку	1		Збірний
К-69, СП- 71	Перший корпус вакуум- випарного апарату з винесеною гріючою камерою і зоною кипіння	2		Нерж. сталь 12Х18Н10Т

Зм.	Адк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДП ББ21 11.000 ПЗ

Адк.

106

1	2	3	4	5
К-72, СП-74	Другий корпус вакуум-випарного апарату з винесеною гріючою камерою і зоною кипіння.	2		Нерж. сталь 12Х18Н10Т
Ф-75	Автоматичний газовий факел закритого типу з максимальною пропускною спроможністю 800 норм.м ³ /год	1		Збірний
ЛТ КП-9.1, КП-12.1, КП-15.1, КП-17.1, КП-20.1, КП-22.1, КП-29.3, КП-32.2, КП-36.2, КП-46.3, КП-54.1, КП-60.1, КП-65.1	Прилад для вимірювання рівня безшкальний з дистанційною передачею, встановлений за місцем	15		Збірний
РІ КП-1.1, КП-1.2, КП-3.1, КП-6.1, КП-6.2, КП-11.1, КП-25.1, КП-32.1, КП-36.1, КП-40.2, КП-63.1, КП-66.1, КП-71.1, КП-73.1	Датчик вимірювання тиску	15		Збірний
Зм.	Адк.	№ докум.	Підпис	Дата
ДП ББ21 11.000 ПЗ				Адк. 107

1	2	3	4	5
TE КП-25.2, КП-29.1, КП-32.3, КП-36.3, КП-40.3, КП-49.2, КП-56.1, КП-57.1, КП-59.1, КП-61.1, КП-69.1, КП-72.1	Датчик вимірювання температури	12		Збірний
QEPH КП-29.2, КП-32.4, КП-36.4, КП-46.4, КП-61.2, КП-63.1, КП-66.2	Приймальний пристрій для вимірювання рН	8		Збірний
FT КП-16.1, КП-21.1, КП-26.1, КП-46.1, КП-46.2, КП-64.1,	Датчик витрати	6		Збірний
FQI КП-39.1	Лічильник газу	1		Збірний
QH ₂ S, O ₂ КП-40.1, КП-40.4	Приймальний пристрій для вимірювання вмісту сірководню, кисню в біогазі (Газоаналізатор)	2		Збірний
QH ₂ O КП-49.1	Приймальний пристрій для вимірювання вмісту вологи в біогазі (Газоаналізатор)	1		Збірний
Зм.	Адк.	№ докум.	Підпис	Дата
ДП ББ21 11.000 ПЗ				Адк. 108

1	2	3	4	5
QE ^{CH₄} КП-49.3	Приймальний пристрій для вимірювання вмісту метану в біогазі (Газоаналізатор)	1		Збірний

					ДП ББ21 11.000 ПЗ	Адк.
						109
Зм.	Адк.	№ докум.	Підпис	Дата		