

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

**Факультет біотехнології і біотехніки
Кафедра екобіотехнології та біоенергетики**

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Євгеній КУЗЬМІНСЬКИЙ
(підпис)

«___» _____ 2021р.

**Дипломний проєкт
на здобуття ступеня бакалавра
за освітньо-професійною програмою «Біотехнології»
спеціальності 162 «Біотехнології та біоінженерія»
на тему: «Технологія виробництва біогазу з післяспиртової барди»**

Виконала:

студентка IV курсу, групи БЕ-71

Захарчук Аліна Павлівна _____

Керівник:

Асист., к.т.н. асист.,

Зубченко Людмила Сергіївна _____

Консультант з проєктування:

Проф., д.т.н, проф.,

Саблій Лариса Андріївна _____

Рецензент:

ст. викл. кафедри промислової біотехнології, к.б.н.,

Ліновицька Віта Михайлівна _____

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

Студентка _____

Київ – 2021 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»**

Факультет біотехнології і біотехніки
Кафедра екобіотехнології та біоенергетики

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 162 «Біотехнології та біоінженерія»

Освітньо-професійна програма «Біотехнології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Євгеній КУЗЬМІНСЬКИЙ
(підпис) (ім'я, прізвище)

«__» _____ 2021р.

**ЗАВДАННЯ
на дипломний проєкт студенту
Захарчук Аліні Павлівні**

1. Тема проєкту «Технологія виробництва біогазу з післяспиртової барди», керівник проєкту к.т.н. асист. Зубченко Людмила Сергіївна, затверджені наказом по університету від «__» _____ 20__ р. № _____

2. Термін подання студентом проєкту _____

3. Вихідні дані до проєкту: добова витрата післяспиртової барди – 270 м³/добу; густина барди 1050 кг/м³; вміст сухих речовин в барді – 6%; зольність барди – 0,3 % (5% від СР). Необхідна вологість для зброджування – 95%. Режим зброджування - безперервний. Доза завантаження – 10%. Спроектувати метантенк для зброджування післяспиртової барди з отриманням біогазу (можливе використання косубстратів).

4. Зміст пояснювальної записки: Характеристика післяспиртової барди як сировини для виробництва біогазу; обґрунтування вбору технології виробництва біогазу; характеристика анаеробного активного мулу; опис хімічних та біохімічних перетворень, які відбуваються в процесі метаногенезу; матеріальний баланс; опис технології виробництва біогазу з післяспиртової барди; розрахунок метантенка; охорона праці та навколишнього середовища.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо): Технологічна схема виробництва біогазу з післяспиртової барди (А1); Апаратурна схема виробництва біогазу післяспиртової барди (А1); Креслення метантенка для виробництва біогазу з післяспиртової барди (А1)

6. Консультанти розділів проєкту*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Графічна частина дипломного проєкту	Саблій Л.А. д.т.н., проф		

7. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
	Проведення літературно-патентних досліджень.		
	Характеристика сировини.		
	Обґрунтування вибору технології.		
	Характеристика біологічного агента та біохімічних перетворень.		
	Опис технології. Матеріальний баланс. Сировина та матеріали.		
	Підбір і характеристика основного та допоміжного обладнання. Контроль виробництва.		
	Розробка креслень апаратурної та технологічної схеми. Розробка креслення метантенка.		
	Опис заходів з охорони праці та захисту навколишнього середовища.		

Студент

Аліна ЗАХАРЧУК

Керівник проєкту

Людмила ЗУБЧЕНКО

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 77 с., 2 рис., 8 табл., 66 посилань.

У роботі розроблено проєкт метанового зброджування післяспиртової барди та пташиного посліду. Надано характеристику післяспиртовій барді як сировині для виробництва біогазу. Обґрунтовано необхідність використання косубстрату. У якості косубстрату було обрано пташиний послід у співвідношенні до ПСБ 0,18:1 за сухою речовиною. Охарактеризовано біологічні агенти процесу зброджування та описано кінцевий продукт. Обрано та обґрунтовано двостадійну технологію зброджування післяспиртової барди, що відбувається в окремих реакторах. Зброджена сировина розділяється на тверду та рідку фракції. Тверда фракція використовується як добриво. Рідка фракція спочатку упарюється, потім використовується як добриво.

Виконано основні технологічні розрахунки процесу отримання біогазу та складено матеріальний баланс. Розроблено та описано технологічну та апаратурну схеми виробництва, вказано точки та параметри контролю. На основі рорахунків обрано та запроектовано метантенк для другої стадії зброджування післяспиртової барди об'ємом 1000 м³, який працює в безперервному режимі та задовольняє вимоги технології, у кількості 4 шт. Наведено основні вимоги охорони праці та навколишнього середовища при отриманні біогазу.

**БІОГАЗ, ЗБРОДЖУВАННЯ, ПІСЛЯСПИРТОВА БАРДА,
ПТАШИНИЙ ПОСЛІД, МЕТАНОГЕНЕЗ, МЕТАНТЕНК, БІОЕНЕРГЕТИКА.**

ABSTRACT

The explanatory note: 77 pages, 2 figures, 8 tables, 66 references.

The project of methane fermentation of distillery spent wash and poultry manure is developed in the work. The characterization of distillery spent wash as a raw material for biogas production is given. The necessity of a cosubstrate is substantiated. As a cosubstrate was selected poultry manure in the ratio to distillery spent wash 0.18: 1 by dry matter. The biological agents of the fermentation process are described and the final product is described. The two-stage technology of distillery spent wash fermentation, which takes place in separate reactors, is selected and substantiated. Fermented raw materials are divided into solid and liquid fractions. The solid fraction is used as fertilizer. The liquid fraction is first evaporated, then used as fertilizer.

The main technological calculations of the biogas production process are performed and the material balance is made. Technological and hardware schemes of production are developed and described, points and parameters of control are specified. A methane tank for second stage of fermentation of distillery spent wash has been designed, which satisfies the requirements of the technology. The methane tank was selected as a continuous flow type, with a volume of 1000 m³ in the amount of 4 reactors. Calculations of technological parameters of the process were made and drawings of the technological scheme, equipment scheme and methane tank were developed. The main requirements of labor and environmental protection in obtaining biogas are given.

BIOGAS, FERMENTATION, DISTILLERY SPENT WASH, BIRD MANURE, METANOGENESIS, METANTENK, BIOENERGY.

Зміст

ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1. ХАРАКТЕРИСТИКА ПІСЛЯСПИРТОВОЇ БАРДИ ЯК СУБСТРАТУ ДЛЯ ОТРИМАННЯ БІОГАЗУ. ХАРАКТЕРИСТИКА БІОЛОГІЧНОГО АГЕНТА. ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА БІОГАЗУ З ПІСЛЯСПИРТОВОЇ БАРДИ.....	12
1.1 Характеристика післяспиртової барди як субстрату для отримання біогазу.....	12
1.2 Характеристика мікроорганізмів, що здійснюють метанове бродіння...	15
1.3 Обґрунтування вибору технології зброджування післяспиртової барди ..	21
1.3.1 Необхідні умови та технологічні особливості метанового зброджування біомаси	21
1.3.2 Обґрунтування вибору косубстрату	24
1.3.3 Обґрунтування обраної технології отримання біогазу	27
1.4 Обґрунтування вибору основних конструктивних елементів біогазових установок.....	29
РОЗДІЛ 2. ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА БІОГАЗУ З ПІСЛЯСПИРТОВОЇ БАРДИ.....	36
2.1 Біохімічні основи перебігу процесу зброджування.....	36
2.2 Характеристика біогазу	42
РОЗДІЛ 3. ТЕХНОЛОГІЯ ОТРИМАННЯ БІОГАЗУ З ПІСЛЯСПИРТОВОЇ БАРДИ.....	47
3.1 Сировина та матеріали.....	47

					ЕКБ.БЕ7106.ДП				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Зміст	Літ.	Арк.	Аркушів	
Розроб.		Захарчук А.П.					6	77	
Перевір.		Зудченко Л.С.				КПІ ім. Ігоря Сікорського, ФБТ.			
Реценз.						БЕ-71			
Н. Контр.									
Затверд.									

3.2 Опис технологічного процесу.....	48
3.3 Контроль виробництва.....	53
3.4 Матеріальний баланс	54
РОЗДІЛ 4. ВИБІР ТА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ОТРИМАННЯ БІОГАЗУ З ПІСЛЯСПИРТОВОЇ БАРДИ	56
РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ДОВКІЛЛЯ	63
5.1 Загальні вимоги щодо охорони праці та техніки безпеки на підприємстві з виробництва біогазу	63
5.2 Охорона довкілля	64
ВИСНОВКИ.....	66
Список використаних джерел	68
Додаток А.....	76

Перелік умовних позначень та скорочень

DG – технологія сухого помелу виробництва етанолу;

pH – ступінь кислотності або лужності середовища;

ЗР – завислі речовини;

ЛЖК – леткі жирні кислоти;

ПСБ – післяспиртова барда;

СОР – суха органічна речовина;

СР – суха речовина;

ХСК – хімічне споживання кисню.

					<i>ЕКБ.БЕ7106.ДП</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

ВСТУП

Загострення проблеми забруднення довкілля органічними відходами, а також дефіцит енергетичних ресурсів, який зростає, є головними мотивами інтенсифікації нових розробок у галузі виробництва та ефективного використання біогазу. Виробництво біогазу є ефективним способом зменшення забруднення води й повітря шкідливими органічними відходами. На 2015 рік у промислово розвинених країнах біогазові установки набули значного поширення, особливо в Західній Європі, де $\frac{3}{4}$ від загальної кількості біогазових установок припадає на установки з об'ємом від 100 до 300 м³, які переробляють відходи тваринництва.

Спирт, відомий як етиловий спирт або етанол, є цінною речовиною для ряду галузей промисловості і використовується як розчинник для багатьох речовин. Крім алкогольних напоїв його використовують в хімії, фармацевтиці та косметичних засобах, а також в якості добавки до палива [1].

Основним побічним продуктом виготовлення спирту є післяспиртова барда. На спиртзаводах вона утворюється у великих об'ємах та досить швидко псується. На сьогоднішній день актуальною проблемою є пошук ефективних та екологічно-безпечних шляхів утилізації післяспиртової барди.

При скиді великих обсягів барди на поля фільтрації, білок барди швидко починає розкладатися та виділяти небезпечні токсичні речовини, тому цей метод не є ефективним та безпечним шляхом утилізації.

Барда, завдяки вмісту клітковини, вуглеводів, білка і мікроелементів, є цінним вторинним сировинним ресурсом, вона може служити сировиною для виробництва корму для тварин та інших корисних продуктів. Так як у сирому вигляді термін зберігання барди досить невисокий, доцільно використовувати сушильні апарати для висушування сировини [2].

					ЕКБ.БЕ7106.ДП			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Вступ	Літ.	Арк.	Аркушів
Розроб.		Захарчук А.П.						
Перевір.		Зубченко Л.С.					9	77
Реценз.						КПІ ім. Ігоря Сікорського, ФБТ. БЕ-71		
Н. Контр.								
Затверд.								

Проблемою утилізації барди шляхом використання як корму тваринам є те, що поголів'я сільськогосподарської худоби зменшується, тому питання утилізації спиртової барди залишається відкритим.

З іншого боку, енергетична промисловість одна з найважливіших у наш час. Вископні джерела енергії постійно скорочуються, а споживання енергії тільки росте. Для вирішення цієї проблеми ведуться пошуки альтернативних джерел палива. Для збільшення частки альтернативних, зокрема відновлювальних, джерел в енергетиці, розвинені країни світу впроваджують закони про альтернативну енергетику, впроваджують "зелений тариф". Окрім сонячної, вітрової, водної енергії, значну частину новітньої енергетики займають біопалива (біодизель, брикети, біогаз, біобутанол тощо). Біопалива зручні тим, що використовують як сировину органічну речовину, яка може утворюватися в результаті роботи промисловості як побічні продукти або відходи. Найпоширеніше джерело сировини для біопалива – відходи агропромислового комплексу, такі як відходи життєдіяльності тварин або залишки рослинної сировини.

Оскільки використання барди в кормових цілях не завжди є найефективнішим та найдодільнішим методом утилізації барди, іншим привабливим шляхом утилізації післяспиртової барди є зброджування в анаеробних умовах з отриманням біогазу. Цей метод не потребує високих експлуатаційних витрат та забезпечує отримання необхідної енергії, що є досить важливою перевагою для виробництва, віддалених від джерела енергопостачання. Недоліком методу є довга тривалість процесу та складність переробки висококонцентрованих середовищ, і, як наслідок, необхідність розбавлення та великих земельних площ для розміщення відходів. Тому важливим є дослідження існуючих методів для розробки більш ефективної технології анаеробного зброджування післяспиртової барди.

При зброджуванні післяспиртової барди виникають деякі складнощі, пов'язані з низьким значенням рН та низьким вмістом нітрогену, який є

					ЕКБ.БЕ7106.ДП	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

необхідним для розвитку мікроорганізмів, що беруть участь у процесі бродіння. На сьогоднішній день було проведено ряд досліджень, в яких змінювали концентрації елементів середовища шляхом додавання хімічних речовин, таких як: фосфати, сечовина та мікроелементи; хлорид заліза, солома, мікрокристалічна целюлоза, цинк, нікель, вапняне добриво. Для кращого перебігу бродіння також використовували методи коферментації. Веліся дослідження з використання як ко-субстрату коров'ячого гною та відпрацьованого мулу з очисних споруд спиртового заводу чи міста [3].

Метою дипломного проєкту є обґрунтування та вибір технології отримання біогазу з післяспиртової барди.

Завданнями дипломного проєкту є:

1. надати характеристику післяспиртовій барді як сировині для отримання біогазу; охарактеризувати угруповання мікроорганізмів, що здійснюють процес метанового зброджування;
2. обрати та обґрунтувати технологію отримання біогазу з післяспиртової барди;
3. виконати основні технологічні розрахунки процесу отримання біогазу та скласти матеріальний баланс;
4. накреслити технологічну та апаратурну схеми отримання біогазу;
5. запроектувати реактор для метанового зброджування, що задовольнить вимоги технології, здійснити розрахунки та розробити креслення;
6. навести основні вимоги охорони праці та захисту навколишнього природнього середовища при отриманні біогазу.

РОЗДІЛ 1. ХАРАКТЕРИСТИКА ПІСЛЯСПИРТОВОЇ БАРДИ ЯК СУБСТРАТУ ДЛЯ ОТРИМАННЯ БІОГАЗУ. ХАРАКТЕРИСТИКА БІОЛОГІЧНОГО АГЕНТА. ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА БІОГАЗУ З ПІСЛЯСПИРТОВОЇ БАРДИ

1.1 Характеристика післяспиртової барди як субстрату для отримання біогазу

Зростаючий попит на етанол як паливну добавку призвів до різкого збільшення зерна, що використовується для виробництва етанолу. Для виробництва етанолу з зерна використовують переважно технологію сухого помелу (DG), враховуючи переваги цієї технології перед іншими альтернативами [4]. У технології сухого помелу зерно переробляється подрібненням, зрідженням, оцукрюванням та спиртовим бродінням з метою перетворення крохмалю в етанол, який потім відокремлюється від культуральної рідини на наступній стадії перегонки [5]. Отже, установки сухого помелу мають два основних вихідних продукти: етанол і залишок після бродіння, який називається післяспиртовою бардою. На кожен дм^3 етанолу утворюється 10–20 дм^3 спиртової стічної води із значенням хімічного споживання кисню (ХСК) до 250 г/ дм^3 і загальним вмістом твердих речовин 6–12% [6]. Цілі шлаки зазвичай додатково переробляють у сухий, стабільний продукт, який можна продати як корм для тварин. Однак сушіння барди має два важливі недоліки:

- випаровування води вимагає великої кількості тепла, що становить приблизно 47% від загального споживання енергії на установці виробництва спирту [7][6];
- залежність від ринків кормів: оскільки виробляється приблизно 1 т сухої барди/т етанолу, маркетинг є критичним для стабільності виробництва [4][5].

					ЕКБ.БЕ7106.ДП			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Захарчук А.П.			РОЗДІЛ 1. ХАРАКТЕРИСТИКА ПІСЛЯСПИРТОВОЇ БАРДИ ЯК СУБСТРАТУ ДЛЯ ОТРИМАННЯ БІОГАЗУ. ХАРАКТЕРИСТИКА БІОЛОГІЧНОГО АГЕНТА. ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА БІОГАЗУ З ПІСЛЯСПИРТОВОЇ БАРДИ	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Зубченко Л.С.					12	77
Реценз.						КПІ ім. Ігоря Сікорського, ФБТ. БЕ-71		
Н. Контр.								
Затверд.								

Спиртова промисловість – одна з провідних галузей в Україні за виходом відходів та стічних вод. В Україні понад 80 спиртових заводів, де за рік утворюється близько 4 млн м³ барди з меляси та 3,6-3,8 барди із зерна, та приблизно 8 млн м³ стічних вод з низьким вмістом забруднення, які підлягають обов’язковому очищенню. Температура барди, при виході з циклу виробництва спирту, сягає 40-50°. Така температура чудово підходить для подальшого анаеробного зброджування без необхідності додаткового нагріву. Окрім цього, на виробництві наявні вторинні джерела тепла: конденсати, лютерна вода тощо). Зброджування 1 м³ відходів спиртового виробництва дозволяє отримати 45-50 м³ біогазу. Незважаючи на досить вигідний вихід біогазу, вартість метантенків є досить високою – біля 140 000 доларів за монолітний залізобетонний метантенк потужністю 60 м³/добу.

Барда – це суспензія світло-коричневого кольору, яка має запах зерна або іншої сировини. Упарена післяспиртова барда – густа темно-коричнева маса з запахом горілого цукру, що складається з мінеральних солей, азотистих основ, карбонових кислот, вуглеводів, гліцерину, мікроелементів, вітамінів та ін. Її хімічний склад наведено в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Хімічний склад (в %) і поживність сухої речовини меляси та барди [8][9]

Компоненти	Меляса, %	Мелясна післяспиртова барда, %
Суха речовина:	6,7-8,34%	
Сирий протеїн	12,94	25,0
В тому числі:		
-білок	1,87	4,62
-аміди	10,31	20,38
-бетаїн	5,52	14,50
Жири	-	1,67
Безазотисті екстрактивні речовини	75,28	53,37
В тому числі:		
-цукор	67,93	5,0

Зола	11,78	20,0
Клітковина	-	0,9 – 1,7%
Мінеральні речовини:		
-кальцій	1,06	3,10
-фосфор	0,02	1,63
-калій	4,02	8,50
-магній	0,85	1,30
-натрій	1,87	1,18
-сірка	0,10	0,20
-хлор	2,10	3,00
Поживність 1 кг сухої речовини:		
Кормових одиниць, кг	1,07	0,71
Валової енергії, ккал	3816	3021
Обмінної енергії, ккал	2594	1853

Післяспиртова барда також містить ряд корисних мікроелементів. Основні з них наведені в табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Вміст мікроелементів у сухій речовині післяспиртової барди [8]

Мікроелементи	Вміст в сухій речовині, мг%
Марганець	0,3-9,0
Нікель	0,6-1,9
Кобальт	0,06- 0,64
Титан	0,3-6,0
Ванадій	0,03-0,3
Молібден	0,03-0,09
Хром	0-0,3
Цирконій	0-0,95
Мідь	0,3-18,3
Свинець	0-0,3
Срібло	0-0,6
Лантан	0-1,8
Барій	0-23,3
Бор	0,3-12,7

Разом з основними поживними речовинами та мікроелементами в склад мелясної барди також входить ряд біологічно активних речовин – вітаміни групи Б та інші (табл. 1.3).

В 1 кг сухої речовини післяспиртової барди входить:

Таблиця 1.3 – Вміст біологічно активних речовин в післяспиротовій барді [8]

Вітамін:	Вміст, мг
Тіамін	2,0 – 2,6
Рибофловін	45,0-50,0
Пантотенова кислота	27,5-50,0
Нікотинова кислота	806-1552
Піридоксин	4,3-9,6
Біотин	0,014-0,015
Інозит	950-2212
Фолієва кислота	8-10

У процесі виробництва спирту після ферментації та сепарації утворюється велика кількість післяспиртової барди. Вихід барди становить 1100-1200% від об'єму виготовленого спирту. На заводі потужністю 6000 дал на добу виготовляється 660-720 м³ сирої барди, 7,5 - 8,5% сухої речовини, 26 - 30% якої становить білок [10].

1.2 Характеристика мікроорганізмів, що здійснюють метанове бродіння

Ферментація метану є класичним анаеробним процесом перетворення біомаси в енергію з утворенням великої кількості біогазу.

Бактерії, що беруть участь в утворенні метану можна поділити на 4 групи: аеробні гідролізні, кислотопродукуючі, воднепродукуючі та метаноутворюючі (Рис. 1.1).

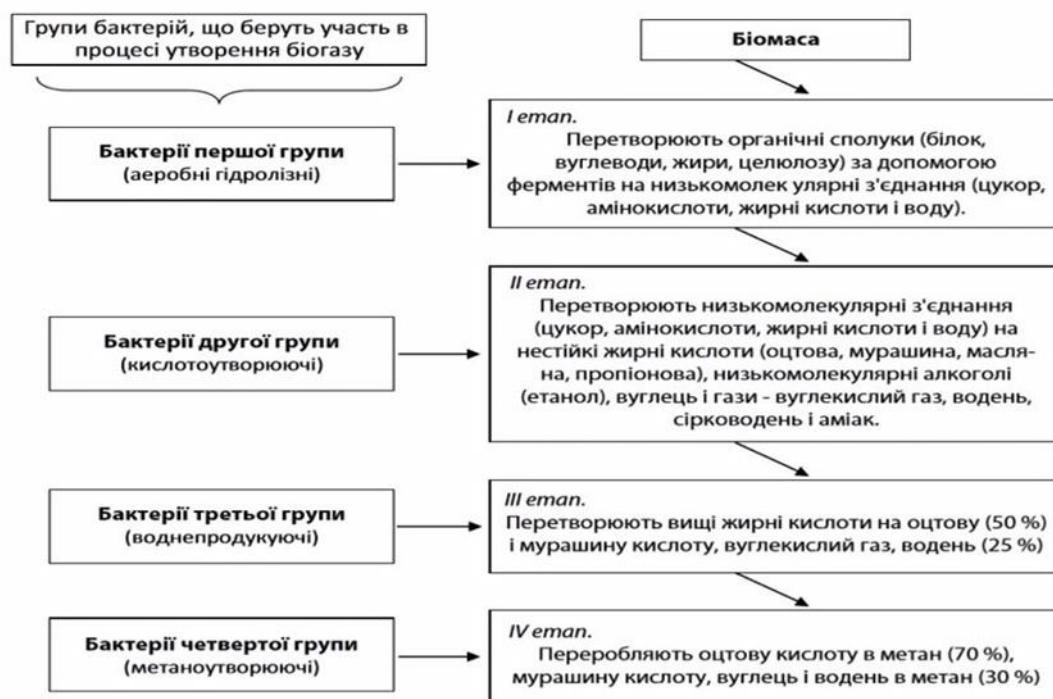


Рисунок 1.1 – Етапи метанового бродіння біомаси з утворенням біогазу [8]

За кожний етап метаногенезу відповідає певна група мікроорганізмів, що володіє функціями, необхідними для перетворення субстрату в біогаз через проміжні сполуки.

Гідроліз. За гідроліз в основному відповідає гідролітична група бактерій. Ця функціональна група бактерій гідролізує макромолекули до розчинних продуктів, які можуть бути перетворені в низькомолекулярні органічні сполуки.

Кількісний вміст біомаси: між 10^6 - 10^5 і 10^9 - 10^8 клітин гідролітичних бактерій на 1 см^3 анаеробного активного мулу, або 10^{10} - 10^{11} клітин на 1 г органічних речовин у мулі[11].

Видовий склад: спорулюючі й неспорулюючі грам-позитивні палички, такі як протеолітичні *Eubacterium*, целюлолітичні *Clostridium*, *Acetobacterium*, облігатні анаероби, такі як *Bacteroides* і *Bifidobacteria* і факультативні анаероби *Streptococcus* і *Enterobacteriaceae*, грам-позитивні коки *Peptostreptococcus*, *Peptococcus*, *Streptococcus* [11].

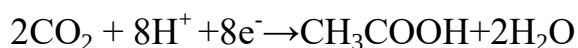
Характерною особливістю целюлозолітичних організмів є наявність мультиферментного комплексу – целюлосом. Молекулярна маса комплексу становить близько 3 МДА і містить 15-25 ферментів, пов'язаних інтегруючим некаталітичним білковим скафолдином. Окремі целюлосоми утворюють поліцелюлосоми. Комплекси, аналогічні целюлосомним ферментам, присутні у представників мікрофлори шлунково-кишкового тракту травоядних тварин *Orpinomys*, *Neocallimastix*, *Piromyces*. Підвищувати каталітичну активність мікроорганізми здатні адгезією до субстрату – утворення біоплівки і мікроколоній [12].

Біодеградація крохмалю можлива завдяки активності бактерій родів *Prevotella*, *Thermoanaerobacterium*, *Clostridium*, *Ruminobacter*, *Succinimonas*, *Bacteroides*, *Streptococcus*, *Butirivibrio*.

Розщеплення білків і амінокислот здійснюють відповідні представники родів *Clostridium*, *Selenomonas*, *Bacteroides*, *Syntrophomonas*, *Peptostreptococcus*, *Acidaminococcus*, *Fusobacterium*; пектинів і ксиланів - *Clostridium*, *Ruminococcus*, *Bacteroides*, *Lachnospira*, *Butirivibrio*, *Prevotella* [13].

Після утворення оліго- і мономерів починають діяти різні гідролітики та метилотрофні бактерій (диссипотрофи). У це співтовариство входять представники родів *Streptococcus bovis*, *Lactobacillus sp.*, *Anaerobaculum mobile*, а також класів *Bacteroidia*, *Clostridia*, *Acinobacteria* [12].

Гетероацетогенні бактерії (гетероацетогени) – це група строго анаеробних бактерій, що синтезують оцтову кислоту з вуглекислого газу і органічних сполук відповідно до рівняння:



При розкладанні органічних речовин утворюються протони і електрони, що використовуються в реакції синтезу оцтової кислоти з вуглекислого газу.

Це відрізняє їх від інших прокариот, що утворюють ацетат і вуглекислий газ при зброджуванні органічних сполук. Синтез оцтової кислоти відбувається за участю ферменту ацетил-КоА-синтетази і пов'язаний з накопиченням енергії.

					ЕКБ.БЕ7106.ДП	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

Ацетогенні бактерії виділені з мікробних співтовариств ґрунтів, донних осадів, травного тракту тварин і людини, содових озер, солоних лагун, термальних джерел. Описані близько 100 видів ацетогенів бактерій з 20 родів, філогенетично слабо пов'язаних між собою, у тому числі *Acetohalobium arabaticum*, *Morelia tkermoautotrophica*, *Thermoanaerobacter kivui*, *Eubacterium limosum*, *Acetobacterium woodii*, *Clostridium ljungdahlii* [14]. Ацетогени відіграють важливу роль у біогеохімічному циклі карбону у біосфері. Розробляються біотехнологічні методи промислового отримання оцтової кислоти за допомогою ацетогенних бактерій.

Ця група бактерій здійснює симбіотичну ацетогенну дегідрогенізацію жирних кислот з довшим, ніж в оцтової кислоти, ланцюгом (пропіонова, масляна, бензойна) яка є лімітуючою стадією при утворенні метану. Кількісний вміст: $4,2 \times 10^6$ клітин на 1 см³ сирого мулу. Видовий склад: гомоацетогенні бактерії, такі як *Acetobacterium woodi*, гетероацетогенні бактерії: *Synthrobacter wolinii* (грам-негативна паличка) і *Synthrophomonas wolfii* (нефототрофна бактерія) [14].

Утворення метану. Вважається, що метаногени виникли приблизно 3,0 – 3,5 млрд. років тому та досягли свого розквіту в археї. Разом з іншими бактеріями вони приймають участь у деструкції органічних речовин в різноманітних екологічних нішах.

Серед метаногенів, які можливо виділити у вигляді чистих культур, наявні організми, клітини яких подібні до сферичних. Вони утворюють агрегати, схожі на сарцини, ланцетоподібні, паличкоподібні та ниткоподібні форми. Більшість нерухомі, але окремі види проявляють здатність до руху за рахунок наявності джгутиків.

Як і інші археобактерії, метаногени відрізняються від інших прокаріот складом компонентів клітини, в тому числі клітинною стінкою, яка не містить муреїн, а також характером ліпідів, в які не входять жирні кислоти. Більшу

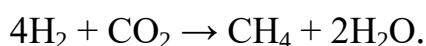
частину нейтральних ліпідів складають прості ефіри гліцерину та довголанцюгового спирту фітанолю [15].

У метаболізмі метансинтезуючих бактерій бере участь кофермент М (2-меркаптоетансульфонова кислота), фактор F420, який представляє собою особливий флавін, та ряд інших сполук, які не зустрічаються у інших мікроорганізмів. Але головною відмінністю є нуклеотидна послідовність в 16S рРНК, на що вказує вивчення складу отриманих з неї олігонуклеотидів. По цьому показнику та по вмісту ГЦ в ДНК окремі види метаногенів підрозділяють на три порядки, які містять декілька родин та родів. Найбільш вивченими видами є *Methanobacterium thermoautotrophicum*, *Methanobrevibacter ruminantium*, *Methanosarcina barkeri*.

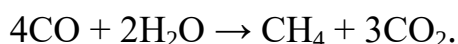
Всі метаногени є строгими анаеробами, деякі з них мезофіли, інші, що ростуть при 60 – 80 °С і більш високій температурі, термофіли. До числа термофілів можна віднести *M. thermoautotrophicum*. Оптимальне значення рН для росту різних видів 6,5 – 8,0. Деякі штами здатні розвиватися за наявності в середовищі до 5 – 7 % і більше NaCl [16].

В якості джерела сульфору бактерії зазвичай використовують сульфід, а як джерело нітрогену – амоній. Деяким видам для росту необхідна наявність дріжджового автолізу або суміші вітамінів. Також відомі метаногени, для росту яких необхідна наявність ацетату або інших органічних речовин.

Субстратами, з яких більшість відомих видів метаногенів утворюють метан, слугують молекулярний водень та діоксид вуглецю:



Ряд видів синтезує метан з монооксиду вуглецю:



Деякі види утворюють метан з мурашиної кислоти:



Також відомі метансинтезуючі бактерії, котрі утворюють метан з метанолю, метиламіну, диметиламіну, триметиламіну та ацетату. При

перетворенні метильованих амінів, метанолу та ацетату в метан у нього переходить метильна група субстрату.

У 1960-х роках було сформульовано гіпотезу про те, що метаногени здатні акумулювати енергію в процесі окисного фосфорилювання. Поштовхом для її формулювання стала схема біохіміка І.Х. Баркера, яка описувала відновлення вуглекислого газу в метан.

У дослідженнях, що проводилися вченими, чистих культур метаногенів, було встановлено, що синтез метану протікає в мембранах, цей процес спряжений із генерацією мембранного потенціалу, енергія якого трансформується в АТФ. Таким чином, метаногени здійснюють не бродіння, а анаеробне дихання, використовуючи CO_2 в якості акцептора електронів.

Вихід енергії на кожний утворений моль метану у метаногенів не перевищує двох молів АТФ. Тому для забезпечення свого росту метанутворюючі бактерії повинні синтезувати значку кількість метану.

Мікроорганізми, які знаходяться в метантенку, можуть включати до 60 різних видів – анаеробів і архей [17]. Група організмів, що беруть участь в початковій стадії бродіння – гідролітики. Серед них є мікроорганізми, що розщеплюють целюлозу, відносяться до родів *Caldicellulosiruptor*, *Ruminococel*, *Fibrobacter*, *Spirochaeta*, *Desulfurococcus*, *Eubacterium*, *Acetivibrio*, *Bacteroides*, *Anaerocellum*, *Butyrivibrio*, *Clostridium*, *Thermotoga*.

Третій етап ферментації обмежує активність ацетогенних угруповань і визначає швидкість процесу утворення метану в цілому.

Остання стадія ферментації характеризується активністю метанових бактерій і прямим утворенням метану двома способами – перетворенням ацетату і відновленням CO_2 воднем.

За морфологічною будовою метаногени діляться на групи:

- сарциновидні (*Methanosarcina*);
- коки (*Methanococcus*);
- спіралеподібні (*Methanospirillum*).

					ЕКБ.БЕ7106.ДП	Арк.
						20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- паличкоподібні (*Methanobacterium*);

У нормальній мікрофлорі гною присутні синтрофні і метаноутворюючі бактерії *Methanobacterium formicicum* і *Methanospirillum hungati* [18].

З практичної точки зору процеси, що відбуваються в метантенку при ферментації біомаси, відповідають процесам культивування мікроорганізмів в біореакторах. Для метаногенезу характерні наступні фази:

- лаг-фаза (перші 3-4 дні) – адаптація мікроорганізмів до нового субстрату;
- логарифмічна (експоненціальна) – від 4 до 8 днів – фаза зростання і розмноження мікроорганізмів, їх висока активність;
- затримка і уповільнення зростання (період 8-15 днів): виснажуються поживні речовини субстрату, накопичуються продукти обміну;
- стаціонарна фаза (15-20 днів): темпи відмирання і приросту біомаси приблизно рівні, знаходяться в стані динамічної рівноваги;
- фаза вимирання (20-35 днів): кількість поживних речовин в сировині мінімальна, отримані продукти обміну перевищують порогові концентрації.

1.3 Обґрунтування вибору технології зброджування післяспиртової барди

1.3.1 Необхідні умови та технологічні особливості метанового зброджування біомаси

Тривале використання біогазу залежить як від постійної подачі сировини, так і від постійного контролю та підтримання необхідних умов для протікання процесу [19]. Поєднання гною для тварин та субстратів з залишками їжі дозволяє більш повно використати енергетичний потенціал відходів шляхом підвищення ступеня зброджування сировини.

Для нормального протікання процесу необхідно забезпечити такі умови:

- дотримання температурного режиму;
- наявність поживних речовин для бактерій;

					ЕКБ.БЕ7106.ДП	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

- забезпечення достатньої вологості сировини;
- відсутність інгібіторів процесу.
- анаеробне середовище;
- регулярне перемішування;
- оптимальний термін зброджування, завантаження та вивантаження сировини;
- дотримання кислотно-лужного балансу;
- співвідношення вуглецю і азоту;

Температура

Залежно від температурних оптимумів, властивих мікроорганізмам, що беруть участь у процесах бродіння, розрізняють термофільний, мезофільний та психрофільний режими.

Відповідно до психрофільного режиму температура процесу знаходиться в межах до 30 °С, що дозволяє уникнути стадії нагрівання субстрату. Недоліком цього методу є низька рентабельність роботи реактора, оскільки продуктивність і обсяг біогазу незначні.

Мезофільний режим характеризується температурним оптимумом, який підходить для більшості метаногенів. Установки з цим режимом найбільш широко поширені в практичному використанні, оскільки рентабельність виробництва висока.

Використання термофільного температурного режиму доцільне, коли необхідно проводити гігієнічну обробку субстрату, або при використанні сировини, що має власну високу температуру. При цьому режимі досягається висока швидкість процесу та відносно великий обсяг виробленого біогазу, однак при розрахунку продуктивності необхідно враховувати споживання енергії для опалення біогазової установки.

					<i>ЕКБ.БЕ7106.ДП</i>	Арк.
						22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Тривалість ферментації сировини

Тривалість процесу визначається дозою завантаження і температурою. Якщо тривалість ферментації обрано занадто коротку, бактерії вимиваються швидше, ніж вони встигають розмножуватися.

Тривалість ферментації – час від моменту завантаження свіжої сировини в реактор, її обробки, до моменту вивантаження ферментованої біомаси з реактора.

З практичної точки зору бажано вибирати тривалість ферментації в залежності від температури і типу сировини:

- мезофільний режим – 10-20 днів;
- термофільний режим – 5-10 днів;
- психрофільний режим – 30-40 і більше днів.

Вміст вуглецю та азоту

Найоптимальніше співвідношення вуглецю і азоту, при якому найвищий вихід біогазу, від 10: 1 до 20: 1 і залежить від типу субстрату для бродіння. У разі перевищення вмісту вуглецю є обмеження процесу бродіння через нестачу азоту. Якщо занадто багато азоту, то утворюється кількість аміаку, яка є токсичною для мікроорганізмів [19].

Вологість сировини

Для нормального метаболізму в біомасі необхідно підтримувати індекс в'язкості, при якому можливе безперешкодне переміщення бактерій і газу в об'ємі сировини, що зброджується. На практиці розрізняють вологе і твердофазне бродіння. Основна відмінність технологій полягає в частці сухої речовини у вихідній сировині, що подається в реактор. Так, при використанні субстрату з вмістом сухої речовини 8-12% відбувається вологе бродіння, для 15-20% сухої речовини застосовується технологія твердофазного бродіння.

Інгібітори

Інгібітори процесу – речовини (антибіотики, розчинники тощо), які негативно впливають на життєдіяльність мікроорганізмів, сповільнюють

					<i>ЕКБ.БЕ7106.ДП</i>	Арк.
						23
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

метаболізм, а іноді і припиняються процес отримання біогазу. Наявність токсичних та інгібуючих речовин при використанні відходів харчової та агропромисловості, як правило, пов'язана з потраплянням шкідливих речовин на етапі виробництва продукції, або при виробництві самого біогазу. Тому важливо контролювати походження та показники сировини, яка використовується. Так само має контролюватися підготовка сировини для виробництва біогазу. Не можна, наприклад, використовувати для розведення гною воду, що залишилася після прання білизни синтетичним миючими засобами.

1.3.2 Обґрунтування вибору косубстрату

Аналіз світового досвіду свідчить, що зернова післяспиртова барда має найбільші перспективи як сировина для отримання білоквмісної кормової добавки та біогазу. Оскільки обидва продукти користуються попитом на ринку, вони здатні забезпечити рентабельність виробництва [20].

Оскільки до складу сирої барди можуть входити речовини, що не піддаються анаеробній обробці (наприклад, феноли) і можуть гальмувати метаболізм метаногенів, необхідно проводити попередню обробку сировини. В якості попередньої обробки використовують осадження, фотоокиснення, хімічну коагуляцію, фільтрацію, попередню ферментацію тощо [20, 21].

Дослідження [22] показують, що в склад сухої речовини барди входить 50-56% ЗР, що містить переважно білок та клітковину, що уповільнюють анаеробний розклад. Прискорення розкладу відбувається преацидифікуванням – витриманням барди протягом декількох діб за анаеробних умов, що спонтанно розвиває кислотогенні мікроорганізми.

Далі відбувається основна стадія анаеробного розкладу. Одним із варіантів зброджування є використання розділення твердої та сухої фаз барди. Фугат зброджується з метою отримання метану у проточному UASB-реакторі

					<i>ЕКБ.БЕ7106.ДП</i>	Арк.
						24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

за термофільних умов, кислотності середовища – 6,5-7,2. На основі досліджень, вихід біогазу при зброджуванні фугату становить $9 \text{ м}^3/\text{м}^3$ фугату, вміст метану – 59% після чотирьох з половиною місяців. Після шести місяців – $14,6 \text{ м}^3/\text{м}^3$ фугату, вміст метану – 65% [23]. Недоліками цього методу є складність експлуатації, громіздкість технології, необхідність доочистки фугату, великі капіталовкладення.

Іншим методом є одностадійне зброджування в мезофільному режимі [24]. Щоб нейтралізувати кислотність сирової барди, використовують частину зброженої біомаси. Зброжена маса має занижений вміст фосфору, тому в середовище потрібно вводити необхідну концентрацію суперфосфату. Вихід метану за такою технологією – 50,0-51,0%. Після зброджування вихідна сировина може мати високій вміст сульфідів, які утворюються внаслідок високої активності сульфоредакуючих бактерій, що перетворюють сульфати та сульфідів. Це є небажаним процесом, оскільки надмірний розвиток сульфоредакуючих бактерій може знижувати активність метаногенів.

Згідно з останніми публікаціями, перспективними є методи зброджування барди з відходами тваринних комплексів [25, 26, 27, 28]. Деякі дослідження показують високу ефективність виділення метану при використанні коров'ячого гною [29]. У такому процесі відбувається більш повне розщеплення ПСБ, але наявна проблема закисання субстрату на початкових стадіях процесу. Також у цій технології низький вихід біогазу та низький вміст у ньому метану через неоптимальне співвідношення карбону та нітрогену.

Іншою речовиною, яку використовують в якості косубстрату, може слугувати пташиний послід. Оскільки птахи погано засвоюють рослинну сировину, то більша її частина переходить у послід, який є перспективним косубстратом у виробництві біогазу.

Оскільки рН барди від спиртового виробництва достатньо низька – 3,7-4,6 а співвідношення C:N не відповідає оптимальним умовам для метанового зброджування, використання пташиного посліду, як косубстрату, створює

					ЕКБ.БЕ7106.ДП	Арк.
						25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

необхідне більш лужне середовище та забезпечує субстрат нітрогеном [30]. Кислотність посліду більше 6,5. У якості косубстрата він нейтралізує кислоту в реакторі та дає необхідні елементи живлення мікроорганізмам. Досягається необхідне співвідношення вуглецю до азоту.

Відповідно до [30] для отримання біогазу раціональне співвідношення барди до посліду за сухою органічною речовиною доцільно приймати 1:1,7. За даного співвідношення кислотність середовища оптимальна для анаеробного зброджування, концентрація азоту збільшується до необхідної норми та забезпечується необхідна кількість поживних речовин та мікроелементів для мікроорганізмів. При такому співвідношенні субстратів, вологість середовища зменшується. Тому, доцільним є розведення суміші. У якості рідини можна використовувати виробничу стічну воду спиртзаводу. Розводити суміш необхідно до 85-95% вологості [31].

При сумісному мезофільному зброджуванні післяспиртової барди та пташиного посліду, розбавлених стічною водою до вологості 90 %, при співвідношенні стічної води, ПСБ та пташиного посліду 0,2:1:7 відповідно, вихід біогазу становив 265 см³/г сухої органічної речовини. Вміст метну в біогазі становив близько 72% біогазу [30].

Згідно з наведеними дослідженнями, кислотність та співвідношення C:N барди не підходить для самостійного зброджування. Найвищий вихід біогазу виходить при додаванні пташиного посліду у якості косубстрату.

Для розрахунку оптимального співвідношення ПСБ до косубстрату, необхідно визначити вміст вуглецю та азоту у барді.

Вміст вуглецю у сухій органічній речовині складає 58% [32], отже вміст вуглецю у вологій барді при вмісті сухих речовин (CP) 6%, і сухих органічних речовин (COP) 95% (від CP) :

$$C_{\text{ПБС}} = \text{COP}_{\text{ПБС}} \cdot \text{CP}_{\text{ПБС}} \cdot 0,58 \quad (1.3.1)$$

$$C_{\text{ПБС}} = 0,95 \cdot 6 \cdot 0,58 = 3,306 \%$$

					ЕКБ.БЕ7106.ДП	Арк.
						26
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вміст азоту у барді становить 1,28% [33] від сухої речовини, отже вміст азоту від загальної маси барди:

$$N_{ПБС} = CP_{ПБС} \cdot 0,0128 \quad (1.3.2)$$

$$N_{ПБС} = 6 \cdot 0,0128 = 0,077\%.$$

Отже, співвідношення C:N=3,306:0,077=43:1.

Оптимальним співвідношенням C:N для проходження процесу анаеробного зброджування є C:N=30:1.

Вміст азоту в пташиному посліді – 4,36% [34] від СР:

$$N_m = CP_m \cdot 0,0436 \quad (1.3.3)$$

$$N_m = 0,0436 \cdot 26 = 1,13\%,$$

Співвідношення C:N пташиного посліду становить C:N=8:1 [35], тоді вміст вуглецю в пташиному посліді – 9,04%.

Отже, на 100 кг барди, для встановлення необхідного співвідношення C:N необхідно додати 4,15 кг пташиного посліду, тому необхідне співвідношення барди до косубстрату 1:0,0415 або 1:0,18 за сухою речовиною.

1.3.3 Обґрунтування обраної технології отримання біогазу

Біогазові установки промислового типу влаштовані доволі складно і розраховані на роботу з певним видом сировини. Анаеробний метод обробки післяспиртової барди здійснюється в різних за конструкцією реакторах: біореакторах з іммобілізованою плівкою, UASB-реакторах, реакторах із псевдозрідженим шаром (AFB-реактор), реакторах періодичної дії. Використовується одно- та двофазна анаеробна обробка, ставковий спосіб фільтрації, реактори з безперервним перемішуванням [36-41].

Обрана технологія передбачає розділення процесу метанового бродіння на 2 стадії, що відбуваються у різних реакторах. Такий метод виключає можливість закисання субстрату та дозволяє краще контролювати параметри бродіння. У першому реакторі відбувається ферментативний гідроліз та

ацидогенез, у другому – метаногенез. Перший реактор також забезпечує відстоювання речовини, попередню обробку субстрату, за якої розвиваються кислотогенні мікроорганізми.

Температурний режим

Згідно з проведеними дослідженнями [42], оптимальна температура для гідролізу є 55°C та метаногенезу – 35-42 °C [43]. Оскільки біогазова установка знаходиться близько до спиртового заводу та температура барди, що виходить з виробництва, досить висока (близько 80 °C) для обраної технології обрано дотримання термофільного режиму у першому реакторі. Тривалість першої стадії – 2-5 днів. За термофільного режиму зброджування субстрату проходить швидше, що дозволяє використовувати реактори меншого об'єму. Для другої стадії обрано мезофільний режим, тривалістю 10-40 днів, оскільки він є оптимальним для даного процесу та зменшує затрати для підтримання температури. За мезофільного режиму біогаз також містить більшу частку метану. Мікроорганізми, що беруть участь у гідролізі, менш чутливі до перепадів температури, на відміну від метаногенів.

Очищення біогазу

Окрім CH_4 , всі інші гази, що містяться в біогазі, є небажаними і розглядаються як забруднювачі біогазу. Енергетичний вміст метану, описаний нижчою теплотою згорання становить 50,4 МДж / кг- CH_4 або 36 МДж / м^3 - CH_4 (за стандартних умов). Тому це добре зрозуміло, що чим вище вміст CO_2 або N_2 , тим менша теплотворна здатність біогазу. Для біогазу з вмістом метану в межах 60–65% нижча теплота згорання становить приблизно 20–25 МДж / м^3 біогазу. H_2S і NH_3 токсичні та надзвичайно їдкі, вони погіршують тепловий та електричний енергетичний вузол та металеві деталі через викид SO_2 від згорання. Більше того, присутність силоксанів у біогазі, навіть у незначних концентраціях, призводить до негативних наслідків. Загальновідомо, що при згорянні оксидів силіконів, утворюються липкі залишки, які відкладаються при згорянні біогазу на двигунах та клапанах, що спричиняють несправність [44]. У

					ЕКБ.БЕ7106.ДП	Арк.
						28
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

наш час існують різні методи очищення, спрямовані на видалення небажаних сполук з біогазу, розширюючи його діапазон застосувань. Оскільки біогаз планується використовувати на когенераційній установці, біогаз не потребує глибокої очистки. Тому в технологічній схемі передбачено очищення біогазу від CO₂ та супутніх газів і абсорбері з водою та механічне зневоднення.

Обробка зброженої суміші

Окрім біогазу, після процесу бродіння також утворюється зброжена біомаса. Вона містить багато корисних мікроелементів, поживних речовин та її можна використовувати у якості корму тваринам або добрива. Але оскільки вона займає великі об'єми та містить багато води, доцільно додати етап зневоднення отриманої зброженої суміші.

1.4 Обґрунтування вибору основних конструктивних елементів біогазових установок

Біогазова установка – це конструкція з обладнанням для виробництва біогазу. Залежно від призначення їх поділяють на побутові та промислові. Відоме поняття пілотних біогазових установок, які застосовують для проведення експериментальних дослідів технологічного процесу.

Біогазові установки, які будуються або встановлюються на рівні домогосподарств у вигляді фіксованого купола, плавучого барабана, так і у вигляді збірної споруди. Для їх функціонування потрібно забезпечити нескладні операції, які включають часте постачання нової сировини, а також періодичне технічне обслуговування та ремонт. Агенції-донори (наприклад, німецький GTZ, Нідерландська організація розвитку (SNV)) просували встановлення для невеликих господарств купольних біогазових установок, термін експлуатації яких 20 років і більше, якщо вони належним чином підтримуються. Збірні конструкції зброжувачів більш популярні в Китаї [45] та Мексиці [46]. В обох випадках матеріали для біогазової установки легко доступні. Також потрібна невелика територія землі та доступ до води. Біогазові

					<i>ЕКБ.БЕ7106.ДП</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

установки та допоміжне обладнання (печі, трубопроводи, клапани) виробляються в країнах з більшими ринками (наприклад, Китай, В'єтнам) та імпортуються в райони, де менше споживачів (наприклад, Африка).

Основними конструктивними елементами біогазових установок, які перебувають у функціональній залежності, є: біореактор, газгольдер; система теплозабезпечення; система завантаження та система перемішування біомаси: система завантаження біореактора, система перемішування, газгольдер та система підігрівання.

Система завантаження

Система завантаження забезпечує подавання органічної маси в ємності для її переробки. Залежно від способу подавання органічної маси системи завантаження поділяються на гравітаційні, насосні та механічні.

Гравітаційні системи завантажування переважно застосовують у біогазових установках, які розташовані на місцевості з чітко вираженим рельєфом. Біореактор розташовують нижче від рівня ємності для збирання (підготовлення) органічної маси, у такий спосіб субстрат самопливом надходить до біореактора (метантенка).

Насосні системи завантаження широко застосовують у біогазових установках, в яких органічна маса попередньо підготовлена до транспортування, тобто має відповідну гомогенність (густину) і є придатною для транспортування насосами. У такому разі особливого значення рельєф місцевості не має, оскільки завантажують за допомогою насоса.

Механічні системи використовуються для завантаження твердого субстрату. Зазвичай це шнекові або скребкові транспортери. Гомогенізація органічної маси в таких випадках відбувається в гомогенізаторах або безпосередньо в біореакторі.

Обрана технологія передбачає використання насосної системи транспортування барди, оскільки вона підходить для транспортування рідкої сировини. Пташиний послід завантажують в змішувач за допомогою

					ЕКБ.БЕ7106.ДП	Арк.
						30
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

механічної системи завантаження, оскільки він занадто сухий для насосних систем завантаження та місцевість не підходить для гравітаційного методу.

Біореактор. Біореактор біогазової установки є основною частиною, і вимоги до нього висувають доволі високі. Основними вимогами є: гідравлічні, технологічні, теплотехнічні, економічні та естетичні [47].

Біореактори поділяють залежно від конструкції на вертикальні, горизонтальні та суміщені [48]. Особливістю суміщених біореакторів є наявність в їхній конструкції ємкості для зберігання біогазу-газгольдера. Вертикальні біореактори мають переважачий геометричний розмір-висоту. У таких біореакторах наявні дві вертикальні камери: в одну надходить сировина, а з другої відводиться відпрацьована органічна маса. Наявність другої камери уможливорює досягнення ефективного процесу метаноутворення і збільшення виходу біогазу.

У горизонтальних біореакторах переважачим розміром є довжина. Принцип роботи полягає у витісненні переробленої органічної маси свіжим субстратом. Тому робота таких біореакторів нагадує дію кишківника живого організму. Перевагою метантенків такого типу є те, що у разі незадовільних результатів бродіння матеріал може бути спрямований на рециркуляцію, а також зменшення будівельних площ за рахунок суміщення агрегатів. Необхідно відзначити, що вибір типу біореактора та його розмірів визначається залежно від характеристик органічної маси (субстрату), тривалості бродіння, яка своєю чергою залежить від бажаного виходу біогазу, кількості органічних відходів і наявного простору для будівництва споруд.

Для зброджування ПСБ з косубстратом було обрано технологію з підземним вертикальним циліндричним біореактором. Зброджувана сировина має невисоку в'язкість, тому для процесу зброджування підходить високий циліндричний реактор. Підземна технологія краще зберігає тепло. Верхня частина реактора утеплена шаром шлаку та м'якого теплоізоляційного матеріалу.

					ЕКБ.БЕ7106.ДП	Арк.
						31
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Способи теплозабезпечення біореакторів

Щоб отримати необхідну для процесу бродіння температуру і підтримувати її на постійному рівні, потрібно насамперед підігріти субстрат, що подається до реактора, до потрібної температури. Додаткове підведення тепла необхідне для компенсації теплових втрат. Тепло можна підводити до субстрату у робочому просторі реактора або в пристрої, який подає субстрат. Оскільки перепад температури негативно впливає на вихід біогазу, необхідно, за можливості, поєднувати підігрівання з інтенсивним перемішуванням. Крім того, в системі підігрівання необхідно унеможливити осідання завислих у субстраті твердих частинок. Тому потрібно, щоб поверхні легко очищалися. На роботу теплообмінника не повинна впливати присутність у субстраті твердих частинок [49]. Для невеликих реакторів можна використовувати теплообмінні нагрівальні елементи (наприклад, шланги, циліндричні або плоскі теплообмінники), через які прокачують гарячу воду і які можна виймати з реактора під час його очищення.

Нагрівачі, вбудовані у стінки реактора, доцільно застосовувати, зважаючи на їх ККД, лише в тому випадку, якщо вони можуть передавати тепло субстрату з обох боків стінки, як це відбувається у двокамерному реакторі з внутрішньою перегородкою. Крім того підігрівати субстрат можна, безпосередньо подаючи в нього гарячу воду. Оскільки вода використовується одночасно для розбавлення і турбулізації субстрату, який під час завантаження містить дуже велику кількість твердих частинок, цей метод може виявитися ефективним. Підігрівання субстрату через введення пари під тиском підвищує вміст вологи у газі, для усунення якої під час підготовки газу до використання потрібні додаткові заходи.

Рівномірне передавання тепла до субстрату можна забезпечити за допомогою теплообмінників, розташованих поза межами реактора. Однак їх потрібно застосовувати тільки в поєднанні з системою примусової циркуляції субстрату, що відповідно підвищує економічні витрати, але й уможливорює

					ЕКБ.БЕ7106.ДП	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

надійне регулювання температури бродіння. Перевага цієї системи підігрівання полягає у тому, що завдяки одночасному підігріванню і перемішуванню свіжого і циркулюючого субстрату різниця між температурами свіжого і вже наявного в реакторі субстрату буде незначною. Крім того, надійно підтримується швидкість переміщення субстрату, необхідна для запобігання випадання твердого осаду на поверхнях теплообмінника [49].

Розташування теплообмінників поза робочим простором реактора значно полегшує обслуговування і ремонт.

Електрообігрівання вимагає великої кількості електроенергії і може бути використане тільки для невеликих біореакторів. Як нагрівальні елементи найчастіше застосовують трубчасті теплообмінники, де теплоносієм слугує гаряча вода з температурою, близькою до 60 °С. Вища температура провокує ризик налипання зважених твердих частинок на поверхні теплообмінника [50, 51, 52].

Для анаеробного зброджування барди було обрано технологію прямого підігріву сумісно з зовнішнім теплообмінником. Прямий підігрів забезпечується поданням гарячої барди, а зовнішній теплообмінник підтримує температуру середовища та підтримує стабільність температури. Зовнішній теплообмінник не заважає руху сировини в реакторі та легший в обслуговуванні. Для його роботи використовується теплота, отримана від спалювання отриманого біогазу.

Перемішування сировини у біореакторі

Система перемішування – це сукупність елементів, пов'язаних між собою функціональною залежністю для інтенсифікації процесу метаноутворення за допомогою інтенсифікації масообміну і усунення плівки на поверхні органічної маси у метантенках. Системи перемішування бувають механічними, гідравлічними, барботажними [48].

Механічні системи перемішування характеризуються наявністю механічного пристрою для збурення шарів органічної маси у метантенку.

					<i>ЕКБ.БЕ7106.ДП</i>	Арк.
						33
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Залежно від типу біореактора перемішувальний пристрій може бути виконаний у вигляді лопатей на горизонтальному валу для горизонтальних біореакторів або у вигляді крильчатки для вертикальних біореакторів. Такі системи перемішування використовуються для біогазових установок невеликої потужності з біореакторами малих об'ємів.

Гідравлічні системи перемішування містять насоси, які переміщують органічну біомасу з однієї частини біореактора в іншу, до того ж відбувається перемішування шарів субстрату. Такі системи використовують у біореакторах великих розмірів.

Барботувальні системи використовують біогаз для перемішування органічної маси. Такі системи дають змогу досягти оптимального перемішування. Однак до субстрату висувають більші вимоги особливо до його в'язкості, інакше є небезпека утворення плаваючої плівки.

Для зброджування ПСБ прийнято механічну систему перемішування – пропелерну мішалку. Пропелерні механічні мішалки забезпечують рівномірне перемішування сировини в циліндричних вертикальних реакторах за рахунок зміни висоти розміщення мішалки [53].

Висновки:

1. Для виробництва біогазу з ПСБ в якості косубстрату обрано пташиний послід у співвідношенні до ПСБ у відношенні 0,18 до 1 за СР.
2. Збродження проходить у підземному циліндричному вертикальному реакторі.
3. Збродження поділено на 2 стадії та проходить у різних реакторах. У першому проходить гідроліз, ацидогенез та ацетогенез при температурі 55°C, у другому – метаногенез при температурі 38°C.
4. Температурний режим забезпечується прямим підігрівом вхідним субстратом та додатково підтримується зовнішнім теплообмінником – у першому реакторі і подачею гострої пари – у другому реакторі..
5. Перемішування субстрату відбувається пропелерною мішалкою.

					<i>ЕКБ.БЕ7106.ДП</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

6. Завантаження сировини в реактор відбувається за допомогою насосних систем.

					ЕКБ.БЕ7106.ДП	Арк.
						35
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2. ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА БЮГАЗУ З ПІСЛЯСПИРТОВОЇ БАРДИ

2.1 Біохімічні основи перебігу процесу зброджування

В даний час визнано, що процес утворення метану ділиться на чотири стадії [54]:

1. Ферментативний гідроліз – розпад біологічних полімерів у прості органічні сполуки;
2. Ацидогенна стадія – стадія кислотоутворення. Вивільняються леткі жирні кислоти, амінокислоти та спирти, також утворюються водень та вуглекислий газ;
3. Ацетогенна стадія – перетворення утворених сполук в оцтову кислоту, що розкладається;
4. Метаногенна стадія – утворення метану відбувається в результаті перетворення оцтової кислоти, а також реакції відновлення вуглекислого газу воднем [55].

Етапи чітко не відокремлені один від одного, а становлять багатоступеневу систему (Рис.2.1).

					ЕКБ.БЕ7106.ДП			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РОЗДІЛ 2. ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА БЮГАЗУ З ПІСЛЯСПИРТОВОЇ БАРДИ	Літ.	Арк.	Аркушів
Розроб.		Захарчук А.П.					36	77
Перевір.		Зубченко Л.С.				КПІ ім. Ігоря Сікорського, ФБТ.		
Реценз.						БЕ-71		
Н. Контр.								
Затверд.								

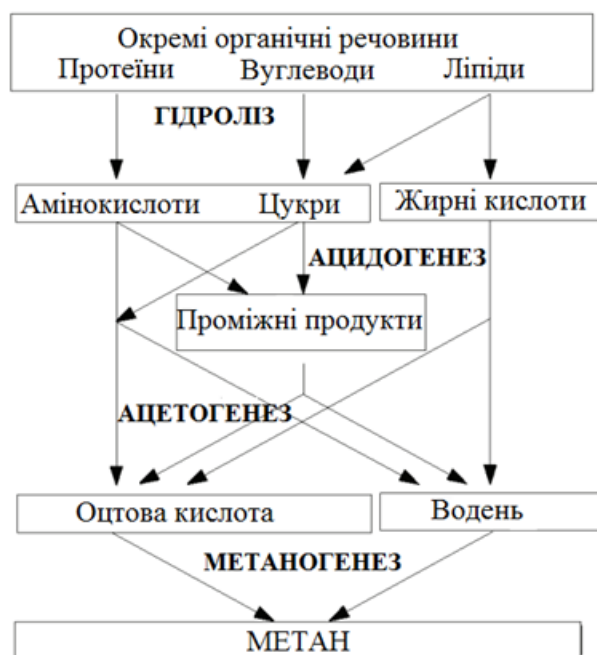


Рисунок 2.1 – Схема анаеробного бродіння [55]

Перший етап – гідроліз. Перша фаза (гідроліз) забезпечується різними групами бактерій (факультативними і облігатними анаеробами). Майже усі мікроорганізми цієї групи є факультативними анаеробами з оптимумом pH 6,5-7,6. На першій стадії органічні речовини ферментуються і позаклітинними ферментами (амілаза, протеаза та ліпаза) мікроорганізмів, фактично відбувається і переведення твердих речовин з нерозчинного у розчинний стан. Бактерії розщеплюють довгі ланцюги складних вуглеводів. Білки та ліпіди перетворюються на мономери.

У процесу гідролізу анаеробні мікроорганізми ферментативно розщеплюють високомолекулярні органічні сполуки (вуглеводи, білки, жири, целюлозу) до низькомолекулярних, таких як цукор, амінокислоти, жирні кислоти і воду. Виділені ензими (екзоферменти) прикріплюються до зовнішньої стінки бактерій і розщеплюють органічні речовини на малі водорозчинні молекули [55]. Гідроліз відбувається досить повільно і залежить від позаклітинних ензимів як, наприклад, целюлази, амілази, протеази і ліпази. Швидкість гідролізу залежить від природи органічних субстанцій і від умов його проходження: наявність достатньої кількості ферментів, вид ферментів,

забезпечення контакту з органічним субстратом, підтримання оптимальних необхідних значень температури і рівня рН.

Серед продуктів гідролізу найбільше значення мають:

- органічні кислоти – оцтова, пропіонова, масляна, капронова, мурашина, молочна, бурштинова;
- спирти й кетони – метанол, етанол, ізопропіловий спирт, бутанол, гліцерин, ацетон;
- гази – водень, метан, діоксид вуглецю;
- вітаміни – рибофлавін, вітамін В12 [56].

Також в склад збродженої суміші входить велика кількість ферментів – целюлаза, алкогольдегідрогеназа.

Оскільки наступні стадії зброджування, які є анаеробними, не можуть розпочатися доки не пройшов гідроліз і тверді нерозчинні речовини не трансформуються у розчинні, стадія гідролізу може лімітувати загальну швидкість процесу [56].

Енергія утворюється у другій фазі (бродиння, ацидогенна), яку здійснює та ж група бактерій, яка приймає участь у першій фазі, а також лактобацили, стрептококи та ін. Через те, що ці дві фази енергетично спряжені, вони часто розглядаються об'єднано.

Другий етап – кислотоутворення (бродиння). Кислотоутворюючі бактерії, які беруть участь у другій стадії утворення біогазу, розкладають складні органічні сполуки (клітковина, білки, жири і т. д.) у простіші. Таким чином, у навколишньому середовищі знаходяться первинні продукти бродіння – леткі жирні кислоти, нижчі спирти, водень, окис вуглецю, оцтова і мурашина кислоти і т.д [56].

Оліго- та мономери утворені з таких полімерів (цукрів, амінокислот, жирних кислот, гліцеролу, пуринів та піримідинів) первинні анаероби розкладають до спиртів (метанолу, етанолу, пропанолу, бутанолу), альдегідів,

органічних кислот (пропіонова, масляна, оцтова, піровиноградна, молочна). Також утворюється H_2 , H_2S , CO_2 , азот, леткі жирні кислоти.

Окремі молекули проникають в клітини мікроорганізмів, де продовжується їх розкладання. Анаеробні умови для метаногенів створюють анаеробні бактерії, що утилізують кисень, що залишився. При значеннях рН 6-7,5 синтезуються спочатку нестійкі жирні кислоти, карбонові кислоти (оцтова, мурашина, масляна, пропіонова кислоти), низькомолекулярний спирт – етанол і газу – двоокис карбону, карбон, сірководень і аміак. При цьому етапі рівень рН зменшується, через що він називається етапом окиснення.

Приблизно 20 % органічних речовин вихідного осаду перетворюються в оцтову кислоту, 15 % – у пропіонову, а 65 % – в інші проміжні сполуки. Дана стадія не обмежує наступні етапи зброджування, оскільки мікроорганізми, що здійснюють її, невибагливі й ростуть дуже швидко. Але швидкі стадії гідролізу й кислотоутворення (їх загальна тривалість приблизно 7 год.) можуть призвести до накопичення летких кислот і зниження рН, що часто пригнічує ріст бактерій, які здійснюють наступні стадії процесу [57].

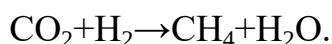
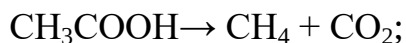
Третій етап - утворення кислотоутворюючими мікроорганізмами оцтової кислоти, двоокису карбону та карбону. Вони є початковими продуктами для утворення метану. Бактерії третього етапу є дуже чутливими до температури. У третій стадії беруть участь бактерії, що утворюють оцтову кислоту (ацетогени). До них належать групи бактерій *Acetobacterium woodii*, *Clostridium thermoaceticum*, *Clostridium aceticum*. Частина мікроорганізмів утворює ацетат з виділенням водню з розчинних продуктів попередньої стадії кислотоутворення. Інші утворюють оцтову кислоту шляхом використання водню для відновлення CO_2 [13].

Четвертий етап - утворення метану. Також відбувається утворення двоокису карбону і води. Під час останньої стадії утворюється 90% усього метану, 70% походить з оцтової кислоти. Тому ефективність продукування метану залежить від кількості оцтової кислоти, виробленої на попередніх

					ЕКБ.БЕ7106.ДП	Арк.
						39
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

стадіях. Метаногени – анаеробні бактерії з оптимальною кислотністю середовища $pH = 7$.

Метан утворюється двома шляхами – розщепленням оцтової кислоти, а також відновленням вуглекислоти воднем (група бактерій 4)[57]:



У четвертій стадії беруть участь метанові бактерії *Methanobacterium formicum*, *Methanospirillum hungati* [58].

Деякі продукти фази бродіння, такі як CO_2 , H_2 , CO , метанол, метиламін, ацетат, форміат, уникаючи ацетогенну стадію, безпосередньо трансформуються в метан. Інші продукти бродіння (кислоти, у яких більше 2 атомів карбону та спирти – більше одного) проходять ацетогенну стадію, у якій утворюються ацетат і водень.

Процес здійснюють такі мікроорганізми, як *Syntrophomonas*, *Syntrophobacter*, *Desulfovibrio*, *Thermoanaerobium* при умовах низького парціального тиску H_2 . Тому ацетогенні мікроорганізми об'єднуються в синтрофні асоціації з метаногенними та сульфатредукуючими бактеріями. В асоціації відбувається міжвидовий перенос водню [58].

Якщо в середовищі присутня велика кількість водню та вуглекислого газу, є ще один проміжний етап утворення ацетату з цих речовин. Бактерії, що утворюють вуглекислий газ та ацетат, отримують енергію, що витрачається на відновлення CO_2 , за допомогою перетворення H_2 до ацетату. Проміжна стадія утворення ацетату також називається ацетогенезом. Таким чином, ацетогенез об'єднує процеси, при яких мікроорганізми отримують енергію разом з утворенням ацетату.

Мікроорганізми, що здійснюють ацетогенну фазу, представлені наступними видами: *Sporomusa ovata*, *Acetogenium kivui*, *Acetobacterium woodi*, *Butyribacterium methylotrophicum*, *Clostridium thermoaceticum* та інші[59].

Отже, асоціація мікроорганізмів, що становлять трофічний ланцюг первинних та вторинних анаеробних організмів, здійснюють анаеробний розпад органічних речовин. Стадії гідролізу та кислотоутворення здійснюється первинними анаеробами, стадії ацетогенезу та метаногенезу – вторинними анаеробними мікроорганізмами.

Для трофічного ланцюжка при метановому бродінні характерне використання продуктів обміну одних груп бактерій іншими: харчові і енергетичні субстрати вторинних анаеробів утворюються в результаті діяльності первинних [59].

Розщеплювання органічних речовин до простіших молекул та подальше перетворення на метан проходить лише у вологому середовищі, тому що бактерії можуть переробляти тільки речовини в розчиненому виді. Таким чином, для зброджування твердих субстратів необхідне розбавлення середовища водою.

На сьогодні науці відомі близько 10 різних видів *Methanococcus* і *Methanobacterium*, розміром усього лише 0,0001 мм, здатних жити в різному середовищі. У процесі розщеплення продукти обміну речовин одної групи бактерій виступають поживними речовинами для іншої наступної групи бактерій [59].

Пофазне розщеплювання органіки відбувається з різною швидкістю. Різні групи бактерій працюють з різною швидкістю. Тоді як аеробні бактерії при достатньому живленні подвоюють свою масу упродовж 20 хв – 10 годин (час генерації) анаеробні бактерії істотно повільніше нарощують біомасу. Утворення ацетату проходить найповільніше. Бактеріям необхідно багато часу для розщеплювання поживних речовин. Серед метанових бактерій у повільних видів – розщеплення займає 3-5 днів. Усі інші розщеплюють оцтову кислоту на метан протягом від декількох годин до трьох днів [60].

Швидше за всіх працюють кислотоутворюючі бактерії, у яких перші перетворення органіки відбуваються від декількох годин до 2 днів. У

					ЕКБ.БЕ7106.ДП	Арк.
						41
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ідеальному випадку між фазами розщеплювання встановлюється динамічна рівновага в концентрації речовин, а саме між вступом поживних речовин і їх розщеплюванням.

Помилкою, що найчастіше робиться, є перегодовування бактерій субстратом, що швидко розщеплюється, це призводить до накопичення кислот через діяльність кислотоутворюючих бактерій. У зв'язку з цим може настати занадто різке падіння рівня рН, якого не переживуть інші бактерії. Крім того, надмірна концентрація виробленої речовини призводить до затримки зростання групи бактерій, що виробляє її. Динамічна рівновага також визначається легкістю розщеплювання субстрату [60].

Цукор і крохмаль, наприклад, через свою просту структуру розщеплюються дуже швидко і вимагають лише короткого часу перебування у ферментаторі. Чим складніше структура субстрату, тим довше триватиме розщеплювання. Целюлоза і геміцелюлоза мають широко розгалужену структуру і розкладаються повільно. Лігнін розкладається бактеріями дуже погано, оскільки він проявляє стійкість навіть до кислот [60].

2.2 Характеристика біогазу

Біогаз – продукт анаеробного бродіння органічних відходів – різновид біопалива – газ, який утворюється під час мікробіологічного розкладання метановим угрупованням біомаси чи біовідходів, твердих і рідких органічних відходів: в каналізації, на вигрібних ямах звалищах, болотах тощо. Добувають із відходів тваринництва, харчової промисловості, стічних вод та твердих відсортованих побутових відходів, без неорганічних домішок та домішок неприродного походження [61].

Біогаз, вироблений із будь-якої сировини, в тому числі біомаси, має відповідати вимогам документів ДСТУ 7509:2014 «Газоподібне паливо. Біогаз. Методи відбору проб»; ДСТУ 7721:2015 «Газоподібне паливо. Біогаз. Технічні

					<i>ЕКБ.БЕ7106.ДП</i>	Арк.
						42
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вимоги і методи контролю» ; ДСТУ ISO 13443:2015 «Гази горючі природні для промислового і комунально-побутового призначення»

Біометан є біогазом, який був підвищений до якості, подібної до викопного природного газу і має концентрацію метану 90% або більше. Біогаз є газоподібною формою метану, отриманого з біомаси . Підвищуючи якість до природного газу, стає можливим розподілити газ споживачам через існуючу газову мережу в межах існуючих приладів.

Існує три покоління виробництва біометану, що розрізняються по використовуваній органічній речовині і процесу трансформації [62]:

1. Біометан першого покоління утворюється в результаті анаеробного розкладання органічних відходів, яке є результатом природного розпаду органічної речовини. Цей неочищений або злегка заздалегідь оброблений газ називається біогазом і може бути використаний локально для виробництва електроенергії, тепла або і того, і іншого в процесі з комбінованим циклом. Після подальшого очищення біогаз стає біометаном, 100% поновлюваною енергією тієї ж якості, що і природний газ, який може використовуватися в транспортних засобах.

2. Біометан другого покоління отримують газифікацією з лігноцелюлозної біомаси (дерево і солома) з використанням процесу "термохімічної конверсії". Цей процес здійснюється в два етапи: - на першому етапі біомаса перетворюється в синтетичний газ. Цей синтетичний газ потім перетворюється на біометан шляхом каталітичного синтезу на другому етапі.

3. Біометан третього покоління походить від прямої трансформації мікроводоростей, що культивуються у високопродуктивних фотосинтетичних реакторах з використанням природного світла, води і мінералів, при утилізації CO₂.

Склад біогазу, отриманого при метановому бродінні, нестабільний і залежить від багатьох факторів. Біогаз складається на 55-75% з метану, 25-45% становить CO₂, також він містить незначні домішки водню (H₂) і сірководню

					ЕКБ.БЕ7106.ДП	Арк.
						43
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

(H₂S), азоту, ароматичних вуглеводнів, галогено-ароматичних вуглеводнів. Використання біогазу є одним із методів доповнення та часткової заміни традиційних видів палива. Необхідність вирішення на сучасному рівні екологічних проблем, що виникають під час утилізації відходів у сільському господарстві, є важливим аргументом на користь цього джерела енергії [62].

Однією з основних тенденцій у розгортанні екологічно безпечного виробництва продукції рослинництва і тваринництва є розвиток комплексних технологій із використанням процесів метанового зброджування. Для виробництва біогазу придатними є різноманітні відходи агропромислового комплексу, харчової та фармацевтичної промисловості, побуту, які містять целюлозу та інші цукри [63].

У результаті ферментації із відходів одержують не лише біогаз, але й концентровані органічні добрива, які є цінним продуктом для застосування у сучасних технологіях вирощування культур, системах органічного землеробства тощо. Придатною сировиною для виробництва біогазу є гній ВРХ, свинячий гній та курячий послід, оскільки бактерії, що беруть участь в утворенні метану, вже містяться у шлунку тварин.

Однак, при використанні гною, вміст метану у біогазі може становити близько 60-65 % через попереднє бродіння у шлунку [63]. Збирання і вивезення гною великої рогатої худоби і свинячого гною та курячого посліду з ферм відбуваються державним регулюванням відповідно до Державних норм технологічного проектування [64]. Механічне або гідравлічне транспортування також впливає на склад гною і його подальші енергетичні характеристики. Біогаз складається переважно з метану та двоокису вуглецю. Вміст енергії в біогазі безпосередньо залежить від вмісту метану. Що вищий вміст таких речовин, як жири і крохмаль, які легко розпадаються на ферментну масу, то більший вихід газу [64].

					ЕКБ.БЕ7106.ДП	Арк.
						44
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Теплотворна здатність 1 м³ біогазу складає, залежно від вмісту метану, – 20–25 Мдж/м³ (табл. 2.1). Така кількість біогазу еквівалентна згоранню 0,6–0,8 дм³ бензину, 1,3–1,7 кг дров або використанню 5–7 кВт електроенергії.

Теплотворні властивості біогазу, отриманого в результаті метанового бродіння, як правило, поступаються природному газу. Але теплотворність біогазу після його відповідної технологічної сепарації (поглинання і використання на інші технологічні потреби наявного вуглекислого газу) може перевершувати природний газ. Збагачений біогаз, отриманий за допомогою анаеробної ферментації, або очищений синтез-газ, який отриманий в ході газифікації біомаси називають біометаном [65].

Таблиця 2.1 – Фізичні властивості компонентів біогазу [65]

№ з/п	Назва показника	Одиниці вимірювання	Складові біогазу			
			CH ₄	CO ₂	H ₂	H ₂ S
1	2	3	4	5	6	7
2	Об'ємна частка	%	55-70	27-44	1	3
3	Теплота згорання	МДж/м ³	35,8	-	110	22,3
4	Температура спалахування	°С	650-950	-	585	-
5	Критичний тиск	МПа	4,7	7,5-304	1,3	89
6	Критична температура	°С	190,5		0,09	373
7	Нормальна густина	г/см ³	0,72	468	31	1,54
8	Критична густина	г/см ³	162	2,5	-	349
9	Відносна густина (до повітря)	-	0,55	-	0,07	1,2

Відповідно до обраної технологічної схеми біогаз отримують з суміші післяспиртової барди та курячого посліду. Бродіння проводиться в два етапи – на першому етапі в анаеробному кислотогенному реакторі відбуваються перші

три стадії метаногенезу, на другому етапі, в метаногенному реакторі відбувається четверта стадія – власне утворення метану. Біогаз, який виділяється в процесі зброджування після попередньої очистки в абсорбері з водою та осушення подається на спалювання в когенераційну установку.

Характеристика біогазу, який подається на спалювання в когенераційну установку: вміст метану – 88%, питома теплота згоряння 24,6 МДж/м³, питома густина 1 кг/м³.

					ЕКБ.БЕ7106.ДП	Арк.
						46
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3. ТЕХНОЛОГІЯ ОТРИМАННЯ БІОГАЗУ З ПІСЛЯСПИРТОВОЇ БАРДИ

3.1 Сировина та матеріали

Характеристика необхідної для анаеробного зброджування сировини
(Табл. 3.1)

Таблиця 3.1 – Характеристика сировини для метанового зброджування
післяспиртової барди з отриманням біогазу

Найменування	Категорія та НТД, яким регламентується сировина	Показники, що обов'язкові для перевірки та їх нормативне значення	Примітки
1. Основна сировина:			
1.1 Післяспиртова барда	ДСТУ 4478:2005 Продукти перероблення барди зернової післяспиртової. Загальні технічні умови.	Відповідно до вимог технологічного процесу Вологість 94%, зольність 0,03%	
1.2. Послід пташиний	ДСТУ 7526:2014 Послід пташиний. Технологія перероблення на органічні та органомінеральні добрива високотемпературним методом. Загальні вимоги	Відповідно до вимог технології вологість 74%, зольність 6,5%	
2. Напівпродукти			
2.1. Суміш барди та пташиного посліду	Згідно технологічного регламенту	Вологість, зольність, C:N=1:0,0415, COP-92%	

					<i>ЕКБ.БЕ7106.ДП</i>		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Захарчук А.П.			ТЕХНОЛОГІЯ ОТРИМАННЯ БІОГАЗУ З ПІСЛЯСПИРТОВОЇ БАРДИ	Літ.	Арк.
Перевір.		Зубченко Л.С.					47
Реценз.						КПІ ім. Ізгоря Сікарського, ФБТ.	
Н. Контр.						БЕ-71	
Затверд.							

2.2. Зброджена сировина	Згідно технологічного регламенту	Вологість 95%, відсутність патогенної мікрофлори	
2.3 Фільтрат		СР=3,29%	
2. Допоміжна сировина:			
2.1. Вода технічна (або вода водопровідна)	ДСТУ 7525:2014	pH = 6,5-7,5, завислі речовини >1,5 мг/дм ³ , вміст вільного хлору 0,3-0,5 мг/дм ³	

3.2 Опис технологічного процесу

ДР1 Підготовка повітря

Підготовка передбачає очищення повітря від пилу, аерозолів, інших забруднювачів та компресування повітря. Очищене повітря використовується для витіснення біогазу з газгольдера та для подачі повітря в когенераційну установку.

ДР 1.1 Забір повітря з атмосфери

Повітря забирається виносними трубами повітрозбірника на висоті 4-6м над рівнем землі.

ДР 1.2 Фільтрування повітря

Процес фільтрування повітря поділяється на 2 етапи. Спочатку повітря проходить через багатошарові дротяні сітки. На цьому етапі виділяються частинки розміром 5-10 мкм. Потім повітря проходить через волокнистий фільтр з фільтрувального матеріалу ФВНР. На цьому етапі затримуються частинки розміром 1-1,8 мкм. Ефективність очищення – 98%. Повітря проходить контроль ефективності очистки.

ДР 1.3 Компресування повітря

					ЕКБ.БЕ7106.ДП	Арк.
						48
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Повітря компресується за допомогою повітродувки продуктивністю 2-190 м³/хв. Повітря стискається до 5 кПа, при цьому повітря нагрівається. Для осушення повітря від вологості його охолоджують до 20°C, надлишкова волога виходить в конденсат. Стиснене повітря подається на ТП 7.1, для витиснення біогазу з газгольдера, а також на ТП 8 для підтримання процесу спалювання біогазу.

На стадії проходить контроль тиску та температури.

ДР 2 Підготовка виробництва

ДР 2.1 Підготовка обладнання

Обладнання на виробництві потребує планових техоглядів та ремонтів. Необхідно проводити періодичне санітарне очищення споруд, апаратів та трубопроводів від утворених в процесі роботи осадів та накипів. При засміченні труби промивають водою під тиском.

ДР 2.2 Перевірка обладнання на герметичність

Перевірка герметичності обладнання здійснюється під тиском гідравлічним методом. Апарати та комунікації, які проходять перевірку, заповнюються водою під тиском 50 кПа на 15 хв. Манометром перевіряють показники тиску та проводять візуальний огляд споруд та комунікацій на наявність протікань.

ТП 3 Підготовка сировини

Оскільки барда з виробництва надходить у подрібненому стані, вона не потребує додаткового подрібнення. ПСБ надходить до спеціальної ємності, де накопичується до подачі у реактори.

ТП 4 Підготовка косубстрату

Косубстрат, який завозиться на виробництво, не потребує подальшого подрібнення. Він завантажується у спеціальну ємність та накопичується там до подачі у реактор-змішувач. У якості косубстрату використовується пташиний послід з рН=4, вологістю 74% та співвідношенням С:N=8:1.

ТП 5 Підготовка субстрату

					<i>ЕКБ.БЕ7106.ДП</i>	Арк.
						49
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ТП 5.1 Змішування субстрату в збірнику

Пташиний послід подається до змішувача за допомогою шнекового конвеєра. Насосною системою закачується ПСБ з окремого накопичувача. У змішувачі сировина перемішується протягом 15 хв за допомогою встановленої лопатевої мішалки під кутом 45° . Частота обертання мішалки – 50 об/хв. Косубстрат подається у співвідношенні до ПСБ 0,0415:1. На даній стадії передбачено контроль рН, температури та рівня заповнення змішувача.

ТП 5.2 Розбавлення субстрату водою

Для підтримання оптимального рівня вологості до змішувача також надходить необхідна кількість води, яка змішується у резервуарі з сировиною. В якості води для розбавлення використовується охолоджений теплоносій з реактора, в якому відбувається перша стадія зброджування. Оскільки температура барди, що надходить з виробництва, достатньо висока для підтримання оптимальної температури зброджування сировини, на цій стадії суміш не потребує додаткового обігріву. Кінцева вологість сировини для зброджування $W=95\%$, температура $t=58^{\circ}\text{C}$.

ТП 6 Зброджування

Сировина проходить анаеробне зброджування у 2 стадії.

ТП 6.1 Перша стадія зброджування

На першій стадії зброджування суміш післяспиртової барди та косубстрату, розведені до необхідної вологості, перекачується насосом зі змішувача до CSTR-реактора (постійне перемішування, безперервний потік). Під час першої стадії відбуваються перші три етапи утворення біогазу. У реакторі вмонтовано мішалку пропелерного типу, швидкість перемішування – 100 об/хв. Реактор працює у термофільному режимі, температура – 55°C . Температура підтримується постійним додаванням гарячої сировини та зовнішніми теплообмінниками, в яких циркулює гарячий теплоносій, що готується на ТП8 з конденсату грючої пари від процесу сушіння. Відпрацьований гарячий теплоносій використовують для розбавлення

					<i>ЕКБ.БЕ7106.ДП</i>	Арк.
						50
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

субстрату на ТП5.2. Періодично встановленим у реактор автоматичним пробовідбірником відбираються проби сировини, що зброджується. Проби проходять мікробіологічний аналіз. Під час першої стадії утворюється невелика кількість збіднілого на метан біогазу. Тривалість зброджування на першій стадії– 5-6 діб.

ТП 6.2 Друга стадія зброджування

Під час другої стадії зброджування відбувається процес метаногенезу. Процес проходить за мезофільного режиму. Біомаса після перших трьох етапів зброджування у першому реакторі перекачується насосом до другого реактора. Температура підтримується постійним змішуванням теплішої сировини та подачею пари через паровий інжектор. Для підтримання температури використовується вторинна пара (пара, що випарувалася з продукту, що упарюється), що утворюється в процесі упарювання рідкої фракції на ТП9.2. Утворений біогаз видаляється з метантенка через вихідний отвір у верхній частині реактора в газові ковпаки, звідки надходить до газгольдерів. Перемішування сировини здійснюється пропелерними мішалками. Ця стадія потребує контролю температури, рН та мікробіологічного контролю. Рідина з реактора надходить до збірника рідини і далі йде на подальшу обробку.

ТП 7 Очищення отриманого біогазу

ТП 7.1 Накопичення біогазу в газгольдері

Біогаз надходить з реакторів по трубопроводам і зберігається у газгольдерах під тиском 0,5 МПа. Якщо тиск перевищує заданий, біогаз автоматично видаляється з газгольдера. Для витіснення біогазу з газгольдера використовується повітря від ДР1, яке подається між двома шарами плівки, що формує купол реактора тим самим створюючи тиск в газгольдері завдяки якому біогаз витісняється. Ця стадія потребує контролю тиску в реакторі.

ТП 7.2 Очищення біогазу в абсорбері

Газ з газгольдера подається до абсорбера з водою. Біогаз пропускається через абсорбер під тиском 1-3 МПа, під час чого з газу видаляється частина

					<i>ЕКБ.БЕ7106.ДП</i>	Арк.
						51
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вуглекислого газу та сірководню. На цьому етапі відбувається контроль тиску та хімічних показників. Вміст метану після очищення – 88%. Вода, що слугує абсорбентом, регенерується, після чого знову надходить в абсорбер. Гази, що видаються з абсорбента, вловлюються системою хімічних фільтрів.

ТП 7.3 Зневоднення біогазу

Для видалення вологи біогаз з газгольдера проходить через систему труб у вигляді змійовика, що знаходяться під землею на глибині 1-2 м. за рахунок різниці температур біогазу та трубопроводів, волога починає конденсувати на стінках трубопроводів. Отримана вода збирається в збірник.

ТП 8 Спалювання біогазу в когенераційній установці

Очищений біогаз по газовим трубам надходить до когенераційної установки. Біогаз спалюється для отримання електричної енергії, яка використовується для потреб виробництва. Теплота, що утворюється під час спалювання біогазу використовується для підігрівання конденсату гріючої пари, який надходить зі стадії ТП9.2. Гарячий теплоносій подається на ТП6.1 для обігрівання анаеробного реактора першої стадії зброджування.

ТП 9 Обробка збродженого субстрату

ТП 9.1 Розділення збродженого субстрату

Зброджена сировина з другого реактора надходить до шнекового сепаратора для відокремлення твердої та рідкої фракції. Рідка фракція відокремлюється під тиском 0,1-0,2 МПа. Рідка фракція проходить подальшу обробку. Тверда фракція використовується як добриво. Проводиться технологічний та хімічний контроль. Фільтрат, що утворився підлягає концентруванню упарюванням.

ТП 9.2 Упарювання рідкої фракції

Відділена рідка фракція надходить до випарної установки. Процес випарювання проходить під атмосферним тиском. Установка обігрівается гріючою парою з температурою 120-130°C. Утворена вторинна пара використовується для обігріву метантенка на ТП6.2. Конденсат гріючої пари

					<i>ЕКБ.БЕ7106.ДП</i>	Арк.
						52
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

підігрівається за рахунок тепла гарячих вихлопних газів в когенераційній установці на ТП8 і використовується як теплоносії для обігріву анаеробного реактора на першій стадії зброджування ТП6.1. Далі упарена рідка фракція надходить до збірника, звідки розливається в цистерни та відправляється на реалізацію як рідке добриво. Проводиться технологічний контроль тиску та концентрації СОР. Рідка фракція упарюється до СР=1%. Також отримані добрива перевіряють на наявність важких металів.

3.3 Контроль виробництва

Щоб забезпечити якість продуктів бродіння: біогазу та добрив, та відповідність стандартам, запобігти втратам ресурсів, необхідно проводити поточний контроль процесу на всіх його стадіях. Перелік контрольних точок, що забезпечують дотримання заданих параметрів наводиться у Таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Точки та параметри контролю виробництва.

№ п / п	Назва стадії процесу, місце заміру параметра або відбору проби	Параметр, що контролюється	Частота контролю	Норми технологічного режиму та допустимі відхилення	Методи контролю	Спосіб контролю параметра, тип приладу
1	ДР1. Підготовка аераційного повітря	Тиск та температура	Регулярно	P=2,5кПа, t=20°C	Технологічний	За показниками датчиків – манометр, термометр
2	ДР2 Підготовка виробництва	Відсутність забруднення герметичності	Регулярно	Відповідно технічним характеристикам	Технологічний	Оглядовий
3	ТП5.1 Змішування сировини	Витрата	Кожне завантаження	ПСБ:косубстрат=1:0,0415	Технологічний	Автоматично
4	ТП5.2 Розбавлення сировини водою	Вологість, рН, температура	Кожне завантаження	W=95%, 5,5-6,8 58 °C	Технологічний	Автоматично

Продовження таблиці 3.1

5	ТП6 Зброджуван ня	Температура, рН, рівень заповненості реактора, Тиск, Мікробіологіч ний склад	Постійно	t=55°C	Техноло гічний, Хімічни й, мікробі ологічн ий	Термодатч ик дотчик тиску, рН- метр, лаборатор ні аналізи, рівнемір
6	ТП7 Очищення отриманого біогазу	Тиск, Вологість, Вміст метану	Постійно	$3.5 \cdot 10^3 \text{ Па}$ W=0,3% 88%	Техноло гічний	Манометр, Газовий хроматогр аф
7	ТП8 Спалюванн я біогазу на когенерацій ній установці	Потужність	Кожна операція		Техноло гічний	Автоматич но
8	ТП9 Обробка збродженої суміші	Вміст СР, температура, тиск	Кожне завантаження	1% p=0,1-0,2 МПа t=120-130°C	Техноло гічний	Автоматич но

3.4 Матеріальний баланс

Розрахунки матеріального балансу отримання біогазу з ПСБ та косубстрату наведено в Таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Матеріальний баланс виробництва біогазу

Використано					Отримано			
Стаді я	Назва сировини, матеріалів, напівпродуктів	Кількість			Назва кінцевого продукту чи напівпродукту, відходів і витрат	Кількість		
		м ³	шт	кг		м ³	шт	кг
ТП3	ПСБ	270		283500	ПСБ	270		283500
ТП4	Пташиний послід	11		11773	Пташиний послід	11		11773

Продовження таблиці 3.2

ТП5. 1	ПСБ	270			Субстрат для зброджування (нерозбавлений)			
	Пташиний послід	11						295273
	Всього:			295273	Всього			295273
ТП5. 2	Субстрат для зброджування (нерозбавлений)	281		295273	Субстрат для зброджування			401436
	Охолоджений теплоносій від 6.1	106		106163				
	Всього			401436	Всього			401436
ТП6	Субстрат для зброджування	387,3		401436	Неочищений біогаз	7102,4		7102,4
					Зброджений залишок			394337
	Всього			401436	Всього			401439
ТП9. 1	Зброджений залишок			394337	Тверда фракція			3774
					Рідка фракція	390568		390563
	Всього			394337	Всього			
ТП9. 2	Рідка фракція			390563	Упарена рідка фракція			38907
					Вторинна пара			348327
	Всього			390563	Всього			390563

РОЗДІЛ 4. ВИБІР ТА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ОТРИМАННЯ БІОГАЗУ З ПІСЛЯСПИРТОВОЇ БАРДИ

Вихідні дані:

ПСБ

Добова витрата післяспиртової барди – 270 м³/добу;

Густина барди – 1050 кг/м³;

Вміст сухих речовин в барді – 6%;

Зольність барди – 0,3% (5% від сирої речовини);

Необхідна вологість для зброджування – 95%;

Доза завантаження – 10%;

Пташиний послід

Вологість – 74%

Вміст сухих речовин – 26%

Зольність – 6,5 %

Вміст СОР – 75% (від сухої речовини)

Для розрахунку основних параметрів біогазової установки необхідно знайти значення наступних показників:

1. Для розрахунку об'єму метантенку використаємо наступну формулу:

$$V_{\text{мет}} = \frac{V_{\text{заг}} \cdot 100}{D} \quad (4.1.1)$$

де $V_{\text{заг}}$ – загальний обсяг сировини, м³/доба;

D – добова доза завантаження сировини, 10%.

Загальний об'єм сировини визначається виходячи з необхідної вологості для зброджування. Для зброджування ПСБ було прийнято вологість 95%.

Розрахуємо загальну масу сировини після розбавлення та необхідну кількість води. За добу утворюється 283500 кг ПСБ, з яких 17010 кг СР.

					ЕКБ.БЕ7106.ДП		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ВИБІР ТА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ОТРИМАННЯ БІОГАЗУ З ПІСЛЯСПИРТОВОЇ БАРДИ		
Розроб.		Захарчук А.П.					
Перевір.		Зубченко Л.С.					
Реценз.							
Н. Контр.							
Затверд.					КПІ ім. Ізоря Сікарського, ФБТ. БЕ-71		
					Лит.	Арк.	Акрушів
						56	77

Маса розбавленої до вологості 95% ПСБ становить:

$$m_{95\%ПСБ} = \frac{m_{ср.ПСБ} \cdot 100}{5} \quad (4.1.2)$$

$$m_{95\%ПСБ} = \frac{17010 \cdot 100}{5} = 340200 \text{ кг/добу.}$$

Для зброджування використовується пташиний послід в якості косубстрату у співвідношенні ПСБ:послід=1:0,18 за сухою речовиною.

Кількість сухої речовини необхідного косубстрату:

$$m_{ср.косуб.} = m_{ср} \cdot 0,18 \quad (4.1.3)$$

$$m_{ср.косуб.} = 17010 \cdot 0,18 = 3062 \text{ кг}$$

При вологості 74%, необхідна маса косубстрату:

$$m_{косуб.} = \frac{m_{ср.косуб.} \cdot 100}{26} \quad (4.1.4)$$

$$m_{косуб.} = \frac{3061 \cdot 100}{26} = 11773 \text{ кг.}$$

Маса розбавленого до вологості 95% косубстрату становить:

$$m_{95\%косуб} = \frac{m_{ср.косуб.} \cdot 100}{5} \quad (4.1.5)$$

$$m_{95\%косуб} = \frac{3062 \cdot 100}{5} = 61240 \text{ кг.}$$

Маса води, яку необхідно додати для забезпечення вологості ПСБ 95% становить:

$$m_{вод.ПСБ} = m_{95\%ПСБ} - m_{ПСБ} \quad (4.1.6)$$

$$m_{вод.ПСБ} = 340200 - 283500 = 56700 \text{ кг.}$$

Маса води, яку необхідно додати для забезпечення вологості ПСБ 95% становить:

$$m_{вод.косуб} = m_{95\%косуб} - m_{косуб} \quad (4.1.7)$$

$$m_{вод.косуб} = 61240 - 11773 = 49463$$

Об'єм води для розбавлення ПСБ:

$$V_{вод.ПБС} = \frac{m_{вод.заг}}{\rho_n} \quad (4.1.8)$$

					ЕКБ.БЕ7106.ДП	Арк.
						57
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$V_{вод.ПБС} = \frac{56700}{1000} = 56,7 \text{ м}^3/\text{добу},$$

Об'єм води для розбавлення косубстрату:

$$V_{вод.косуб} = \frac{m_{вод.косуб}}{\rho_n} \quad (4.1.9)$$

$$V_{вод.косуб} = \frac{49463}{1000} = 49,463 \text{ м}^3/\text{добу}$$

Загальний об'єм сировини для зброджування:

$$V_{заг} = V_{95\%ПБС} + V_{95\%косуб} \quad (4.1.10)$$

Об'єм косубстрату розраховується за формулою :

$$V_{95\%косуб} = \frac{m_{95\%косуб}}{\rho_{95\%косуб}} \quad (4.1.11)$$

Для розрахунку густини пташиного посліду $\rho_{косуб}$ т/м³ скористаємося формулою:

$$\rho_{косуб} = \frac{1000 + 2,4 \cdot (100 - W_{95\%косуб})}{1000} \quad (4.1.12)$$

$$\rho_{косуб} = \frac{1000 + 2,4 \cdot (100 - 95)}{1000} = 1,012 \text{ т/м}^3.$$

Об'єм косубстрату з вологістю 95%:

$$V_{95\%косуб} = \frac{61240}{1012} = 60,51 \text{ м}^3$$

Об'єм ПБС розраховується за формулою :

$$V_{95\%ПБС} = \frac{m_{95\%ПБС}}{\rho_{95\%ПБС}} \quad (4.1.13)$$

де ρ - густина ПБС вологості 95%, 1041кг/м³.

Тоді

$$V_{95\%ПБС} = \frac{340200}{1041} = 326,8 \text{ м}^3$$

Загальний об'єм сировини після розбавлення становить:

$$V_{заг} = 60,51 + 326,8 = 387,3 \text{ м}^3$$

					ЕКБ.БЕ7106.ДП	Арк.
						58
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Тоді загальний об'єм метантенка становить:

$$V_{мет} = \frac{387,3 \cdot 100}{10} = 3873 \text{ м}^3$$

Приймаємо 4 типові метантенк об'ємом 1000 м³ (ТП 902-2-227).

Основні параметри обраного метантенку:

корисний об'єм – 1000 м³;

Висота циліндричної частини – 6,5 м;

Діаметр – 12,5 м;

Висота нижнього конуса – 2,15 м.

Висота верхнього конуса – 1,9 м;

Маса сухої речовини, що зброджується в метантенку становить:

$$m_{cp} = \frac{5 \cdot m_{заг}}{100} \quad (4.1.14)$$

$$m_{cp} = \frac{5 \cdot 3873000}{100} = 193650 \text{ кг}$$

2. Теоретичний добовий вихід біогазу визначається з урахуванням вмісту СОР:

$$V_{\delta} = \frac{m_{COP} \cdot Z}{100 \cdot K \cdot \nu} \quad (4.2.1)$$

Де m_{COP} – маса вихідної сухої органічної речовини, кг;

ν – питома маса біогазу, 1 кг/м³ [66];

Z – ступінь розкладання органічної сировини, 50%;

K – коефіцієнт розчинності біогазу, 1,1-1,5.

Середня частка органічної сировини у суміші, що зброджується, розраховується за формулою:

$$COP = \frac{COP_{ПСБ} + 0,18 \cdot COP_{косуб}}{1 + 0,18} \quad (4.2.2)$$

де $COP_{косуб}$ приймаємо за 75% від СР біомаси косубстрату [35];

$$COP = \frac{0,95 + 0,18 \cdot 0,75}{1 + 0,18} = 0,92,$$

$$V_{\delta} = \frac{(17010 + 3062) \cdot 0,92 \cdot 50}{100 \cdot 1,3 \cdot 1} = 7102,4 \text{ м}^3$$

					ЕКБ.БЕ7106.ДП	Арк.
						59
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Приймаємо 8 газгольдерів об'ємом по 1000 м³(ТП 707-2-5).

3. Кількість теплоти, що втрачається субстратом в процесі тепловіддачі через стінку реактора в навколишнє середовище за годину, Вт:

$$Q_{втр} = k \cdot F \cdot (T_{пр} - T_{серед}) \quad (4.3.1)$$

Де k – коефіцієнт тепловіддачі, приймаємо значення для легкого бетону, 0,5 Вт/м²К;

$T_{серед}$ – температура середовища, °С;

F – площа поверхні теплообміну метантенка, м².

Площа розраховується як сума площ циліндричної частини, нижнього та верхнього конусів за формулою:

$$F = \pi \cdot D \cdot H_k + \pi \cdot R \cdot \sqrt{R^2 + H_n^2} + \pi \cdot R \cdot \sqrt{R^2 + H_g^2} \quad \text{м}^2 \quad (4.3.2)$$

$$F = 3,14 \cdot 12,5 \cdot 6,5 + 3,14 \cdot 12,5 \cdot \sqrt{12,5^2 + 2,15^2} + 3,14 \cdot 12,5 \cdot \sqrt{12,5^2 + 1,9^2} = 513 \text{ м}^2,$$

Отже, втрата теплоти влітку та взимку при $T_{серед} = 10^\circ\text{C}$ (температуру приймаємо як середньорічну на глибині 10 м, оскільки метантенк знаходиться практично повністю під землею):

$$Q_{втр} = 0,5 \cdot 513 \cdot (38 - 10) = 7182 \text{ Вт/год} \quad (4.3.3)$$

$$\text{в МДж} = 25,9$$

4. Визначаємо витрати енергії на підтримку роботи реактора:.

За експериментальними даними витрати енергії на перемішування за допомогою механічних мішалок можна прийняти рівними 30 - 60 Вт / м³ при режимі 5 год. роботи і 7 год. паузи = 810 МДж.

Загальні витрати енергії на підтримку роботи чотирьох реакторів за добу:

$$Q_{заг} = 4(Q_{нід} + Q_{втр} + Q_{мех}) \quad (4.4.1)$$

$$Q_{заг} = 4(847,7 + 25,9 + 810) = 6734 \text{ МДж.}$$

5. Потенційні запаси енергії біогазу, виробленого на добу:

$$Q_{запас} = V_g \cdot C_g \quad (4.5.1)$$

Де C_g – теплотворна здатність біогазу, МДж/м³.

$$Q_{запас} = 7102,4 \cdot 22 = 156253 \text{ МДж,}$$

					ЕКБ.БЕ7106.ДП	Арк.
						60
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вихід твердої та рідкої фракції

6. Маса кеку, що утворюється після проходження збродженої суміші через шнековий сепаратор.

Тверда фракція, отримана в результаті сепарації, зневоднена до 70% вологості.

Маса кеку становить:

$$m_{\text{кек}} = \frac{m_{\text{сп2}} \cdot 30}{100} \cdot 0,97 \quad (4.6.1)$$

де 0,97 – ККД затримання сухої речовини;

$$m_{\text{кек}} = \frac{12969 \cdot 30}{100} \cdot 0,97 = 3774 \text{ кг}$$

Маса сухої речовини суміші після зброджування:

$$m_{\text{сп2}} = m_{\text{сп}} - m_{\text{б}} \quad (4.6.2)$$

$$m_{\text{сп2}} = (17010 + 3062) - 7102,4 = 12969 \text{ кг}$$

Маса біогазу, утвореного в процесу зброджування:

$$m_{\text{б}} = V_{\text{б}} \cdot \rho_{\text{б}} \quad (4.6.3)$$

де густина біогазу $\rho_{\text{б}} = 1 \text{ кг/м}^3$ [66].

$$m_{\text{б}} = 7102,4 \cdot 1 = 7102,4 \text{ кг}$$

Маса фугату:

$$m_{\text{ф}} = m_{\text{заг.с}} - m_{\text{кек}} \quad (4.6.4)$$

$$m_{\text{ф}} = 394337 - 3774 = 390563 \text{ кг}$$

Загальна маса суміші після зброджування:

$$m_{\text{заг.с}} = m_{95\%} - m_{\text{б}} \quad (4.6.5)$$

$$m_{\text{заг.с}} = (340200 + 61240) - 7102,4 = 394337 \text{ кг}$$

Маса сухої речовини, що залишилась у фугаті:

$$m_{\text{сп.ф}} = m_{\text{сп2}} \cdot 0,03 \quad (4.6.6)$$

$$m_{\text{сп.ф}} = 12969 \cdot 0,03 = 389,07 \text{ кг}$$

					ЕКБ.БЕ7106.ДП	Арк.
						61
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вміст СР у фугаті:

$$C_{cp.\phi} = \frac{m_{cp.\phi}}{m_{\phi}} \cdot 100 \quad (4.6.7)$$

$$C_{cp.\phi} = \frac{389,07}{390563} \cdot 100 = 0,1\%$$

7. Визначення об'єму рідких добрив

Фугат упарюють до 1% вмісту сухих речовин, щоб підвищити концентрацію рідких добрив.

Після упарювання маса рідких добрив становитиме:

$$C_{cp.\phi} = \frac{m_{cp.\phi} \cdot 100}{1} = 38907 \text{ кг} \quad (4.7.1)$$

У процесі випарювання утворюється вторинна пара. Маса вторинної пари становить:

$$m_{в.л.2} = m_{\phi} - m_{p\partial} \quad (4.7.2)$$

$$m_{в.л.2} = 387234 - 38907 = 348327 \text{ кг.}$$

					ЕКБ.БЕ7106.ДП	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ДОВКІЛЛЯ

5.1 Загальні вимоги щодо охорони праці та техніки безпеки на підприємстві з виробництва біогазу

Біогазова установка потребує виконання ряду вимог до безпечності її використання. Вимоги, які гарантують безпечну роботу установки:

1) у склад біогазу в результаті роботи біогазової установки (мікробіологічний реактор), включаються два основні компоненти: метан (55-70%), вуглекислий газ CO_2 (26-44%). Метан (CH_4) – безбарвний газ, не розчиняється у воді, задушливий, не має запаху, не отруйний, легкозаймистий і легший ніж повітря. Межі вибухової суміші з киснем або повітрям: 5-15% метану за об'ємом, найбільшу вибухонебезпечну силу має газова суміш з повітрям із вмістом метану 9,4%. Вуглекислий газ (CO_2) безбарвний, стійкий, негорючий, важчий за повітря, зі слабокислим запахом, здатний до реакцій. В залежності від концентрації газ має п'янку, збудливу або задушливу дію. Під час роботи з газами необхідно бути обережним та уважним. Не палити і не користуватися вогнем. Забороняється викид біогазу в робоче приміщення;

2) біореактори належать до вибухонебезпечних споруд з виробничою категорією Е, категорією вибухонебезпечних сумішей газів ПА, категорією вибухонебезпечних зон В1, група вибухонебезпечних сумішей Т1;

3) для проведення експлуатаційних, налагоджувальних та ремонтних робіт працівникам повинно бути не менше 18 років, допускаються тільки і особи, які пройшли медичний огляд та мають спеціальну освіту на право роботи з газовими апаратами і устаткуванням;

4) при обслуговуванні біогазових комплексів необхідно також керуватися Правилами охорони праці у сільськогосподарському виробництві (Затверджені наказом Міністерства соціальної політики України 29.08.2018 № 1240)

					<i>ЕКБ.БЕ7106.ДП</i>		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	<i>РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ДОВКІЛЛЯ</i>		
Розроб.		Захарчук А.П.					
Перевір.		Зубченко Л.С.					
Реценз.							
Н. Контр.							
Затверд.					<i>КПІ ім. Ізгоря Сікарського, ФБТ. БЕ-71</i>		
					Лит.	Арк.	Аркушів
						63	77

Правилами безпеки при експлуатації електроустановок споживачем» (Держенергонагляд, 12.04.69 р.) Правила техніки безпеки експлуатації газових приладів, Правилами безпеки в газовому господарстві (НПАОП 0.00-1.20-98) та іншими нормативними документами з охорони праці;

5) на виробництві біогазу необхідно забезпечити наявність у необхідній кількості ящиків з піском, вогнегасників та інших засобів гасіння пожежі; у приміщенні газового обладнання мають розміщуватися прилади контролю та запобігання накопичення граничнодопустимої концентрації метану;

7) забороняється підключення до газопроводів, реакторів інших виробів захисного заземлення;

8) ширина проходу навколо окремо розташованих виробів установки (реактори, блок-контейнери і т. д.) не повинна бути менше 0,8 м;

9) територія навколо біогазової установки, приміщення щитової, блок-контейнерів повинні бути обладнані освітлювальним обладнанням для роботи в нічний час;

10) усе обладнання потребує планового і профілактичного ремонту відповідно до затверджених планових графіків; необхідно робити записи в експлуатаційній документації, журналах, в яких повинні бути вказані всі порушення, відхилення від нормального режиму експлуатації і роботи по їх усуненню;

11) на виробництві обов'язкова наявність аптечки, баку з питною водою та водопровідного вузлу для надання першої допомоги, промивання рук, очей, рота та ін.

5.2 Охорона довкілля

Післяспиртова барда у своєму нативному вигляді швидко псується, виділяє токсичні речовини та неприємні запахи у навколишнє середовище. Окрім того вона є розсадником небезпечних мікроорганізмів. Також, при розкладанні ПСБ утворюються небезпечні горючі та парникові гази, що

					ЕКБ.БЕ7106.ДП	Арк.
						64
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

створюються пожежо-небезпечні умови та забруднюють атмосферу. Тому використання метанового зброджування для переробки барди запобігає забрудненню довкілля.

У результаті зброджування сировини утворюються біогаз – відновлювальне джерело енергії та зброджена сировина. Далі сировина від зброджування розділяється на шнековому сепараторі на тверду та рідку фракції. Тверда фракція відразу використовується як добрива, а рідка підлягає попередньому упарюванню. Усі відходи, що утворюються на підприємстві переробляються в корисні продукти, тому відсутнє забруднення довкілля органічними речовинами.

Для збільшення енергоефективності вторинна пара від упарювання рідкої фракції поступає на обігрів другого реактора для зброджування сировини. Конденсат гріючої пари від упарювання підігрівається гарячими газами когенераційної установки та поступає на підігрівання першого реактора. Таким чином, завдяки використанню теплоти нагрітих відходів зменшується теплове забруднення довкілля та споживання енергії. Забруднені гази, що утворюються в процесі очищення та спалювання біогазу, вловлюються системою очищення газоподібних відходів.

Тому розроблена технологія анаеробного зброджування післяспиртової барди безпечна для довкілля та енергоефективна.

					<i>ЕКБ.БЕ7106.ДП</i>	Арк.
						65
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

1. На основі огляду літературних джерел встановлено, що післяспиртова барда містить велику кількість органічних речовин, зокрема цукрів (до 5% від СР), що робить її придатною для отримання біогазу шляхом метанового зброджування. Вміст сухих речовин в післяспиртовій барді сягає 5-8 %, її температура 60-70 С, що дозволяє уникнути витрат на підігрівання сировини до температури бродіння перед подачею в реактор.

Охарактеризовано мікроорганізми, що здійснюють процес анаеробного бродіння. Бактерії, що беруть участь в утворенні метану можна поділити на 4 групи: аеробні гідролізні, кислотопродукуючі, воднепродукуючі та метаноутворюючі. На першій стадії, гідролізі, відбувається перетворення органічних сполук на низькомолекулярні з'єднання.

У процесі беруть участь мікроорганізми родів *Eubacterium*, *Clostridium*, *Acetobacterium*, *Bifidobacteria* *Streptococcus*. На другій – ацитогенній – вивільняються ЛЖК, амінокислоти та спирти, утворюється водень та CO_2 . Для розщеплення білків і амінокислот використовують відповідні представники родів *Clostridium*, *Bacteroides*, *Syntrophomonas*, *Acidaminococcus*, *Fusobacterium*; пектини і ксилан - *Clostridium*, *Bacteroides*, *Butirivibrio*, *Prevotella*. Під час ацетогенної стадії відбувається перетворення утворених сполук в оцтову кислоту. Прикладом кислотоутворюючих мікроорганізмів є *Acetobacterium woodii*, *Clostridium thermoaceticum*, *Clostridium aceticum*. Утворення метану відбувається під час метаногенної стадії. Утворення метану відбувається в результаті перетворення оцтової кислоти, а також реакції відновлення вуглекислого газу воднем. У четвертій стадії беруть участь метанові бактерії *Methanobacterium formicicum*, *Methanospirillum hungati*.

					ЕКБ.БЕ7106.ДП			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Висновки	Літ.	Арк.	Аркушів
Розроб.		Захарчук А.П.						
Перевір.		Зубченко Л.С.					66	77
Реценз.						КПІ ім. Ізгоря Сікорського, ФБТ.		
Н. Контр.						БЕ-71		
Затверд.								

2. Обрано та обґрунтовано технологію отримання біогазу з післяспиртової барди з поділом процесу бродіння на 2 стадії у різних реакторах та використанням пташиного посліду як косубстрату у відношенні 0,0415:1 до ПСБ.В першому реакторі відбувається гідроліз, ацидо- та ацетогенез, в другому – метаногенез. Умови в першому реакторі: $\text{pH}=5,5$, $t=55^{\circ}\text{C}$, в другому: $\text{pH}=6,8-8$, $t=38^{\circ}\text{C}$. Обидва реактори працюють в безперервному режимі. Отриманий біогаз надходить до абсорбера з водою, де очищується від домішок до вмісту метану 88% та зневоднюється в системі труб. Потім спалюється у когенераційній установці, утворену енергію та тепло використовують на виробництві. Зброджений субстрат надходить до шнекового сепаратора, у якій поділяється на тверду та рідку фази. Тверда фаза використовується як добриво. Рідка фаза упарюється у випарній установці до вмісту $\text{CP}=1\%$ та використовується як рідке добриво. Утворена вторинна пара використовується для обігріву реактора.
3. Було виконано основні технологічні розрахунки для процесу метанового бродіння та складено матеріальний баланс для добової витрати барди 270 м^3 . Добовий вихід біогазу становить 7102 м^3 .
4. Накреслено технологічну та апаратурну схеми тримання біогазу з ПСБ з використанням як косубстрату пташиного посліду, які включають стадії підготовки субстрату, двостадійне зброджування в анаеробних реакторах, очищення отриманого біогазу та його спалювання в когенераційній установці, обробки збродженого субстрату.
5. Запроектовано реактор для метанового зброджування, що задовольняє вимоги технології, здійснено розрахунки та розроблено креслення. Обрано 4 метантенки об'ємом 1000 м^3 та 8 газгольдерів об'ємом 1000 м^3 .
6. Наведено основні вимоги охорони праці та захисту навколишнього середовища при отриманні біогазу.

Список використаних джерел

1. Технология производства спирта [Электронный ресурс]// ООО «Фогельбуш Биокоммодитиз ГмбХ». VOGELBUSCH.UA.info : [веб-сайт]. – Режим доступа <https://www.vogelbusch-biocommodities.com/technology-ru/alcohol-ru/>. – Назва з екрана.
2. Андросов А.Л. Промышленные технологии переработки послеспиртовой барды. / А.Л. Андросов, И.А. Елизаров, А.А. Третьяков // Вестник ТГТУ. – 2010. – Том 16. – № 4. – С.954-964
3. Голуб, Н. Б. Технологія одержання біогазу з післяспиртової барди./ Н.Б. Голуб, М.В. Потапова // Відновлювана енергетика. – 2018, –№ 53 (2), – С. 70–77.
4. BelyeaR. L. Composition of corn and distillers dried grains with solubles from dry grind ethanol processing. / L. BelyeaR, D. RauschK, E. TumblesonM // Bioresource Technology. – 2004. – №94. –Р. 293–298.
5. Liu K. Rosentrater K. A. Distillers Grains. Production, Properties, and Utilization. / A K Peters/CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton // –FL, USA. – 2012.
6. Eskicioglu C. 2011 Anaerobic digestion of whole stillage from dry-grind corn ethanol plant under mesophilic and thermophilic conditions./ C. Eskicioglu, K. J. Kennedy, J. Marin, B. Strehler.// Bioresource Technology. – 2011. – № 102. – Р. 1079–1086.
7. Agler M. T. Thermophilic anaerobic digestion to increase the net energy balance of corn grain ethanol./ M. T. Agler, M. L. Garcia, E. S. Lee, M. Schlicher, L. T. Angenent.// Environmental Science & Technology. – 2008. – № 42. – Р. 6723–6729

					ЕКБ.БЕ7106.ДП			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Список використаних джерел	Лит.	Арк.	Акрушіл
Розроб.		Захарчук А.П.					68	77
Перевір.		Зубченко Л.С.						
Реценз.						КПІ ім. Ізгоря Сікорського, ФБТ.		
Н. Контр.						БЕ-71		
Затверд.								

8. Дудник А. А. Использование меласной послеспиртовой барды в сельском хозяйстве [Текст] : обзор отечественного и зарубежного опыта. / А. А. Дудник [и др.].// УкрНИИспиртбиопрод. – 1995. – 23 с.
9. Спиртовая барда. Проблемы утилизации [Электронный ресурс]// ООО «Екостар». Ecostar.UA.info: [веб-сайт]. – Режим доступа :<https://www.ecostar.by/index.php/articles.html?id=72:utilizaciya-spirovoy-bardy&catid=1> – Назва з екрана.
10. Технологии переработки послеспиртовой зерновой барды [Электронный ресурс]//ООО «ICK Group». ICK.UA.info : [веб-сайт]. – Режим доступа: <https://ick.ua/engineer/tehnologii-pererabotki-poslespirovoy-zernovoj-bardy/>. – Назва з екрана.
- 11.Хайнц Б.Э. Практическое пособие. Основы планирования. Строительные работы. Типы установок Экономическая обоснованность / Барбара Эдер Хайнц за ред. И.А. Реддих.// – Мюнхен. – 1996. – 268 с.
12. Кооп Ю. Виробництво і використання біогазу в Україні / Ю. Кооп, Ж. Хохі, Дж. Фултон, Х. Персонн.// – Київ: Рада з питань біогазу з.т. – травень 2012. – 74 с.
13. Хоулт Дж. Определитель бактерий Берджи. / Под. ред. Дж. Хоулта, Н. Крига, П. Снита, Дж. Стейли, С. Уильямса // М.: Мир. – 1997. – Том 2. – 368 с.
14. Joan Mata Alvarez Anaerobic digestion of the Barcelona Central faod market organic wostes: Experimental Study./ Mata Alvarez Joan et al. // Bialesaur. Technal. – 1992. – № 1. – Р. 39 – 48.
- 15.Аркадьева З. А. Промышленная микробиология / З. А. Аркадьева, А. М. Безбородов, И. Н. Блохина и др.// под ред. Н. С. Егоров. - М.: Высш. шк. – 1989. – 688 с.
16. Чан Динь Тоай Биогенез метана./ Чан Динь Тоай и др. // Итоги науки и техники. Сер. Биотехнология, М. – 1983.

17. Баркер Н.А. Біологічне метанове ферментування / Н.А. Баркер // К., – 1994. – С. 1-80.
18. Шен М. Компогаз - метод брожения биоотходов / “Метроном”. – № 1-2. – 1994. – с.41.
19. Puzzolo, E. Clean fuels for resource-poor settings: a systematic review of barriers and enablers to adoption and sustained use. / E. Puzzolo, D. Pope, D. Stanistreet, E. A. Rehfuess & N. G. Bruce. // *Environmental Research*. – 2016.– 146. – P. 218–234.
20. Siles J. Integrated ozonation and biomethanization treatments of vinasse derived from ethanol manufacturing. / J. Siles, I. Garcia-Garcia, A. Martin, M. Martin. // *J Hazard Mater*. – 2011. – Vol 188. – Iss.1-3. – P 247-253. DOI: 10.1016 / j.jhazmat. 2011.01.096
21. Lafi W. Combined advanced oxidation and biological treatment processes for the removal of pesticides from aquatic solutions. / W. Lafi, Z. Al-Qodah. // *J Hazard Mater*. – 2006. – №137 (1): – P 489-497. DOI: 10.1016 / 5, jhazmat.2006.02.027
22. Eskicioglu C. Anaerobic digestion of whole stillage from dry-grind com ethanol plant under mesophilic and thermophilic conditions. / C. Eskicioglu, K. Kennedy, J. Marin, B. Strehler. // *Biores Technol*. – 2011. – Vol. 2. – P. 1079-1086. DOI: 10.1016 / .biortech.2010.08.061
23. Kuznetsov I.N. Change in the composition of the distillery spent wash in anaerobic and enzymatic treatment. / I.N. Kuznetsov, N.S. Ruchaj, A.I. Lembovich. // *Pgos BSTU. Ser 4: Chemistry and Technology of Organic Substances and Biotechnology*. – 2011. – Vol. 19 – P. 289-295.
24. Pathe P. Performance evaluation of a full scale effluent treatment plant for distillery spent wash. / P Pathe, N Rao, M Kharwade, S Lakhe, S Kaul. // *Int J Environ Stud*. – 2002. – Vol. 59 (4). – P. 415-438. DOI: 10.1080 / 00207230212743

- 25.Venkatasamy G. Treatment of distillery spent wash in upflow anaerobic contact filter. / G Venkatasamy, S Aruna // Indian J Appl Res. – 2013. – Vol. 3 (7). – P. 199-200.
- 26.Deshmukh HV. Economic feasibility and pollution abatement study of biogas production process utilizing admixture of ipomoea carnea and distillery waste. J Environ Res Develop. – 2012. – Vol. 7 (2). – P. 633-642.
- 27.Shukla Bhalerao VP. Comparative study of biogas production from different food wastes. / VP Shukla Bhalerao, S Tejomyee. // J Environ Res Develop. – 2010. – Vol. 4 (4) . – P. 958-963.
- 28.Babel S. Anaerobic co-digestion of sewage and brewery sludge for biogas production and land applications./ S Babel, J Sae-Tang, A Pechoraply. // Int J Environ Sci Tech. – 2009. – Vol. 6 (1). – P. 131-140. DOI: 10.1007 / BFO3326067
- 29.Mise SR. Treatment of distillery spent wash by anaerobic digestion process. / SR Mise, R Saganadgoudar, R. Lamkhade // Int J Res Eng Technol. – 2013. – Vol. 11. – P. 310-313.
30. Голуб, Н. Б. Вплив співвідношення косубстратів на вихід біогазу при утилізації післяспиртової барди. / Н. Б. Голуб, М. В. Потапова. // Відновлювана енергетика. – 2017. – № 49 (2) . – С. 90–97.
31. Эдер Б. Биогазовые установки. Практическое пособие. / Б. Эдер, Х. Шульц. // Zorg Biogas. – 2011. – 268 с.
- 32.Tinsely J. The Composition and Manurial value of poultry excreta, straw-droppings composts and deep litter: Introduction, experimental materials, method of sampling and analysis. / J.Tinsely, T.Z.Nowakowski // Journal of Science Food Agric. – 1959. – Vol. 10. – P. 145-150
- 33.Хижняк М. І. Спиртова барда як цінна кормова добавка й органічне добриво у сільському господарстві. / М. І. Хижняк, Н. І. Цьонь. // Рибогосподарська наука України. – 2010. – 2. – С. 122–130.

34. Ghaly A. Drying of poultry manure for use as animal feed. / A. Ghaly, K. MacDonald. // American Journal of Agricultural and Biological Sciences. – 2012. – Vol. 7(3) . – P. 239– 254.
35. Біоенергетика : метод. вказівки до виконання курсової роботи для студ. усіх форм навчання та студ.-іноземців за спец. 141 – “Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка”, спеціалізація “Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії” / [уклад.: М.О. Будько] ; НТТУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського». - К. : ФЕА НТТУ «КПІ» . – 2017. – 40 с.
36. Rana R. A review on characterization and bioremediation of pharmaceutical industries' wastewater: an Indian perspective. / R Rana, P Singh, V Kandari, R Singh, R Dobhal, S Gupta. // Appl Water Sci. – 2014. – Vol. 7 (1) . – P. 1-12. DOI: 10.1007 / s13201-014-0225-3
37. Gujer W. Review rapper-anaerobic treatment of wastewater in fixed film reactors. / W Gujer, AJB Zehnder. // Water Sci Technol. – 1983. – Vol. 15. –P. 1- 120. DOI: 10.2166 / wst.1983.0161
38. Mohana S. Distillery spent wash: Treatment technologies and potential applications. / S Mohana, B Acharya, D Madamwar. // J Hazard Mater. – 2009. – Vol. 163 (1). – P. 12-25. DOI: 10.1016 / , jhazmat.2008.06.079
39. Lalov IG. Improvement of biogas production from vinasse via covalently immobilized methano- gens. / IG Lalov, MA Kgrysteva, JL Phelouzat. // Biores Technol. – 2001. – Vol. 79. – Vol. 83-85
40. Perez-Garcia M. Effect of pH infuent conditions in fixed film hectors for anaerobic thermophilic treatment of wine-distillery wastewater. / M. Perez-Garcia, LI. Romero-Garcia, R. Rodriguez-Cano, D. Sales-Marquez. // Water Sci Technol. – 2005. – Vol. 51. – P. 183-189.
41. Van Lier JB. New perspectives in anaerobic digestion./ JB Van Lier, A Tiche, vk Ahring. // Water Sci Technol. – 2001. – Vol. 43. – P. 1-18.
42. Chen H. Dissecting methanogenesis for temperature-phased anaerobic digestion: Impact of temperature on community structure, correlation, and fate of

					ЕКБ.БЕ7106.ДП	Арк.
						72
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- methanogens./ H Chen, S Chang. // Bioresour Technol. – 2020. – Vol. 306. – P. 1-10. DOI: 10.1016/j.biortech.2020.123104. – PMID: 32172088.
43. Ge H. Temperature phased anaerobic digestion increases apparent hydrolysis rate for waste activated sludge. / H. Ge, P.D. Jensen, D.J. Batstone. // Water Res. – 2011. – 45,1597–1606 . – <https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2010.11.042>.
44. Abatzoglou, N. A review of biogas purification processes. Biofuels Bioprod. Biorefin./ N. Abatzoglou, S. Boivin // – 2009 . – Vol. 3. – P. 42–71.
45. Chen Q. Biogas system in rural China: Upgrading from decentralized to centralized. / Q. Chen, T. Liu. // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017. – Vol. 78. – P. 933–944.
46. Fundación Ecología y Desarrollo. Study of Social Entrepreneurship and Innovation Ecosystems in the Latin American Pacific Alliance Countries: Case Study: Sistema Biobolsa, Mexico. IDB-TN-1202. Inter-American Development Bank (IDB). – 2016.
47. Ратушняк Г.С. Інтенсифікація біоконверсії коливальним перемішуванням субстрату / Г.С. Ратушняк, В.В. Джеджула. // Вінниця: УНІВЕРСАМ. – Вінниця. – 2008. – 117 с.
48. Желих В.М. Нетрадиційні джерела енергії: конспект лекцій / В.М. Желих, О.Т. Возняк, Ю.С. Юркевич. // Львів. – 2008.
49. Соуфер С. Биомасса как источник энергии / С.Соуфер, О. Заборски. // пер. С англ. – М.: Мир. – 1985. – 368 с.
50. Кива А.А. Биоэнергетическая оценка и снижение энергоёмкости технологических хозяйствах в животноводстве /А.А. Кива, В.М. Рабштына, В.И. Сотников. // М.: Агропромиздат. – 1990. – 176 с.
51. Ковалев А. А. Перспективы применения сбраживания для переработки навоза / А. А. Ковалев, П. И. Гриднев // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1985. – № 8. -С. 38-39.
52. Курис Ю.В. Преимущества биотехнологий в решении энергетических вопросов / Ю.В. Курис // Труды юбилейной XXX международной научно-

					ЕКБ.БЕ7106.ДП	Арк.
						73
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- технической конференции ‘Запорожсталь ХХХ’. – Запорожье: Запорожсталь. – 2003. – 53-57 с.
53. Веденеев, А.Г. Б.: Руководство по биогазовым технологиям. / А.Г. Веденеев, Т.А. Веденева. // «ДЭМИ» . – 2011. - 84 с.
54. Семененко И. В. Оборудование и процессы метанового сбраживания органических отходов : монография. / И. В. Семененко, М. Г. Зинченко. // Харків: НТУ «ХПИ» . – 2012. – 272 с.
55. Щурська К. О. Біоенергетика : підручник для студ. спеціальності 162 «Біотехнології та біоінженерія». / К. О. Щурська, Є. В. Кузьмінський // Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського. – 2018. – 304 с.
56. Баркер Н.А. Біологічне метанове ферментування / Н.А. Баркер // К. –1994. – С. 1-80.
57. Вінярьська Г. Б. Накопичення селену та його вплив на метаболізм у *Chlorella vulgaris* Beij. в культурі за дії селеніту натрію та йонів металів : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. біол. наук : спец. 03.00.04 «Біохімія» / Г.Б. Вінярьська — Тернопіль. – 2016. — 24 с.
58. Марцинкевич В. Поводження з відходами тваринництва: переваги технології анаеробного зброджування / В. Марцинкевич, Н. Коломієць // К.: НЕЦУ. – 2015. – 20 с.
59. Дубровін В.О. Біопалива (технології, машини і обладнання) / В.О. Дубровін, М.О. Корчемний, І.П. Масло, О. Шептицький, А. Рожковський, З. Пасторек, А. Гжибек, П. Євич, Т. Амон, В.В. Криворучко. // – К.: ЦТІ «Енергетика і електрифікація». – 2004. –137с.
60. Майстренко О. Ю. Розробка математичної моделі процесів розвитку мікроорганізмів в рамках біоенергетики біомаси / О. Ю Майстренко, Ю. В. Куріс, Ю. С. Калінцева // Фаховий журнал “Новини Енергетики”. Київ, – № 2. – 2010. – С. 32–39.
61. Желих В. М. Біогазові технології: теорія і практика : монографія / В. М. Желих, Ю.В. Фурдас // М-во освіти і науки України, Нац. ун-т "Львів

					ЕКБ.БЕ7106.ДП	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		74

політехніка". – Львів : Вид-во Львів. Політехніки. – 2015. – 164 с. : іл. –
Бібліогр.: с. 138-147. – ISBN 978-617-607-838-8.

62. Бонч-Осмоловская Е.А. Образование метана сообществами м/о.// Успехи
микробиологии. – М., 1979. – Т. 14.

63. Schnell R. Aus Hausmuell das Beste machen. Verfahren zur Gewinnung von
Biogas aus Hausmuell. / "Enrsorg. Prax." . –1988. – №3. – Р. 63-67.

64. ВНТП-АПК-02.05, ВНТП-АПК-01.05, ВНТП-АПК-04.05, ВНТП-АПК-09.06.
Системи видалення, обробки, підготовки та використання гною.

65. Дубровін В. Біопалива (технології, машини та обладнання) / В.Дубровін,
М.О. Корчемний, І. Масло та ін. – К.: ЦТІ "Енергетика і електрифікація". –
2006. – 256 с.

66. ГБН В.2.2-35077234-001:2011. Підприємства сортування та перероблення
твердих побутових відходів. Вимоги до технологічного проектування.
[Чинний від 21.02.2011]. К.: Мінжитлокомунгосп України. - 2011. 34 с.

					ЕКБ.БЕ7106.ДП	Арк.
						75
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Додаток А

Таблиця А1 – Специфікація обладнання

Позиція	Позначення	Найменування	Кількість	Маса, кг	Примітки
ПЗ-1	Повітрозабірник	Висота 4,5 м	1		Збірний
Ф-2	КдМ-1000	Волокнистий фільтр попереднього очищення. Ефективність 98%	1		Збірний
К-3	Тп-178-1,6	Компресор. Продуктивність від 2 до 1000 м ³ /год. Стиснення повітря 0,163 МПа. Потужність електродвигуна 360кВт	1		Збірний
Зб-4	Збірник	V=10 м ³	1		Неірж. сталь 12Х18Н10Т
Шн-5	Шнекова дробарка	Продуктивність – 350 кг/год.	1		Неірж. сталь 12Х18Н10Т
Зб-6	Збірник	Обладнаний перемішуючим пристроєм, V= 20 м ³	2		Неірж. сталь 12Х18Н10Т
Н-7, Н-9	Насос	Насос. Пропускна здатність: 100.0 (м ³ /год), Потужність: 18.8 (кВт)	2		Збірний
Зм-8	Змішувач	Обладнаний перемішуючим пристроєм, V= 50 м ³	1		Збірний
Р-10	Реактор	Реактор з механічним перемішуючим пристроєм та виносним теплообмінником. Об'єм 1000 м ³ , надлишковий тиск тиск у апараті не більше 0,5 кПа. Теплоносій – гаряча вода.	2		Збірний
Н-11	Насос	Насос. Пропускна здатність: 100.0 (м ³ /год), Потужність: 18.8 (кВт)	2		Збірний

					<i>ЕКБ.БЕ7106.ДП</i>		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Захарчук А.П.			<i>Додаток А</i>		
Перевір.		Зубченко Л.С.					
Реценз.							
Н. Контр.							
Затверд.							
						Літ.	Арк.
							76
							77
						КПІ ім. Ігоря Сікорського, ФБТ.	
						БЕ-71	

Р-12	Реактор	Метантенк з механічним перемішуючим пристроєм. Об'єм 1000 м ³ , надлишковий тиск у апараті не більше 0,5 кПа. Підтримання температури – гострою парою через паровий інжектор.	4		Збірний
Г-13	Купольний газгольдер низького тиску	Газгольдер. Надлишковий тиск - 5 кПа; номінальний об'єм – 1000 м ³	8		ПВХ, 5 мм
Фу-14	Факельна установка	Установка для спалювання надлишкового газу	1		Збірний
А-15	Абсорбер	Абсорбер для очищення біогазу від CO ₂ , H ₂ S, NH ₃	1		Збірний
Кз-16	Конденсатозбірник	Система труб для виділення води з газу та збірник	1		Збірний
КГ-17	Когенераційна установка	Установка газопоршнева комбінованого циклу потужністю 7,5 кВт·А з коефіцієнтом використання теплоти палива 83% і вище	1		Збірний
Н-18, Н-20	Насос	Насос. Пропускна здатність: 100.0 (м ³ /год), Потужність: 18.8 (кВт)	1		Збірний
Сш-19	Сепаратор шнековий	Сепаратор шнековий. продуктивність 20 м ³ /год, потужність двигуна 5,5 кВт	1		Збірний
В-21	Випарна установка	Випарна установка з примусовою циркуляцією розчину. Швидкість циркуляції рідини по трубах 2-3 м/с, температура у трубному просторі t=120-125°C. Працює під атмосферним тиском. Теплоносій - пара.	2		Збірний
Зб-22	Збірник	V=40 м ³	1		Неірж. сталь 12Х18Н10 Т