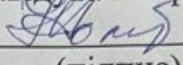


**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**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: «Технологія виробництва біогазу з відходів рослинництва»**

Виконала:

студентка IV курсу, групи ББ-21
Хмеловська Діана Владиславівна

Керівник:

Доцент. каф.біоенергетики, біоінформатики
та екобіотехнології, к.т.н., с.н.с.
Гринюк Ірина Іванівна

Консультант з проектування:

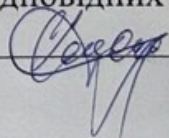
Проф. каф.біоенергетики, біоінформатики
та екобіотехнології, д.т.н, професор
Саблій Лариса Андріївна

Рецензент:

Проф. каф. промислової біотехнології та біофармації
д.б.н., с.н.с Гаркава Катерина Григорівна

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

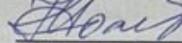
Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 162 «Біотехнології та біоінженерія»

Освітньо-професійна програма «Біотехнології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

 Наталія ГОЛУБ

«14» квітня 2026 р.

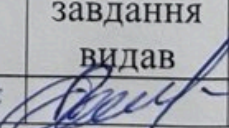
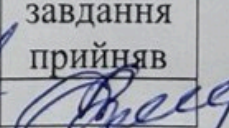
ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студентки

Хмеловської Діани Владиславівни

- Тема роботи «Технологія виробництва біогазу з відходів рослинництва». Науковий керівник роботи Гринюк Ірина Іванівна, доцент кафедри біоенергетики, біоінформатики та екобіотехнології, затверджені наказом по університету від «27» травня 2026 р. № 1941.
- Термін подання студенткою роботи 12.06. 2026
- Вихідні дані до проєкту: загальна добова маса нативної (вологої) рослинної суміші 35000 кг/добу ; базові ко-субстрати: кукурудзяний силос та гичка цукрових буряків у співвідношенні 2:1 за масою сухої речовини; вологість кукурудзяного силосу 68% (вміст сухої органічної речовини 95% від СР, рН 3,8–4,2); вологість гички цукрових буряків 85% (вміст сухої органічної речовини 82% від СР, рН 6,2–6,8); робоча вологість пульпи в метантенку 90% (СР пульпи 10%); розрідження сировини здійснюється із додаванням активного мулу (інокуляту) в кількості 30% від об'єму розрідження та технологічної води; умови процесу: мезофільний, одноступінчастий безперервний режим ферментації при температурі ; гідравлічний час утримання біомаси 19,2 доби.
- Перелік графічного матеріалу: технологічна схема (А1), апаратурна схема (А1), аеротенк-витиснювач (А1), презентація.

6. Консультанти розділів проєкту*

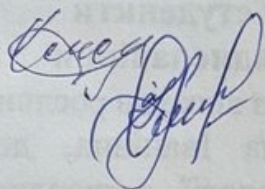
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Технологічна схема	Вайс І.І. ст. д.т.н. професор		

7. Дата видачі завдання 14 квітня 2026 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Огляд літературних джерел	14.04- 01.05.2026	виконано
2.	Обґрунтування вибору сировини та біологічного агенту.	01.05 –20.05.2026	виконано
3.	Обґрунтування вибору технології.	21.05–25.05. 2026	виконано
4.	Виконання розрахунків.	11.05–17. 05. 2026	виконано
5.	Розробка технологічної, апаратурної схеми, креслення метантенка.	18.05– 24.05. 2026	виконано
6.	Написання п'ятого розділу, висновків. Охорона праці та довкілля.	25.05– 28.05. 2026	виконано
7.	Оформлення пояснювальної записки, графічної частини.	29.05– 02.06. 2026	виконано

Студент



Діана ХМЕЛОВСЬКА

Керівник

Ірина ГРИНЮК

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 70 ст., 9 табл., 49 джерел.

У даному проєкті обрано та обґрунтовано технологію виробництва біогазу з відходів рослинництва. У якості сировини було обрано кукурудзяний силос та гичку цукрових буряків, а в якості біологічного агенту було обрано бактерії з активного мулу. Було обґрунтовано використання цієї сировини у виробництві біогазу та охарактеризовано, тому що сумісне ко-зброджування високовуглецевого силосу та високоазотистої гички дозволяє оптимізувати сумарний нутрієнтний баланс (C:N), а багатий хімічний склад бурякових залишків забезпечує формування потужної природної буферної системи, що запобігає закисленню реактора та максимізує питомий вихід біометану.

Було вибрано умови процесу та наведено характеристику та вимоги до сировини для виробництва біогазу, обґрунтовано застосування активного мулу як інокуляту, обрано оптимальні режими підготовки і бродіння. Були спроектовані та описані технологічна та апаратурна схеми виробництва. Було розраховано матеріальний баланс та вибрано основне і допоміжне обладнання, вказані точки і параметри контролю етапів процесу, що є необхідними для забезпечення якості кінцевої продукції, охорони праці і довкілля. Спроектовано один метантенк об'ємом 1850 м³.

БІОГАЗ, СИЛОС КУКУРУДЗИ, МЕТАНТЕНК, МАТЕРІАЛЬНИЙ БАЛАНС,
АНАЕРОБНЕ ЗБРОДЖУВАННЯ, БІОГАЗОВА УСТАНОВКА

ABSTRACT

Explanatory note: 70 p., 9 tabl., 49 references.

In this project, the technology for biogas production from crop residues was selected and substantiated. Corn silage and sugar beet tops were chosen as the raw materials, and bacteria from activated sludge were selected as the biological agent. The utilization of these raw materials for biogas production was substantiated and characterized because the co-digestion of high-carbon silage and high-nitrogen beet tops allows for the optimization of the overall nutrient balance (C:N), while the rich chemical composition of beet residues ensures the formation of a powerful natural buffer system that prevents reactor acidification and maximizes the specific yield of biomethane.

The process conditions were selected, the characteristics and requirements for the raw materials for biogas production were presented, the application of activated sludge as an inoculum was justified, and the optimal modes for preparation and fermentation were determined. The technological and equipment layouts of the production process were designed and described. The material balance was calculated, and the main and auxiliary equipment was selected; the points and parameters for controlling the process stages required to ensure end-product quality, occupational health, and environmental safety were specified. A single methane tank with a capacity of 1850 m³ was designed.

BIOGAS, CORN SILAGE, METHANE TANK, MATERIAL BALANCE,
ANAEROBIC DIGESTION, BIOGAS PLANT

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1.ХАРАКТЕРИСТИКА СИРОВИНИ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ АНАЕРОБНОГО ЗБРОДЖУВАННЯ.....	9
1.1. Характеристика сировини.....	9
1.2. Обґрунтування вибору технології.....	18
1.2.1 Існуючі технології.....	20
1.3. Характеристика біологічного агенту.....	25
РОЗДІЛ 2. БІОХІМІЧНІ ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ, ХАРАКТЕРИСТИКА БІОЛОГІЧНИХ АГЕНТІВ.....	33
2.1. Схема перебігу процесів.....	33
2.2. Характеристика кінцевого продукту.....	35
РОЗДІЛ 3. ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА.....	39
3.1. Сировина та матеріали.....	39
3.2. Контроль виробництва	43
3.3. Матеріальний баланс.....	45
3.4. Опис технологічної схеми.....	49
РОЗДІЛ 4. ПІДБІР ТА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЛАДНАННЯ.....	52
4. Основні технологічні розрахунки.....	52
РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ, ОХОРОНА ПРАЦІ.....	57
ВИСНОВКИ.....	63
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	65

					ДП ББ21.16.000 ПЗ				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Зміст	Літ.	Арк.	Архів	
Розроб.		Хмеловська Д.В.							
Перев.									
Керів.		Гринюк І. І.				КПІ ім. Ігоря Сікорського ФБТ КББЕ			
Затв.									

ВСТУП

На сучасному етапі розвитку світової економіки та енергетичного сектору однією з найбільш гострих проблем є стрімке вичерпання традиційних викопних енергоресурсів: нафти, природного газу, вугілля - та спричинене їх інтенсивним спалюванням катастрофічне антропогенне навантаження на навколишнє природне середовище. Постійне зростання обсягів промислового виробництва, масштабна робота теплових електростанцій та транспортного сектору потребують безперервного залучення нових енергетичних потужностей. Це призводить до прогресуючого накопичення парникових газів в атмосфері, дестабілізації кліматичної системи та погіршення екологічного стану біосфери [3,4].

У зв'язку з цим йде пошук та винайдення інших альтернативних джерел, які могли б зменшити залежність енергетичного сектору від видобутку традиційних викопних ресурсів. У цій ситуації одним із найбільш перспективних та стратегічно важливих альтернативних джерел відновлюваної енергії у світі є біогаз. Біогаз - це екологічне біопаливо, що отримують в результаті анаеробного зброджування (метанової ферментації) органічної маси різного походження (субстрату) за участю спеціалізованої консорції мікроорганізмів. Головним енергетичним компонентом біогазу є метан (CH_4), об'ємна частка якого в паливі залежно від типу сировини та умов ведення процесу може досягати 70% [3,4].

Актуальність теми зумовлена насамперед стрімким вичерпанням невідновлювальних викопних ресурсів та гострою потребою в декарбонізації енергетичного сектору. Це зумовлює активний пошук стабільних альтернативних джерел енергії, до яких входить якраз видобування біогазу. У цих умовах біометан виступає як найбільш перспективне, високотехнологічне та стабільне альтернативне джерело енергії.

					ДП ББ21.17.000 ПЗ				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Вступ	Літ.	Арк.	Архивіф	
Розроб.		Хмеловська Д.В.							
Перев.							7	71	
						КПІ ім. Ігоря Сікорського ФБТ КББЕ			
Керів.		Гринюк І. І.							
Затв.									

Будучи повним фізико-хімічним аналогом природного газу, він є єдиним відновлюваним паливом, що здатне безпосередньо закачуватися в наявну газотранспортну систему без необхідності капіталомісткої модернізації магістральних трубопроводів чи обладнання кінцевих споживачів. На відміну від сонячної чи вітрової генерації, виробництво біометану є абсолютно прогнозованим і не залежить від кліматичних або погодних факторів, а сам газ легко піддається компресії, скрапленню та тривалому акумулюванню.

Мета дипломного проєкту: розробка ефективної технології виробництва біогазу з відходів рослинництва.

Для досягнення поставленої мети поставлено такі **завдання**:

1. Обґрунтувати вибір сировини у вигляді силосу кукурудзи та гички цукрових буряків для виробництва біогазу.
2. Обґрунтувати вибір біологічного агенту.
3. Обрати технологічну схему виробництва.
4. Надати характеристику кінцевого продукту, що утворюється в процесі анаеробного зброджування.
5. Розробити технологічну та апаратурну схеми виробництва біогазу із силосу кукурудзи та гички цукрових буряків.
6. Виконати розрахунок матеріального балансу.
7. Розрахувати основні технічні параметри біогазової установки та спроектувати метантенк.
8. Визначити основні вимоги охорони праці та захисту навколишнього середовища при виробництві біогазу.

					ДП ББ21.17.000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.З	Арк.	№ докум.№	ПідписПі	Дата		

РОЗДІЛ 1. ХАРАКТЕРИСТИКА СИРОВИНИ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ АНАЕРОБНОГО ЗБРОДЖУВАННЯ

1.1. Характеристика сировини

Вибір сировини є одним з ключових етапів вироблення біогазу, оскільки кінетичні закономірності, стабільність метаногенезу та питома газопродуктивність безпосередньо залежать від фізико-хімічних властивостей і біохімічного потенціалу субстрату.

За рахунок того, що сучасна потреба в інтенсифікації технологій видобутку біогазу пояснюється не лише необхідністю активного пошуку і впровадження альтернативних джерел відновлюваної енергії, а й нагальною потребою в утилізації багатотоннажних органічних відходів, логічним і біотехнологічно виправданим є використання залишків життєдіяльності свійських тварин, птахів, а також концентрованої рослинної біомаси. Останню часто застосовують як додаткові або базові рослинні ко-субстрати для стабілізації біохімічного складу, оптимізації реологічних властивостей та збагачення поживного фону ферментаційного середовища [2, 3].

У загальній практиці світового та вітчизняного агропромислового комплексу (АПК) для метанового бродіння зазвичай використовують такий широкий спектр органічних субстратів:

- гній свиней, великої рогатої худоби (ВРХ) та повнокомпонентний послід птиці;
- бадилля, гичка та зелена маса овочевих культур;
- надлишковий урожай злакових, силосних та овочевих культур, цукрових буряків, кукурудзи;
- свіжий буряковий жом і меляса (відходи цукрового виробництва);
- спиртова барда (фільтрат та кубовий залишок);

					ДП ББ21.17.000 ПЗ			
Вм.	Арк.	№ док.	Підпис	Пата	РОЗДІЛ 1. ХАРАКТЕРИСТИКА СИРОВИНИ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ АНАЕРОБНОГО ЗБРОДЖУВАННЯ	Літ.	Арк.	Архшів
Разраб.		Хмеловська Д.В.						
Перев.		Гриняк І.І.						
Ватверд.								
						КПІ ім. Ізгоря Сікорського ФБТ КББЕ		

- мучка, пивна дробина, дрібне некондиційне зерно, зародок;
- солодові паростки, білковий відстій;
- відходи крохмало-патокового виробництва та глюкозних заводів;
- деструктивні вичавки фруктів та овочеві;
- молочна сироватка і маслянка (відходи переробки молока).

Кількість і компонентний склад субстратів чи видів відходів, що одночасно або послідовно використовуються для стабільного виробництва біогазу в межах однієї промислової біогазової установки (БГУ), може варіюватися від одного (моносубстратне живлення) до десяти і більше найменувань у складі полікомпонентних бакових сумішей [4].

Для забезпечення життєдіяльності, стабільного метаболізму та максимальної ферментативної активності консорціуму анаеробних мікроорганізмів, вихідна сировина повинна відповідати суворим критеріям.

Вимогами до складу сировини є:

1. Співвідношення вмісту карбону та нітрогену (C:N): це ключовий біохімічний показник характеристики для отримання біогазу. Для нормального перебігу процесу даний показник повинен перебувати в межах інтервалу $C:N = 10 - 20:1$, проте оптимальне значення залежить від типу сировини. Якщо карбону набагато більше, то внаслідок недостатнього обміну речовин вуглевод не може бути повністю задіяним в процесі метаболізму і вихід метану не буде масштабним. У випадку надлишку азоту утворюється велика кількість аміаку, який згубно впливає на життєдіяльність бактерій [6, 7].

2. Вміст сухої речовини (СР) та вологість: вихід біогазу напряму залежить від вмісту сухої речовини в субстраті. Сировина має містити органічну речовину, що біологічно розкладається, й у великій кількості воду (оптимально 90–94% для вологих систем бродіння) [48].

3. Хімічний склад органічної маси (протеїни, ліпіди, вуглеводи): Білки є головним джерелом утворення метану, оскільки саме від їх вмісту та

					ДП ББ21.17.000 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

якості залежить калорійність газу. Чим менше білків у складі сировини, тим менший вихід біогазу. Водночас надлишок рослинної клітковини (целюлоза, лігнін) сповільнює процес через важкодоступність структури.

4. Активна кислотність (рН): бажано, щоб середовище вихідного матеріалу було близьким до нейтрального. Оптимум для метаногенів становить 6,8–7,4, тому сировина не повинна викликати стрімких зсувів кислотності.

5. Відсутність речовин-інгібіторів: У сировині мають бути відсутні сполуки, що заважають дії бактерій - мило, пральні порошки, важкі метали, дезінфектанти та антибіотики.

Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика білоквмісних (тваринних) та рослинних субстратів [41,44]

Показник порівняння	Білоквмісні субстрати (Гній ВРХ, свиней, послід)	Рослинні субстрати (Силос кукурудзи, гичка, жом)
Хімічні показники та склад	Високий вміст протеїнів та аміаку; низький вміст сухої речовини (СР = 4 - 12%); низьке співвідношення С:N (6-16:1).	Високий вміст вуглеводів, крохмалю, целюлози; високий вміст сухої речовини (СР = 15–35%); високе С:N (15\50:1).
Енергетичний потенціал	Низький питомий вихід біогазу на тонну нативної сировини (для гною ВРХ: 20-30 м ³ /т).	Високий питомий вихід біогазу на тонну нативної сировини (75-230 м ³ /т).
Головні переваги	1. Наявність ендогенної метаногенної мікрофлори. 2. Наявність потужної природної буферної системи, яка стабілізує рН. 3. Однорідність фізико-хімічного складу.	1. Екстремально висока концентрація енергії (органічної маси). 2. Велика питома частка редукованих цукрів та амінокислот рослин. 3. Відсутність ветеринарних антибіотиків.

Головні недоліки та ризики	1. Ризик виділення вільного аміаку, що пригнічує метаногенез. 2. Великі об'єми транспортування води. 3. Наявність залишків антибіотиків та дезінфектантів.	1. Високий ризик лавиноподібного накопичення ЛЖК та закислення середовища. 2. Гостре азотне голодування бактерій. 3. Утворення поверхневої лігноцелюлозної кірки.
-----------------------------------	--	---

Виходячи з даних таблиць порівняння білоквмісних субстратів та рослинних субстратів, можна зробити висновок, що для жижі гною ВРХ вихід біогазу становить всього 20-30 м³/т, що значно менше за інші субстрати. Це пов'язано не тільки з кількісним складом гною (низький вміст сухих речовин), а й якісним: у гної ВРХ міститься мало вільних білків та легкодоступних цукрів, які власне і дають високий вихід метану, натомість там багато неперетравленої сирової клітковини. Окрім цього, у гної ВРХ містяться антибіотики (тетрацикліни, пеніциліни, сульфонаміди), якими годують тварин при утриманні для лікування або профілактики. Підвищений вміст антибіотиків пригнічує біологічних агентів, а використання такого гною як сирого добрива значно погіршує якість ґрунтів.

Якщо ж робити порівняння саме рослинної сировини, то в таблиці 1.2 наведено детальну порівняльну характеристику вмісту основних поживних речовин, макромолекул та хімічних компонентів у п'яти ключових рослинних субстратах, які найчастіше залучаються до промислового анаеробного розкладу.

Таблиця 1.2 – Вміст поживних речовин та хімічний склад основних рослинних субстратів в Україні [11, 16]

Компонент/ Показник складників	Кукурудзяний силос	Гичка цукрових буряків	Буряковий жом (свіжий)	Силос трав'яний (злаково- бобовий)	Солома злакових культур

Органічна маса (від СР), %	90,0-94,5	78,0-84,0	92,0-95,5	85,0-89,0	91,0-93,5
Загальний Азот (N), % від СР	1,2-1,6	2,1-2,8	1,0-1,3	2,2-2,9	0,5-0,8
Фосфор (P)% від СР	0,4-0,6	0,5-0,8	0,2-0,4	0,6-0,9	0,2-0,3
Калій (K), % від СР	1,5-2,2	3,5-5,2	0,8-1,2	2,0-3,1	1,2-1,9
Кальцій (Ca), % від СР	0,3-0,5	1,4-2,2	0,7-1,1	0,8-1,4	0,4-0,6
Магній (Mg), % від СР	0,1-0,3	0,5-0,9	0,2-0,3	0,3-0,5	0,1-0,2
Целюлоза, % від СР	22,0-28,0	12,0-16,0	24,0-30,0	25,0-31,0	38,0-45,0
Геміцелюлоза, % від СР	18,0-23,0	8,0-11,0	22,0-26,0	15,0-19,0	26,0-32,0
Сирий жир, % від СР	2,5-3,5	1,8-2,4	0,4-0,8	2,8-3,8	1,2-1,8
Сирий протеїн, % від СР	7,5-10,0	13,0-17,5	6,2-8,1	13,5-18,0	3,1-5,0
Розчинні вуглеводи/цукри, % від СР	8,0-12,0	14,0-20,0	4,0-7,0	5,0-9,0	1,0-2,5
Лігнін, % від СР	4,5-6,0	1,5-3,0	1,0-2,0	6,5-8,5	12,0-16,0
Співвідношення C:N	35-45:1	12-15:1	40-50:1	18-22:1	70-90:1

Вміст різних мікро- та макроелементів, а також структурних полісахаридів у складі рослинних відходів безпосередньо залежить від сорту культури, умов

					ДП ББ21.17.000 ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вегетації, типу внесених мінеральних добророк, а також технології збирання та консервації (силосування). У таблиці 1.3 наведено кількісні характеристики питомого виходу біогазу та чистого біометану для зазначених вище п'яти видів рослинних субстратів у розрахунку на нативну (вологу) масу та на тонну сухої речовини.

Таблиця 1.3 – Питомий вихід біогазу та біометану з різних рослинних субстратів [12, 18]

Рослинний субстрат	Середній вміст сухої речовини (СР), %	Вихід біогазу з нативної маси, м ³ /т	Питомий вихід біогазу, м ³ /т СОР	Вихід чистого метану (CH ₄), м ³ /т СОР	Середній вміст метану в біогазі, %
Кукурудзяний силос	30-35	180-230	580-650	310-360	52-55
Гичка цукрових буряків	15-18	65-85	420-480	220-250	50-53
Буряковий жом (свіжий)	10-12	60-75	500-560	260-290	51-54
Силос трав'яний	28-32	160-190	540-600	280-320	52-54
Солома злакових структур	82-86	320-380	390-440	190-220	48-50

Виходячи з аналізу фізико-хімічних показників, монокомпонентне зброджування більшості представлених рослинних субстратів є біотехнологічно

неефективним або нестабільним. Так, висококалорійні субстрати з високим вмістом сухої речовини (кукурудзяний силос, зерно злаків) мають критично завелике співвідношення (C:N), що викликає гостре азотне голодування мікроорганізмів та лавиноподібне накопичення летких жирних кислот (закислення реактора).

Натомість соковиті рослинні відходи (гичка цукрових буряків, жом) мають низький вміст сухої речовини та підвищену зольність, а їхнє монозброджування загрожує швидким розпадом протеїнів із виділенням надлишкового амонійного азоту. Саме тому для досягнення фізіологічного оптимуму продуцентів та забезпечення стабільної вологості біомаси необхідне обов'язкове комбінування високовуглецевого кукурудзяного силосу та високоазотистої гички цукрових буряків.

Кукурудзяний силос. Кукурудза є провідною зернофуражною та силосною культурою в Україні. Щорічні площі посіву кукурудзи на силос і зелений корм становлять сотні тисяч гектарів, забезпечуючи валовий збір на рівні 15–20 млн тонн нативного зразка. Головними джерелами кукурудзяного силосу є великі тваринницькі та рослинницькі фермерські господарства, агрохолдинги та спеціалізовані заготівельні підприємства. Швидкість накопичення сировини має сезонний характер: збирання зеленої маси кукурудзи у фазі воскової стиглості зерна відбувається в обмежені терміни (серпень – жовтень), після чого сировина піддається одноразовій консервації (тобто силосуванню) для забезпечення цілорічного безперервного постачання біогазового комплексу з рівномірною добовою витратою [11].

Гичка цукрових буряків. Вирощування цукрових буряків зосереджено переважно в зонах Лісостепу та Полісся України (Вінницька, Хмельницька, Полтавська, Тернопільська та Черкаська області). Валовий збір цукрових буряків в Україні коливається в межах 9–12 млн тонн на рік. Маса гички (листя з головками коренеплодів), що зрізається під час збирання, становить близько 40–50% від ваги товарного коренеплоду, що еквівалентно щорічному утворенню 4–5,5 млн тонн

					ДП ББ21.17.000 ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

соковитих зелених відходів. Джерелами сировини є бурякосіючі господарства та сировинні зони цукрових заводів. Швидкість накопичення характеризується надзвичайно високою інтенсивністю протягом вузького часового прояву (вересень – листопад). У цей період щодобово накопичуються тисячі тонн швидкопсувної біомаси, яка потребує негайної технологічної утилізації або правильної організації умов тимчасового зберігання.

Далі в таблиці 1.4 окремо наведені показники, переваги та технологічні ризики комбінування обраної сировини.

Таблиця 1.4 – Технологічна оцінка комбінування кукурудзяного силосу та гички цукрових буряків [11, 16]

Параметр оцінки суміші	Кукурудзяний силос (Моносубстрат)	Гичка цукрових буряків (Моносубстрат)	Бінарна суміш: Силос + Гичка (Оптимальне ко-зброджування)
Робочі хіміко-технологічні показники	СР = 32%; С:N $\approx$ 40:1; високий вміст крохмалю та лінійної целюлози; низька буферність середовища.	СР = 16%; С:N $\approx$ 13:1; високий вміст вільних цукрів, протеїнів, пектину; висока зольність (до 18%).	СР суміші = 10–12%; С:N = 22–25:1 (ідеальний оптимум); рН стабілізовано на рівні 7,0–7,2; зольність нівельована розведенням.
Ключові технологічні переваги	Екстремально високий та прогнозований питомий вихід	Швидкий первинний гідроліз за рахунок	Потужний синергетичний ефект: автоматичне

	біогазу; тривале та стабільне зберігання у силосних траншеях протягом року.	легкодоступних моноцукрів; високий вміст сирого протеїну — джерела азоту для мікробіоти.	вирівнювання нутрієнтного балансу; соковита гичка знижує потребу у додаванні технічної води для розрідження силосу.
Технологічні ризики та недоліки	Лавиноподібне накопичення летких жирних кислот (ЛЖК); швидке закислення реактора; азотне голодування мікроорганізмів.	Ризик накопичення вільного аміаку (NH_3) та іонів амонію; висока сезонність; ризик замулювання метантенка через пісок і ґрунт.	Ризики мінімізовано: амонійний азот гички повністю нейтралізує ЛЖК силосу, формуючи природний амонійно-карбонатний буфер проти закислення.
Параметр оцінки суміші	Кукурудзяний силос (Моносубстрат)	Гичка цукрових буряків (Моносубстрат)	Бінарна суміш: Силос + Гичка (Оптимальне ко-зброджування)

Важливим технологічним елементом обраної технології є обов'язкове введення до її складу активного мулу як інокуляту. Оскільки обрана сировина

(кукурудзяний силос та гичка цукрових буряків) є суто рослинними субстратами, вона є ендегенно стерильною щодо специфічних анаеробних мікроорганізмів бродильного комплексу та не містить у своєму початковому складі необхідної кількості метаногенних архей. За рахунок цього було застосування активного мулу базується на його унікальних біотехнологічних властивостях.

Таким чином, комбінування кукурудзяного силосу та бурякової гички дозволяє отримати гомогенну, реологічно стабільну пульпу з оптимальним вмістом вологи, збалансованим співвідношенням C:N = 24:1 та стійкою внутрішньою буферною системою, що запобігає хімічному дисбалансу бродильного промислового консорціуму мікроорганізмів.

1.2 Обґрунтування вибору технології

Виробництво біогазу та біометану на сучасному етапі розвитку світової та вітчизняної енергетики сприяє високоефективному вирішенню двох глобальних проблем сучасного життя: стрімкого зростання кількості багатотоннажних органічних відходів, що утворюються внаслідок діяльності агропромислового комплексу (АПК), та негативного впливу антропогенних викидів парникових газів на кліматичну систему планети.

На відміну від чистого біометану, отримання якого вимагає глибокого та капіталомісткого очищення від супутніх компонентів, сирий або частково очищений біогаз є автономним паливом, повністю придатним для безпосереднього спалювання з метою локального отримання теплової та електричної енергії. Це дозволяє повністю задовольнити внутрішні енергетичні потреби самого переробного біогазового комплексу, а надлишок електроенергії експортувати в загальну розподільну мережу за стимулюючими тарифами [12].

Використання відпрацьованої рослинної біомаси кукурудзяного силосу та гички цукрових буряків для отримання біогазу створює умови так званої вуглецевої нейтральності (нульового сумарного викиду вуглекислого газу). При цьому обсяг CO₂, що виділяється при спалюванні газу чи його технологічних витоків, повністю

					ДП ББ21.17.000 ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

поглинається з атмосфери під час фотосинтетичної асиміляції рослинами наступного року вегетації, з яких залишки відходів можуть бути використані знову як відновлювана сировина.

Анаеробне бродіння в метантенку є складним, багатокомпонентним і динамічно нестійким біотехнологічним процесом, перебіг якого залежить від скоординованого метаболізму синтрофного консорціуму. Цей процес є результатом чотирьох взаємопов'язаних етапів (ферментативного гідролізу, ацидогенезу, ацетогенезу та метаногенезу), де початковий високомолекулярний матеріал послідовно розкладається на простіші молекули. На кожному окремому етапі бере участь своя специфічна група мікроорганізмів, які послідовно розкладають продукти попередніх стадій, через що загальна швидкість процесу повного розкладання визначається найповільнішою, лімітуючою інженерною реакцією.

При зброджуванні рослинних лігноцелюлозних субстратів, що містять у своєму складі значні масові частки складноструктурованої целюлози, геміцелюлози та пектинових речовин, саме стадія первинного екзогенного ферментативного гідролізу визначає загальну кінетику та час перебування маси в реакторі. Оскільки метаногенні археї є найбільш чутливими та вразливими до коливань внутрішнього фізико-хімічного середовища, при проектуванні промислової установки БГУ необхідно орієнтуватися на оптимізацію інженерних чинників під біологічні потреби саме цієї фінальної ланки консорціуму [17].

Анаеробне бродіння підпорядковується сукупній дії низки взаємозалежних внутрішніх та зовнішніх факторів. Основні фактори, що безпосередньо впливають на стабільність і питомий вихід біогазу, включають такі параметри:

- зовнішня температура атмосферного повітря та рівень теплоізоляції резервуарів;
- внутрішня температура бродильного середовища всередині метантенка;
- активна кислотність та лужність середовища (показник pH);
- наявність, концентрація та поріг дії хімічних речовин-інгібіторів і

					ДП ББ21.17.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

ксенобіотиків;

- фракційний (дисперсний) склад рослинного субстрату, його початкова вологість та динамічна в'язкість;
- гідравлічний час утримання (тривалість бродіння маси в апараті);
- інтенсивність, кратність та конструктивні особливості перемішування пульпи;
- хімічний, елементний та нутрієнтний склад вихідного рослинного матеріалу;
- надійність інженерної системи термостабілізації процесу;
- надлишковий тиск у газовій порожнині системи;
- геометрична форма та конструктивні особливості будови резервуара метантенка.

Недотримання встановлених технологічних меж за будь-яким із зазначених чинників здатне викликати лавиноподібне гальмування процесу аж до повної зупинки генерації газу, тоді як сукупна дія дрібних відхилень має ефект підсумовування, що суттєво знижує техніко-економічні показники комплексу [18].

1.2.1 Існуючі технології

У сучасній світовій інженерній практиці розроблено та реалізовано численні технологічні рішення та модифікації БГУ, які варіюються за своєю складністю від найпростіших кустарних ємностей без рухомих елементів до повністю автоматизованих промислових комплексів з комп'ютерним керуванням. Існуючі технології отримання біогазу класифікують за кількома базовими робочими параметрами, які визначають апаратне оформлення та біохімічні показники станції:

1. Класифікація за температурним режимом ферментації

- Психрофільний режим (температура $< 20^{\circ}\text{C}$): Характеризується екстремально низькою кінетикою ферментативних реакцій та слабким метаболізмом архей. Тривалість зброджування лігноцелюлозної маси може перевищувати 50-70 діб, що робить цей режим абсолютно непридатним для

					ДП ББ21.17.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

використання у промислових масштабах відновлюваної енергетики через потребу у зведенні гігантських геометричних об'ємів реакторів.

- Мезофільний режим (температура 30-40 °С, оптимально 36°C): Є найбільш поширеним та затребуваним в умовах помірного клімату України. Мезофільні мікроорганізми характеризуються високою біологічною стабільністю, стійкістю до плавних коливань зовнішніх чинників та значно меншим рівнем інгібування вільним аміаком. Операційні витрати енергії на підтримання внутрішнього тепла є мінімальними, що гарантує високу рентабельність БГУ.
- Термофільний режим (температура 45-60 °С): Забезпечує збільшення питомої швидкості біодеградації органічної маси рослин на 50-60% та значний вихід газу за короткий проміжок часу. Проте термофільний консорціум є екстремально чутливим до найменших температурних коливань та викликає хімічний шок бактерій, а високі температури зсувають рівновагу амонію в сторону утворення токсичного вільного аміаку (NH_3), що робить процес нестабільним і дорогим в управлінні [38].

2. Класифікація за способом завантаження та типом культивування

- Періодичний метод (порційна подача, Batch-процес): Реактор одноразово повністю заповнюється підготовленою порцією сировини, герметизується і залишається на повний цикл зброджування без додавання чи вилучення маси. Після завершення процесу апарат повністю спорожнюють і очищують. Технологія відрізняється простотою та низькою вартістю конструкції. Проте періодичний метод має критичні інженерні обмеження: лавиноподібні графіки виходу біогазу (максимум на 7-9 добу з падінням до нуля до 25 доби), нестабільну якість газу та високі трудовитрати на перезавантаження.
- Безперервний (проточний) метод (Continuous-процес): Нові дозовані порції свіжого рослинного субстрату завантажуються в реактор через рівні, автоматично запрограмовані проміжки часу (кілька разів на добу), і

					ДП ББ21.17.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

одночасно з цим з метантенка викачується еквівалентний об'єм відпрацьованого дигестату. Це забезпечує постійний об'єм пульпи всередині, динамічну рівновагу бродильного консорціуму, стабільний тиск та рівномірне, цілодобове продукування біогазу з незмінними якісними характеристиками [33].

3. Класифікація за вмістом сухих речовин (реологічними властивостями)

- Сухе анаеробне зброджування (Dry Digestion, вміст СР = 22-40%): Орієнтоване на переробку твердих, пакувальних відходів або чистої соломи. Вимагає менших сумарних об'ємів камер та мінімізує утворення рідких стоків. Однак сухі системи мають жорсткі обмеження: неможливість застосування стандартного гідравлічного обладнання, лавиноподібний знос поршневих і шнекових систем через високе тертя та необхідність використання суто періодичного способу культивування.
- Вологе анаеробне зброджування (Wet Digestion, вміст СР = 3-16%): Сировина штучно розріджується до стану текучої текучої пульпи з робочим вмістом сухих речовин у метантенку на рівні 8-12%. Це забезпечує ідеальну реологічну текучість, гомогенний розподіл нутрієнтів по всьому об'єму апарату, виключає виникнення мертвих зон та дозволяє застосовувати надійні відпрацьовані серійні гвинтові та відцентрові насоси [12].

4. Класифікація за кількістю просторових стадій процесу

- Багатоступінчасті (двофазні) системи: Процес апаратурно розділений. У першій ємності (гідролізаторі) підтримуються кислі умови (рН 5,2-6,2) для першої та другої стадій, а в другій камері - нейтральні умови (рН 6,8-7,5) для метаногенезу. Системи ефективні для великих комплексів (понад 50 000 т/рік). Проте для рослинної суміші силосу та гички, що містить багато легкодоступних цукрів, у першій фазі виникає неконтрольоване закислення середовища (рН < 4,5), що повністю руйнує ферментативні системи бактерій. Крім того, подвоєння систем перемішування та підігріву різко підвищує

					ДП ББ21.17.000 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

капітальні витрати.

- Одноступінчасті системи: Усі чотири біохімічні фази деградації протікають паралельно в єдиному герметичному об'ємі метантенка при строго компромісних, нейтральних параметрах середовища (рН 6,8-7,4). Вони є значно простішими у проектуванні, монтажі, обслуговуванні та відрізняються мінімальною вартістю і максимальною надійністю в умовах реального виробництва АПК [41].

На основі детального порівняльного аналізу існуючих світових технологій, а також з урахуванням специфічних фізико-хімічних та біохімічних властивостей обраного рослинного ко-субстрату (суміші кукурудзяного силосу та гички цукрових буряків), для реалізації даного дипломного проєкту було обрано вологу одноступінчасту мезофільну технологію анаеробного зброджування із безперервним режимом завантаження сировини.

Обране інженерне оформлення процесу базується на використанні вертикальних залізобетонних метантенків типу CSTR (Continuous Stirred-Tank Reactor) безперервної дії з примусовим механічним перемішуванням. Дана біотехнологічна схема є найбільш раціональною та безальтернативною для обраної теми з огляду на такі інженерно-технологічні чинники:

1. Забезпечення безперервного культивування та проточного режиму: Послідовна, дрібнопорційна автоматична подача бінарної рослинної суміші через фіксовані часові інтервали повністю ліквідує загрозу хімічного шоку бродильного консорціуму. Легкодоступні вуглеводи та вільні цукри бурякової гички при одноразовому (періодичному) завантаженні викликали б миттєвий сплеск ацидогенезу з критичним накопиченням ЛЖК та падінням рН (явище «закислення» реактора). Безперервний режим CSTR дозволяє утворюваним кислотам миттєво гомогенізуватися та відразу перероблятися ацетокластичними археями в цільовий газ метан, що стабілізує рН у безпечних межах 6,8-7,4.
2. Переваги вологого способу зброджування пульпи: Розрахункове поєднання

					ДП ББ21.17.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

кукурудзяного силосу (СР = 32%) та соковитої бурякової гички (СР = 16%) дозволяє отримати оптимальний середній вміст сухих речовин у вхідному потоці на рівні 10-12%. Це штучно переводить систему в режим вологої ферментації, забезпечуючи високу гідродинамічну текучість маси. Реологічні властивості такої пульпи дозволяють повністю відмовитися від капіталомістких шнекових або поршневих систем штовхання, замінивши їх стандартними, високонадійними ексцентриково-гвинтовими (шнековими) насосами для гнучкого транспортування маси трубопроводами [44].

3. Обґрунтування мезофільного температурного діапазону (36°C: Вибір мезофільного режиму забезпечує максимальну економічну рентабельність комплексу в кліматичних умовах України. Витрати власного тепла на підігрів рослинної пульпи є мінімальними, що дозволяє спрямувати понад 80–85% утвореної когенераційною ТЕЦ теплової енергії на зовнішні комерційні потреби або технологічні процеси глибокої переробки дигестату (упарювання рідкої фракції та сушіння твердої). Крім того, мезофільна мікробіота є надійно захищеною від ризику амонійного отруєння вільним газом NH_3 , який міг би масово виділятися з протеїнів бурякової гички при термофільних температурах [14].

4. Конструктивні особливості перемішуючих пристроїв метантенка: Проектом передбачено оснащення метантенків зануреними похилими гвинтовими (механічними) мішалками тягової дії. Таке інженерне рішення безпосередньо спрямоване на усунення специфічних вад обраної рослинної сировини:

Боротьба з лігноцелюлозною кіркою: Подрібнені легкі волокна кукурудзяного силосу мають природну тенденцію спливати під дією висхідних потоків газу. Активне гвинтове перемішування руйнує плаваючий шар на поверхні, зтягуючи рослинні залишки назад у товщу рідини для повного ферментативного контакту з гідролітиками.

Попередження замулювання днища: Механізоване збирання бурякової гички неминуче супроводжується занесенням у систему значної

					ДП ББ21.17.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

кількості землі, піску та глини (підвищена зольність). Постійна гідродинамічна циркуляція пульпи підтримує важкі мінеральні фракції у зваженому стані, запобігаючи замулюванню кінцевого днища апарату та забезпечуючи їх планомірне виведення разом із дигестатом.

1.3 Характеристика біологічного агента

Анаеробна переробка концентрованої рослинної біомаси, що складається з лігноцелюлозних волокон кукурудзяного силосу та пектиново-протеїнового комплексу гички цукрових буряків, реалізується не за рахунок дії одного ізолюваного штаму, а є результатом метаболічної діяльності багатокомпонентного, високоструктурованого та синтрофно зв'язаного промислового консорціуму мікроорганізмів. Цей складний біоценоз поєднує представників двох різних доменів живої природи - *Bacteria* (гідролітики, ацидогени, ацетогени) та *Archaea* (кінцеві продуценти метану). Стабільність роботи всього біогазового комплексу безпосередньо залежить від фізіологічного балансу між окремими трофічними групами консорціуму. Оскільки продукти метаболізму попередньої групи бактерій є прямими ростовими субстратами для наступної, найменше гальмування однієї з ланок викликає лавиноподібне порушення всього технологічного ланцюга.

Для першого етапу – ферментативного гідролізу – характерними є гідролітичні бактерії наступних родів: *Clostridium*, *Eubacterium*, *Spirochaeta*, *Desulfurococcus*, *Acetivibrio*, *Bacteroides*, *Anaerocellum*, *Butyrivibrio*, *Caldicellulosiruptor*, *Thermotoga*, *Fibrobacter*, *Ruminococcus*, *Halocella*. Ці мікроорганізми виділяють у середовище комплекс позаклітинних ферментів, які розщеплюють високомолекулярні біополімери рослинної сировини до розчинних мономерів [44].

Утворені мономери складних сполук після стадії кислотогенезу далі розкладаються вторинними анаеробами – синтрофами на ацетогенній стадії. Ці мікроорганізми відповідають за міжвидове перенесення водню. Так, розвиток

					ДП ББ21.17.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

бактерій родів *Syntrophomonas* і *Syntrophobacter* можливий лише за присутності в середовищі гідрогенотрофних метаногенів, які безперервно видаляють молекулярний водень, що в подальшому використовується для відновлення вуглекислого газу в метан. А перетворювачі пропіонової та масляної кислот *Syntrophobacter fumaroxidans* і *Syntrophomonas bryantii* (відповідно) споживають субстратні речовини лише при дії метаногена, що використовує і водень, і форміат, який також виступає важливим переносником електрона між клітинами синтрофного консорціуму. Також перетворювачами сполук під час ацетогенної стадії є представники родів *Thermosyntropha*, *Syntrophomonas*, *Syntrophothermus*, *Syntrophobacter*, *Smithella*, *Desulfotomaculum*, *Pelotomaculum*, *Syntrophus*, *Sporotomaculum*, *Thauera* [12].

Третій етап – кислотогенез (ацидогенез) – утворення оцтової кислоти є лімітуючою стадією, тобто від швидкості метаболізму ацетогенних бактерій (наприклад, представників родини *Acetobacteraceae*) безпосередньо залежить загальний час ферментації та кінетика накопичення прекурсорів метаногенезу в апараті.

На фінальній стадії метаноутворюючі бактерії (археї) переробляють ацетат, мурашину кислоту (форміат), вуглець і водень на метан. До метаногенів відносять коки – *Methanococcus*, палички – *Methanobacterium*, сарциновидні бактерії – *Methanosarcina*, спіралеподібні бактерії – *Methanospirillum*. Звичайна мікрофлора біомаси містить синтрофні та метаноутворюючі бактерії *Methanospirillum hungatei* та *Methanobacterium formicicum* [14, 45].

Для систематизації біологічних агентів, що беруть участь у деструкції бінарної рослинної суміші, ключові мікроорганізми, їхні метаболічні стадії, роди та фізіологічні ролі зведено в єдину таблицю 1.5.

					ДП ББ21.17.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

Таблиця 1.5 - Систематика та біотехнологічна характеристика ключових мікроорганізмів анаеробного консорціуму БГУ [45]

Стадія процесу	Метаболічна група бактерій	Приклади родів та видів мікроорганізмів	Біохімічна та технологічна роль у промисловому реакторі	Субстрат у використанні мікроорганізмом
I. Ферментативний гідроліз	Первинні гідролітичні деструктори біополімерів	<i>Clostridium, Eubacterium, Spirochaeta, Desulfurococcus, Acetivibrio, Bacteroides, Anaerocellum, Butyrivibrio, Caldicellulosiruptor, Thermotoga, Fibrobacter, Ruminococcus, Halocella</i>	Секреція комплексів позаклітинних екзоферментів (целюлаз, ксиланаз, пектиназ, протеаз); деструкція лігноцелюлозної матриці кукурудзяного силосу та тканин гички.	Високомолекулярні біополімери (кристалічна целюлоза, геміцелюлоза, пектини, сирий протеїн).
II. Кислотогенез (Ацидогенез)	Кислотоутворюючі ферментуючі бактерії	<i>Lactobacillus, Streptococcus, Enterococcus, Acetobacteraceae, Escherichia, Propionibacterium</i>	Внутрішньоклітинне розщеплення мономерів; синтез первинних летких жирних кислот (ЛЖК),	Розчинні мономери (глюкоза, ксилоза, розчинні цукри буряків, вільні

			нижчих спиртів, водню та діоксиду вуглецю.	амінокислоти) .
III. Ацетогенез (Лімітуюча стадія)	Синтрофні оцтовокислі та воднеутворю ючі бактерії	<i>Thermosyntrop ha</i> , <i>Syntrophomon as</i> (вкл. <i>S. bryantii</i>), <i>Syntrophother mus</i> , <i>Syntrophobact er</i> (вкл. <i>S. fumaroxidans</i>), <i>Smithella</i> , <i>Desulfotomacu lum</i> , <i>Pelotomaculu m</i> , <i>Syntrophus</i> , <i>Sporotomaculu m</i> , <i>Thauera</i>	бета- окиснення вищих ЛЖК до ацетату; забезпечення міжвидового переносу водню та форміату під тиском метаногенів.	Проміжкові продукти бродиння (пропіонова, масляна, молочна кислоти, етанол).
IV. Метаногенез (Гідрогенотро фний)	Автотрофні археї- метаногени (домен <i>Archaea</i>)	<i>Methanococci s</i> (коки), <i>Methanobacter ium</i> (палички, вкл. <i>M. formicicum</i>), <i>Methanosarcin a</i> ,	Відновлення розчиненого діоксиду вуглецю молекулярним воднем та форміатом; термодинамічн	Молекулярни й водень (H ₂), форміат-іони та діоксид вуглецю (CO ₂).

		<i>Methanospirillum</i> (вкл. <i>M. hungatei</i>)	е розвантаження ацетогенної ланки.	
--	--	--	------------------------------------	--

Для стабільного інженерного керування промисловим біогазовим реактором типу CSTR необхідно детально розглянути фізіологічні особливості, переваги та недоліки кожного конкретного роду мікроорганізмів, що складають ядро бродильного консорціуму.

1. Рід *Clostridium* та *Caldicellulosiruptor* (Гідролітична стадія)

Переваги: Володіють екстремально потужною системою позаклітинних ферментів - целюлосом. Штами здатні з високою швидкістю розривати міцні бета-1,4-глікозидні зв'язки кристалічної целюлози кукурудзяного силосу. Багато видів утворюють стійкі ендоспори, що дозволяє консорціуму виживати при тривалих технологічних зупинках, температурних шоках або короткочасному потраплянні кисню в реактор.

Недоліки: Більшість представників є суворими облігатними анаеробами, які миттєво припиняють ріст за наявності слідових концентрацій розчиненого кисню. Мають низьку стійкість до накопичення власних продуктів метаболізму (спиртів та кислот), що вимагає їх постійного відведення супутніми групами бактерій [45].

2. Рід *Bacteroides* та *Fibrobacter* (Гідролітична та ацидогенна стадії)

Переваги: Універсальні біологічні агенти, здатні одночасно розщеплювати як рослинні полісахариди (руйнування волокон клітковини), так і складні протеїнові макромолекули, якими багата гичка цукрових буряків. Клітини мають надзвичайно високу швидкість питомого росту, що дозволяє швидко відновлювати чисельність популяції після промислових промивок або перезавантажень метантенка.

					ДП ББ21.17.000 ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Недоліки: Екстремально чутливі до зниження активної кислотності середовища. При падінні рН нижче 6,0, яке викликане накопиченням ЛЖК, ферментативна активність цих родів знижується на 80–90%, що повністю зупиняє стадію гідролізу всього реактора.

3. Родина *Acetobacteraceae* та рід *Lactobacillus* (Кислотогенез / Ацидогенез)

Переваги: Високоадаптовані продуценти, що спеціалізуються на швидкій переробці вільних моно- та дицукрів, які масово виділяються із соковитої гички цукрових буряків. Виявляють унікальну ацидофільність - здатні активно функціонувати та розмножуватися за низьких значень рН (аж до 4,5–5,0). Оскільки утворення оцтової кислоти є лімітуючою стадією, висока швидкість їх метаболізму забезпечує безперервне надходження субстрату для метаногенів.

Недоліки: Екстремальна швидкість метаболізму за певних умов є головним технологічним ризиком. При перевантаженні реактора силосом вони викликають миттєве, лавиноподібне накопичення кислот, що призводить до падіння рН середовища та явища «кислого шоку» або «перекидання» метантенка, повністю паралізуючи метаногени [47, 48].

4. Роди *Syntrophobacter* та *Syntrophomonas* (Ацетогенна стадія)

Переваги: Ключові облігатні біологічні агенти (зокрема види *Syntrophobacter fumaroxidans* та *Syntrophomonas bryantii*), які здійснюють утилізацію та окиснення пропіонової та масляної кислот. Без стабільної роботи цих родів неможливе замикання біохімічного циклу, оскільки метаногени не здатні засвоювати пропіонат і бутират напряму.

Недоліки: Реакції окиснення жирних кислот є термодинамічно несприятливими ($\Delta G > 0$). Продуценти здатні розвиватися і працювати виключно в умовах найсуворішого синтрофного зв'язку з воднеспоживаючими археями (міжвидового переносу водню та форміату). Якщо парціальний тиск водню в метантенку перевищить критичну межу 10^{-4} атм, їхній метаболізм повністю блокується, що викликає швидке отруєння реактора токсичними кислотами [44, 45].

					ДП ББ21.17.000 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5. Рід *Methanothrix* / *Methanosaeta* (Ацетокластичний метаногенез)

Переваги: Головний робочий промисловий продуцент цільового метану. Має унікально високу хімічну спорідненість до оцтової кислоти (низьке значення константи насичення K). Це дозволяє клітинам ефективно поглинати та переробляти ацетат навіть за його екстремально низьких концентрацій у бродильному середовищі, надійно утримуючи загальний рівень ЛЖК в реакторі на безпечному мінімальному рівні. Клітини схильні до утворення довгих ниток, які формують міцні гранули дигестату.

Недоліки: Характеризується критично низькою швидкістю дузвуків клітин (час генерації становить від 3 до 9 діб) та мінімальним приростом біомаси. Надзвичайно чутливий до накопичення іонів амонію, які виділяються при деградації білків бурякової гички. Зсув рН у лужну сторону (понад 7,8) викликає миттєву хімічну денатурацію ферментних систем цього роду.

6. Рід *Methanosarcina* (Ацетокластичний та метилотрофний метаногенез)

Переваги: Найбільш стійкий та витривалий біологічний агент серед усіх метаногенів. Має високу швидкість росту (час генерації – 1-2 доби) та великий розмір клітинних конгломератів, захищених міцною оболонкою з метанохондрітину. Має високий поріг стійкості до амонійного отруєння (витримує концентрації до 5000 мг/л) та здатний ефективно працювати при тимчасових сплесках концентрації ЛЖК, виступаючи головним інженерним «щитом» БГУ при технологічних перевантаженнях рослинною масою.

Недоліки: Має низьку спорідненість до ацетату за низьких концентрацій. Коли рівень оцтової кислоти падає до норми, *Methanosarcina* програє конкурентну боротьбу роду *Methanothrix* та значно знижує швидкість генерації метану, вимагаючи підтримання стабільно підвищеного фону живлення [45].

7. Роди *Methanobacterium* та *Methanospirillum* (Гідрогенотрофний метаногенез)

Переваги: Автотрофні продуценти (зокрема види *Methanobacterium formicicum* та *Methanospirillum hungatei*), які виконують найважливішу екологічну

					ДП ББ21.17.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

функцію «водневого насоса» в консорціумі. Швидко поглинають розчинений водень, діоксид вуглецю та форміат, миттєво знижуючи їх парціальний тиск у системі. Цим самим мікроорганізми термодинамічно дозволяють перебіг реакцій ацетогенезу, рятуючи реактор від накопичення вищих кислот.

Недоліки: Забезпечують генерацію лише до 30% від загального об'єму метану. Абсолютно не здатні утилізувати органічні вуглецеві ланцюги (ацетат), через що не можуть самотійно очистити середовище від накопичених летких жирних кислот при відмові ацетокластичної ланки.

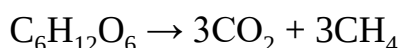
					<i>ДП ББ21.17.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

РОЗДІЛ 2. БІОХІМІЧНІ ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ, ХАРАКТЕРИСТИКА БІОЛОГІЧНИХ АГЕНТІВ

2.1 Схема перебігу процесу

Біогаз утворюється за допомогою анаеробного зброджування.

Цей процес є багатостадійною послідовною руйнацією складних сполук за умов відсутності кисню, внаслідок чого утворюється метан та вуглекислий газ:



Процес анаеробного зброджування включає в себе чотири стадії: гідроліз, ацидогенез, ацетогенез та метаногенез.

I етап - гідроліз. Зазвичай вихідна рослинна та тваринна біомаса представлена переважно складними макромолекулярними полімерними сполуками. Для забезпечення доступності внутрішнього енергетичного потенціалу субстрату для клітинного метаболізму бродильних бактерій ці високомолекулярні ланцюги на початковому етапі підлягають деструкції до низькомолекулярних мономерів (наприклад, розчинних цукрів), які здатні легко засвоюватися суміжними групами бактерій. Гідроліз полімерних компонентів виступає першою необхідною стадією на початку анаеробного зброджування.. За допомогою гідролізу органічні молекули біополімерів розпадаються на прості моносахариди, амінокислоти, гліцерин та вищі жирні кислоти.

Ацетат, водень та діоксид вуглецю, що виділяються вже на стартових фазах бродіння, мають безпосередню метаболічну цінність і можуть прямо засвоюватися метаногенами.

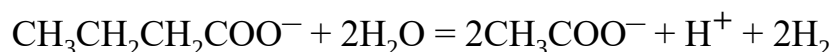
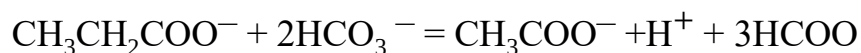
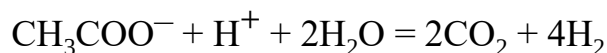
					<i>ДП ББ21.17.000 ПЗ</i>			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докum.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	РОЗДІЛ 2. БІОХІМІЧНІ ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ, ХАРАКТЕРИСТИКА БІОЛОГІЧНИХ АГЕНТІВ	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Архів</i>
<i>Розроб.</i>		<i>Хмелювська Д.В.</i>						
<i>Перев.</i>		<i>Гринюк І.І.</i>					33	70
						КПІ ім. Ігоря Сікорського ФБТ КББЕ		
<i>Затверд.</i>								

II етап - ацидогенез. На цьому етапі ацидогенні мікроорганізми поглинають продукти гідролізу, з яких утворюються проміжні леткі жирні кислоти (ЛЖК) та інші продукти, такі як: ацетати, а також вищі органічні кислоти - пропіонат і бутират, молекулярне співвідношення яких зазвичай варіюється в діапазоні від 75:15:10 до 40:40:20. Паралельно на цій стадії фіксується утворення незначних концентрацій етанолу та лактату. Питома кінетика накопичення проміжних метаболітів у межах ацидогенної фази жорстко залежить від макрокінетичних умов розщеплення субстрату; зокрема, від концентрації жирних кислот, що зазнає суттєвих змін залежно від поточного рівня активної кислотності рН середовища [18].

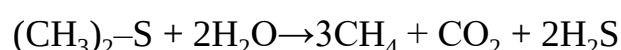
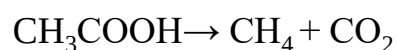
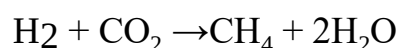
Як правило, швидкість перебігу ацидогенезу перевищує кінетичні показники всіх інших стадій анаеробного зброджування, оскільки ацидогенні бактерії відрізняються високою інтенсивністю метаболізму, а тривалість їхньої генерації (час регенерації популяції) становить менше 36 годин. Важливо наголосити, що, попри продукування на етапі ацидогенезу прямих мономерних попередників для фінальної стадії газоутворення, надмірне накопичення ЛЖК та спричинене цим хімічне підкислення бродильної маси виступає головним чинником кінетичного гальмування та повного блокування подальшого метаногенезу.

III етап - ацетогенез. У межах цієї фази здійснюється біокаталітичне перетворення вищих летких жирних кислот на ацетат із супутнім виділенням молекулярного водню. При цьому метаболізм амінокислот із парною кількістю атомів вуглецю в скелеті спрямований на безпосереднє утворення оцтової кислоти, тоді як амінокислоти з непарною кількістю вуглецевих атомів першочергово трансформуються у пропіонову кислоту. Оцтова кислота піддається електролітичній дисоціації з утворенням аніона ацетату та катіона водню, а деструкція проміжних кислот описується такими хімічними рівняннями:

					ДП ББ21.17.000 ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



IV етап - метаногенез. Кінцева стадія анаеробного ланцюга, на якій відбувається безпосередній біосинтез метану з оцтової кислоти (ацетокластичний шлях), а також у результаті реакції відновлення молекулярним воднем розчиненого діоксиду вуглецю (гідрогенотрофний шлях). Окрім цього, метаногенез може протікати за участю метилованих субстратів [41]:



2.2 Характеристика кінцевого продукту

Таблиця 2.3 – Характеристики біогазу [19]

Показник	Межі	Методи контролю
1	2	3
Нижча теплота згорання, МДж/м ³ при 20°C, тиску 101,325 кПа	31,8	ДСТУ ISO 6976:2009
Значення числа Воббе (вищого), МДж/м ³	41,2–54,5	ДСТУ ISO 6976:2009
Масова концентрація сірководню, г/м ³	0,02	ДСТУ ISO 6326-1:2015, ДСТУ ISO 6326-3:2015

Показник	Межі	Методи контролю
Масова концентрація меркаптанової сірки, г/м ³	0,036	ДСТУ ISO 6326-3:2015, ДСТУ ISO 19739:2015
Об'ємна частка кисню, %	1,0	ДСТУ ISO 6974-1:2007, ДСТУ ISO 6974-2:2007, ДСТУ ISO 6974-3:2007
Маса механічних домішок, г/м ³	0,001	ГОСТ 22387.4
Інтенсивність запаху в об'ємній частці 1% в повітрі	3	ДСТУ ISO 13734:2015, ДСТУ ISO/TR 16922:2015

Кінцевим продуктом процесу анаеробного зброджування виступає біогаз, який після проходження комплексу технологічних етапів очищення та збагачення набуває фізико-хімічних властивостей природного газу. Отриманий енергоносіє є безбарвним, не має запаху та повністю відповідає регламентованим вимогам національних стандартів ДСТУ 7721:2015 «Газоподібне паливо. Біогаз. Технічні вимоги і методи контролю», ДСТУ 7509:2014 «Газоподібне паливо. Біогаз. Методи відбору проб», а також ДСТУ 4516:2006 «Поновлювані джерела енергії. Установки біогазові», що дозволяє ефективно застосовувати його як у промисловому секторі, так і в галузі житлово-комунального господарства.

Окрім параметрів, зазначених у таблиці 2.1, важливими фізико-хімічними властивостями газової суміші є границя спалахування у повітрі, яка має перебувати в межах 6-12%, температура займання палива – 650-750°C, показник критичного тиску - 7,5 МПа, значення критичної температури -2,5°C, а також нормальна густина, що становить 1,2 кг/м³.

Транспортування отриманого біогазу територією підприємства та поза його межами має здійснюватися у суворій відповідності до нормативних інженерних вимог ДБН В.2.5-20-2010 «Газопостачання».

					ДП ББ21.17.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

Після завершення технологічних процесів метанового бродіння та обов'язкового первинного очищення газового потоку від сірководню, готовий біогаз можна закачувати та зберігати у спеціалізованих балонах. Також його можна безпосередньо спрямовувати на спалювання на когенераційній установці цього ж заводу з метою генерації електричної та теплової енергії. Отримані енергоресурси надалі витрачаються на внутрішні технологічні потреби підприємства, а саме: на забезпечення процесів гранулювання, сушіння твердої фракції біодобрив (кеку) та упарювання рідкого фугату [38, 41].

За умови такого локального внутрішньозаводського спалювання біогазу для енергетичних потреб комплексу, він не потребує додаткового глибокого очищення від супутніх забруднюючих сполук. Дана особливість зумовлена тим, що промислові енергоблоки заводу конструктивно облаштовані спеціалізованими фільтраційними системами, які ефективно затримують та нейтралізують забруднюючі речовини безпосередньо перед викидом димових газів в атмосферу, що, на відміну від промислових об'єктів, не передбачено в будівлях житлового сектора.

У разі комерційного використання біогазу як товарного палива загального призначення, його склад та теплотворну здатність необхідно адаптувати під енергетичну цінність природного газу, а також здійснювати його обов'язкове одорювання (надання специфічного різкого запаху за допомогою спеціальних домішок-одорантів). Надання газу запаху є необхідним заходом безпеки для швидкого виявлення можливих технологічних витоків біогазу візуально-органолептичним методом. Водночас проведення повного циклу збагачення (апгрейдингу) біогазу до біометану та доведення його якісних показників до стандартів природного газу є економічно доцільним та рентабельним лише для біогазових комплексів, продуктивність яких перевищує 250 м³ біогазу на годину.

У промисловості та комунальній сфері біогаз застосовують як моторне паливо для автомобільного транспорту або подають безпосередньо в газорозподільну мережу. Також широко відомі та впроваджені інженерні рішення

					ДП ББ21.17.000 ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

для організації опалення за допомогою біогазу. У системах теплопостачання використовують опалювальні котли з атмосферними пальниками невеликої потужності (від 10 до 30 кВт), а також високоефективні паяльні пальники для забезпечення значно більшої теплової потужності. Крім того, можливе застосування газових колонок (перкотлярів), які функціонують на базі одного атмосферного пальника і використовуються для швидкого нагрівання води в системах промислового гарячого водопостачання.

					ДП ББ21.17.000 ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3. ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

3.1. Сировина та матеріали

Характеристика основної сировини, допоміжних матеріалів та реагентів, а також посилання на діючу нормативно-технічну документацію (НТД) у вигляді державних стандартів України (ДСТУ) та галузевих стандартів (ГСТУ) зведено у таблицю 3.1 [6,7].

Таблиця 3.1 – Характеристика сировини, допоміжних матеріалів та реагентів [32]

Найменування сировини, матеріалу, реагенту	Категорія і номер НТД (ТУ, ГСТУ, ДСТУ)	Показники, які підлягають обов'язковій перевірці при вхідному контролі	Нормативне технологічне значення показника	Примітки, функціональне призначення сполуки у схемі
1	2	3	4	5
1. Основна сировина (Ко-субстрати):				
1.1. Силос кукурудзяний	ДСТУ 4782:2007	1. Масова частка сухої речовини (СР) 2. Активна кислотність (рН) 3.	28,0 – 35,0% 3,8 – 4,2 0,0%	Головне високовуглецеве джерело карбону. Подається на ДР 3.1.

					ДП ББ21.17.000 ПЗ				
Зм.	Арк.	№ док-м.	Підпис	Дата					
Розроб.		Хмелювська Д.В.			РОЗДІЛ 3. ТЕХНОЛОГІЧНА СХЕМА		Літ.	Арк.	Архциф
Перев.		Гринюк І.І.						39	70
							КПІ ім. Ігоря Сікорського ФБТ КББЕ		
Затверд.									

		ні показники (колір, запах)		
1.2. Гичка цукрових буряків	ДСТУ 4327:2004 «Гичка цукрових буряків. Технічні умови»	1. Масова частка сухої речовини (СР) 2. Масова частка мінеральних домішок (земля, пісок) 3. Вміст сирого протеїну (азоту)	15,0 – 20,0% ≤15,0% від СР 11,0 – 14,5% від СР	Допоміжне джерело азоту (С:N). Виступає природним лужним буфером. Подається на ДР 3.1.
2. Допоміжні матеріали та реагенти:				
2.1. Крейда мелена (Суспензія карбонату кальцію)	ТУ У 08.1- 23817399- 001:2012 «Крейда мелена»	1. Масова частка карбонату кальцію (CaCO ₃). Дисперсність (залишок на ситі 0,14 мм)	≥ 98,0% ≤0,5%	Аварійний хемосорбційний реагент для нейтралізації ЛЖК та коригування рН в М-16.
2.2. Оксид заліза (Тверда пориста насадка)	ТУ У 24.1- 13456789- 2015	1. Масова частка активного Fe ₂ O ₃ .	≥ 65,0% 3,0 – 7,0 мм	Хемосорбент для сухої очистки біогазу від сірководню в

					ДП ББ21.17.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

		Фракційний склад (розмір зерен)		адсорбційний колони АБ (ТП 6.2).
2.3. Атмосферне повітря	ДСТУ ISO 8573-1:2003 «Стиснене повітря. Частина 1. Забруднюва чі та класи чистоти»	1. Вміст механічного пилу та домішок	Клас чистоти ≤ 4	Використовуєть ся для опресовування контуру (ДР 1) та як теплоносій у сушарці (ДР 2).
2.4. Мулова вода (Рециркуляційн ий фугат)	Внутрішній регламент очисних споруд / БГУ	1. Загальна мінералізація 2. Температура рідини	$\leq 12,0$ г/л 30-35°C	Технологічний агент для розрідження та засівання сировини бактеріями в змішувачі ЗБ (ДР 3.3).

Фізико-хімічні вимоги до основної сировини

Кукурудзяний силос (ДСТУ 4782:2007): Вхідний контроль жорстко лімітує наявність масляної кислоти у силосі. Наявність масляної кислоти свідчить про порушення герметичності при силосуванні та розвиток анаеробних гнильних бактерій роду *Clostridium butyricum*. Такий силос містить токсичні продукти розпаду білків (кадаверин, путресцин), які пригнічують кінцевий метаногенез. Масова частка молочної кислоти повинна складати не менше 60–70% від загальної суми вільних кислот силосу. Лінійний розмір часток, що надходять зі сховища, не повинен перевищувати 30–50 мм, що дозволяє шнековим живильникам ТШ працювати без заклинювання [6].

Гичка цукрових буряків (ДСТУ 4327:2004) «Гичка цукрових буряків. Технічні умови»): Критичним параметром прийому є зольність субстрату. Оскільки збирання гички здійснюється механізованим способом, вміст грудок землі та піску є значним. Обмеження вмісту золи на рівні $\leq 15\%$ є обов'язковим для попередження абразивного знищення робочих органів гвинтового насоса та накопичення мертвого важкого осаду в нижньому конусі метантенка. Суспензія гички не повинна містити ознак масового пліснявіння (розвитку аеробних мікроміцетів), оскільки їхні мікотоксини повністю блокують ферментні системи архей [7].

Фізико-хімічні вимоги до допоміжних матеріалів

Крейда мелена (ТУ У 08.1-23817399-001:2012 «Крейда мелена»): Використовується як хімічний буферний реагент. Тонкодисперсний стан (залишок на ситі 0,14 мм $\leq 0,5\%$) забезпечує високу швидкість розчинення карбонату кальцію в текучій пульпі. Низька дисперсність привела б до випадання крейди в осад на дно метантенка до моменту вступу в реакцію з летких жирних кислот (ЛЖК). Вміст домішок силікатів (піску) у крейді обмежується $\leq 1,5\%$ [26].

- **Залізооксидний поглинач (Fe_2O_3):** Тверда зерниста насадка повинна мати механічну міцність на стискання не менше 2,5 МПа для виключення стирання зерен у пил під дією постійного тиску газового потоку в колоні. Розмір зерен 3,0 - 7,0 мм є оптимальним для створення розвиненої

					ДП ББ21.17.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

питомої поверхні хемосорбції при збереженні низького гідродинамічного опору шару насадки.

Обґрунтування вибору та нормування витрат матеріалів

Вибір усіх допоміжних компонентів підпорядкований єдиній інженерній меті - забезпеченню максимальної автономності та екологічної замкненості біогазового комплексу:

1. **Заміна технічної води фугатом:** норма витрати чистої водопровідної води для розрідження сухого кукурудзяного силосу зведена до **0,0 кг**. Замість неї впроваджено використання підігрітого рециркуляційного фугату з лагун ПВ 9. Це дозволяє підтримувати водний баланс метантенка, економити теплову енергію (фугат уже має температуру близько 32–35 °С) та повертати живі клітини бактерій назад у бродильну зону.

2. **Нормування витрати реагенту CaCO_3 :** Крейда вводиться в систему не безперервно, а виключно як індикаторний аварійний реагент. Норма її витрати розраховується автоматично за показаннями промислового рН-метра у метантенку: при падінні рН нижче критичної позначки 6,6, автоматика подає команду на введення 5%-ї водної суспензії крейди з розрахунку **2,5 кг CaCO_3 на кожний кубічний метр субстрату** до моменту повної стабілізації карбонатної буферної ємності та відновлення рН до рівня 7,2.

3. **Циклічність заміни хемосорбенту Fe_2O_3 :** Залізооксидна насадка працює в циклічному режимі з повною рекуперацією. Термін служби однієї партії насадки до повної хімічної деградації становить 12 місяців, за умови проведення проміжних регенерацій атмосферним повітрям безпосередньо в корпусі апарата [26].

					ДП ББ21.17.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

3.2. Контроль виробництва

Для забезпечення стабільного ходу біотехнологічного процесу, досягнення максимального питового виходу цільового біогазу, запобігання втратам сировинних та енергетичних ресурсів, а також для гарантування відповідності кінцевої продукції вимогам чинних стандартів, на підприємстві впроваджено систему безперервного постадійного контролю виробничого режиму [18,32].

Операційний контроль реалізується на всіх етапах технологічного ланцюга, що дозволяє оперативно реагувати на фізіолого-біохімічні зсуви анаеробного консорціуму, попереджати аварійні ситуації (закислення або інтоксикацію біореактора) та мінімізувати механічний знос обладнання.

Таблиця 3.2 – Точки і параметри контролю виробництва біогазу [41]

№ п/п	Найменування стадії процесу, місце заміру	Параметр, що контролюється	Частота контролю	Норми технологічного режиму та допустимі відхилення	Метод контролю, тип приладу
1	ДР 1. Перевірка газового контуру системи	Герметичність апаратів під тиском повітря	Перед кожним пуском або після ремонту	Падіння тиску за 24 год $\leq 0,01$ МПа	Пневматичний опресовувальний метод, манометр
2	ДР 3.2. Вузол молоткової дробарки фітомаси	Дисперсність (лінійний розмір часток)	Періодично, кожна добова партія	Робочий діаметр фракції $d < 10$ мм	Ситовий механічний аналіз, калібрувальна сітка

3	ТП 4. Бродильна ізотермічна камера метантенка	Робоча температур а суспензії субстрату	Безперерв но, автоматич но	$t = 35 \pm 3^{\circ}\text{C}$ (мезофільн ий режим)	Автоматичний замір, датчик- термопара
4	ТП 4. Середина бродильного об'єму реактора	Активна кислотність рідкого середовищ а	Регулярно, кожні 4 години	$\text{pH} = 6,5 - 7,5$ (оптимальн ий нейтральни й)	Електрометричн ий аналіз, промисловий рН-метр
5	ТП 4. Рівень рідкої фази в метантенку	Коефіцієнт наповнення камери реактора	Безперерв но, автоматич но	Робочий коефіцієнт заповнення $K_3 = 0,8$	Акустичний або поплавковий метод, рівнемір
6	ТП 6.2. Вихід газового потoku з адсорбера	Об'ємна концентрац ія сірководню	Автоматич но, регулярно	Граничний вміст H_2S $\leq 0,05\%$ за об'ємом	Хіміко- хроматографічни й аналіз, газоаналізатор
7	ТП 6.3. Накопичувал ьний об'єм газгольдера	Робочий тиск комерційно го біогазу	Безперерв но	Номінальне значення тиску $P = 0,5 \text{ МПа}$	Манометричний автоматичний контроль, манометр
8	ПВ 8.2. Вихід з камери барабанної сушарки	Залишкова вологість сухого дигестату	Після кожної поточної операції	Кінцевий вміст вологи у біодобриві - 12%	Термогравіметри чний метод, вологомір

3.3. Матеріальний баланс

Розрахунок матеріального балансу базується на переробці суміші кукурудзяного силосу та гички цукрових буряків у визначеному технологічному співвідношенні 2:1 за масою сухої речовини (СР) на користь силосу кукурудзи, з обов'язковим додаванням активного мулу як інокуляту.

Вихідні дані та фізико-хімічні показники субстратів:

Загальна добова маса нативної (вологої) рослинної суміші: $m_{\text{нат}} = 35000$ кг/добу (35 т/добу);

Вологість кукурудзяного силосу: 68% ($\text{СР}_{\text{сил}} = 32\%$);

Вологість гички цукрових буряків: 85% ($\text{СР}_{\text{гич}} = 15\%$);

Необхідна робоча вологість пульпи для зброджування в метантенку: 90% ($\text{СР}_{\text{пульп}} = 10\%$) [40].

Розрахунок компонентного складу вхідної суміші за нативною вагою:

Щоб забезпечити точну пропорцію 2:1 за сухою речовиною, на кожні 2 кг СР силосу додається 1 кг СР гички. З урахуванням початкової вологості матеріалів, добове завантаження нативної сировини становить:

- Маса нативного кукурудзяного силосу: 19280 кг/добу (вносить 6170 кг СР);
 - Маса нативної бурякової гички: 15720 кг/добу (вносить 2358 кг СР);
 - Сумарна добова маса сухої речовини суміші: $6170 + 2358 = 8528$ кг СР.
- Початкова вологість цієї суміші становить 75,63% [38].

Розрахунок розрідження робочої пульпи до оптимуму 90% вологості:

- Необхідна загальна маса робочої пульпи в метантенку:

$$m_{90\%} = \frac{8528}{0,10} = 85280 \text{ кг/добу};$$

- Загальна маса рідини, яку необхідно додати для розрідження системи:

$$\Delta m_{\text{рід}} = 85280 - 35000 = 50280 \text{ кг/добу};$$

					ДП ББ21.17.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

- Згідно з технологічними вимогами, як закваску вносимо інокулят (активний мул) із вологістю 95% (СР= 5%) у кількості 30% від об'єму розрідження - 15080 кг/добу, а решту 35200 кг/добу закриваємо очищеною водою (технологічним конденсатом рециклу).

Розрахунок виходу продуктів біоконверсії:

Ступінь деградації сухої органічної речовини рослинних субстратів становить 48%. Питомий вихід сирого біогазу становить 4140 кг/добу (при середній густині $\rho = 1,22 \text{ кг/м}^3$ це становить 3393 м³/добу)

Таблиця 3.3 – Матеріальний баланс виробництва [32]

Використано			Отримано		
Стадія	Назва сировини, матеріалів та напівпродуктів	Кількість, кг	Стадія	Назва кінцевого продукту або напівпродукту, відходів, витрат	Кількість, кг
ДР 3. Підготовка сировини	Кукурудзяний силос	19280		Підготовлена робоча пульпа для метантенка (вологість 90%)	69775
	Гичка цукрових буряків	15720			
	Вода очищена (технологічний конденсат рециклу)	35200		Технологічні втрати при подрібненні та змішуванні (0,5%)	425
	Всього	70200			70200

ТП Проведення метанового зброджуванн я в метантенку	4	Субстрат	69775		Зброджений залишок (рослинний дигестат)	80673
		Активний мул	15080		Сирий рослинний біогаз	4140
					Механічні втрати газів та витоки через арматуру (0,05%)	42
					Зброджений залишок (рослинний дигестат)	80673
		Всього	84855		Всього	84855
ТП Видалення вологи	6.1.	Сирий рослинний біогаз	4140		Очищений товарний біогаз (біометан)	483
		Вода очищена (на промивну абсорбційну колону)	1800		Вилучений сірководень (H ₂ S, направляється на фільтри)	121
					Технологічні втрати газу на лінії (0,15%)	7
		Всього	5940			3611

ПВ 8.1. Відділення вологи	Зброджений залишок (рослинний дигестат)	80673			
	Всього	80673			
ПВ 8.3. Гранулюван ня та пакування	фракція (рослинний кек)	2139		Висушене гранульоване гумусне біодобриво	1 603
				Випарувана внутрішньокапіляр на волога	526
				Втрати пилу та сухої речовини при грануляції	10
	Всього	2139			2139

3.4 Опис технологічної схеми

ДР 1 Підготовка обладнання

Перед запуском комплексу весь газовий контур опресовують компресором.
Систему витримують під тиском 24 години для перевірки на герметичність.

ДР 2 Підготовка теплоносія

ДР 2.1 Забір та фільтрування повітря

Атмосферне повітря засмоктується через повітрозабірник і очищується
від пилу та механічних домішок у касетному фільтрі.

ДР 2.2 Нагнітання повітряного потоку

Очищене повітря надходить до повітродувки, де стискається роторами
для створення динамічного тиску.

ДР 2.3 Термічний нагрів повітря

					<i>ДП ББ21.17.000 ПЗ</i>	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Повітряний потік під тиском подається в трубний простір калорифера. У міжтрубний простір протитоком заходять гарячі вихлопні гази КГУ з температурою понад 450 °С. Нагріте до 130 °С повітря по ізольованому повітроводу транспортується в сушильний барабан.

ДР 3 Підготовка сировини

ДР 3.1 Накопичування сировини

Кукурудзяний силос та гичка цукрових буряків вивантажуються в приймальні бункери та дозуються шнеками у пропорції для вирівнювання вуглецево-азотного балансу.

ДР 3.2 Подрібнення сировини

Рослинна суміш подрібнюється та транспортується за допомогою шнекового дозатора до лінії змішування.

ДР 3.3 Змішування та гомогенізація

Подрібнена маса у резервуарі-змішувачі розріджується рідкою фракцією з дигестату (фугатом) з лагун до робочої вологості 90% та перемішується пропелерною мішалкою.

ДР 3.4 Нагрівання субстрату

Насос Поз. 15 подає рідкий субстрат крізь теплообмінник 3Т, де він підігрівається гарячою водою від когенератора до мезофільної температури 35 °С.

ТП 4 Зброджування субстрату в метантенку

Анаеробне зброджування відбувається безперервно в єдиному вертикальному метантенку протягом 22–25 діб за температури 35 ± 1 °С. Субстрат постійно перемішується механічною мішалкою для запобігання утворенню кірки та осаду. Автоматично контролюються тиск та рН (у разі закислення додається крейда).

ТП 5 Збір біогазу

Вологий сирий біогаз самопливом відводиться з-під купола метантенка через гідрозатвор та лічильник на стадію очищення.

ТП 6 Очищення біогазу

					<i>ДП ББ21.17.000 ПЗ</i>	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ТП 6.1 Видалення вологи

Біогаз проходить крізь підземні конденсатовивідники, де за рахунок охолодження ґрунтом водяна пара конденсується і стікає в дренаж.

ТП 6.2 Очищення від сірководню

Осушений газ проходить через абсорбційну колону А6 з оксидом заліза, де вміст сірководню знижується до рівня менше 0,05%. Потім очищений біогаз напряду спрямовується на когенераційну установку.

ТП 7 Отримання електроенергії і тепла

Біогаз спалюється в циліндрах когенераційної установки. Отримана електроенергія експортується в мережу, а рекупероване тепло (гаряча вода та вихлопні гази) спрямовується на потреби БГУ: підігрів субстрату, опалення метантенка та нагрів повітря в калорифері.

ПВ 8 Виділення і обробка дигестату

ПВ 8.1 Відділення вологи

Відпрацьований дигестат з метантенка насосом подається на шнековий сепаратор, де розділяється на рідку фракцію (фугат) та твердий кек (вологість 40–60%).

ПВ 8.2 Сушіння кеку

Вологий кек сушиться у барабанній сушарці гарячим повітрям (130 °С) від калорифера до товарної вологості 12%, паралельно проходячи повну термічну пастеризацію.

ПВ 8.3 Гранулювання та пакування

Висушений шлам пресується у прес-грануляторі Пн-30 в пелети, які охолоджуються та автоматично фасуються в мішки.

ПВ 9 Накопичення та рециркуляція рідкої фракції

Рідкий фугат після сепаратора стікає в лагуни-накопичувачі. Частина води повертається насосом у змішувач для розрідження нової сировини, а надлишок відвантажується як рідке органічне добриво.

					<i>ДП ББ21.17.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

РОЗДІЛ 4. ПІДБІР ТА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЛАДНАННЯ

4.1. Основні технологічні розрахунки біогазової установки

Розрахунок ділянки анаеробної ферментації та підбір бродильного обладнання виконано на основі показників добового матеріального балансу рослинної сировини (Таблиця 3.3).

а) Конструктивний розрахунок метантенка

Вихідні дані для розрахунку:

Сумарна добова маса розрідженої робочої пульпи з урахуванням інокуляту:

$$m_{90\%} = 85280 \text{ кг/добу};$$

Усереднена густина гомогенізованої рослинної пульпи: $\rho = 1040 \text{ кг/м}^3$ (1,04 т/м³).

Добовий об'єм завантаження субстрату ($V_{\text{доб}}$):

$$V_{\text{доб}} = \frac{m_{90\%}}{\rho} = \frac{85200}{1040} = 82 \text{ м}^3/\text{добу};$$

Розрахунковий об'єм бродильної камери (V_p):

Розрахунок геометричного об'єму здійснюється з урахуванням дози добового завантаження сировини ($D_{\text{зав}}$). Для одноступеневого мезофільного процесу переробки силосних консервів та гички приймається нормативна доза навантаження на рівні 5,2% (що відповідає гідравлічному часу утримання біомаси $\text{HRT} = 19,2$ діб для забезпечення глибокого розкладу клітковини):

$$V_p = \frac{V_{\text{доб}}}{D_{\text{зав}}} = \frac{82 \times 100}{5,2} = 1576,92 \text{ м}^3;$$

Приймаємо стандартний інженерний коефіцієнт заповнення реактора $K_z = 0,85$. Тоді повний необхідний геометричний об'єм апарата становить:

					ДП ББ21.17.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РОЗДІЛ 4. ПІДБІР ТА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЛАДНАННЯ	Літ.	Арк.	Аркцшів
Розроб.		Хмелювська Д.В.						
Перев.		Гричук І.І.					52	70
						КПІ ім. Ізгоря Сікорського ФБТ КББЕ		
Затверд.								

$$V_{\text{заг}} = \frac{V_p}{K_3} = \frac{1576,92}{0,85} = 1855,2 \text{ м}^3;$$

На основі отриманих розрахунків, відповідно до державного промислового ряду ємнісного обладнання, обираємо **один вертикальний залізобетонний метантенк типу CSTR корисним геометричним об'ємом $V_m = 1850 \text{ м}^3$** (модифікація БГУ-1850).

Конструктивні характеристики спроектованого метантенка:

- Внутрішній робочий діаметр реактора (D): 15,0 м;
- Загальна висота циліндричної частини ($H_{\text{ц}}$): 9,8 м;
- Висота нижнього дренажного конуса ($H_{\text{н.к}}$): 1,5 м;
- Висота верхнього газового конуса ($H_{\text{в.к}}$): 1,2 м;
- Тип перемішуючого пристрою: занурена пропелерна мішалка тягової дії.

Фактична доза добового навантаження (D_{ϕ}):

$$D_{\phi} = \frac{V_{\text{доб}} \times 100}{V_{\phi}} = \frac{82,0 \times 100}{1850} = 4,43 \text{ м}^3;$$

Розрахунок геометричних співвідношень пропелерної мішалки:

Для ефективної гомогенізації лігноцелюлозної пульпи та руйнування рослинної кірки силосу, геометричні пропорції перемішуючого пристрою приймаємо відповідно до нормативних інженерних співвідношень:

Співвідношення діаметра реактора до діаметра гвинта: $D/d = 4 \text{ м};$

Діаметр пропелера мішалки:

$$d_m = \frac{D}{4} = \frac{15000}{4} = 3750 \text{ мм};$$

Висота встановлення мішалки від днища (h) приймається з інтервалу співвідношень $h/d_m = 0,6$:

$$h = d \times 0,6 = 3750 \times 0,6 = 2250 \text{ м}^3;$$

Розрахунок об'єму газгольдера:

					ДП ББ21.17.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

Згідно з добовим матеріальним балансом, чистий вихід біогазу за добу становить 3393 м³/добу. За умов періодичності та гнучкості споживання, час акумулювання газу в буферній ємності приймаємо рівним $\tau = 5,5$ (або 0,23 доби):

$$V_{\text{газ}} = V_{\text{доб.газ}} \times \tau = 3393 \times 0,23 = 780,39 \text{ м}^3;$$

Обираємо один інтегрований наземний двомембранний газгольдер об'ємом 800 м³, який монтується безпосередньо як газонепроникний купол на залізобетонне перекриття спроектованого метантенка.

б) Тепловий розрахунок метантенка

Кількість теплоти, необхідна для підігрівання вхідного рослинного субстрату ($Q_{\text{під.р.с}}$):

Розрахунок ведеться для найбільш критичного (зимового) періоду, коли температура вихідної біомаси, що надходить із відкритих сховищ, падає до $t_{\text{вх}} = 5^{\circ}\text{C}$ (278 К), а температура мезофільної ферментації підтримується на рівні $t_{\text{пр}} = 35^{\circ}\text{C}$ (308 К). Коефіцієнт корисної дії (ККД) трубної системи підігріву реактора становить $\eta = 0,80$.

$$Q_{\text{під}} = m_{90\%} \times C \times (t_{\text{пр}} - t_{\text{вх}}) \times \frac{1}{\eta}$$

Де $C = 4,18 \times 10^{-3}$ МДж/(кг·К) — середня питома теплоємність обводненого рослинного субстрату.

$$Q_{\text{під}} = 85280 \times 4,18 \times 10^{-3} \times (35 - 5) \times \frac{1}{0,80} = 13365,12 \text{ МДж/добу}$$

Кількість теплоти, що втрачається через залізобетонні стінки метантенка в довкілля ($Q_{\text{втр}}$):

Розрахунок втрат тепла через ізольовані зовнішні конструкції апарата за середньої зимової температури повітря $t_{\text{зовн}} = -5^{\circ}\text{C}$ (268 К) здійснюється за формулою:

$$Q_{\text{втр}} = k \times F \times (t_{\text{пр}} - t_{\text{зовн}})$$

					ДП ББ21.17.000 ПЗ	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Де $k = 1,0 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ - коефіцієнт тепловіддачі стінок з урахуванням мінераловатного термоізоляційного шару;

F - загальна площа зовнішньої поверхні теплообміну метантенка, яка для циліндричної конструкції з конічним днищем розраховується за формулою:

$$F = \pi \times D \times \left(H_{\text{ц}} + \frac{D}{4} \right) = 3,14 \times 15,0 \times \left(9,8 + \frac{15,0}{4} \right) = 47,1 \times 13,55 = 628,2 \text{ м}^2$$

$$Q_{\text{втр}} = 1,0 \times 628,2 \times (35 - (-5)) = 25128 \text{ Вт} = 25,13 \text{ кВт}$$

Переведемо добові втрати тепла в мегаджоулі (з урахуванням $1 \text{ кВт} \cdot \text{год} = 3,6 \text{ МДж}$):

$$Q_{\text{втр.добу}} = 25,13 \times 24 \times 3,6 = 2171,23 \text{ МДж/добу}$$

Загальна витрата енергії комплексом за добу ($Q_{\text{заг}}$):

Сумарна потреба в тепловій та механічній енергії включає витрати на роботу приводів механічних мішалок, яка за експериментальними даними для апарата об'ємом 1850 м^3 становить $Q_{\text{мех}} = 430 \text{ МДж/добу}$:

$$Q_{\text{заг}} = Q_{\text{під}} + Q_{\text{втр.добу}} + Q_{\text{мех}} = 13365,12 + 2171,23 + 430 = 15966,35 \text{ МДж/добу}$$

Кількість енергії, що генерується при спалюванні отриманого біогазу за добу ($Q_{\text{вир}}$):

$$Q_{\text{вир}} = V_{\text{доб.газ}} \times C_{\text{г}} = 3393 \times 22 = 74646 \text{ МДж/добу}$$

Де $C_{\text{г}} = 22 \text{ МДж/м}^3$ — чиста нижча теплотворна здатність отриманого рослинного біогазу.

Сумарний добовий енергетичний ефект БГУ (E_6):

$$Q_6 = Q_{\text{вир}} - Q_{\text{заг}} = 74646 - 15966,35 = +58679 \text{ МДж/добу}$$

					ДП ББ21.17.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

Висновок до теплового розрахунку:

Позитивне значення енергетичного ефекту (+58679,65 МДж/добу) доводить високу термодинамічну ефективність та повну автономність розробленої схеми. Кількість виробленої енергії значно перевищує власні потреби метантенка на підігрів та перемішування, що дозволяє спрямувати вільний енергетичний потенціал на внутрішні процеси сушіння кеку.

На основі виконаних комплексних інженерних та теплофізичних обчислень для ділянки виробничого біосинтезу за вихідними даними матеріального балансу рослинних ко-субстратів було підібрано та рекомендовано до встановлення один вертикальний залізобетонний метантенк типу CSTR повним об'ємом 1850 м³ (робочий коефіцієнт заповнення 0,85) з внутрішнім діаметром 15 м, обладнаний зануреною пропелерною мішалкою діаметром 3750 мм, а також один інтегрований двомембранний газгольдер об'ємом 800 м³ для стабільного збору та зберігання цільового палива.

					ДП ББ21.17.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ, ОХОРОНА ПРАЦІ ТА НАВКОЛИШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ

Проектування та експлуатація промислового комплексу безперервного анаеробного зброджування кукурудзяного силосу та гички цукрових буряків підпорядковані суворим вимогам нормативно-правових актів з охорони праці (НПАОП) України. Біогазова станція класифікується як високотехнологічний об'єкт із підвищеним рівнем пожежно-, вибухо- та біологічної небезпеки. Це зумовлено постійною генерацією, компримуванням та спалюванням горючого газового палива, високим тиском у магістралях, наявністю рухомих механічних вузлів та мікробіологічних агентів [34].

Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів

Впровадження інженерних заходів безпеки базується на детальному аналізі потенційних деструктивних факторів, які згідно з ДСТУ 3273-95 [34].

Фізичні небезпечні фактори

1. Пожежно- та вибухонебезпека газового контуру: головний компонент біогазу - метан (CH_4) - утворює з киснем атмосферного повітря вибухонебезпечні суміші в діапазоні концентрацій 6,0–15,0% за об'ємом.

2. Підвищений тиск у технологічних системах: газовий компресор стискає очищений біогаз до робочого тиску (5 бар) для його акумулювання всередині двомембранного газгольдера. Механічне руйнування стінок ресиверів, трубопроводів або корпусів фільтрів під дією надлишкового тиску може призвести до вибухоподібної декомпресії з утворенням уламків.

					ДП ББ21.17.000 ПЗ				
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата	РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ, ОХОРОНА ПРАЦІ ТА НАВКОЛИШНЬОГО СРЕДОВИЩА	Літ.	Арк.	Аркцшів	
Розроб.		Хмеловська Д.В.							
Перев.		Гринюк ІІ.					57	70	
						КПІ ім. Ігоря Сікорського ФБТ КББЕ			
Затверд.									

3. Висока температура поверхонь обладнання: Газо-повітряний калорифер, барабанна сушарката вихлопний тракт КГУ функціонують у високотемпературних режимах (температура вихлопних газів перевищує 450°C , а нагрітого повітря - 130°C). Прямий контакт шкіри персоналу з неізольованими металевими стінками апаратів викликає термічні опіки.

4. Небезпечний рівень напруги в електричному ланцюзі: Усі основні й допоміжні приводи (електродвигуни молоткової дробарки, прес-гранулятора, шнекових насосів та вентиляторів калорифера) підключені до промислової трифазної електромережі напругою 380 В / 50 Гц. Порушення цілісності ізоляції обмоток або кабельних ліній створює ризик ураження людини електричним струмом.

5. Підвищений рівень шуму та вібрації: Обертіві ротори молоткової дробарки, повітродувки Рутса та газопоршневого двигуна КГУ є потужними джерелами низько- та середньочастотного звукового тиску. Тривалий вплив шуму, що перевищує регламентні , викликає професійні захворювання слухового апарату та загальну втоми операторів [32,34,35].

Хімічні небезпечні та токсичні фактори

1. Токсичність сірководню (H_2S): Сирий біогаз до моменту проходження адсорбера Аб містить до 0,5% сірководню. Сірководень є сильною нервово-паралітичною отрутою. Завдяки високій густині він важчий за повітря і здатний накопичуватися в низинних точках приміщень, колодязях та приямках. Вдихання повітря з концентрацією понад 0,1% викликає миттєвий параліч дихального центру та смерть [20,34].

2. Ризик задухи через накопичення діоксиду вуглецю (CO_2): Вуглекислий газ є баластним компонентом біогазу (до 43% за об'ємом). Він також важчий за повітря і не має кольору та запаху. При

					ДП ББ21.17.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

аварійних витоках у закритих приміщеннях без вентиляції витісняє кисень, викликаючи кисневе голодування, втрату свідомості та задуху [35].

Біологічні небезпечні фактори

Вихідна нативна гичка цукрових буряків збирається безпосередньо з полів і контактує з ґрунтом, що обумовлює наявність спор патогенних мікроорганізмів та яєць гельмінтів. Прямий контакт персоналу з необробленою сировиною на стадії ДР 3.1 без засобів індивідуального захисту створює ризик зараження гельмінтозами та іншими бактеріальними інфекціями [34].

Інженерно-технічні заходи з охорони праці та пожежної безпеки

Для повної нейтралізації виявлених небезпек у проєкті розроблено та впроваджено комплекс архітектурно-планувальних, інженерних та організаційних рішень.

Пожежна та вибухобезпека системи

- Зонування приміщень: приміщення компресорної станції біогазу, когенераційного блоку та зона розміщення двомембранного газгольдера віднесені до вибухонебезпечної категорії А (клас зони В-І згідно з ПУЕ). Споруди розміщують на генеральному плані з навітряного боку відносно адміністративних корпусів з урахуванням регламентних протипожежних розривів.
- Вибухозахищене обладнання: усі електродвигуни занурених мішалок метантенка, гвинтового компресора та шнекового насоса підібрані строго у вибухозахищеному виконанні (маркування вибухозахисту не нижче).
- Вентиляція та газоаналіз: у цехах категорії А впроваджено безперервну припливно-витяжну вентиляцію у вибухобезпечному виконанні, яка забезпечує трикратний повітрообмін за годину. Приміщення обладнуються автоматичними стаціонарними датчиками-газоаналізаторами метану. При

					ДП ББ21.17.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

досягненні концентрації газу в повітрі на рівні 20% від нижньої межі вибухонебезпечності (1,2% за об'ємом) автоматика миттєво вмикає аварійну звукову сигналізацію та запускає резервні аварійні витяжні вентилятори.

- Захист від статичної електрики: увесь газовий тракт (сталеві труби, корпуси адсорбера та сепаратора) об'єднується в єдиний заземлювальний контур. Опір заземлювального пристрою не повинен перевищувати . Для захисту мембрани газгольдера від прямих ударів блискавки встановлюються окремо розташовані щоглові блискавковідводи [43].

Електробезпека обладнання

Для захисту персоналу від ураження струмом при випадковому переході напруги на металеві корпуси машин внаслідок пошкодження ізоляції, впроваджено комплексне захисне заземлення та занурення відповідно до вимог ДСТУ Б В.2.5-82:2016. Усі пускові щити та щити автоматизації КВПіА обладнуються пристроями захисного відключення (ПЗО), які миттєво (за час) знеструмлюють ланцюг при виникненні струму витoku понад 30 мА. Роботи всередині метантенка при його плановому опресовуванні та огляді дозволяється проводити лише з використанням переносних світильників напругою у вибухозахищеному виконанні [35,37].

Захист від шуму, вібрації та термічних опіків

- Зниження шуму: Потужні віброактивні агрегати - молоткова дробарка та когенераційний двигун - монтуються на індивідуальних залізобетонних фундаментах, повністю віброізолюваних від фундаментів стін будівлі за допомогою пружних демпферних прокладок. З'єднання нагнітальних патрубків насосів із магістральними трубопроводами виконується через гнучкі гумові вставки (віброгасильні компенсатори). Персонал у машинних залах зобов'язаний використовувати засоби індивідуального захисту органів слуху - протишумні навушники або беруші за ДСТУ EN 352-1:2018.

					<i>ДП ББ21.17.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

- Термічна ізоляція: усі високотемпературні трубопроводи гарячої води опалювального контуру, повітроводи гарячого повітря калорифера та корпус барабанної сушарки покриваються шаром теплоізоляції з базальтового волокна, захищеного алюмінієвим кожухом. Товщина ізоляції розрахована так, щоб температура на зовнішній поверхні захисного кожуха у зоні доступу персоналу не перевищувала .

Охорона навколишнього середовища

Проектований біогазовий комплекс функціонує як високоефективний природоохоронний та енергозберігаючий об'єкт, повністю інтегрований у систему циркулярної економіки агропідприємства. Технологічні рішення дозволяють кардинально покращити екологічний стан навколишнього природного середовища за такими напрямками:

1. Захист атмосферного басейну від парникового ефекту: Традиційне відкрите накопичення та гниття тоннажних залишків гички цукрових буряків на полях призводить до масштабної емісії парникових газів: вільного метану (CH_4) та діоксиду вуглецю (CO_2). Збирання гички та її подача в єдиний герметичний метантенк дозволяє повністю перехопити цей газовий потік. Станція забезпечує 100% уловлювання метану, який згодом спалюється в когенераторі, перетворюючись на екологічно чисту електричну енергію. Це заміщує спалювання викопного палива на теплових електростанціях і значно знижує антропогенний вуглецевий слід підприємства.

2. Організація безстічного виробництва та захист гідросфери: найбільш небезпечним фактором відкритого накопичення силосу та гички є виділення агресивного, токсичного силосного соку з екстремально високими показниками хімічного споживання кисню (ХСК до 50 000 мг/л). Цей сік здатний просочуватися в ґрунт та отруювати підземні

					ДП ББ21.17.000 ПЗ	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

водоносні горизонти нітратами. У нашому проєкті рідкий дигестат після метантенка зневоднюється на сепараторі. Отримана рідка фракція фугату зливається в лагуни ПВ 9, які повністю гідроізольовані від ґрунту спеціальною тришаровою полімерною геомембраною високої щільності (HDPE товщиною 2,0 мм), що виключає будь-яку фільтрацію рідини в землю. Частина фугату безперервно повертається насосом назад у змішувач на стадію ДР 3.3 для розрідження свіжої сировини. Комплекс працює за замкненим безстічним водно-технологічним циклом без скидання промислових стічних вод і без споживання чистої технічної води.

3. Повна безвідходність та випуск екологічних добрив: усі мінеральні макроелементи рослинної сировини (азот, фосфор, калій), які не переходять у газ, повністю концентруються у збродженому шламi. На стадіях ПВ 8.2–8.3 вологий кек проходить глибоке висушування в барабані під дією високої температури (130°C). Це забезпечує 100% термічну пастеризацію та дегельмінтизацію. Отримані сухі гранули в мішках «Біг-Бег» та товарний фугат із лагун повертаються на поля як високоефективні, стерильні органо-мінеральні добрива, що повністю заміщують хімічні мінеральні добрива, відновлюють гумусовий шар та закривають безвідходний екологічний колообіг речовин [37].

					<i>ДП ББ21.17.000 ПЗ</i>	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

1. Обґрунтовано вибір кукурудзяного силосу та гички цукрових буряків як рослинного субстрату для отримання біогазу. Встановлено, що поєднання високовуглецевої сировини із соковитою азотовмісною гичкою оптимізує нутрієнтний баланс рослинної сировини до фізіологічної норми, а лужні елементи гички формують природну буферну систему, яка стабілізує рН та виключає ризик закислення реактора без використання хімічних реагентів.

2. Обґрунтовано вибір біологічного агенту анаеробного процесу, яким виступає консорціум мікроорганізмів активного мулу *Clostridium*, *Bacteroides*, *Syntrophomonas*, *Syntrophobacter* та архей родів *Methanothrix*, *Methanosarcina* і *Methanobacterium*.

3. Обрано технологічну схему виробництва, яка базується на вологій одноступінчастій мезофільній ферментації із безперервно-порційним режимом завантаження сировини. Даний режим забезпечує високу реологічну текучість рослинної пульпи за робочої вологості 90 %, запобігає локальному накопиченню жирних кислот і дозволяє повністю автоматизувати транспортування мас за допомогою промислових гвинтових насосів.

4. Надано характеристику кінцевого продукту анаеробного зброджування – біогазу, який являє собою безбарвний цільовий енергоносіє, що акумулюється та зберігається в інтегрованому двомембранному газгольдері об'ємом 800 м³, а за своїм хімічним складом містить 55–60 % метану (CH₄), 38–43 % діоксиду вуглецю (CO₂), а також домішки води, азоту та сірководню. Розроблено технологічну та апаратурну схеми виробництва біогазу.

5. Розроблено технологічну та апаратурну схеми виробництва біогазу. Технологічна схема включає стадії підготовки сировини, безперервного мезофільного зброджування в метантенку CSTR, абсорбційного очищення і осушення біогазу, обробки дигестату та пакування.

6. Виконано розрахунок матеріального балансу виробництва

					ДП ББ21.17.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

7. Виконано інженерні розрахунки матеріально-теплого балансу на добову потужність переробки 35 тонн суміші. Спроектовано один вертикальний метантенк типу CSTR об'ємом 1850 м³, з мішалкою діаметром 3750 мм та газгольдером на 800 м³. Розраховано та обґрунтовано вибір метантенку такого-то типу такого-то об'єму. (Окремо в завданнях написати про розрахунок матеріального)

8. Описано засади техніки безпеки під час виробництва біогазу, наведено заходи охорони навколишнього середовища та охорони праці.

					ДП ББ21.17.000 ПЗ	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бакалаврський дипломний проєкт. Організація виконання та захисту, вимоги до структури, змісту та оформлення: Навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Біотехнології» спеціальності 162 Біотехнології та біоінженерія / Укладачі: Л. С. Зубченко, М. Ю. Козар, І. І. Левтун. — Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. — 47 с.
2. ДСТУ 3008:2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. — Вид. офіц. — Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016. — 32 с.
3. Світ переходить на чисту енергію: попит на альтернативні джерела зростає у 2026 році. Нью Формат: інформаційне агентство. 2026. URL: <https://newformat.info/news/svit-perekhodyt-na-chystu-enerhiiu-popyt-na-alternatyvni-dzherela-zrostaie-u-2026-rotsi/> (дата звернення: 11.06.2026).
4. Зелена енергетика та її вплив на сталий розвиток аграрного сектору. BBC News Україна. 2026. URL: <https://www.bbc.com/ukrainian/articles/cde569rw8j1o> (дата звернення: 11.06.2026).
5. Офіційний сайт Міністерства аграрної політики та продовольства України. URL: <https://minagro.gov.ua/> (дата звернення: 15.06.2026).
6. ДСТУ 4782:2007. Силос із зеленої маси культурних рослин. Технічні умови. — Вид. офіц. — Київ: Держспоживстандарт України, 2008. — 18 с.
7. ДСТУ 4327:2004. Гичка цукрових буряків. Технічні умови. — Вид. офіц. — Київ: Держспоживстандарт України, 2005. — 12 с.
8. ДСТУ ISO 6496-2005. Корми для тварин. Визначення вмісту вологи та інших летких речовин. — Вид. офіц. — Київ: Держспоживстандарт України, 2006. — 14 с.
9. Калетнік Г. М. Розвиток ринку біопалив в Україні: монографія.

					ДП ББ21.17.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

— Київ: Аграрна наука, 2010. — 250 с.

10. Гелету́ха Г. Г., Же́lezна Т. А. Перспективи вирощування та використання енергетичних культур в Україні // Промислова теплотехніка. — 2014. — Т. 36, № 2. — С. 74–82.

11. Ганженко О. М. Обґрунтування використання сировини кукурудзи для виробництва біогазу // Відновлювана енергетика. — 2018. — № 2 (53). — С. 76–83.

12. Сучасні біотехнології конверсії біомаси в енергоносії: Навчальний посібник / За ред. Н. О. Голуб. — Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. — 184 с.

13. Офіційний сайт Державної служби статистики України. URL: <https://ukrstat.gov.ua/> (дата звернення: 15.06.2026).

14. Патент UA 114562. Спосіб підготовки лігноцелюлозної біомаси до анаеробного зброджування / Голуб Н. О., Хмельницький В. А.; опубл. 25.04.2017, Бюл. № 8.

15. Біоенергетична асоціація України (UABIO). Аналітичні записки щодо потенціалу біомаси АПК. URL: <https://uabio.org/> (дата звернення: 15.06.2026).

16. Гудков І. М., Мельничук М. Д. Сільськогосподарська мікробіологія: Підручник. — Київ: ЦУЛ, 2003. — 304 с.

17. Дігтяр Т. В., Круглицька В. В. Особливості синтрофних асоціацій мікроорганізмів метаногенного консорціуму // Фізіологічний журнал. — 2015. — Т. 61, № 5. — С. 89–96.

18. Голуб Н. О., Шуляк М. В. Анаеробна переробка рослинних відходів агропромислового комплексу в біогаз // Відновлювана енергетика. — 2020. — № 2. — С. 82–89.

19. ДСТУ EN 16723-1:2023. Природний газ і біометан для транспорту та біометан для закачування в мережу природного газу. Частина 1. Технічні вимоги до біометану. — Вид. офіц. — Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2023.

					ДП ББ21.17.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

— 24 с.

20. ДСТУ ISO 6326-1:2003. Газ природний. Визначення вмісту сполук сірки. Частина 1. Загальний вступ. — Вид. офіц. — Київ: Держспоживстандарт України, 2004. — 10 с.

21. Deublein D., Steinhauser A. Biogas from Waste and Renewable Resources: An Introduction. — Weinheim: Wiley-VCH, 2011. — 570 p.

22. Schnürer A., Jarvis Å. Microbiological Handbook for Biogas Plants. — Linköping: Swedish Waste Management, 2010. — 124 p.

23. Саблій Л. А. Фізико-хімічне та біологічне очищення висококонцентрованих стічних вод і шламів: Монографія. — Рівне: НУВГП, 2013. — 291 с.

24. Практикум з біотехнологій очищення води та утилізації відходів: навчальний посібник для студ. спеціальності 162 «Біотехнології та біоінженерія» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: Л. А. Саблій, О. М. Бунчак, В. С. Жукова. — Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. — 106 с.

25. Методичні вказівки до виконання курсових та дипломних проєктів з дисципліни «Біоенергетика» для студентів спеціальності 162 «Біотехнології та біоінженерія» / Уклад.: І. І. Гринюк. — К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020.

26. ТУ У 08.1-23817399-001:2012. Крейда мелена хемосорбційна. Технічні умови. — Київ: Мінекономрозвитку України, 2012.

27. Запольський А. К. Водопостачання, водовідведення та якість води: Підручник. — К.: Вища школа, 2005. — 671 с.

28. Туровський І. С. Обробка та утилізація осадів стічних вод і органічних шламів. — М.: Стройиздат, 1989. — 256 с.

29. Екологічна біотехнологія: очищення стічних вод та утилізація органічних відходів: Монографія / О. В. Швиденко, В. М. Радченко. — Херсон: ОЛДІ-ПЛЮС, 2019. — 312 с.

30. Ковальчук В. А. Очистка стічних вод та обробка шламів:

					ДП ББ21.17.000 ПЗ	Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Підручник. — Рівне: ВАТ «Рівненська друкарня», 2002. — 622 с.

31. Каталог насосного та перемішуючого обладнання для біогазових complexes компанії «NETZSCH Pumps & Systems». URL: <https://www.netzsch-pumps.com/> (дата звернення: 15.06.2026).

32. Процеси та апарати біотехнологічного виробництва: Підручник / За ред. проф. К. М. Васильєва. — Львів: Новий Світ-2000, 2015. — 430 с.

33. Каталог когенераційного обладнання та енергоблоків компанії «Caterpillar / MWM Gas Engines». URL: <https://www.mwm.net/> (дата звернення: 15.06.2026).

34. ДСТУ 3273-95. Безпека промислових підприємств. Загальні положення та аналіз небезпечних факторів. — Вид. офіц. — Київ: Держстандарт України, 1996. — 20 с.

35. ДСТУ Б В.2.5-82:2016. Електроустановки. Захисне заземлення та занурення в будинках і спорудах. — Вид. офіц. — Київ: Мінрегіон України, 2016. — 45 с.

36. ДСТУ EN 352-1:2018. Засоби індивідуального захисту органів слуху. Загальні вимоги. Частина 1. Навушники. — Вид. офіц. — Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019. — 18 с.

37. Правила будови електроустановок (ПУЕ). Розділ 7: Електрообладнання спеціальних установок. Вибухонебезпечні зони. — Київ: Міненерговугілля України, 2017. — 120 с.

38. Виробництво і використання біогазу в Україні / Рада з питань біогазу з.т. Biogasrat e.V. — Київ, 2012. — 74 с.

39. Козловець О. А. Біотехнологія одержання біогазу при коферментації посліду птахів. Автореферат дис. ... канд. техн. наук: спец. 162 «Біотехнології та біоінженерія» / Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». — Київ, 2018. — 24 с.

40. Лановенко О. Г., Остапішина О. О. Метантенк. Словник-

					ДП ББ21.17.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68

довідник з екології: навч.-метод. посіб. — Херсон: ПП Вишемирський В. С., 2013. — С. 122.

41. Біотехнологічні основи виробництва біогазу / В. М. Поліщук, Т. В. Матусевич, О. В. Шворов та ін. // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. — Київ, 2013. — Вип. 185, ч. 2. — С. 289–296.

42. Eder B., Schulz H. Biogas Praxis: Grundlagen, Planung, Anlagenbau, Beispiele Wirtschaftlichkeit. — Staufen: Ökobuch Magnum, 2007. — 268 S.

43. Грибан В. Г., Негодченко О. В. Охорона праці: Навчальний посібник. — Київ: Центр учбової літератури, 2009. — 280 с.

44. Уминський С. М. Технології одержання біогазу і органічних добрив в агровиробництві // Аграрний вісник Причорномор'я. Технічні науки. — 2013. — № 67. — С. 167–176.

45. Любецький О. В. Технологія виробництва біогазу з відходів тваринництва. Магістерська дисертація / Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». — Київ, 2018. — 126 с.

46. Буткова П. В. Технологія виробництва біогазу з відходів свиноферми: дипломний проєкт бакалавра: спец. 162 «Біотехнології та біоінженерія» / Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». — Київ, 2021. — 54 с.

47. Demirel B., Scherer P. The roles of acetotrophic and hydrogenotrophic methanogens during anaerobic conversion of biomass to methane: a review // *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*. — 2008. — Vol. 7, No. 2. — P. 173–190. <https://doi.org/10.1007/s11157-008-9131-1>.

48. Aigle A., Bourgeois E., Marjolet L. et al. Relative weight of organic waste origin on compost and digestate 16S rRNA gene bacterial profilings and related functional inferences // *Frontiers in Microbiology*. — 2021. — Vol. 12. — P. 1–18. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.667043>.

					ДП ББ21.17.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		69

49. Wu B., Wang J., Hu Z., Yuan S., Wang W. Anaerobic biotransformation and potential impact of quinoline in an anaerobic methanogenic reactor treating synthetic coal gasification wastewater and response of microbial community // *Journal of Hazardous Materials*. — 2020. — Vol. 384. — P. 121404. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121404>.

					ДП ББ21.17.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		70