

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
Факультет конструювання і дизайну**

УДК 662.75

ПОГОДЖЕНО
Декан факультету конструювання і дизайну

(підпис) Іван РОГОВСЬКИЙ
(ПІБ)

“ ____ ” травня 2026 р.

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри
технічного сервісу та інженерного
менеджменту імені М. П. Момотенка
(назва кафедри)

(підпис) Руслан ШАТРОВ
(ПІБ)

“ ____ ” травня 2026 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему Обґрунтування технології та параметрів обортового реактора для виробництва субстратів з органічної сировини

Спеціальність: 133 «Галузеве машинобудування»

Орієнтація освітньої програми: освітньо-професійна

Гарант освітньої програми:

Доктор технічних наук, професор

(підпис)

Вячеслав ЛОВЕЙКІН

(ПІБ)

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи:

Кандидат технічних наук, доцент

(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Наталія ЦИВЕНКОВА

(ПІБ)

Виконав

(підпис)

Максим БАШИНСЬКИЙ

(ПІБ студента)

КИЇВ – 2026

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
Факультет конструювання і дизайну**

ЗАТВЕРДЖУЮ

**Завідувач кафедри технічного сервісу та
інженерного менеджменту ім. М. П. Момотенка**

К.Т.Н., доцент _____ Руслан ШАТРОВ
(науковий ступінь, вчене звання) (підпис) (ПІБ)
“_____” травня 2026 року

З А В Д А Н Н Я

ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ

Башинському Максиму Володимировичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність: 133 «Галузеве машинобудування»

Освітня програма: «Машини та обладнання сільськогосподарського виробництва»

Орієнтація освітньої програми: освітньо-професійна

Тема магістерської кваліфікаційної роботи: Обґрунтування технології та параметрів
обертового реактора для виробництва субстратів з органічної сировини
затверджена наказом ректора НУБіП України від “16” грудня 2024 р. № 2268 «С»

Термін подання завершеної роботи на кафедру _____ 15 травня 2026 року
(рік, місяць, число)

Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи: науково-технічні джерела у сфері
біоконверсії та переробки органічних матеріалів, відомості про властивості й види вихідної
сировини для отримання субстратів, технічні характеристики та конструктивні особливості
сучасних зразків обертових реакторних установок, фізико-механічні параметри
перероблюваної маси, показники енергетичної та екологічної ефективності обладнання для
приготування поживних субстратів.

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Аналіз сучасного стану технологій переробки біоорганічної сировини та
критичний огляд існуючих конструкцій обертових реакторів.
2. Математичне моделювання гідродинамічних та тепломасообмінних процесів
під час перемішування компонентів у робочій зоні обертового реактора.
3. Експериментальне визначення конструктивно-технологічних параметрів
реакторної установки, оцінка її робочої ефективності та обґрунтування раціональних
режимів виробництва субстратів.

Перелік графічного матеріалу (за потреби): загальний вигляд та технологічна схема
розробленого обертового реактора; креслення складальних одиниць та деталей робочих
органів; графічні залежності й діаграми за результатами експериментів, що ілюструють
інтенсифікацію процесу переробки органічної сировини.

Дата видачі завдання “30” грудня 2025 р.

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи _____ Наталія ЦИВЕНКОВА
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання _____ Максим БАШИНСЬКИЙ

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна магістерська робота на тему: «Обґрунтування технології та параметрів обортового реактора для виробництва субстратів з органічної сировини» за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування» – Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ, 2026.

Дослідження присвячено науковому обґрунтуванню технологічних режимів та конструктивних характеристик обортового реактора, призначеного для переробки біоорганічних матеріалів, що дозволяє інтенсифікувати термомеханічні процеси та стабілізувати якісні показники готових субстратів.

У першому розділі доведено, що головним чинником низької продуктивності традиційного обладнання є недостатня інтенсивність тепломасообміну у гетерогенному середовищі органічної сировини. Це призводить до тривалого циклу обробки та значного питомого споживання енергії. Обґрунтовано, що застосування обортового реактора циліндричного типу забезпечує рівномірне перерозподілу часток біомаси, збільшуючи корисну площу контакту та прискорюючи термохімічну конверсію.

У другому розділі сформульовано наукову концепцію інтенсифікації масообмінних і теплових процесів шляхом перемішування й гравітаційного пересипання компонентів у замкненому об'ємі. Розроблено конструктивно-технологічну схему обортового реактора безперервно-циркуляційної дії, оснащеного внутрішніми лопатевими елементами спеціальної конфігурації. Таке рішення гарантує високу однорідність суміші за мінімальних механічних зусиль на привод установки.

У третьому розділі наведено результати теоретичного моделювання та експериментальних випробувань. Встановлено закономірності між геометрією внутрішніх лопатей обортового барабана та швидкістю протікання робочого процесу. Визначено характер і ступінь впливу частоти обертання реактора на структуру та якість диспергування органічної маси. Доведено, що

раціональний динамічний режим забезпечує суттєве зниження сукупних витрат енергії на підготовку та термообробку субстрату.

На основі комплексного аналізу взаємодії конструктивних та кінематичних факторів визначено оптимальні параметри функціонування установки. Зокрема, оптимізовано геометрію внутрішніх робочих органів та доведено позитивний вплив обертового перемішування на підтримання стабільного температурного режиму (у межах 55–62°C) за рахунок акумуляції теплоти внутрішнього тертя шарів біомаси, що зменшує навантаження на систему зовнішнього підігріву.

Запропонований обертовий реактор забезпечує стабільну високопродуктивну роботу в безперервному режимі, а рівень виходу кондиційного цільового субстрату досягає від 50% до 70%. Втрата 30-50% маси є нормою для такого процесу через випаровування води та виділення вуглекислого газу. Впровадження розроблених параметрів дозволяє скоротити загальний час технологічного циклу та знизити загальну енергоемність виробництва.

Магістерська робота складається зі вступу, 3 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел (50 найменувань) та додатків. Загальний обсяг текстової частини: 85 сторінок пояснювальної записки, 5 таблиць, 11 рисунків.

Ключові слова: органічна сировина, поживний субстрат, обертовий реактор, параметри змішувача, лопатеві елементи, термомеханічна обробка, енергоефективність, інтенсифікація масообміну.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1.....	11
ТЕОРЕТИЧНЕ ПІДГРУНТЯ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ОРГАНІЧНИХ СУБСТРАТІВ.....	11
1.1. Сировинна база виробництва органічних субстратів.....	11
1.2. Технологічні процеси та режими твердофазної ферментації органічних відходів.....	20
1.2.1. Підготовка субстрату та формування реакційного середовища	20
1.2.2. Гідродинаміка та термодинаміка процесу.....	21
1.2.3. Масообмінні закономірності та дифузійні обмеження	25
1.2.4. Апаратне оформлення та режими перемішування	26
1.2.5. Кінетичні аспекти та контроль процесу	26
1.3. Переваги та недоліки аеробного та анаеробного розкладання	30
1.4. Конструктивні особливості реакторів для твердофазної ферментації органічної сировини.....	33
1.5. Аналіз конструктивних параметрів обертових реакторів для виробництва субстратів з органічної сировини	36
1.6. Класифікація та особливості сучасного обладнання для виробництва органічних субстратів.....	40
1.7. Вимоги до органічних субстратів та їх вплив на вибір технології виробництва.....	43
1.8. Висновки до розділу 1	46
РОЗДІЛ 2	49
АНАЛІЗ ТА МОДЕЛЮВАННЯ КОНСТРУКЦІЙ ОБЛАДНАННЯ І ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ АЕРОБНОГО РОЗКЛАДАННЯ БІОСИРОВИНИ	49

2.1. Аналіз технологічного процесу виробництва органічних субстратів в обертовому реакторі	49
2.2. Обґрунтування конструктивних параметрів та елементів робочих органів обертового реактора	52
2.3. Аналіз математичних моделей анаеробного зброджування	55
2.4. Моделювання процесу анаеробного розкладання біосировини в реакторі	56
2.5. Моделювання продуктивності камери ферментації органічної сировини.....	60
2.6. Висновки до розділу 2	62
РОЗДІЛ 3	64
МЕТОДИКА ТА РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТУ	64
3.1. Методика проведення експерименту	64
3.3. Планування та обробка результатів багатофакторного експерименту ..	67
3.3. Обробка результатів експерименту з виробництва поживного субстрату.....	69
3.4. Висновки до розділу 3	74
ВИСНОВКИ.....	76
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	79

ВСТУП

Постійне зростання попиту на екологічно безпечні агротехнології та прогресуюче накопичення органічних відходів рослинницької і тваринницької галузей зумовлюють високий інтерес до розробки ефективних методів їх утилізації з отриманням біологічно цінних субстратів. Модернізація конструкцій переробного обладнання у поєднанні з поглибленням знань про механізми біохімічної та фізико-хімічної трансформації речовин підтверджують необхідність створення інноваційних технологічних рішень. Такі підходи є основою для впровадження принципів сталого сільськогосподарського виробництва та раціонального природокористування.

Разом з тим, сучасний аграрний сектор гостро потребує стабільного постачання високоякісних органічних компонентів, здатних оптимізувати властивості ґрунтового покриву, стимулювати вегетацію рослин і зменшити залежність від мінеральних добрив та пестицидів. Окреслені виклики активізують пошук більш досконалих систем переробки, які дозволяють інтенсифікувати підготовку біосубстратів за умови суворого контролю якісних показників готової продукції. Відповідно, ключовий науковий інтерес зосереджений на технологіях, що гармонійно поєднують високу продуктивність із мінімальними енергетичними витратами та експлуатаційною надійністю обладнання.

Попри суттєві здобутки у цій сфері, низка конструктивно-технологічних та інженерних завдань досі залишається невирішеною. Зокрема, бракує вичерпних даних щодо характеру впливу архітектури реактора та динамічних режимів його роботи на якісні характеристики субстрату. Відсутність цілісного математичного опису та верифікованих експериментальних моделей суттєво ускладнює процеси оптимізації параметрів обладнання, що заважає повною мірою реалізувати його потенційну продуктивність.

Перспективним напрямом розв'язання цієї проблеми є інтеграція у виробничий процес барабанних обертових реакторів. Безперервне

переміщення та динамічний перерозподіл шарів матеріалу всередині робочої камери забезпечують гомогенізацію умов переробки, активізують тепло і масообмінні процеси, а також формують оптимальне середовище для біоконверсії. Результати досліджень вітчизняних та зарубіжних наукових шкіл доводять високу ефективність експлуатації обортових реакторних систем під час утилізації різноманітної за складом органічної сировини.

Технологічний цикл отримання субстратів в обортових реакторах базується на взаємозв'язку складних механічних, гідродинамічних, біологічних та теплових явищ. Результативність цих процесів підпорядкована впливу багатьох чинників, серед яких визначальними є вологість маси, кутова швидкість барабана, ступінь його заповнення та тривалість перебування сировини в зоні обробки. Встановлення раціонального співвідношення зазначених параметрів є базовою умовою для підвищення продуктивності установок без втрати цільових фізико-хімічних властивостей кінцевого продукту.

Практичне впровадження технологій на основі обортових реакторів дозволить оптимізувати поводження з органічними відходами, мінімізувати екологічні ризики, пов'язані з їх неконтрольним накопиченням, і закласти основу для розвитку циркулярної агроекономіки. Готові субстрати є цінною сировиною для виготовлення екологічних добрив, меліорантів, штучних ґрунтосумішей та інших затребуваних у сільському господарстві продуктів. Це забезпечує рентабельність переробки матеріалів, які раніше вважалися виключно відходами.

З огляду на це, науково-технічне обґрунтування технологічних алгоритмів та конструктивних параметрів обортового реактора для переробки органічної сировини є актуальним науково-прикладним завданням, що має вагомое практичне значення для галузі.

Мета магістерської роботи – встановлення раціональних конструктивно-технологічних параметрів барабанного обортового реактора для підвищення ефективності виробничого процесу та забезпечення

гарантовано високих якісних показників цільового субстрату.

Методи дослідження. Для розв'язання поставлених завдань застосовано комплексний підхід, що включає: теоретико-аналітичні методи – для критичного аналізу наукових джерел та окреслення вектору досліджень; математичні методи – з метою моделювання внутрішньореакторних процесів та встановлення функціональних залежностей між робочими параметрами; лабораторно-експериментальні методи – для оцінки реальних показників роботи обладнання та верифікації теоретичних розрахунків; статистичні методи – для математичної обробки масивів експериментальних даних, перевірки відтворюваності результатів та підтвердження адекватності розроблених моделей.

Об'єкт дослідження – процес переробки та отримання субстрату з органічної сировини в умовах функціонування обертового реактора.

Предмет дослідження – конструктивні особливості та технологічні режими роботи барабанного обертового реактора, що визначають загальну ефективність процесу субстратуутворення.

Завдання дослідження:

1. Здійснити системний аналіз існуючих технологічних рішень для отримання субстратів з органічних відходів.
2. Науково обґрунтувати доцільність використання обертового реактора як ефективного інструменту інтенсифікації процесу підготовки субстрату.
3. Побудувати математичну модель, що описує характер механічної взаємодії органічної сировини з робочими органами реактора.
4. Оцінити характер та ступінь впливу конструктивних і режимних параметрів установки на якісні критерії готового субстрату.
5. Виконати комплекс експериментальних досліджень згідно з розробленою матрицею планування експерименту.

6. Перевірити рівень адекватності запропонованої математичної моделі та сформулювати прикладні рекомендації щодо вибору оптимальних параметрів реактора.

Методологічна, теоретична та інформаційна база дослідження: теоретичний фундамент роботи становлять фундаментальні та прикладні праці українських і зарубіжних авторів у сфері утилізації органічних відходів, теорії змішування дисперсних середовищ, біоконверсії, а також проектування та модернізації реакторного обладнання екологічного та агроінженерного спрямування.

Основні положення та результати дослідження пройшли апробацію на науково-практичних конференціях.

РОЗДІЛ 1.

ТЕОРЕТИЧНЕ ПІДГРУНТЯ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ОРГАНІЧНИХ СУБСТРАТІВ

1.1. Сировинна база виробництва органічних субстратів

Формування стабільної та якісної сировинної бази є базовою передумовою організації виробництва органічних субстратів. Вибір вихідних компонентів безпосередньо визначає кінетику ферментаційних процесів, конструктивні особливості необхідного обладнання та агрохімічну цінність кінцевого продукту.

Номенклатура матеріалів, придатних для біоконверсії, охоплює широкий спектр органічних відходів аграрного сектору, переробної промисловості та лісового господарства.

Залежно від хімічного складу та фізичних властивостей, ці матеріали виконують різні функції у формуванні субстрату: одні слугують джерелом енергії для мікробіоценозу, інші забезпечують структурний каркас, треті є донорами біогенних елементів.

У контексті твердофазної ферментації сировину найчастіше класифікують за співвідношенням вуглецю до азоту (C/N), що є ключовим індикатором її біохімічної реактивності.

Для наочного аналізу та порівняння компонентів сировинної бази нижче наведено структуровану таблицю.

Таблиця 1.1.

Характеристика основних груп органічної сировини для виробництва субстратів

Група сировини	Основні представники	Співвідношення C:N	Фізико-хімічні особливості	Роль у процесі ферментації
Високову глецева (структурна)	Солома озимих та ярих зернових,	від 100:1 до 500:1	Багата на лігноцелюлозний комплекс, має низьку	Формує стійкий пористий каркас, запобігає

	стебла кукурудзи, тирса, стружка, подрібнена кора		теплопровідність та високу гігроскопічність	ущільненню маси під власною вагою, виступає акумулятором вологи
Високоаз отиста (активна)	Гній ВРХ, свинячий гній, послід птиці, скошена зелена маса (сидерати)	від 8:1 до 15:1	Висока концентрація вологи, протеїнів, амінокислот та сечовини; висока щільність.	Запускає швидкі екзотермічні реакції, забезпечує миттєву колонізацію бактеріями, є донором біогенних елементів
Специфіч ні побічні продукти АПК	Буряковий жом, пивна дробина, соняшников е та соєве лушпиння, макуха	Варіюєтьс я залежно від партії	Містить легкорозчинні цукри, органічні кислоти, або воски та кутин.	Стимулює стартовий розвиток мікрофлори; лушпиння діє як додатковий розпушувач аераційних каналів

Для інженерного проектування та розрахунку конструктивних параметрів обертового реактора характеристики гетерогенного середовища необхідно розглядати виключно через призму його фізико-механічних та реологічних властивостей.

Насипна щільність вихідної суміші для компонентів на основі соломи чи тирси становить від 60 до 120 кілограмів на метр кубічний, тоді як для вологого гною та посліду цей показник сягає від 700 до 900 кілограмів на метр кубічний. Оптимальна зволожена маса на вході в робочу камеру має середню щільність у межах від 550 до 650 кілограмів на метр кубічний.

Внаслідок біодеструкції, випаровування води та усадки матеріалу щільність шару збільшується до 750 кілограмів на метр кубічний, що суттєво

змінює статичні та динамічні навантаження на опорні елементи установки. Кут природного укосу для органічної суміші вологістю від 55% до 65% становить від 38 до 48 градусів. Цей параметр є визначальним для розрахунку геометрії підйомних лопатей та визначення кута, під яким маса починає осипатися вниз при обертанні барабана.

Високий вміст органічних кислот на початкових етапах розкладу та постійне виділення вологи зумовлюють вибір корозійностійких матеріалів, зокрема сталі марки 08X18H10, для виготовлення внутрішньої стінки робочої камери.

З точки зору машинобудування повільний розклад лігніну означає, що структурний каркас сировини змінює свій опір зсуву нелінійно, створюючи перемінні моменти опору на валу привода протягом усього циклу переробки.

Оскільки пряме вимірювання приросту біомаси всередині твердофазного реактора ускладнене, для інженерного моделювання процесу та розрахунку систем аерації використовують непрямі кінетичні моделі. Швидкість біодеградації органічної речовини, виражена в одиницях за годину, описується модифікованим рівнянням типу Моно з урахуванням лімітування за киснем та температурного фактора Суньє:

$$\mu = \mu_{max} \cdot \left(\frac{CO_2}{K_{O_2} \cdot CO_2} \right) \cdot f(T) \quad (1.1)$$

У цій залежності параметр μ_{max} означає максимальну швидкість деградації субстрату за оптимальних умов, поточна концентрація кисню в міжчастинковому просторі органічної маси позначається як CO_2 , константа насичення киснем рівна K_{O_2} , а безрозмірна функція впливу температури записана як $f(T)$. Температурна функція відображає графік розігріву і математично задається через граничні параметри середовища:

$$f(T) = \frac{T - T_{min}}{T_{opt} - T_{min}} \cdot \exp \left(1 - \frac{T - T_{min}}{T_{opt} - T_{min}} \right) \quad (1.2)$$

Мінімальна температура старту процесу T_{min} приймається рівною 20 градусам Цельсія, а оптимум для термофільної фази T_{opt} становить від 55 до

60 градусів Цельсія. Наведена модель доводить, що для підтримання максимальної швидкості процесу конструкція обертового реактора повинна забезпечувати безперервну подачу повітря для утримання концентрації кисню вище 10% та регулювати частоту перемішування для рівномірного розподілу ендогенної теплоти.

Охолодження за рахунок випаровування вологи вимагає від конструктора точного розрахунку продуктивності вентиляційного обладнання та інтеграції в систему автоматичного керування контуру форсуночного зволоження маси.

Для обґрунтування раціональних геометричних та кінематичних параметрів барабана використовуються базові аналітичні залежності гідродинаміки сипких середовищ. Критична частота обертання барабана в обертах за хвилину, за якої відцентрова сила стає рівною силі тяжіння і матеріал переходить у режим центрифугування, розраховується за формулою:

$$n_{кр} = \frac{30}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{g}{R}} \approx \frac{42.3}{\sqrt{D}} \quad (1.3)$$

Прискорення вільного падіння g рівне 9.81 метра на секунду в квадраті, радіус барабана в метрах позначено як R , а діаметр барабана в метрах — як D . Робоча частота обертання проектного реактора має прийматися в межах від 0.05 до 0.15 від критичного значення, що гарантує стійкий каскадний режим руху матеріалу. Середній час перебування матеріалу в похилому обертовому реакторі в добах, який визначає тривалість технологічного циклу, обчислюється через кут нахилу:

$$\tau = \frac{C \cdot L}{D \cdot n \cdot \sin \alpha} \quad (1.4)$$

Довжина барабана в метрах позначена як L , кут нахилу поздовжньої осі до горизонту в градусах рівний α , а коефіцієнт C враховує конфігурацію внутрішніх лопатей. Ці залежності безпосередньо пов'язують технологічні вимоги із конструктивними параметрами реактора, дозволяючи перейти до аналізу робочих органів.

Матеріали з високим вмістом вуглецю традиційно розглядаються як структурні компоненти. До цієї групи належить солома озимих та ярих зернових культур, стебла кукурудзи, кошики соняшнику, а також відходи деревообробки – тирса, стружка та подрібнена кора.

Основою цих матеріалів є лігноцелюлозний комплекс. Целюлоза та геміцелюлоза під дією мікробних ферментів гідролізуються відносно рівномірно, забезпечуючи гетеротрофні мікроорганізми необхідною енергією. Натомість лігнін, що має складну просторову полімерну структуру, розкладається повільно, переважно за участю специфічних грибів. Саме стійкість лігніну дозволяє рослинним залишкам підтримувати шпаруватість (пористість) маси в реакторі, запобігаючи її надмірному ущільненню під власною вагою.

Деревні відходи вирізняються екстремально високим відношенням C/N , що може перевищувати показники 300:1 або навіть 500:1. Використання тирси хвойних чи листяних порід у чистому вигляді неможливе через гострий дефіцит азоту, який призводить до іммобілізації цього елемента – явища, коли мікроорганізми споживають весь доступний мінеральний азот із середовища для побудови власних клітин.

Крім того, деревна сировина може містити смоли, дубильні речовини та терпени, які проявляють бактерицидні та фунгіцидні властивості, пригнічуючи стартовий розвиток мікрофлори. Водночас тирса є чудовим регулятором вологості завдяки високій гігроскопічності, що робить її доцільною добавкою при переробці надмірно вологих субстратів.

Другу велику групу утворюють матеріали з високим вмістом азоту. Сюди належать різні види гною великої рогатої худоби, свиней, послід сільськогосподарської птиці, а також скошена зелена маса (сидерати, газонні трави). Екскременти тварин багаті на протеїни, амінокислоти та сечовину. Вони характеризуються вузьким співвідношенням C/N (зазвичай від 10:1 до 15:1) та високою концентрацією вологи.

Азотовмісна сировина запускає швидкі екзотермічні реакції, оскільки

легкодоступні поживні речовини миттєво колонізуються бактеріями. Проте надлишок азоту за відсутності достатньої кількості вуглецевого буфера неминуче призводить до втрат цього елемента у вигляді газоподібного аміаку. Це не лише знижує агрохімічну цінність майбутнього субстрату, але й створює токсичне середовище всередині реактора, що може зупинити процес ферментації.

Окрему нішу в сировинному балансі займають побічні продукти агропромислового комплексу та харчової промисловості: жом цукрового буряка, пивна дробина, соняшникове та соєве лушпиння, відходи екстракції соків (макуха яблук, винограду).

Ці компоненти часто мають специфічні фізико-хімічні властивості. Наприклад, плодово-ягідна макуха містить значну кількість легкорозчинних цукрів та органічних кислот. Її потрапляння в ферментаційну суміш викликає різке падіння рівня pH на початкових етапах розкладання. Лушпиння насіння, навпаки, містить воски та кутин, що ускладнює змочування частинок водою і уповільнює первинну атаку мікроорганізмів. Разом з тим, лушпиння є відмінним розпушувачем, здатним підтримувати аерацію навіть у перезволожених сумішах.

Оскільки жоден із наведених матеріалів не є самодостатнім для забезпечення оптимальних умов ферментації, базовим технологічним прийомом стає ко-компостування – цілеспрямоване змішування кількох компонентів. Рецепт суміші розраховується з урахуванням кількох критичних параметрів.

Перш за все, балансується загальне співвідношення вуглецю та азоту, яке для успішного старту процесу має перебувати в діапазоні 25–30 частин вуглецю на 1 частину азоту. Мікроорганізми асимілюють ці елементи саме в такій пропорції: близько третини вуглецю йде на побудову клітинних структур, а дві третини окислюються до вуглекислого газу для отримання енергії.

Другим параметром, що визначає вибір сировини, є вихідна вологість

суміші. Біологічна деградація відбувається виключно у водному середовищі, де розчиняються ферменти та поживні речовини. Якщо вологість опускається нижче критичної межі, клітинні мембрани мікроорганізмів зневоднюються, і біологічна активність припиняється.

З іншого боку, якщо сировина містить надлишок води, вільна рідина заповнює міжчастинковий простір (макропори), витісняючи повітря. Це неминує призводить до зміни мікробного пейзажу з аеробного на анаеробний, що супроводжується виділенням фітотоксичних органічних кислот, метану та сірководню.

Для оптимізації цього показника рідку сировину (наприклад, безпідстилковий гній) змішують із сухими абсорбентами (соломою, половиною), доводячи загальну вологість до технологічного оптимуму, який зазвичай становить 55-65%.

Гранулометричний склад (розмір часток) сировини також вимагає ретельного контролю. Бактерії та гриби працюють виключно на поверхні матеріалу. Відповідно, подрібнення сировини збільшує питому площу контакту мікрофлори з живильним субстратом, прискорюючи біодеградацію. Проте надмірно дрібні частки, особливо у вологому стані, схильні до когезії (злипання). Це формує монолітні блоки, куди не проникає кисень. У практиці виробництва субстратів оптимальним вважається фракційний склад у межах 10–50 мм, що досягається використанням спеціальних шредерів або дробарок перед завантаженням матеріалу в реактор. Для різних типів сировини ступінь подрібнення підбирається індивідуально: жорсткі стебла вимагають інтенсивнішого руйнування волокон порівняно з крихким лушпинням.

Крім базових поживних елементів, якість сировини визначається наявністю домішок та забруднювачів. Органічні відходи сільського господарства можуть містити залишки пестицидів, антибіотиків, важких металів, а також патогенну мікрофлору (сальмонели, кишкову паличку) та життєздатне насіння бур'янів. Хоча термофільна фаза ферментації, за якої температура в реакторі підвищується до 60 – 70°C, здатна інактивувати

більшість біологічних загроз, хімічні контамінанти можуть залишатися стабільними. Цей факт вимагає ретельного санітарно-епідеміологічного та токсикологічного скринінгу вихідних матеріалів. Особлива увага приділяється відходам тваринництва з промислових комплексів, де систематично застосовуються ветеринарні препарати, які можуть інгібувати мікробіологічні процеси розкладання.

Логістичний аспект управління сировинною базою обумовлює економічну рентабельність усього виробництва. Більшість органічних відходів характеризується низькою насипною щільністю та високим вмістом води, що робить їхнє транспортування на великі відстані економічно недоцільним. Відповідно, виробничі потужності доцільно розміщувати безпосередньо в зонах генерації основних обсягів сировини. Крім того, утворення рослинних залишків має яскраво виражений сезонний характер, пов'язаний із циклами збирання врожаю. Це вимагає створення інфраструктури для тимчасового зберігання матеріалів без втрати їхніх якісних характеристик.

Неправильне складування свіжої органіки під відкритим небом призводить до її спонтанного розігріву, гниття, вимивання атмосферними опадами водорозчинних форм азоту та фосфору, що суттєво знижує енергетичний потенціал маси ще до початку цілеспрямованої ферментації.

Здатність системи адаптуватися до змінних параметрів вхідної сировини є показником гнучкості технології. У реальних виробничих умовах точний хімічний склад відходів постійно варіюється залежно від кліматичних умов року, раціонів годівлі тварин чи особливостей агротехніки вирощування культур.

Тому технологічний регламент повинен передбачати алгоритми оперативного коригування рецептур, використання буферних добавок (наприклад, крейди, фосфоритного борошна, цеолітів) для стабілізації кислотності та утримання летких форм азоту.

Комплексне розуміння фізико-хімічних властивостей кожного окремого

компонента дозволяє прогнозувати їхню поведінку в багатокомпонентних сумішах і свідомо керувати процесами біологічної трансформації на всіх етапах виробничого циклу.

Фізико-хімічні характеристики органічної сировини визначають не лише перебіг біологічних процесів, але й умови функціонування технологічного обладнання. Для проєктування обертових реакторів твердофазної ферментації важливими є також фізико-механічні властивості сировини, які впливають на процеси завантаження, транспортування, перемішування та аерації субстрату.

Органічні відходи, що використовуються для виробництва субстратів, являють собою дисперсні багатокомпонентні системи зі змінними характеристиками. Одним із найважливіших параметрів є насипна густина матеріалу, яка залежить від його вологості, ступеня подрібнення та компонентного складу. Зі збільшенням вологості насипна густина, як правило, зростає, що призводить до підвищення навантаження на конструктивні елементи реактора та збільшення енерговитрат на перемішування.

Суттєвий вплив на ефективність роботи реактора має гранулометричний склад сировини. Надмірне подрібнення сприяє ущільненню шару та зменшенню його пористості, що погіршує умови аерації та відведення тепла. Водночас великі частинки знижують площу контакту між мікроорганізмами та субстратом, що негативно впливає на інтенсивність біологічної трансформації. Тому вибір розміру частинок повинен враховувати як технологічні, так і конструктивні особливості обладнання.

Для сипких органічних матеріалів характерними є такі показники, як кут природного укосу та коефіцієнт внутрішнього тертя. Ці параметри визначають характер переміщення маси в обертовому барабані, впливають на умови пересипання матеріалу та інтенсивність його перемішування. Саме від них значною мірою залежить вибір швидкості обертання барабана, ступеня його заповнення та конструкції внутрішніх елементів.

У процесі ферментації фізико-механічні властивості субстрату

змінюються внаслідок біодеструкції органічної речовини, зменшення розмірів частинок та зміни вологості. Це призводить до зміни насипної густини, сипкості та аераційних характеристик матеріалу. Тому під час обґрунтування конструктивних і режимних параметрів обортового реактора необхідно враховувати зміну властивостей субстрату протягом усього циклу переробки, оскільки вони безпосередньо впливають на ефективність перемішування, інтенсивність тепло- та масообміну, а також енерговитрати приводу.

1.2. Технологічні процеси та режими твердофазної ферментації органічних відходів

Технологія твердофазної ферментації органічних відходів базується на культивуванні мікроорганізмів на поверхні та в об'ємі водонерозчинного твердого матеріалу за відсутності вільної рідини. Цей процес імітує природні умови розвитку багатьох сапрофітних мікроорганізмів, зокрема міцеліальних грибів, адаптованих до розкладання складних полімерних комплексів. Органічні відходи сільського господарства, харчової та деревообробної промисловості виступають у таких системах одночасно як джерело поживних речовин і як фізичний каркас для просторового закріплення клітин. На відміну від глибинного культивування, де гетерогенність системи мінімізується шляхом інтенсивного перемішування рідини, твердофазна ферментація є принципово гетерогенним процесом із вираженими градієнтами концентрацій, температур та вологості.

1.2.1. Підготовка субстрату та формування реакційного середовища

Лігноцелюозна природа більшості сільськогосподарських та промислових відходів зумовлює необхідність їхньої ретельної попередньої підготовки перед внесенням інокуляту. Структура клітинної стінки рослин, де целюлозні мікрофібрили оточені геміцелюлозою та інкрустовані лігніном, створює значні стеричні перешкоди для доступу гідролітичних ферментів. Тому технологічний цикл зазвичай розпочинається з механічного подрібнення

сировини. Ця операція має подвійну мету: збільшення питомої площі поверхні для контакту з мікроорганізмами та формування оптимальної гранулометричної структури маси.

Вибір розміру частинок є результатом інженерного компромісу. Занадто дрібна фракція забезпечує максимальну площу поверхні, проте призводить до критичного зниження шпаруватості (пористості) шару. Ущільнення дрібнодисперсного матеріалу блокує міжчастинкові канали, унеможливаючи ефективну дифузію кисню та відведення вуглекислого газу. Натомість надмірно великі частинки формують структуру з високою аеродинамічною проникністю, але суттєво обмежують доступність внутрішнього об'єму субстрату для міцелію, залишаючи значну частину поживних речовин невикористаною. Окрім механічної обробки, залежно від хімічного складу відходів, може застосовуватися термічна, хімічна (наприклад, лужна або кислотна) чи біологічна предобробка. Ці методи спрямовані на часткову делігніфікацію та руйнування кристалічної структури целюлози, що експоненційно підвищує біодоступність вуглецю під час основної стадії ферментації.

1.2.2. Гідродинаміка та термодинаміка процесу

Критичним параметром, що визначає термодинамічну можливість протікання твердофазної ферментації, є вміст вологи, який у таких системах прийнято виражати через показник активності води (a_w). Оскільки процес протікає без вільної гравітаційної рідини, життєдіяльність мікробної популяції залежить від капілярної та поверхнево-зв'язаної вологи. Значення a_w має бути достатнім для підтримання внутрішньоклітинного тургору, забезпечення метаболічних реакцій та дифузії розчинних поживних речовин. Водночас вологість не повинна перевищувати порогове значення, за яким відбувається заповнення міжчастинкових повітряних пор водою. Перезволоження неминуче спричиняє агрегацію частинок, різке падіння коефіцієнта масопередачі кисню та перехід мікрофлори до анаеробного метаболізму, що

супроводжується накопиченням інгібуючих побічних продуктів.

Проблема тепловідведення становить чи не найскладнішу інженерну задачу під час масштабування біореакторів для твердофазної ферментації. Під час експоненційної фази росту мікроорганізмів унаслідок інтенсивного екзотермічного метаболізму виділяється значна кількість біологічного тепла. Тверді органічні субстрати, будучи пористими матеріалами з високим вмістом повітря, характеризуються вкрай низькою теплопровідністю. Це унеможливорює ефективне відведення теплової енергії виключно через стінки реактора (кондуктивний теплообмін). За відсутності належного контролю в товщі субстрату неминуче виникають локальні зони перегріву, де температура швидко досягає значень, які денатурують ферментні системи та викликають загибель культивованих клітин.

Керування температурним режимом у промислових установках зазвичай здійснюється комбінованим шляхом, де головну роль відіграє примусова аерація кондиційованим повітрям. Потік повітря виконує одночасно три функції: забезпечує клітини киснем, відводить метаболічний вуглекислий газ та діє як теплоносіє. Основна частка тепла (часто понад вісімдесят відсотків) відводиться не за рахунок конвективного нагрівання самого повітря, а завдяки прихованій теплоті пароутворення. Вода, що випаровується з поверхні субстрату в потік повітря, поглинає колосальну кількість енергії. Проте такий механізм охолодження створює нову технологічну проблему – поступове висушування субстрату. Тому повітря, що подається в біореактор, попередньо зволожують майже до стану насичення, а процес аерації суворо синхронізують з датчиками температури та вологості всередині шару.

Характер зміни температурного режиму в реакційній зоні обертового барабана є основним критерієм контролю інтенсивності біохімічних перетворень. Графік динаміки зміни температури субстрату за основними фазами твердофазної ферментації представлено на рис. 1.1.

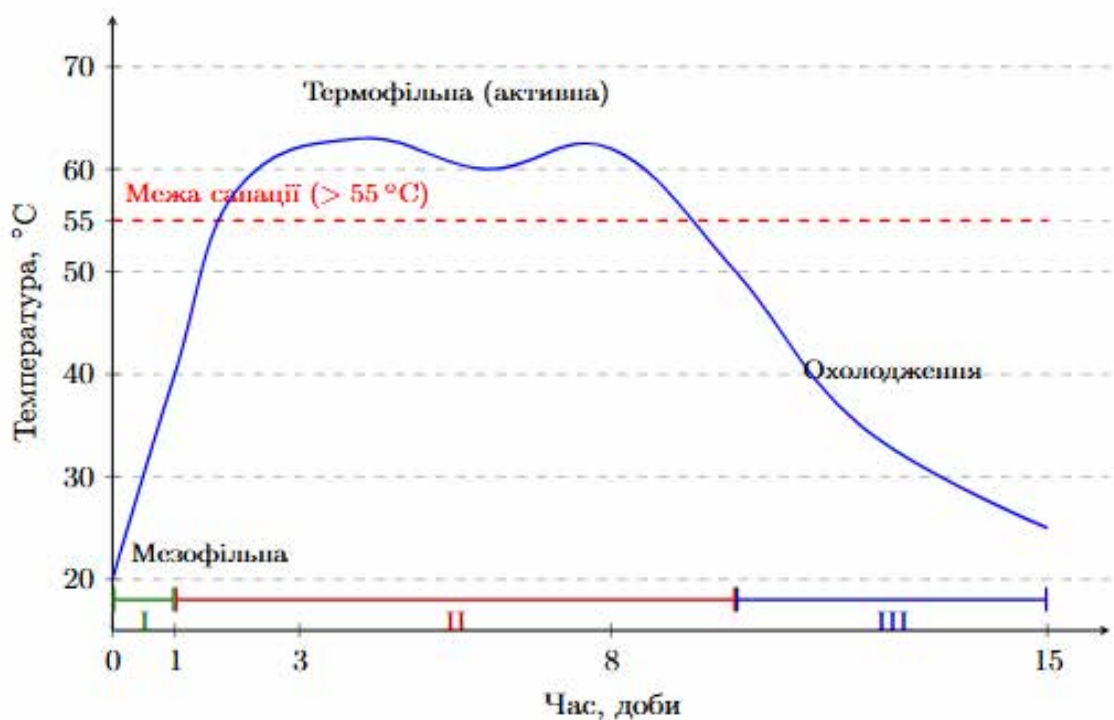


Рисунок 1.1 – Динаміка зміни температури субстрату за фазами твердофазної ферментації: I – мезофільна фаза (розігрів); II – термофільна фаза (активна деструкція та санація біомаси); III – фаза охолодження та дозрівання цільового субстрату

Комплексний порівняльний інженерно-технологічний аналіз процесів аеробного та анаеробного розкладання органічної сировини наведено в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2.

Порівняльний інженерний аналіз аеробного та анаеробного розкладання

Критерій порівняння	Аеробний процес	Анаеробний процес
Термінальний акцептор електронів	Молекулярний кисень (O_2)	Органічні сполуки, CO_2
Температурний режим та санація	Інтенсивне самонагрівання до $55 - 65^\circ C$ за рахунок екзотермічних реакцій;	Вимагає обов'язкового зовнішнього підігріву для підтримки стабільного

	надійна деактивація патогенів, насіння бур'янів та личинок	режиму (мезофільний 35°C або термофільний 55°C)
Основний цільовий продукт	Гуміфікований, біологічно стабільний, твердий органо-мінеральний субстрат (високоякіське добриво)	Енергоносій (біогаз із вмістом метану 55 – 70%) + рідкий або напіврідкий ефлюент (дигестат)
Кінетика процесу	Висока швидкість деструкції (інтенсивна фаза в обертовому реакторі триває від кількох діб до 1–2 тижнів)	Повільний процес розпаду складної органіки (вимагає тривалого перебування сировини в реакторі – від 15 до 30+ діб)
Енергетичний баланс	Енерговитратний процес через необхідність постійної роботи потужних систем аерації та механічних ворошилок	Енергопозитивний процес завдяки можливості когенерації теплової та електричної енергії безпосередньо з біогазу
Основні технологічні ризики	Інтенсивна емісія аміаку (NH_3) при дисбалансі суміші, що вимагає встановлення скрубєрів або біофільтрів	Висока чутливість метаногенів до коливань pH , накопичення летких жирних кислот; ризик повної зупинки процесу
Раціональний тип сировини	Структурні, пористі матеріали з помірною вологістю (соломо-гнійові суміші, тирса, послід із розпушувачем)	Рідкі стоки, чистий гній тваринницьких комплексів без підстилки, надлишковий активний мул очисних споруд

Аналіз температурної кривої (див. рис. 1.1) свідчить, що термофільний

режим (у межах 55 – 65 °C) досягається вже на 2–3 добу процесу за рахунок акумуляції ендогенного тепла. Утримання температури вище межі санації (55 °C) протягом фази II гарантує повну деактивацію патогенної мікрофлори та насіння бур'янів у всьому об'ємі органічної сировини.

Для обґрунтування інженерного рішення щодо вибору саме аеробного режиму ферментації та оцінки його термодинамічних переваг перед альтернативними методами, доцільно провести порівняльний аналіз.

1.2.3. Масообмінні закономірності та дифузійні обмеження

Динаміка масообміну під час твердофазної ферментації охоплює комплекс послідовних етапів перенесення речовини. Транспорт кисню відбувається з основного потоку газу в міжчастинкові простори, далі – крізь тонку плівку рідини на поверхні частинок, і зрештою – безпосередньо до клітинної мембрани. На відміну від рідких середовищ, де лімітуючим фактором зазвичай є розчинність кисню у воді, в системах твердофазної ферментації ключовий опір масопередачі зосереджений у внутрішньочастинковій дифузії та дифузії крізь щільну мікробну біоплівку або шар переплетеного міцелію.

У міру розвитку мікроорганізмів фізико-механічні властивості ферментованої маси зазнають суттєвих змін. Міцеліальні гриби, проростаючи крізь товщу субстрату, зв'язують окремі частинки у суцільний конгломерат. Одночасно відбувається ферментативна деструкція структурних полімерів, що призводить до втрати механічної міцності вихідного каркаса. Сукупність цих факторів викликає поступове осідання та ущільнення шару відходів. Це явище, відоме як усадка субстрату, супроводжується зменшенням об'єму вільних пор, зростанням аеродинамічного опору та підвищенням ризиком утворення каналів (каналоутворенням), коли повітря починає рухатися шляхами найменшого опору, оминаючи щільні зони. Запобігання цьому вимагає точного розрахунку гідродинамічних характеристик реактора та оптимізації режимів подачі газової суміші.

1.2.4. Апаратне оформлення та режими перемішування

Конструктивне виконання біореакторів безпосередньо визначає технологічні режими ферментації та способи втручання в масообмінні процеси. Системи умовно поділяють на статичні та динамічні, залежно від наявності механічного перемішування під час робочого циклу. Статичні ферментери, класичним прикладом яких є кюветні установки, забезпечують нульове напруження зсуву, що є ідеальним середовищем для розвитку тендітних гіфів грибів. Субстрат у таких апаратах розміщується тонким шаром на перфорованих піддонах, що дозволяє уникнути критичного перегріву без механічного руйнування біоплівки. Проте такі системи характеризуються низькою продуктивністю з розрахунку на одиницю об'єму приміщення та вимагають значних площ для розміщення.

Динамічні реактори, такі як барабанні апарати, що обертаються, або ємності з внутрішніми шнековими мішалками, розроблені для інтенсифікації масо- та теплопередачі в значних об'ємах субстрату. Механічне перемішування руйнує температурні градієнти, розбиває агломерати та оновлює поверхню контакту фаз. Водночас застосування таких систем вимагає ретельного підбору швидкості та частоти перемішування. Постійна механічна дія здатна пошкоджувати клітинні структури мікроорганізмів, знижуючи швидкість їхнього росту та секреції ферментів. Крім того, деякі види органічних відходів за високої вологості під впливом механічного тертя схильні до перетворення на пастоподібну масу, що повністю блокує аерацію. Оптимальним технологічним рішенням у багатьох випадках є режим переривчастого перемішування, який активується лише в моменти фіксації критичного перепаду температур у товщі субстрату.

1.2.5. Кінетичні аспекти та контроль процесу

Управління технологічними режимами ускладнюється тим, що твердофазна ферментація є нестационарним процесом. Фази росту

мікроорганізмів – лаг-фаза, експоненціальна та стаціонарна – супроводжуються постійною зміною швидкості споживання кисню, виділення тепла та синтезу метаболітів. Вимірювання базових параметрів, таких як концентрація біомаси, традиційними методами є неможливим через тісне переплетення клітин із частинками нерозчинного субстрату. Відповідно, кінетика процесу зазвичай оцінюється непрямими методами. Аналіз газового складу на виході з реактора дозволяє розрахувати швидкість виділення вуглекислого газу та споживання кисню, що є пропорційними інтенсивності клітинного дихання та приросту біомаси.

Рівень кислотності (pH) середовища також зазнає суттєвих коливань. Біологічна деградація білковмісних відходів часто призводить до виділення аміаку та залужнення середовища, тоді як ферментація вуглеводної сировини зазвичай супроводжується накопиченням органічних кислот. Пряме титрування твердої фази в процесі роботи реактора практично неможливе через відсутність рівномірного розподілу рідини. Тому стабілізація pH досягається на етапі підготовки шляхом внесення твердих буферних солей або використання синергетичних сумішей відходів, де процеси утворення кислот та лугів взаємно компенсуються.

Особливістю барабанних реакторів є те, що інтенсивність перемішування визначається не лише конструкцією апарата, а й закономірностями руху сипкого матеріалу в обертовому циліндричному об'ємі. Під дією сили тяжіння та відцентрових сил частинки субстрату здійснюють складний рух, характер якого залежить від швидкості обертання барабана, ступеня його заповнення та фізико-механічних властивостей матеріалу.

За низьких швидкостей обертання матеріал переважно перекочується по внутрішній поверхні барабана, утворюючи режим перекочування. У цьому випадку забезпечується м'яке перемішування без значного руйнування структури субстрату. Із підвищенням швидкості обертання виникає каскадний режим руху, за якого верхні шари матеріалу відриваються від поверхні та

пересипаються вниз. Такий режим сприяє інтенсифікації тепло- і масообміну та покращує аерацію ферментованої маси.

Подальше збільшення швидкості обертання може призвести до переходу в режим центрифугування, коли частинки утримуються на внутрішній поверхні барабана під дією відцентрових сил. За таких умов ефективність перемішування різко знижується, а процес ферментації погіршується через порушення аерації та нерівномірність температурного поля.

Тому під час проєктування обертових реакторів важливим завданням є вибір такої швидкості обертання, яка забезпечує розвиток режиму перекочування або помірного каскадного руху без переходу до центрифугування. Раціональний режим роботи дозволяє підтримувати рівномірний розподіл вологи, температури та мікроорганізмів у всьому об'ємі субстрату, що позитивно впливає на ефективність технологічного процесу.

Важливим параметром є також ступінь заповнення барабана. Надмірне заповнення обмежує можливість вільного пересипання матеріалу та погіршує аерацію, тоді як недостатнє заповнення призводить до неефективного використання робочого об'єму реактора. Тому вибір коефіцієнта заповнення повинен здійснюватися з урахуванням продуктивності установки, властивостей сировини та необхідної інтенсивності перемішування.

Комплексне узгодження описаних технологічних параметрів – від початкової підготовки сировини до динамічного керування аерацією та тепловідведенням – є фундаментальною умовою ефективності твердофазної ферментації.

Для системного узагальнення взаємозв'язків між фізико-хімічними етапами твердофазної ферментації, їхніми лімітуючими факторами та інженерними методами їх вирішення, основні технологічні параметри зведено в підсумкову таблицю. Комплексний аналіз ключових аспектів процесу наведено в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3.

Фізико-хімічні закономірності та інженерні рішення етапів
твердофазної ферментації

Технологічний етап / аспект	Фізико-хімічна та біологічна сутність	Ключовий лімітуючий чинник (ризик)	Рациональне інженерно-технологічне рішення
Механічна підготовка сировини	Збільшення питомої площі контакту фаз; руйнування лігноцелюлозного каркаса рослинних клітин.	Компроміс пористості: надмірне подрібнення викликає когезію (злипання) часток та блокує дифузію газів.	Забезпечення фракційного складу в межах 10–50 мм; комбінування з хімічною предобробкою для делігніфікації.
Термодинаміка та вологість	Забезпечення клітинного тургору через активність води (a_w); виведення екзотермічного тепла метаболізму.	Локальний перегрів: низька теплопровідність пористого шару призводить до денатурації ферментів у товщі маси.	Охолодження через примусову аерацію насиченим вологою повітрям; використання прихованої теплоти пароутворення.
Масообмін та дифузія	Транспорт O_2 до клітинних мембран та виведення метаболічного CO_2 з міжчастинкового простору.	Усадка субстрату та каналування: міцелій зв'язує частки, викликаючи осідання шару та прорив повітря пустими каналами.	Точний розрахунок аеродинамічного опору шару; регулювання тиску та газового профілю подачі повітряної суміші.
Динаміка перемішування	Руйнування температурних градієнтів, розбивання агломератів, оновлення робочої поверхні.	Механічне руйнування: постійний зсув пошкоджує тендітні гіфи грибів; ризик перетворення вологої маси на пасту.	Впровадження низькошвидкісних обертових барабанів; активація режиму переривчастого перемішування за датчиками температури.
Кінетичний контроль	Моніторинг нестационарних фаз росту мікроорганізмів та метаболічних змін (pH , дихання).	Неможливість прямого вимірювання: біомаса невіддільна від субстрату, а локальне титрування pH є нерепрезентативним.	Непрямий аналіз кінетики за складом відхідних газів (CO_2 / O_2); внесення твердих буферних солей (крейда, цеоліти) на стадії замісу.

Масштабування таких процесів не може спиратися на просте геометричне збільшення об'ємів апаратури, а вимагає глибокого математичного моделювання процесів перенесення тепла і маси. Лише за умови збереження оптимального мікросередовища на рівні окремої частинки субстрату досягається високий ступінь конверсії органічних відходів та стабільний вихід цільових біологічних продуктів.

1.3. Переваги та недоліки аеробного та анаеробного розкладання

Біологічна деструкція органічних відходів реалізується через два фундаментально різні метаболічні шляхи: аеробний та анаеробний. Вибір конкретного методу ферментації визначається фізико-хімічними характеристиками вихідної сировини та кінцевою метою переробки, чи то отримання стабілізованого агрохімічного продукту, чи генерація енергоносіїв. Обидва процеси базуються на використанні мікробних консорціумів, проте відмінності в термінальних акцепторах електронів зумовлюють специфічні термодинамічні та кінетичні закономірності. Ці біохімічні особливості формують технологічні переваги та експлуатаційні обмеження кожної з систем, які необхідно враховувати під час проєктування інженерних об'єктів поводження з відходами.

Аеробне розкладання, класичним прикладом якого є компостування або біосушіння, характеризується використанням молекулярного кисню як кінцевого акцептора електронів. Цей шлях метаболізму забезпечує максимальне вивільнення енергії, закладеної в хімічних зв'язках органічних молекул. Значна частина цієї енергії трансформується в тепло, що зумовлює головну технологічну перевагу процесу – здатність реакційної маси до самонагрівання. Досягнення та підтримання термофільного температурного режиму забезпечує надійну санацію субстрату від патогенної мікрофлори, яєць гельмінтів та насіння бур'янів. Крім того, аеробна деструкція відзначається високою швидкістю протікання реакцій: повний цикл

стабілізації легкорозкладних фракцій може тривати від кількох тижнів до кількох місяців. Кінцевим продуктом виступає гуміфікований матеріал, який має високу агрономічну цінність, покращує структуру ґрунту і може безпосередньо вноситися в агроценози без ризику фітотоксичності.

Інтенсивний окиснювальний метаболізм формує водночас і суттєві недоліки аеробних технологій. Найбільшим інженерним викликом є необхідність безперервного забезпечення мікробної популяції киснем по всьому об'єму субстрату. У промислових масштабах це вимагає значних експлуатаційних витрат електроенергії на роботу потужних вентиляційних систем або залучення спеціалізованого механічного обладнання для регулярного перемішування маси. З точки зору ресурсного потенціалу, аеробний процес є енергозатратним і супроводжується безповоротною втратою значної частини органічного вуглецю у вигляді емісії діоксиду вуглецю. Додатковою складністю є контроль за втратами азоту: під час ферментації субстратів із низьким співвідношенням вуглецю до азоту відбувається інтенсивне виділення аміаку. Це не лише знижує поживну цінність готового компосту, але й створює вагоме екологічне навантаження, змушуючи обладнувати підприємства дорогими системами очищення відпрацьованого повітря (біофільтрами або скруберами).

Анаеробна ферментація (метаногенез) протікає за повної відсутності вільного кисню та є результатом симбіотичної взаємодії складного консорціуму мікроорганізмів, де метаболіти однієї трофічної групи слугують живильним субстратом для іншої. Головна перевага цього методу полягає у збереженні хімічної енергії відходів шляхом біосинтезу біогазу, основним компонентом якого є метан. Така трансформація перетворює очисні споруди із суто екологічних об'єктів на генеруючі енергетичні одиниці. Окрім енергетичної доцільності, анаеробні системи вирізняються високою просторовою компактністю. Процеси протікають у повністю закритих герметичних біореакторах (метантенках), що мінімізує площу промислової забудови та практично унеможливорює неконтрольоване поширення

шкідливих газів і неприємних запахів у навколишнє середовище. Залишкова рідка або напіврідка фракція – дигестат – зберігає абсолютну більшість біогенних елементів вихідної сировини, зокрема азот, фосфор і калій, перетворюючи їх у мінералізовану, легкодоступну для кореневої системи рослин форму.

Незважаючи на високу енергетичну привабливість, анаеробна деструкція має низку жорстких біологічних та інженерних обмежень. Біохімічна кінетика метаногенезу є значно повільнішою порівняно з аеробним окисненням. Це вимагає суттєвого збільшення гідравлічного часу перебування субстрату в реакторі та, як наслідок, значних капітальних витрат на спорудження резервуарів великого об'єму з антикорозійних матеріалів. Крім того, метаногенні археї, які відповідають за фінальну стадію утворення біогазу, є екстремально чутливими до змін параметрів внутрішнього середовища. Коливання рівня кислотності, раптове накопичення летких жирних кислот, присутність іонів важких металів або високі концентрації вільного аміаку здатні спричинити швидке інгібування життєдіяльності мікрофлори та повну зупинку процесу газоутворення. Відновлення стабільної роботи біореактора після таких технологічних збоїв є тривалою і складною процедурою. Слід також зазначити, що дигестат після вивантаження з метантенка рідко є повністю біологічно стабільним продуктом; зазвичай він містить залишкову органіку та потребує подальшої стадії аеробного доочищення перед безпечним використанням у відкритих екосистемах.

Аналіз експлуатаційних характеристик обох напрямків доводить, що вибір оптимальної технології суворо залежить від властивостей вхідного матеріалу. Аеробна ферментація демонструє найвищу ефективність під час обробки структурних, пористих відходів із помірною вологістю, де метою є швидка мінералізація та отримання твердих органічних добрив. Натомість анаеробні технології є безальтернативними для утилізації рідких або пастоподібних субстратів з високим вмістом легкодоступної води та органіки, таких як відходи тваринницьких комплексів чи надлишковий мул

очисних споруд. Для досягнення максимальної екологічної та економічної ефективності в сучасній інженерній практиці дедалі частіше застосовується двоетапна інтеграція цих методів: первинна анаеробна стадія забезпечує вилучення енергетичного потенціалу у формі біогазу, а подальша аеробна обробка дигестату гарантує глибоку стабілізацію та безпеку кінцевого продукту.

1.4. Конструктивні особливості реакторів для твердофазної ферментації органічної сировини

Перебіг процесів твердофазної ферментації значною мірою залежить від умов, у яких знаходиться органічна маса протягом усього циклу переробки. Навіть за однакового складу сировини зміна режимів аерації, інтенсивності перемішування або характеру теплообміну може впливати на швидкість біологічного розкладання та якість кінцевого продукту. Тому під час проєктування технологічних ліній питання вибору реактора розглядають разом із вибором технологічного режиму.

У процесі ферментації всередині шару субстрату одночасно відбуваються мікробіологічні, теплові та масообмінні процеси. Виділення теплоти внаслідок біологічної активності супроводжується споживанням кисню та утворенням газоподібних продуктів розкладання. Якщо тепло або газу відводяться нерівномірно, у товщі матеріалу можуть виникати локальні ділянки з відмінними умовами перебігу процесу. Це ускладнює контроль ферментації та може знижувати ефективність використання об'єму реактора.

Конструкції установок для твердофазної ферментації відрізняються способом утримання та переміщення субстрату. У найпростіших системах матеріал залишається практично нерухомим протягом усього циклу обробки. Такі рішення характеризуються порівняно простою конструкцією та невеликими експлуатаційними витратами, проте зі збільшенням об'єму виникають труднощі із забезпеченням однакових умов у різних частинах

шару. Насамперед це стосується розподілу повітря та температури.

Наявні конструкції реакторів для твердофазної ферментації відрізняються способом організації технологічного процесу, характером переміщення субстрату та рівнем механізації. Залежно від особливостей роботи такі установки доцільно поділяти на статичні та динамічні. Узагальнену класифікацію реакторів, що застосовуються для переробки органічної сировини, наведено на рисунку 1.2.

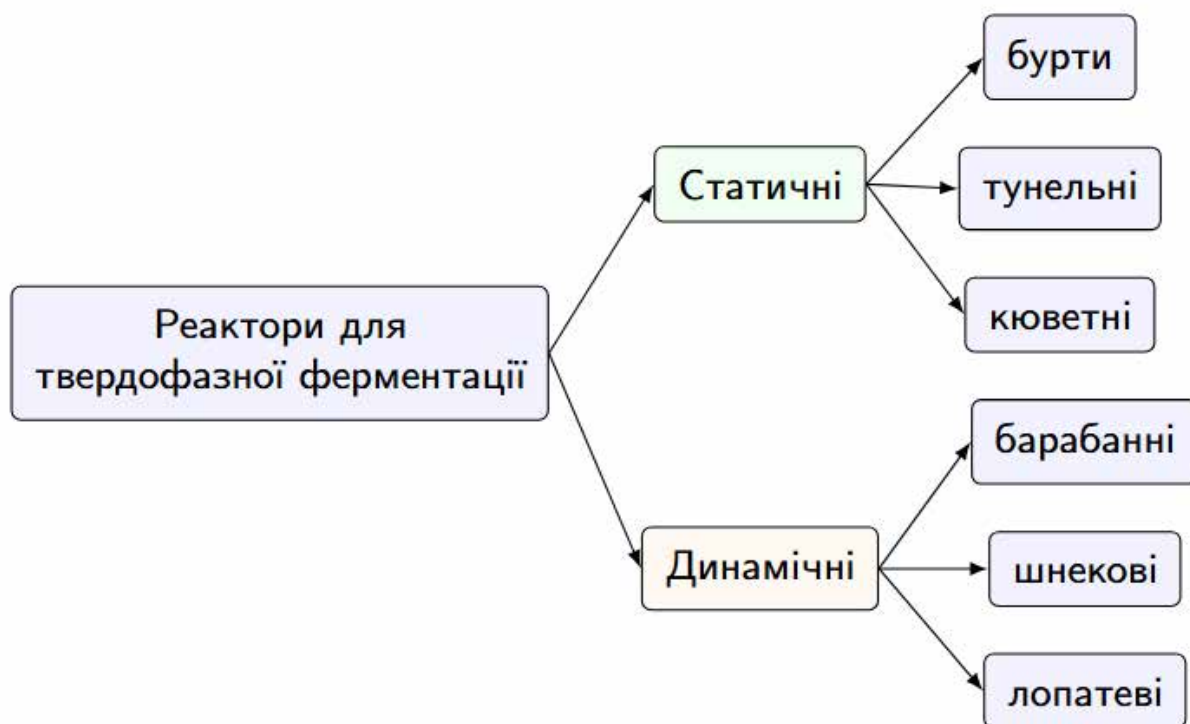


Рисунок 1.2 – Класифікація реакторів для твердофазної ферментації органічної сировини

На рисунку 1.2 наведено узагальнену класифікацію реакторів, що використовуються для твердофазної ферментації органічної сировини. До статичних належать буртові, тунельні та кюветні установки, у яких субстрат протягом більшої частини технологічного циклу залишається нерухомим. Динамічні реактори передбачають механічне переміщення або перемішування матеріалу, що дозволяє інтенсифікувати процеси тепло- та масообміну.

Серед динамічних конструкцій найбільший інтерес для виробництва

субстратів з органічної сировини становлять барабанні реактори. Особливості їхньої будови та вплив основних конструктивних параметрів на перебіг ферментації розглянуто далі.

Для усунення зазначених недоліків застосовують реактори, у яких передбачене механічне перемішування субстрату. Переміщення частинок сприяє вирівнюванню температурного поля, зменшує ймовірність ущільнення матеріалу та покращує доступ повітря до внутрішніх шарів маси. Разом з тим інтенсивність механічного впливу потребує обґрунтування. Надмірне перемішування не завжди призводить до покращення процесу, оскільки може змінювати структуру шару, збільшувати пиловиділення та підвищувати енерговитрати обладнання.

Серед установок, що використовуються для переробки органічної сировини, поширення набули обертові реактори барабанного типу. Їхня робота базується на обертанні циліндричного корпусу, всередині якого відбувається перемішування матеріалу за рахунок багаторазового пересипання частинок під дією сили тяжіння. Такий спосіб переміщення не потребує складних внутрішніх механізмів і забезпечує постійне оновлення поверхні контакту субстрату з повітряним середовищем.

Під час обертання барабана органічна маса переміщується по складній траєкторії, що сприяє більш рівномірному розподілу вологи та температури в робочому об'ємі. Одночасно покращуються умови для газообміну між субстратом і навколишнім середовищем. Саме тому барабанні реактори часто розглядаються як один із можливих варіантів інтенсифікації процесів твердофазної ферментації.

Практичні характеристики таких установок визначаються не лише типом конструкції, а й сукупністю геометричних і режимних параметрів. На умови перебігу процесу впливають розміри барабана, ступінь його заповнення, частота обертання, конфігурація внутрішніх елементів та спосіб подачі повітря. Зміна одного з цих параметрів зазвичай призводить до зміни характеру руху матеріалу, а отже і до зміни умов тепло- та масообміну.

Таким чином, під час розроблення обладнання для твердофазної ферментації необхідно розглядати реактор не лише як ємність для розміщення сировини, а як технічну систему, параметри якої безпосередньо впливають на перебіг технологічного процесу. З цієї причини обґрунтування конструктивних характеристик та режимів роботи обертового реактора є необхідною складовою проєктування установок для виробництва субстратів з органічної сировини.

1.5. Аналіз конструктивних параметрів обертових реакторів для виробництва субстратів з органічної сировини

Обертові барабанні реактори належать до обладнання, в якому технологічний процес безпосередньо залежить від конструктивних параметрів робочого органу. На відміну від статичних систем, де основним фактором є тривалість витримування матеріалу, у барабанних установках вирішальне значення мають умови переміщення та перемішування субстрату всередині робочого об'єму. Саме тому під час проєктування таких реакторів необхідно враховувати взаємозв'язок між геометричними характеристиками обладнання та фізичними процесами, що відбуваються під час ферментації.

У процесі аналізу конструктивних рішень особливу увагу привертають обертові реактори барабанного типу, які забезпечують одночасне перемішування, аерацію та транспортування органічної маси в межах єдиного технологічного циклу. Конструктивна схема такого реактора включає систему завантаження сировини, робочий барабан із внутрішніми лопатевими елементами, вузли подачі повітря та відведення газової суміші, а також механізм приводу обертання, що забезпечує інтенсифікацію тепломасообмінних процесів

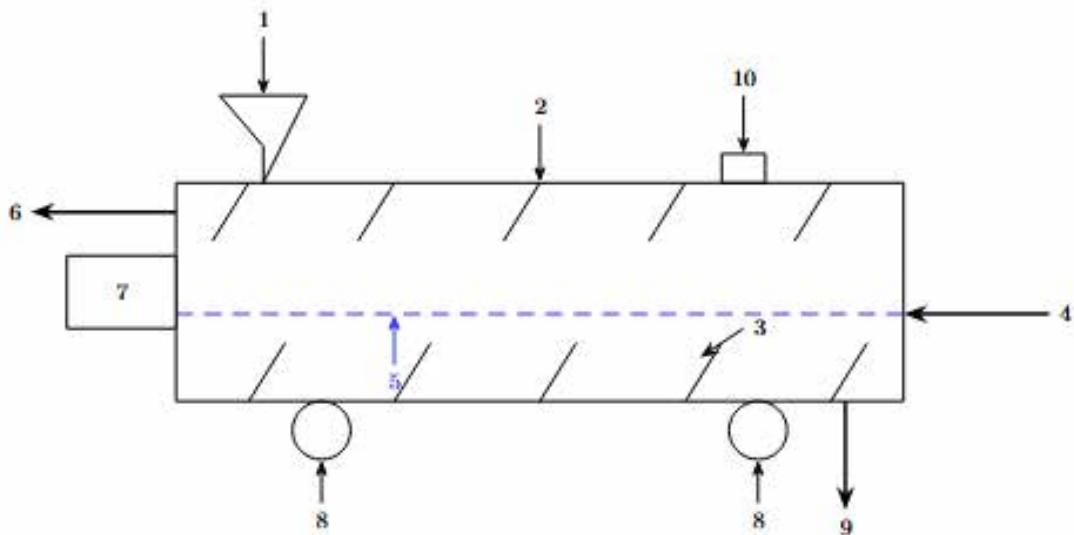


Рисунок 1.3 – Конструктивна схема барабанного біореактора для твердофазної ферментації: 1 – завантажувальний бункер; 2 – корпус барабана; 3 –перемішувальні лопаті; 4 – система подачі повітря; 5 – розподільник повітря; 6 – патрубок відведення газів; 7 – привід обертання; 8 – опорні ролики; 9 – патрубок вивантаження; 10 – контрольно-вимірювальні прилади.

Наведена конструктивна схема демонструє основні функціональні елементи барабанного реактора твердофазної ферментації. Центральним вузлом установки є обертовий барабан, у межах якого здійснюються процеси перемішування, аерації та біологічної трансформації органічної маси. Ефективність роботи реактора визначається не лише його загальною конструкцією, але й раціональним вибором геометричних та режимних параметрів, що забезпечують необхідні умови перебігу ферментаційного процесу.

Одним із основних параметрів є діаметр барабана. Його величина визначає не лише корисний об'єм реактора, а й характер руху частинок під час обертання. Зі збільшенням діаметра змінюється висота підйому матеріалу внутрішніми елементами, а також траєкторія його подальшого пересипання. Від цих процесів залежить інтенсивність перемішування та рівномірність розподілу органічної маси по поперечному перерізу реактора.

Не менш важливим параметром є довжина барабана. Вона впливає на загальний об'єм завантаження та тривалість перебування субстрату в робочій зоні. Зі збільшенням довжини зростає площа контакту матеріалу з внутрішнім середовищем реактора, проте одночасно підвищуються вимоги до жорсткості конструкції та рівномірності приводу. Надмірне збільшення довжини може призводити до нерівномірного розподілу навантажень і ускладнювати забезпечення однакових умов ферментації по всій довжині апарата.

Суттєвий вплив на перебіг процесу має ступінь заповнення барабана. За недостатнього завантаження значна частина внутрішнього об'єму використовується неефективно, а перемішування набуває нестійкого характеру. У разі надмірного заповнення обмежується вільне переміщення частинок, погіршується аерація та зменшується інтенсивність пересипання матеріалу. Тому вибір раціонального ступеня заповнення є одним із важливих завдань під час визначення експлуатаційних параметрів реактора.

Окрему увагу приділяють частоті обертання барабана. Від неї залежить режим руху матеріалу всередині реактора. За низької швидкості обертання субстрат переважно перекочується вздовж внутрішньої поверхні корпусу. Зі збільшенням швидкості посилюється підйом частинок та інтенсивність їх пересипання. Водночас надмірна частота обертання може призводити до притискання матеріалу до стінок під дією відцентрових сил, унаслідок чого ефективність перемішування знижується. Тому режим обертання повинен забезпечувати достатню інтенсивність руху матеріалу без переходу до небажаних режимів роботи.

Для покращення перемішування всередині барабана часто використовуються внутрішні лопаті, ребра або напрямні елементи. Їх призначення полягає у зміні траєкторії руху субстрату та збільшенні кількості пересипань під час одного оберту. Конструкція таких елементів визначає характер переміщення матеріалу та впливає на рівномірність розподілу вологи, температури й повітря в об'ємі реактора. Вибір їх форми та розташування здійснюється з урахуванням фізичних властивостей сировини

та вимог технологічного процесу.

Важливим складником конструкції є система аерації. Під час ферментації мікроорганізми споживають кисень і виділяють тепло, тому реактор повинен забезпечувати умови для безперервного газообміну. Спосіб подачі повітря впливає на температурний режим, вологість субстрату та інтенсивність біологічних процесів. Конструктивне поєднання аерації та механічного перемішування дозволяє підтримувати більш однорідні умови в різних зонах робочого об'єму.

З позицій інженерного проектування найбільший практичний інтерес становлять такі параметри, як діаметр і довжина барабана, коефіцієнт його заповнення, частота обертання та тривалість перебування матеріалу в реакторі. Саме ці величини безпосередньо впливають на продуктивність установки, інтенсивність перемішування, ефективність аерації та енерговитрати приводу. Тому під час обґрунтування конструкції обертового реактора необхідно встановити раціональні значення зазначених параметрів з урахуванням властивостей органічної сировини та вимог технологічного процесу ферментації.

Розглянуті параметри діють не окремо, а як взаємопов'язана система. Зміна геометричних розмірів реактора впливає на характер руху матеріалу, а зміна режиму обертання може змінювати ефективність аерації та перемішування. У зв'язку з цим під час розроблення обертових реакторів доцільно розглядати конструктивні та режимні параметри комплексно, оцінюючи їхній вплив на умови перебігу твердофазної ферментації та якість готового субстрату.

Проведений аналіз свідчить, що ефективність роботи обертового реактора визначається сукупністю конструктивних рішень та режимів експлуатації. Саме тому під час подальшого обґрунтування параметрів установки необхідно враховувати вплив геометрії барабана, ступеня його заповнення, частоти обертання та особливостей внутрішніх робочих елементів на процес ферментації органічної сировини.

1.6. Класифікація та особливості сучасного обладнання для виробництва органічних субстратів

Вибір апаратурного оформлення для ліній виробництва органічних субстратів визначається комплексом фізико-механічних властивостей вихідної сировини, необхідною продуктивністю та обраним біотехнологічним режимом. Інженерна класифікація таких машин базується на їхньому функціональному призначенні в межах технологічного циклу: від первинної підготовки компонентів до фінального фасування готового продукту. Відповідно до агрегатного стану середовища та ступеня ізоляції процесу від доквілля, ферментаційні установки поділяються на системи відкритого, напівзакритого та повністю закритого типу. Кожен із цих класів має специфічні конструктивні рішення, спрямовані на оптимізацію масообміну, забезпечення рівномірного розподілу температур та мінімізацію втрат цільових біогенних елементів.

На етапі попередньої підготовки матеріалу ключовим завданням є досягнення оптимального гранулометричного складу та гомогенізація багатокомпонентних сумішей. Для руйнування структурної цілісності лігноцелюлозних відходів, таких як гілки, солома чи деревні залишки, застосовуються промислові подрібнювачі роторного або молоткового типу. Робочі органи цих агрегатів здійснюють ударно-відцентровий або різальний вплив, зменшуючи розмір частинок до значень, які забезпечують максимальну площу контакту з мікрофлорою без критичного зниження пористості маси. Після подрібнення компоненти подаються у змішувачі – найчастіше шнекові або лопатеві апарати безперервної чи періодичної дії. Їхня геометрія розрахована таким чином, щоб нівелювати градієнти концентрацій вологи, вуглецю та азоту в різних зонах суміші, формуючи фізично однорідну матрицю перед початком біологічної деградації.

Найбільш поширеним рішенням для великотоннажного виробництва

залишаються системи відкритого типу, зокрема технології ферментації у валках (буртах). Основним технологічним обладнанням тут виступають машини-ворошилки, які можуть бути причіпними, агрегованими з тракторами, або самохідними порталними комплексами. Під час проходження вздовж валка фрезерний барабан ворошилки захоплює субстрат, інтенсивно розпушує його, розбиває агломерати та переміщує матеріал від країв до центру і знизу вгору. Така механічна дія відновлює пористість шару, забезпечує скидання надлишкового тепла та збагачує масу киснем. Водночас відкриті системи є вразливими до впливу кліматичних факторів і вимагають значних площ із твердим покриттям, обладнаних дренажними системами для збору та рециркуляції фільтрату.

Перехідною ланкою до індустріальних методів є системи примусової аерації статичних буртів, які часто доповнюються напівпроникними мембранними укриттями. Основою таких комплексів є розгалужена мережа перфорованих труб, прокладених у фундаменті ферментаційного майданчика або безпосередньо під шаром субстрату. Відцентрові вентилятори високого тиску нагнітають повітря крізь товщу матеріалу або працюють у режимі всмоктування. Спеціалізовані полімерні мембрани, якими накривають бурти, виконують подвійну функцію: вони утримують вологу та тепло всередині маси, одночасно створюючи бар'єр для летких сполук. Використання подібних укриттів суттєво знижує залежність процесу від атмосферних опадів та дозволяє зменшити санітарно-захисну зону підприємства.

Закриті біореактори представляють найвищий рівень технологічного контролю над процесом утворення органічних субстратів. Серед них виділяються обертові барабанні ферментери – циліндричні горизонтальні ємності, що повільно обертаються навколо поздовжньої осі. Внутрішня поверхня таких реакторів зазвичай оснащена системою перегородок або шнекових навивок, які забезпечують поступове переміщення матеріалу від завантажувального до вивантажувального люка. Постійне перемішування в комбінації з примусовою подачею кондиційованого повітря підходить для

швидкої початкової стабілізації високоактивних відходів з підвищеною вологістю. Тривалість перебування субстрату в барабанному реакторі зазвичай становить кілька діб, після чого напівготовий продукт направляється на подальше дозрівання у статичних умовах.

Іншим варіантом закритого обладнання є тунельні або боксові реактори, які конструктивно нагадують герметичні залізобетонні камери з активною (перфорованою) підлогою. Завантаження та вивантаження матеріалу здійснюється фронтальними навантажувачами, а весь цикл ферментації проходить у статичному стані без механічного перемішування. Вирішальне значення у тунельних системах має кліматична установка, яка керує рециркуляцією газової фази. Завдяки системі датчиків контролер автоматично регулює співвідношення свіжого та відпрацьованого повітря, підтримуючи задані параметри вологості та температури в різних зонах камери. Це дозволяє здійснювати точне управління кінетикою мікробного росту та мінімізувати втрати аміачного азоту разом із відпрацьованими газами.

Фінальна стадія виробництва передбачає доведення ферментованої маси до товарних кондицій, що вимагає застосування специфічного сортувального та формувального обладнання. Барабанні (tromмельні) або вібраційні гуркоти здійснюють фракціонування матеріалу, відокремлюючи структурно цілісні домішки, каміння, пластик або нерозкладені фрагменти деревини, які можуть бути повернуті на початок технологічного циклу як структурний матеріал. Для отримання субстратів із високою насипною щільністю, зручних для транспортування та механізованого внесення в ґрунт, очищена маса може піддаватися гранулюванню або пелетуванню. Екструдери пресують сировину під високим тиском крізь матриці певного діаметра, водночас локальне підвищення температури під час тертя діє як додатковий фактор пастеризації кінцевого продукту.

Ефективність роботи переліченого обладнання безпосередньо залежить від інтегрованих систем автоматизованого управління технологічними процесами. Промислові лінії оснащуються розподіленими мережами сенсорів,

які в режимі реального часу відстежують динаміку зміни температури, активності води, рівня pH , а також концентрації кисню та вуглекислого газу у відхідних газах. Алгоритми управління, спираючись на отримані масиви даних, коригують роботу виконавчих механізмів – частотних перетворювачів вентиляторів, сервоприводів повітряних заслінок або насосів для зволоження. Перехід від емпіричних методів керування до математичного моделювання режимів безпосередньо в процесі роботи реакторів гарантує стабільність фізико-хімічних характеристик органічних субстратів незалежно від сезонних коливань або варіативності вхідної сировини.

1.7. Вимоги до органічних субстратів та їх вплив на вибір технології виробництва

Кінцеве цільове призначення органічних субстратів формує жорстку матрицю агрохімічних, фізико-механічних та санітарно-епідеміологічних критеріїв, яким повинен відповідати готовий продукт. Проектування технологічних ліній для їхнього виробництва базується на принципі зворотного інжинірингу: вибір методів переробки, апаратурного оформлення та режимів ферментації диктується виключно необхідними характеристиками фінального матеріалу. Залежно від того, чи субстрат використовуватиметься як структурний меліорант для відкритого ґрунту, чи як спеціалізоване середовище для тепличної гідропоніки, інженерні рішення щодо його виготовлення будуть кардинально відрізнятися.

Фундаментальну групу вимог становлять фізико-хімічні показники, серед яких ключовими є рівень кислотності (pH), електропровідність та співвідношення вуглецю до азоту. Для більшості сільськогосподарських культур оптимальний рівень pH знаходиться в нейтральному або слабкокислому діапазоні, тоді як електропровідність, що відображає загальну концентрацію розчинних солей, не повинна перевищувати порогу фітотоксичності. Якщо вхідна сировина характеризується високою

засоленістю (наприклад, певні види тваринницьких відходів), технологія виробництва обов'язково повинна включати стадії змішування з буферними компонентами низької зольності, такими як верховий торф або деревна тирса. Необхідність точного балансування цих показників вимагає інтеграції в технологічну лінію високоточних вагових дозаторів та багатокомпонентних змішувачів, здатних формувати хімічно гомогенну матрицю ще до початку біологічної деградації.

Фізична структура та гідродинамічні властивості субстрату – насипна щільність, вологоємність та аераційна пористість – безпосередньо визначають здатність матеріалу утримувати продуктивну вологу, забезпечуючи при цьому безперешкодний доступ кисню до кореневої системи рослин. Вимоги до гранулометричного складу змушують ретельно підходити до вибору обладнання на етапі попереднього подрібнення та фінального фракціонування. Якщо цільовий продукт призначений для вирощування розсади в дрібних касетах, технологія повинна передбачати використання барабанних або вібраційних гуркотів з мінімальним розміром вічка сита для відділення великих структурних включень. Натомість для субстратів, що використовуються у ландшафтному дизайні або для мульчування, зберігають більшу фракцію, що запобігає вітровій та водній ерозії, а також знижує швидкість мінералізації органічної речовини в природних умовах.

Окремий блок вимог стосується рівня біологічної стабільності та зрілості матеріалу. Внесення в ґрунт нестабілізованої органіки неминуче викликає іммобілізацію ґрунтового азоту мікроорганізмами та локальне зниження концентрації кисню в ризосфері, що пригнічує ріст рослин. Ступінь стабілізації субстрату залежить від тривалості та інтенсивності фази активного розкладання, а також від наявності повноцінної стадії дозрівання. Якщо ринкові умови вимагають швидкого обороту капіталу та мінімізації виробничих площ, вибір робиться на користь закритих інтенсивних біореакторів із примусовим управлінням мікрокліматом, які здатні забезпечити глибоку ферментацію за кілька тижнів. За відсутності жорстких

просторових обмежень економічно виправданим є використання традиційних систем відкритого компостування у валках, де процес гуміфікації може розтягуватися на місяці, але вимагає значно менших капітальних інвестицій в обладнання.

Санітарно-гігієнічні стандарти вимагають повної відсутності в органічних субстратах життєздатних патогенних мікроорганізмів, яєць гельмінтів та насіння смітних рослин. Досягнення цих показників можливе виключно за умови проходження всією масою матеріалу термофільної стадії ферментації, під час якої температура в товщі субстрату стабільно перевищує 55°C протягом кількох діб. Ця вимога кардинально впливає на гідродинамічне моделювання систем аерації та перемішування. У відкритих буртах зовнішні шари матеріалу неминуче охолоджуються, тому технологічний регламент повинен передбачати регулярне механічне ворошіння за допомогою спеціалізованих машин для переміщення периферійних мас у гарячу центральну зону. У тунельних або боксових системах рівномірність прогріву забезпечується точним розрахунком швидкості подачі повітря крізь перфоровану підлогу, що виключає утворення так званих «мертвих» або холодних зон.

Екологічна безпека фінального продукту жорстко лімітує вміст важких металів та синтетичних ксенобіотиків, таких як залишки пластику, скла чи мікропластику. Оскільки біологічні процеси ферментації не здатні зменшити абсолютну кількість важких металів (навпаки, через втрату вуглецю їхня питома концентрація у сухій речовині зростає), дотримання екологічних нормативів забезпечується переважно на етапі селективного збору або вхідного сортування сировини. Якщо вихідним матеріалом слугують змішані муніципальні відходи, технологічна лінія неминуче обтяжується складними комплексами балістичних, магнітних, оптичних та аеродинамічних сепараторів. У разі використання однорідної сільськогосподарської сировини етап вхідного сортування може бути мінімізований або повністю виключений з технологічної схеми.

Таким чином, формування технологічного ланцюга для виробництва органічних субстратів є складною задачею багатокритеріальної оптимізації. Апаратне оформлення, температурні режими, інтенсивність газообміну та тривалість окремих фаз ферментації не можуть обиратися довільно. Вони є прямою похідною від фізико-хімічних, структурних та біологічних параметрів, які необхідно отримати на виході для задоволення конкретних агрономічних чи екологічних потреб. Здатність виробничої лінії гнучко адаптуватися до змінних характеристик вхідної сировини та стабільно видавати продукт із заданим вектором властивостей є головним індикатором ефективності інженерних рішень у сучасній біотехнології утилізації відходів.

1.8. Висновки до розділу 1

Аналіз науково-технічної літератури та виробничої практики дозволяє стверджувати, що ефективність функціонування ліній із виробництва органічних субстратів закладається на етапі проектування їхньої сировинної матриці. Оскільки жоден із поширених видів відходів агропромислового чи лісового комплексу не володіє самодостатніми характеристиками для ізольованої ферментації, базовим технологічним рішенням є ко-компостування. Моделювання багатокомпонентних сумішей вимагає суворого дотримання балансу між лігноцелюлозними матеріалами, що забезпечують пористість та виступають джерелом вуглецю, і вологими азотовмісними екскрементами тварин. Досягнення стартового співвідношення C/N на рівні 25–30 та оптимізація початкової вологості в межах 55-65% є критичними передумовами для запобігання іммобілізації азоту або його втрат у вигляді леткого аміаку.

Дослідження гідродинамічних та термодинамічних закономірностей твердофазної ферментації вказує на специфічний характер масообміну, зумовлений відсутністю вільної гравітаційної рідини. Низька теплопровідність пористого шару органічних відходів створює високі ризики

локального перегріву маси внаслідок екзотермічної активності мікробіоценозу. Доведено, що кондуктивного тепловідведення через конструкційні елементи реакторів недостатньо для стабілізації процесу. Це обумовлює необхідність інтеграції систем примусової аерації кондиційованим повітрям, де основним механізмом скидання надлишкової теплової енергії стає прихована теплота пароутворення. Подальше ущільнення субстрату та явище усадки в процесі деструкції вимагають точного розрахунку аеродинамічного опору шару для запобігання каналутворенню.

Порівняльний аналіз метаболічних шляхів біоконверсії підтверджує, що для отримання твердих профільованих субстратів аеробне розкладання є найбільш доцільним завдяки високій кінетиці процесу та здатності до самонагрівання. Водночас анаеробна технологія залишається раціональним вибором для утилізації рідких стоків із супутньою генерацією енергоносіїв.

Обґрунтовано, що сучасні тенденції індустріалізації галузі зміщують вектор проектування від відкритих валкових систем, залежних від кліматичних чинників, до закритих автоматизованих біореакторів тунельного та барабанного типів. Таке апаратне оформлення дозволяє мінімізувати екологічне навантаження та забезпечує повний контроль за дихальним коефіцієнтом мікрофлори.

Узагальнення вимог до кінцевої продукції показує, що параметри проектування технологічного обладнання перебувають у прямій залежності від сертифікаційних критеріїв субстратів. Необхідність забезпечення повної санітарної безпеки, що передбачає деактивацію патогенів та насіння бур'янів, накладає жорсткі вимоги на системи автоматизованого керування. Інженерні рішення повинні гарантувати утримання термофільного режиму на рівні 55 – 65°C в усьому об'ємі матеріалу, виключаючи появу зон недогріву.

Фінальні характеристики вологоємності, кислотності та фракційного складу субстрату визначають конфігурацію ліній механічної переробки, включаючи шредери, сепаратори та вузли гранулювання. Таким чином, вивчені теоретичні закономірності є фундаментальною основою для

виконання подальших технологічних і конструкторських розрахунків проектного обладнання.

Проведений аналіз технологій твердофазної ферментації та конструкцій сучасного реакторного обладнання свідчить, що найбільш перспективним для виробництва органічних субстратів є обертовий барабанний реактор. Його конструкція забезпечує поєднання ефективної аерації, інтенсивного перемішування та рівномірного розподілу температури і вологості в об'ємі субстрату. Це створює передумови для подальшого аналізу технологічного процесу та обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів реактора у другому розділі.

РОЗДІЛ 2

АНАЛІЗ ТА МОДЕЛЮВАННЯ КОНСТРУКЦІЙ ОБЛАДНАННЯ І ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ АЕРОБНОГО РОЗКЛАДАННЯ БІОСИРОВИНИ

2.1. Аналіз технологічного процесу виробництва органічних субстратів в обертовому реакторі

Інтенсифікація процесу твердофазної ферментації гетерогенної біосировини в обертовому барабанному реакторі базується на принципах регулярного гравітаційного перемішування, організованого газообміну та термодинамічного саморегулювання середовища. Динамічний режим обробки дозволяє мінімізувати дифузійний опір та скоротити тривалість термофільного етапу біоконверсії у 3–4 рази порівняно зі статичними методами.

Ключовим фактором керування процесом у поперечному перерізі робочої камери є забезпечення раціонального трифазного балансу: твердого матричного субстрату, капілярно-зв'язаної вологи та аеруючого газового потоку. Просторова геометрія розподілу цих фаз залежить від ступеня заповнення камери. Кількісно цей показник оцінюється коефіцієнтом заповнення барабана φ (безрозмірна величина), що визначається як відношення площі сегмента, зайнятого сировиною $S_{\text{сер}}$, до повної площі поперечного перерізу внутрішньої камери $S_{\text{бар}}$:

$$\varphi = \frac{S_{\text{сер}}}{S_{\text{бар}}} \quad (2.1)$$

Для аеробних систем промислової біоконверсії нормативне значення коефіцієнта становить $\varphi = 0,50 \dots 0,65$. За такого навантаження у верхній частині реактора формується стійкий вільний простір, необхідний для безперешкодного ламінарного або слаботурбулентного руху повітряного потоку. Характер розподілу фаз та траєкторія руху компонентів наведені на

рисунку 2.1.

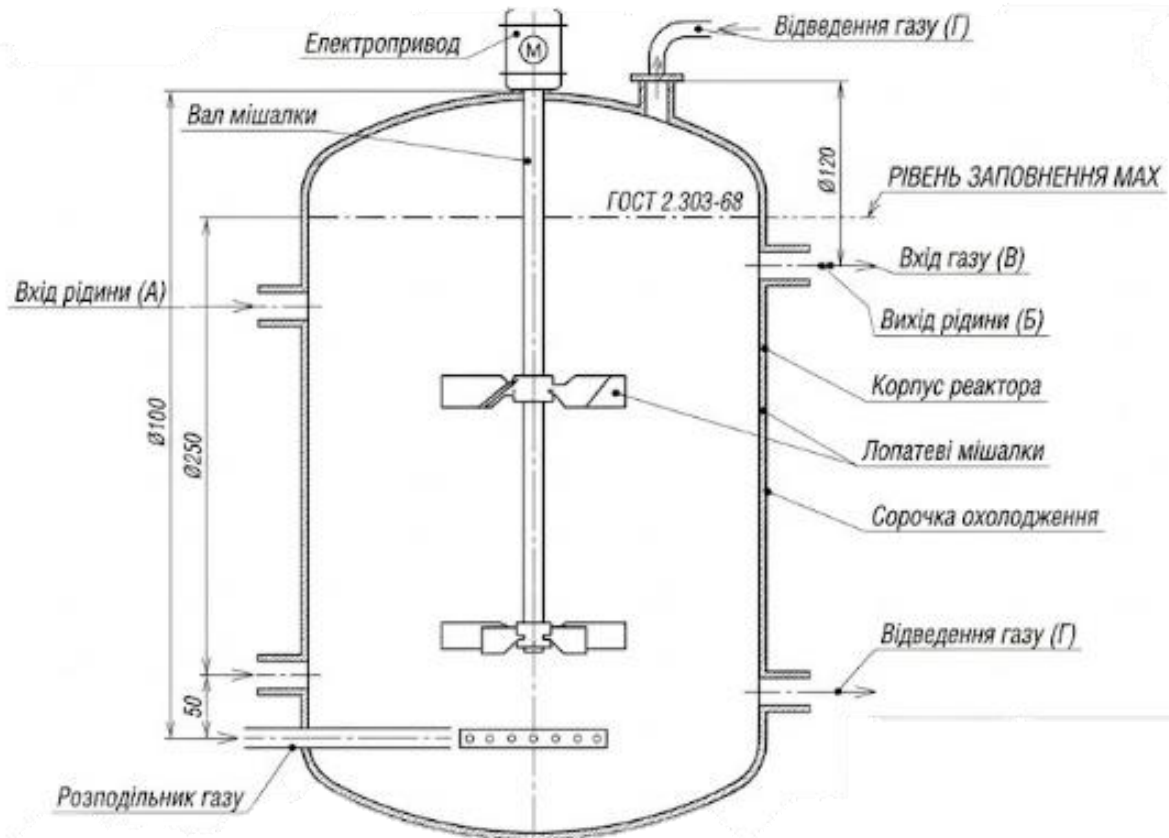


Рисунок 2.1 — Схема розподілу фаз та гідродинаміки потоків у робочій камері реактора

Під час обертання циліндричного корпусу під дією сил міжчастинкового тертя та опорних поверхонь внутрішніх лопатей біомаса піднімається в напрямку обертання на динамічний кут укосу $\alpha_{\text{дин}}$, який залежить від реологічних властивостей суміші та кінематичних параметрів привода:

$$\alpha_{\text{дин}} = \alpha + \arcsin\left(\frac{\omega^2 \cdot R}{g}\right) \quad (2.2)$$

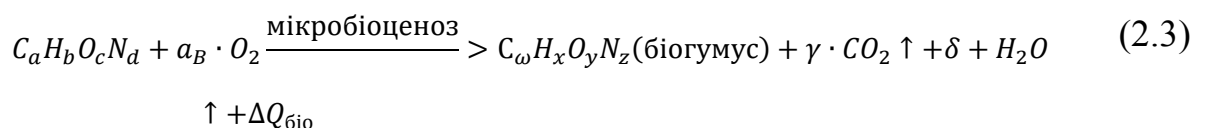
Під час обертання циліндричного корпусу під дією сил міжчастинкового тертя та опорних поверхонь внутрішніх лопатей біомаса піднімається в напрямку обертання на динамічний кут укосу $\alpha_{\text{дин}}$, який залежить від реологічних властивостей суміші та кінематичних параметрів привода, де:

- α – статичний кут природного укосу органічної суміші (для робочої вологості 55 ... 65% становить $38^\circ \dots 48^\circ$;
- ω – кутова швидкість обертання барабана, рад/с;

- R – радіус внутрішньої камери реактора, м;
- g – прискорення вільного падіння (9,81 м/с²).

При досягненні верхньої критичної точки траєкторії підйому сила тяжіння перевищує сили зчеплення, внаслідок чого матеріал переходить у каскадний режим руху. У момент осипання та перекочування частинок відбувається повне руйнування локальних температурних та вологісних градієнтів, усуваються зони концентрування метаболічного вуглекислого газу CO_2 , а питома площа контакту твердої фази з киснем досягає свого максимуму.

Біохімічний інваріант процесу базується на екзотермічній реакції окиснення легкодоступних вуглеводневих та протеїнових фракцій гетеротрофною мікрофлорою. Матеріально-енергетичний баланс цієї трансформації у загальному вигляді описується стехіометричним рівнянням:



де a_B – безрозмірний витратний коефіцієнт кисню, а $\Delta Q_{\text{біо}}$ – питомий тепловий ефект біодеструкції, який становить від 16 ... 20 МДж на кілограм окисненої сухої органічної речовини. Виділення ендогенного тепла забезпечує саморозігрів маси до термофільного рівня (55 ... 65°C) за 24 ... 48 годин, що гарантує деактивацію патогенів згідно з санітарними нормами.

Газодинамічний режим реактора організовано за прямотною схемою (рух повітря та субстрату збігається за напрямком). Подача свіжого кондиційованого повітря у зону завантаження забезпечує максимальний масообмін кисню у точці найвищої кінетичної активності бактерій. Для недопущення переходу процесу в лімітовану стадію, концентрація O_2 у вільній газовій фазі не повинна опускатися нижче критичного порогу 10%.

Оскільки пористий шар біосировини має низький коефіцієнт теплопровідності $\lambda = 0,08 \dots 0,14$ Вт (м · К) кондуктивне тепловідведення крізь металеву стінку є недостатнім для стабілізації температурного поля. Стабілізація термофільного діапазону та захист мікрофлори від перегріву

(вище 70°C) реалізується за рахунок примусової вентиляції, де основним механізмом скидання теплової енергії є поглинання прихованої теплоти пароутворення при випаровуванні капілярної вологи.

Інтенсивне випаровування призводить до супутнього дефіциту вологи. Зниження вологості матеріалу нижче 45% зупиняє ферментативну активність мікроорганізмів. Для стабілізації цього параметра в технологічний контур інтегровано контур форсуночного зволоження. Подача технологічної води або рідких азотовмісних субстратів здійснюється дрібнодисперсним факелом розпилю безпосередньо на пересипний каскад матеріалу через нерухомий центральний колектор, що виключає когезію (злипання) часток та утворення анаеробних конгломератів.

Швидкість поздовжнього просування субстрату вздовж робочої камери визначається кутом нахилу поздовжньої осі барабана $\beta = 1^\circ \dots 3^\circ$ та геометрією гвинтових навивок. Час перебування матеріалу в реакторі становить 2...5 діб, що дозволяє досягти першого ступеня біологічної стабілізації та повної санітарної безпеки продукту перед його вивантаженням на фінальну стадію дозрівання.

2.2. Обґрунтування конструктивних параметрів та елементів робочих органів обертового реактора

Ефективність реалізації каскадного режиму руху, прямооточної аерації та інтенсивного масообміну, проаналізованих у пункті 2.1, безпосередньо залежить від просторової геометрії та конструктивного виконання основних вузлів обертового барабанного реактора. Головним інженерним завданням при обґрунтуванні конструкції є вибір параметрів робочої камери, внутрішніх перемішувальних елементів та систем забезпечення мікроклімату, які забезпечують безперервність процесу при мінімальних питомих витратах енергії на привід.

Основним геометричним критерієм проектування циліндричного

корпуса реактора є співвідношення його довжини L до внутрішнього діаметра D . Для промислових установок твердофазної ферментації органічної сировини раціональний діапазон цього параметра становить:

$$\frac{L}{D} = 3 \dots 5 \quad (2.3)$$

Вибір даного інтервалу обумовлений компромісом між гідродинамічними та конструкційними чинниками. Зменшення співвідношення $\frac{L}{D} < 3$ призводить до звуження зони термофільного контролю та виникнення ризику "проскоку" неферментованої сировини до вивантажувального патрубку. Навпаки, надмірне подовження корпусу ($\frac{L}{D} > 5$) різко збільшує аеродинамічний опір шару біомаси, що вимагає встановлення вентиляційного обладнання підвищеної потужності, а також ускладнює забезпечення жорсткості вала та циліндричної обичайки під дією вагових навантажень.

Для зміни траєкторії руху гетерогенного середовища та забезпечення його гарантованого підйому на динамічний кут укосу, внутрішня поверхня барабана оснащується робочими органами – лопатями (ліфтерами). Для роботи з в'язкою, схильною до адгезії та когезії органічною сировиною (суміші на основі гною, посліду, соломи) класичні суцільні повздовжні лопаті є непридатними через їхнє швидке забивання та утворення застійних зон.

В проектованому реакторі обґрунтовано застосування переривчастих лопатей секційного типу з гвинтовим профілем. Конструктивні параметри лопатевої системи визначаються такими показниками:

- Висота лопаті ($h_{\text{лоп}}$): розраховується відносно внутрішнього діаметра і становить $h_{\text{лоп}} = (0,08 \dots 0,12) \cdot D$, що дозволяє захоплювати нижні шари матеріалу без створення надмірного моменту опору на валу;
- Кут атаки (нахилу) лопаті: становить $10^\circ \dots 15^\circ$ відносно повздовжньої осі, що забезпечує не лише підйом маси, а й її плавне осьове транспортування в напрямку прямого руху;

- Шахове розташування секцій: нівелює пульсації крутного моменту при обертанні барабана.

Організація прямооточного газообміну потребує специфічного конструктивного оформлення вузлів подачі та розподілу повітря. Оскільки корпус реактора обертається, введення нерухомих інженерних комунікацій (трубопроводів аерації та зволоження) реалізується через спеціалізовані торцеві камери (завантажувальну та вивантажувальну), що з'єднуються з барабаном за допомогою лабіринтних або сальникових ущільнень. Подача кондиційованого повітря здійснюється безпосередньо через центральний нерухомий колектор, який виконує роль конструкційної осі симетрії.

Уздовж колектора інтегровано контур форсуночного зволоження. Конструкція форсунок підбирається таким чином, щоб забезпечити дрібнодисперсний факел розпику з середнім діаметром крапель 50...100 мкм. Форсунки орієнтують під кутом 45° до вертикалі в бік осипання каскаду матеріалу, що гарантує миттєву абсорбцію вологи пористою матрицею субстрату без зволоження внутрішніх стінок корпусу.

Через високу хімічну агресивність середовища – постійне виділення аміаку NH_3 , сірководню (H_2S) та насиченої водяної пари при температурах до $65^\circ C$ – до матеріалів внутрішніх елементів висувуються підвищені вимоги щодо корозійної стійкості. Внутрішня обичайка робочої камери та перемішувальні лопаті мають бути виготовлені з високолегованої корозійностійкої сталі марки 08X18H10 (або її міжнародного аналога AISI 304).

З позицій машинобудування, кінематична схема привода повинна розраховуватися на роботу в умовах постійних знакозмінних навантажень, викликаних нерівномірним зміщенням центра важкості сипкого матеріалу при пересипанні. Для забезпечення гнучкості технологічного процесу та можливості оперативного регулювання часу перебування суміші в реакторі, привід обертання обов'язково комплектується частотним перетворювачем (інвертором). Це дозволяє безступінчасто варіювати робочу частоту обертання

барабана в межах $n = 0,1 \dots 1,5$ об/хв залежно від поточної щільності та реологічних характеристик завантаженої партії органічного субстрату.

2.3. Аналіз математичних моделей анаеробного зброджування

Теоретичні засади біоконверсії органічних відходів за умов відсутності кисню детально висвітлені у фундаментальних наукових працях. Попри тривалу практику експлуатації таких систем, єдиного універсального математичного апарату, здатного адекватно прогнозувати перебіг біохімічних перетворень за одночасного коливання комплексу вхідних чинників, досі не створено.

Описані в літературі кінетичні моделі здебільшого зосереджені на фіксації динаміки зниження концентрації вихідного субстрату та швидкості накопичення продуктів метаболізму, зокрема біогазу й ефлюенту. У більшості досліджень ключову увагу приділено базовим рівнянням, які непогано описують загальні мікробіологічні закономірності за принципом «вхід-вихід», проте залишають поза увагою проміжні фази деструкції речовини. Вони не дають змоги з достатньою точністю розрахувати кількісні показники виходу біогазу та добрив, а їх практичне застосування суттєво обмежується через брак надійних інструментальних методів оцінювання поточної маси активного мулу безпосередньо всередині реактора.

Для компенсації дестабілізуювальних чинників, таких як накопичення важких металів чи надлишок лужних сполук, що пригнічують життєдіяльність мікрофлори, вчені базово вводять у кінетичні рівняння коефіцієнт інгібування. На противагу суто теоретичним підходам, існують моделі, адаптовані для прикладних інженерних розрахунків.

Однак вони мають суттєвий технологічний недолік, оскільки вимагають попереднього лабораторного визначення унікальних кінетичних параметрів для кожної нової партії біосировини хімічним шляхом, що є занадто трудомістким процесом для промислових умов.

Окремі математичні залежності мають вузьку спеціалізацію та розроблялися виключно для моделювання очищення рідких стічних вод. Через це їх неможливо коректно екстраполювати на процеси зброджування високовологих або твердофазних субстратів.

Так само обмежену область застосування мають і моделі, орієнтовані на мезофільні умови роботи обладнання. Прогнозування психрофільного режиму за їх допомогою призводить до значних похибок, що підтверджує необхідність пошуку та обґрунтування нових аналітичних рішень, адаптованих до низькотемпературного зброджування в рухомому середовищі.

2.4. Моделювання процесу анаеробного розкладання біосировини в реакторі

Особливості біохімічних перетворень у середовищі обертового реактора дають змогу формалізувати внутрішні зв'язки системи з урахуванням реологічних властивостей вихідного гною, конструктивно-кінематичних параметрів барабана та їхнього підсумкового впливу на якість добрив і обсяги генерації метану.

Біоенергетична установка в такому контексті функціонує як динамічна система, що постійно зазнає впливу збурювальних чинників навколишнього середовища та коливань параметрів сировини (вологості, дисперсності, концентрації органіки).

Усю сукупність параметрів системи доцільно розділити на вхідні та вихідні. Вхідні показники, своєю чергою, формуються із зовнішніх кліматичних умов та внутрішніх чинників, куди відносяться геометричні розміри реактора, фізико-хімічний стан біомаси та кінетика мікробіологічного синтезу.

Реакцію анаеробного середовища на зовнішні імпульси можна представити у вигляді математичного оператора системи C , який визначає алгоритм трансформації вхідних впливів у вихідні показники ефективності.

Структура цього оператора тісно пов'язана не лише з механічною будовою обертового барабана, а й з динамічною зміною внутрішніх параметрів, що дозволяє записати модель за схемою «вхід-вихід» у вигляді операторної форми:

(2.4)

$$Y = C(Z) \cdot X$$

де X відображає вектор вхідних зовнішніх чинників, Y – вектор вихідних характеристик, а Z – стан внутрішнього середовища установки (рис. 2.2, рис. 2.3).



Рис. 2.2. Структурна модель функціонування реактора анаеробного розкладання біосировини

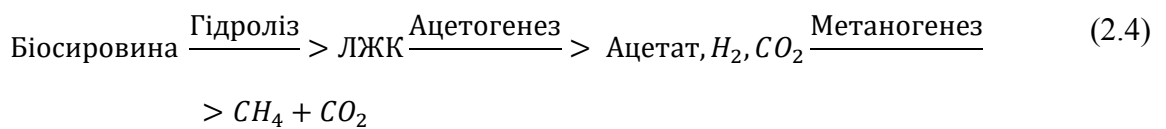


Рис. 2.3. Загальна модель реактора за принципом «вхід-вихід»

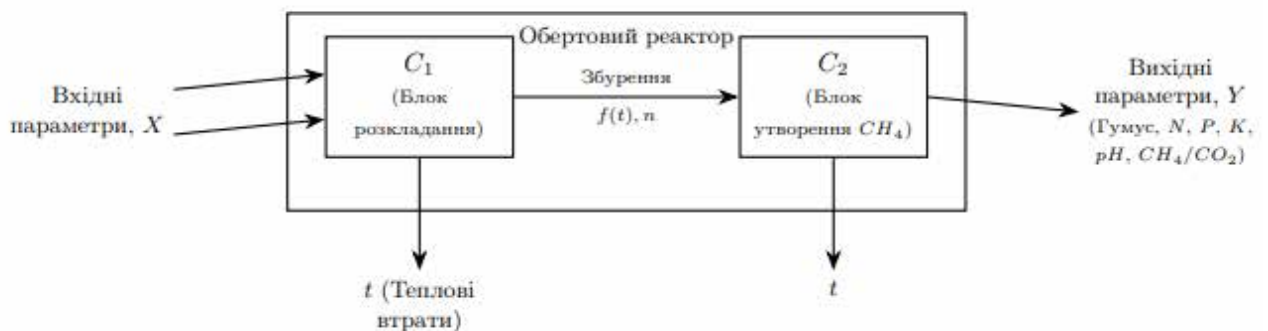
При аналізі енергетичного балансу деструкції біомаси встановлено, що лише 9% вивільненої енергії витрачається на біосинтез клітин мікроорганізмів, близько 4% розсіюється у вигляді теплових втрат, тоді як решта 87% акумулюється в хімічних зв'язках утвореного метану. Повільний приріст популяції метаногенів вимагає високої концентрації органічної речовини в робочій зоні.

Сам процес розпаду є багатостадійним і послідовно забезпечується чотирма основними групами мікроорганізмів: гідролітичними, зброджувальними, ацетогенними та метаногенними. Тісний трофічний зв'язок між ними полягає в тому, що життєдіяльність метаногенів повністю залежить від продуктів метаболізму первинних анаеробів.

Будь-яке пригнічення або недостатня чисельність метанових архей зупиняє конверсію на етапі утворення кислот. Це викликає лавиноподібне накопичення оцтової, масляної та пропіонової кислот, різке падіння рівня pH і, як наслідок, повну зупинку ферментації:



Розроблення динамічної моделі обертового реактора базується на припущенні, що завдяки постійному або періодичному перемішуванню внаслідок обертання робочої камери, температура, вологість та концентрація речовини є рівномірно розподіленими по всьому об'єму, а параметри зовнішнього середовища залишаються стабільними. Відповідно до схеми потоків, наведеної на рис. 2.4, динаміку стану речовини в реакторі під дією оператора розкладання C_1 та оператора метаногенезу C_2 під впливом частоти обертання n і збурення $f(t)$ можна описати системою диференціальних рівнянь:



$$\begin{cases} \frac{dB}{dt} = \mu \cdot B - n_c \cdot C \cdot V_m \\ \frac{dC}{dt} = n_c \cdot C - n_m \cdot M - V \\ \frac{dM}{dt} = n_m \cdot M + V - V_m \end{cases} \quad (2.5)$$

Рис. 2.4. Схема потоків динамічної моделі анаеробного розкладання біосировини в обертовому реакторі:

C_1 – оператор блока анаеробного розкладання сировини; C_2 – оператор блока метаногенезу;

$x_1, x_2, \dots, x_z$ – вхідні параметри (склад, температура, структура субстрату);

n – питома швидкість перемішування (частота обертання барабана); t – теплові втрати;

$y_1, y_2, \dots, y_z$ – вихідні параметри (вміст гумінових речовин, N, P, K, pH , компонентний склад біогазу);

$f(t)$ – збурювальні впливи керуючого характеру (інтенсивність нагрівання, режим обертання тощо).

У цій системі змінні B, C та M відповідають поточним концентраціям вихідної біосировини, проміжного субстрату та накопиченого продукту метаболізму відповідно (кг/т). Часовий інтервал процесу позначається як t , а динаміка біомаси визначається питомою швидкістю росту мікроорганізмів μ та швидкостями розкладання субстрату n_c, n_m . Параметри V та V_m характеризують чисту швидкість хімічних реакцій, тоді як функція V_m відображає інтенсивність міжфазного масообміну під час механічного руху барабана. Всі кінетичні коефіцієнти є функціями початкового складу сировини та поточних технологічних параметрів, які піддаються регулюванню. Керування процесом здійснюється шляхом оптимізації термостабілізації, зміни вологості завантаження, стимулювання росту метаногенів та коригування частоти обертання реактора. При цьому, якщо температурний

фактор є умовно сталим, то концентрація активної речовини та питома швидкість метаболізму виступають головними важелями інтенсифікації процесу, хоча вони й зазнають впливу випадкових зовнішніх збурень.

2.5. Моделювання продуктивності камери ферментації органічної сировини

Конверсія біомаси в метан та гумусові добрива всередині спеціалізованих камер ферментації визначається комплексом факторів різного ступеня значущості. Серед обов'язкових умов стабільного перебігу процесу слід виділити наявність вільної вологи, відсутність світлового випромінювання, строгу анаеробність середовища, стійкий біоценоз мікроорганізмів та жорсткий температурний контроль на кожній фазі. Критерієм ефективності виконання всіх технологічних операцій – від підготовки субстрату та його завантаження до очищення газу й вивантаження компосту – є досягнення максимального виходу цільових продуктів за мінімальної енергоємності обладнання.

Математичне вираження загальної продуктивності камери розглядається як адитивна функція двох складників: продуктивності за твердим добривом ($f_{\text{п. комп}}$) та за газоподібним енергоносієм ($f_{\text{п. біогаз}}$):

$$f_{\text{п}} = f_{\text{п. комп}} + f_{\text{п. біогаз}} \quad (2.6)$$

Деталізований запис цих функцій враховує вартісні показники продукції, базові та додаткові витрати, а також коефіцієнти зниження виходу через потенційне порушення параметрів якості:

$$\begin{aligned} f_{\text{п. комп}} &= (V_{\text{комп}} \cdot \Pi_{\text{комп}} + i = \sum_{i=1}^k \Delta V_{\text{комп} \cdot i} \cdot \Pi_{\text{комп}}) - (W_0 + i = \sum_{i=1}^k \Delta W_i) \cdot j \\ &= \prod_{j=1}^m (1 - \alpha_{\text{комп} \cdot j}) \end{aligned} \quad (2.7)$$

$$f_{п.біогаз} = (V_{біогаз} \cdot \Pi_{біогаз} + i = \sum_{i=1}^k \Delta V_{біогаз} \cdot i \cdot \Pi_{біогаз}) - (W_o + i$$

$$= \sum_{i=1}^k \Delta W i) \cdot j = \prod_{j=1}^m (1 - \alpha_{біогаз} \cdot j) s$$
(2.8)

Для проведення чисельного аналізу за умови, що частка технологічних витрат не перевищує десятивідсотковий бар'єр, було використано реальні технологічні показники. Добовий вихід компосту становить 837 кг/т за ціною 7250 грн/т, а генерація біогазу досягає 1240 м³/т за вартості 4.28 грн/м³. Обсяг некондиційного газу, приданого лише для внутрішнього обігріву установки, дорівнює 124 м³/т. Ті обсяги добрива, що не відповідають товарним вимогам (у грошовому еквіваленті 725 грн/т), не є остаточним браком і повертаються в обортовий реактор для збагачення свіжої сировини бактеріями. Рівень базових експлуатаційних витрат становить 2350 грн/т, а додаткові видатки на логістику та пакування дорівнюють 485 грн/т. Підстановка цих значень у наведену систему рівнянь дає сумарний чистий дохід на рівні 11145.2 грн з кожної тонни переробленого субстрату.

Оптимальний режим роботи системи, що забезпечує максимум цільової функції, визначається через рівність нулю частинних похідних від витратних чинників. Ця математична умова має реальний технологічний сенс лише за умови, що ринкова вартість отриманого метану та добрив повністю покриває суму базових і додаткових експлуатаційних витрат на кожному етапі ферментації. Інтегральна функція витрат формується як сума витрат на виконання окремих операцій:

$$W\Sigma(x) = i = \sum_{i=1}^k \Delta B i(x)$$
(2.9)

Оцінювання структури витрат показує, що найбільш енергоємними етапами є тривале механічне перемішування густої маси та підтримання стабільного температурного профілю. Використання систем фільтрації

дозволяє ефективно утилізувати отриманий газ безпосередньо на місці для отримання теплової енергії. Модернізація всього циклу ферментації в обертових камерах можлива завдяки розробленню стаціонарних блоків підготовки метаногенних штамів, адаптованих до знижених температур, зменшенню теплового навантаження за рахунок переходу на психрофільний режим, а також спрощенню конструкції реактора для можливості його монтажу безпосередньо в тваринницьких приміщеннях.

2.6. Висновки до розділу 2

Сучасна практика проектування біоенергетичного обладнання свідчить про домінування великих стаціонарних реакторів, спорудження та обслуговування яких пов'язане з високими капітальними витратами та складними інженерними рішеннями в системах перемішування й завантаження. Для підвищення техніко-економічної ефективності обґрунтовано доцільність переходу до реакторів обертового типу, які забезпечують інтенсивний масообмін за менших габаритних розмірів установки.

Проведений аналіз температурних режимів підтверджує, що мезофільні та термофільні процеси є вкрай чутливими до найменших температурних коливань, що призводить до швидкого затухання метаногенезу за відсутності інтенсивного підігріву. Впровадження твердофазної конверсії в умовах психрофільного режиму є перспективним інженерним рішенням, оскільки такий процес стабільно протікає за природних температур навколишнього середовища.

Існуючий математичний апарат має переважно аналітичний характер та орієнтований на стаціонарні мезофільні системи, що унеможливорює його пряме використання для проектування мобільних установок. Виникає об'єктивна необхідність у створенні нової математичної моделі, яка б враховувала кінетику низькотемпературного розкладання густих органічних

субстратів всередині рухомого барабана.

На основі системного аналізу динамічної моделі процесу виділено базові параметри керування, серед яких визначальними є вологість завантаженої сировини ($W, \%$), тривалість перебування маси в реакційній зоні (τ , діб) та конструктивний об'єм обертової камери ($V_{\text{реакт}}, \text{м}^3$). Оптимізація цих чинників дозволяє розробити ефективний метод примусової адаптації мезофільних консорціумів мікроорганізмів до стабільної роботи в психрофільних умовах обертового реактора.

Застосування сучасних систем селективної фільтрації та очищення згенерованого біогазу забезпечує можливість його безпосереднього спалювання в котельних установках або когенераційних модулях для повного покриття власних електричних і теплових потреб підприємства.

Оптимізація технологічного процесу ферментації органічних відходів в обертових реакторах барабанного типу досягається шляхом інтеграції в загальну схему стаціонарного інокулятора. Попереднє вирощування в ньому адаптованої до низьких температур метаногенної мікрофлори та її подальше введення у свіжий субстрат дозволяє суттєво інтенсифікувати початкову стадію анаеробного розкладання сировини.

Узагальнення результатів аналітичного огляду та теоретичного моделювання вказує на те, що сформульовані математичні залежності й обґрунтовані технологічні режими психрофільної ферментації потребують обов'язкового підтвердження в умовах, максимально наближених до реальних. Оскільки теоретичні розрахунки не можуть повною мірою врахувати випадкові динамічні збурення та реологічні особливості конкретних видів біосировини, подальший вектор дослідження логічно зміщується у площину експериментальної верифікації отриманих моделей, що вимагає розробки відповідної лабораторної бази та методики проведення натурних випробувань.

РОЗДІЛ 3

МЕТОДИКА ТА РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТУ

3.1. Методика проведення експерименту

Експериментальні дослідження проводилися з метою перевірки та уточнення сформульованих теоретичних положень, а також встановлення відповідності конструктивних параметрів і режимів роботи технічних засобів, призначених для анаеробної переробки біологічної сировини. Основними завданнями досліджень були підтвердження теоретичних залежностей, що характеризують параметри процесу анаеробного зброджування органічної маси, а також оцінювання адекватності розробленої математичної моделі [3, 7, 31].

Для реалізації експериментальної програми було розроблено та виготовлено дослідний зразок реакторної установки для анаеробного розкладання біосировини, представлений на рис.3.1.



Рис. 3.1 - Експериментальний обертовий реактор: 1 – привідний електродвигун; 2 – редуктор; 3 – рама; 4 – опорний вузол; 5 – реактор; 6 – дверцята для завантаження та вивантаження субстрату; 7 – вісь; 8 – опора; 9 – муфта; 10 – штуцер.

Експериментальна установка містить герметичний реактор 5 циліндричної конфігурації, який розміщений горизонтально та встановлений

на валах 7. Для завантаження вихідної біомаси та видалення залишкового шламу, що утворюється під час отримання біогазу, передбачено люк 6. Робота установки здійснюється за періодичним принципом із циклічним завантаженням сировини.

Люк 6 обладнаний патрубком діаметром 20 мм із запірним краном, призначеним для відведення утвореного біогазу. Необхідний рівень герметичності між кришкою люка та корпусом реактора забезпечується ущільнювальним елементом. За потреби кришка може додатково оснащуватися пружним підтискним механізмом.

На внутрішній поверхні реактора розміщено вигнуті лопаті, призначені для перемішування субстрату. Крім того, всередині камери змонтовано чотири трубопроводи, розташовані вздовж її осі. На трубопроводах встановлені форсунки, через які може подаватися повітря для аерації субстрату під час експлуатації установки в режимі компостування.

Вали 7 спираються на підшипникові вузли 4. Один із валів, що з'єднується з електромеханічним приводом через фланцеве з'єднання, виконано суцільним. Протилежний вал виготовлений у вигляді штуцера 10 із внутрішньою різьбою. Обертання реактора забезпечується приводним механізмом, закріпленим на рамі 3, до складу якого входять електродвигун потужністю 3,5 кВт, планетарний редуктор та частотний перетворювач.

Опора 8 має регульовану конструкцію, що дає можливість змінювати висоту встановлення реактора. Завдяки цьому забезпечується регулювання кута нахилу осі його обертання відносно горизонталі в межах 0–20°. Зміна кута здійснюється дискретно з інтервалом 5°.

Для проведення експериментів використовували біосировину в наступному складі:

- 50 % суміші підстилкового гною та подрібненої соломи із сумарною вологістю 45 %,
- 20 % пташиного посліду;
- 30 % рослинних компонентів (15 % торфу і 15 % тирси листяних порід

дерев).

Загальна вологість підготовленого субстрату знаходилася в межах 62 – 73%.

Перед початком досліджень зовнішню поверхню реактора теплоізолювали для мінімізації теплових втрат у навколишнє середовище. За допомогою компресора із реактора через газовідвідний шланг видаляли повітря, формуючи анаеробні умови для перебігу процесу зброджування. Використовувався компресор низького тиску КПП-230-24.

Перемішування субстрату проводили через кожні 12 годин. Тривалість одного циклу перемішування становила 10 хвилин. Перемішування здійснювали плавно та з невеликою швидкістю для запобігання розшаруванню субстратної маси та утворенню поверхневої кірки.

Дослідну установку розміщували у приміщенні з мінімальними повітряними потоками. Під час роботи реактор був підключений до витяжної вентиляційної системи. Робочий об'єм реактора заповнювали свіжим субстратом приблизно на дві третини, тоді як одна третина залишалася вільною для акумулювання біогазу.

Температуру субстрату контролювали за допомогою датчика ТСП 1-8. Частоту обертання реакторної камери визначали портативним оптичним тахометром testo 465.

3.2. Методика визначення вологості

У ході досліджень вологість біосировини перебувала в діапазоні $W = 56\text{--}70\%$. Для оцінювання одного з ключових параметрів процесу анаеробного розкладання — виходу біогазу з одиниці маси абсолютно сухої речовини — було проведено визначення вологості свіжого гною, підготовленого субстрату та залишкового шламу. Дослідження виконували відповідно до методики [52].

Вологість матеріалу визначали за співвідношенням (3.1),

де W_p — відносна вологість матеріалу, %; g_1 — маса зразка до

висушування, г; g_2 — маса зразка після висушування, г.

Відповідно до вимог [52] також здійснювали відбір проб і визначали зольність досліджуваних матеріалів. Масу зразків визначали на лабораторних вагах FEN-320. У процесі досліджень використовували фарфорові тиглі, алюмінієві бюкси, муфельну електропіч SNOL4/1100 із системою автоматичного регулювання температури та робочим режимом 800 ± 25 °С, сушильну шафу ШС-40, ексикатор за ГОСТ 25336–82 із гранульованим хлористим кальцієм, а також тигельні щипці та інструменти для відбору навісок.

Вологість біосировини для ефективного процесу зброжування мала підтримуватись на рівні $W=58...67\%$. З метою дослідження важливого параметра процесу анаеробного розкладання біосировини, здійснено аналізи свіжого гною, підготовленого субстрату і шламу на вміст води. Дослідження виконувалися за методикою [42].

Значення вологості розраховувалися за формулою:

$$W^p = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100\%, \quad (3.1)$$

де W^p – відносна вологість матеріалу, %;

m_1, m_2 – маса матеріалу до і після сушіння.

У відповідності до [42] відбиралися. Під час дослідів маса проби визначалася за допомогою терезів лабораторних FEN-320.

3.3. Планування та обробка результатів багатфакторного експерименту

Багатфакторні дослідження виконувалися для встановлення впливу основних технологічних параметрів процесу анаеробного розкладання біомаси на обсяг отриманого біогазу та органічного добрива.

За результатами апіорного ранжування було визначено найбільш вагомні фактори, що впливають на об'єм виробленого субстрату $V_{\text{субс}}$:

$$V_{\text{субс}} = f(W, \tau, V) \quad (3.2)$$

де $V_{\text{доб}}$ – об’єм отриманого субстрату, м³/т;

V – об’єм реактора для виготовлення субстрату, м³;

W – вологість субстрату;

τ – тривалість циклу, діб.

Для встановлення залежності між незалежними змінними (V , W , τ) та результативним показником $V_{\text{доб}}$, а також для отримання математичного опису цього взаємозв’язку, було реалізовано багатофакторний експеримент. Кодування факторів здійснювали таким чином: $X1 = W$, $X2 = \tau$, $X3 = V$.

Межі варіювання параметрів встановлювались за попередніми результатами математичного моделювання, саме в цих межах очікувались найкращі показники продуктивності циклу отримання субстрату. Для зручності сприйняття вони зведені в табл. 3.1.

Кількість паралельних повторень за однакових умов становила $k = 3$. Відповідно до матриці планування виконано 23 незалежні експерименти з варіюваннями факторів та відповідними плановими повтореннями опорних точок, визначено коефіцієнти лінійної частини регресійного полінома згідно з методикою [22].

Таблиця 3.1

Варіювання опорних факторів експерименту

Рівень фактора	Код	Вологість субстрату W , %	Тривалість циклу τ , діб	Об’єм реактора V , м ³
		X1	X2	X3
Верхній	-1	75	35	1,4
Центральний	0	70	30	0,8
Нижній	1	65	25	0,4

Виконання експерименту вимагало чіткого дотримання методики та плану оскільки точність, закладена в матрицю експерименту визначає загальне планове відхилення від дійсних значень. Порухення вимог до експерименту

спотворить результати дослідження.

3.3. Обробка результатів експерименту з виробництва поживного субстрату

Для встановлення закономірностей формування об'єму отриманого поживного субстрату $V_{\text{субс}}$ було реалізовано багатofакторний експеримент типу 2^3 . На першому етапі проаналізовано спільний вплив факторів X_1 , X_2 на величину вихідного параметра за умови фіксації фактора X_3 на нульовому рівні. Після підстановки значення $X_3=0$, у рівняння регресії другого порядку одержано вираз:

$$y = 21,96 - 0,61X_1 + 0,3X_2 - 0,0039X_1X_2 + 0,0054X_1^2 + 0,00019X_2^2 \quad (3.3)$$

Для визначення координат стаціонарної точки виконано частинне диференціювання рівняння за змінними X_1 та X_2 :

$$\begin{aligned} (\partial y / X_1) &= -0,61 - 0,0039X_2 + 0,0108X_1 = 0 \\ (\partial y / X_2) &= 0,3 - 0,0039X_1 + 0,00038X_2 = 0 \end{aligned} \quad (3.4)$$

У результаті розв'язання системи рівнянь (3.4) отримано координати центру поверхні відгуку: $X_{1z}=91$ та $X_{2z}=79$.

Підставивши знайдені значення у рівняння (3.3), визначено координати центру поверхні. Відповідне значення функції відгуку становить

$$y_z = 21,96 - 0,61 \cdot 91 + 0,3 \cdot 79 - 0,0039 \cdot 91 \cdot 79 + 0,0054 \cdot 91^2 + 0,00019 \cdot 79^2.$$

Звідси, при $X_{1z}=91$ та $X_{2z}=79$ $y_z=2,38$.

Подальший аналіз передбачав визначення кута повороту нової системи координат:

$$\text{ctg} 2\alpha = \frac{c_{11}-c_{22}}{c_{12}} = \frac{0,0054-0,00019}{0,0039} = -1,109; \quad \alpha = -25^{\circ}07' \quad (3.5)$$

За від'ємного значення кута поворот координатних осей у центральній точці здійснюється за напрямком годинникової стрілки. Для приведення

рівняння до канонічної форми необхідно визначити власні значення квадратичної форми шляхом розв'язання характеристичного рівняння [18]:

$$f(C) = \begin{vmatrix} C_{11} - C & 0,5 \cdot C_{12} \\ 0,5 \cdot C_{12} & C_{22} - C \end{vmatrix} = 0 \quad (3.6)$$

$$\begin{aligned} C_{11} &= C_{11} \cdot \cos^2 \alpha + C_{12} \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha + C_{22} \cdot \sin^2 \alpha \\ C_{22} &= C_{11} \cdot \sin^2 \alpha - C_{12} \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha + C_{22} \cdot \cos^2 \alpha \end{aligned} \quad (3.7)$$

$$f(C) = \begin{vmatrix} 0,0054 - C & 0,5 \cdot (-0,0039) \\ 0,5 \cdot (-0,0039) & 0,00019 - C \end{vmatrix} = 0 \quad (3.8)$$

У результаті розрахунків встановлено, що корені характеристичного рівняння дорівнюють $C_{11}=0,0033$ та $C_{22}=-0,00198$.

Таким чином, рівняння (3.4) після перетворення до канонічного вигляду набуває форми:

$$y - 2,18 = 0,0028 \cdot X_1^2 + 0,0017 \cdot X_2^2 \quad (3.9)$$

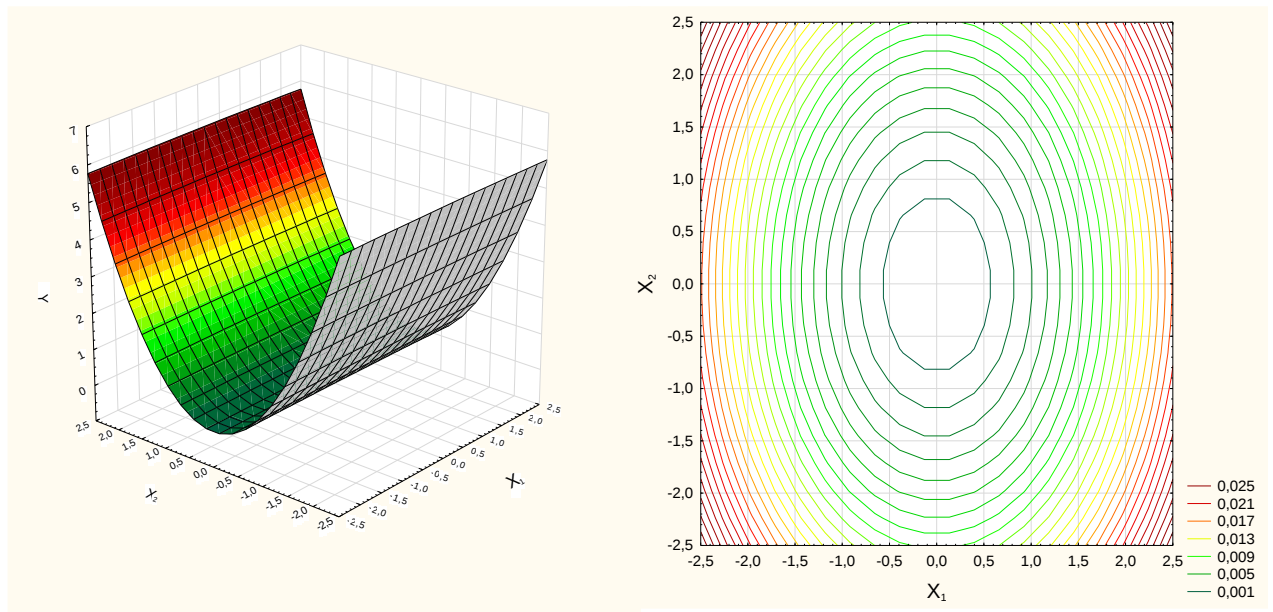


Рис. 3.2. Поверхня відгуку, яка характеризує об'єм виробленого добрива залежно від вологості субстрату $W(X_1)$ та тривалості перебування субстрату у реакторі $\tau(X_2)$

У графічному представленні отримана залежність відповідає поверхні відгуку у формі еліпсоїда обертання з наявністю екстремальної точки. Аналіз результатів показав, що раціональні значення параметрів знаходяться в межах:

вологість субстрату 57...63%, тривалість перебування матеріалу в реакторі 26...30 діб.

На наступному етапі досліджувався сумісний вплив факторів X_2 та X_3 за умови, що $X_1=0$. Після відповідної підстановки отримано рівняння:

$$y = 90,37 - 0,047X_2 + 7,33X_3 - 0,1903X_2X_3 + 0,0031X_2^2 + 0,96X_3^2 \quad (3.10)$$

Здійснимо диференціювання за X_2 та X_3 отримаємо:

$$\begin{aligned} (\partial y / X_2) &= -0,047 - 0,1903X_3 + 0,0062X_2 = 0 \\ (\partial y / X_3) &= 7,33 - 0,1903X_2 + 1,96X_3 = 0 \end{aligned} \quad (3.11)$$

Розв'язком системи рівнянь (3.10) знаходимо $X_{3z} = -0,8511$ та $X_{2z} = -14,01$.

Знаходимо центр поверхні та її нові координати, підставляючи X_2 та X_3 в рівняння (3.10):

$$\begin{aligned} y_z &= 90,37 - 0,044 \cdot (-14,01) + 7,33 \cdot (-0,8511) - 0,1903 \cdot (-0,8511) \\ &\quad \cdot (-14,01) + 0,0031 \cdot (-14,01)^2 + 0,96(-0,8511)^2. \end{aligned}$$

Значення функції відгуку становить $y_z = 86,35$. Кут повороту нової системи координат визначається співвідношенням:

$$\operatorname{ctg} 2\alpha = (0,0031 - 0,96) / (-0,1811) = 4,955; \quad \alpha = 5^\circ 37' \quad (3.12)$$

Оскільки отримане значення кута має додатний знак, поворот осей відбувається проти годинникової стрілки. Подальше перетворення до канонічної форми виконували через розв'язання характеристичного рівняння:

$$f(C) = \begin{vmatrix} 0,0031 - C & 0,5 \cdot (-0,1811) \\ 0,5 \cdot (-0,1811) & 0,96 - C \end{vmatrix} = 0 \quad (3.13)$$

Знаходимо корені: $C_{22} = -0,0044$ та $C_{33} = 0,9793$.

У канонічному вигляді рівняння набуває такого запису:

$$y - 86,35 = -0,0044 \cdot X_2^2 + 0,9793 \cdot X_3^2 \quad (3.14)$$

Достовірність обчислень підтверджується рівністю сум відповідних коефіцієнтів (3.10) та (3.14).

Отримана поверхня відгуку має форму параболоїда (рис. 3.3) та характеризує залежність кількості сформованого поживного субстрату від тривалості перебування матеріалу в реакторі та його об'єму. Оскільки

поверхня витягнута вздовж осі фактора X_2 , саме тривалість перебування субстрату в реакторі має найбільший вплив на результативний показник. Оптимальними встановлено такі параметри: тривалість циклу має становити 27...31 діб, $V_{\text{субст}}=0,9...1,2 \text{ м}^3$.

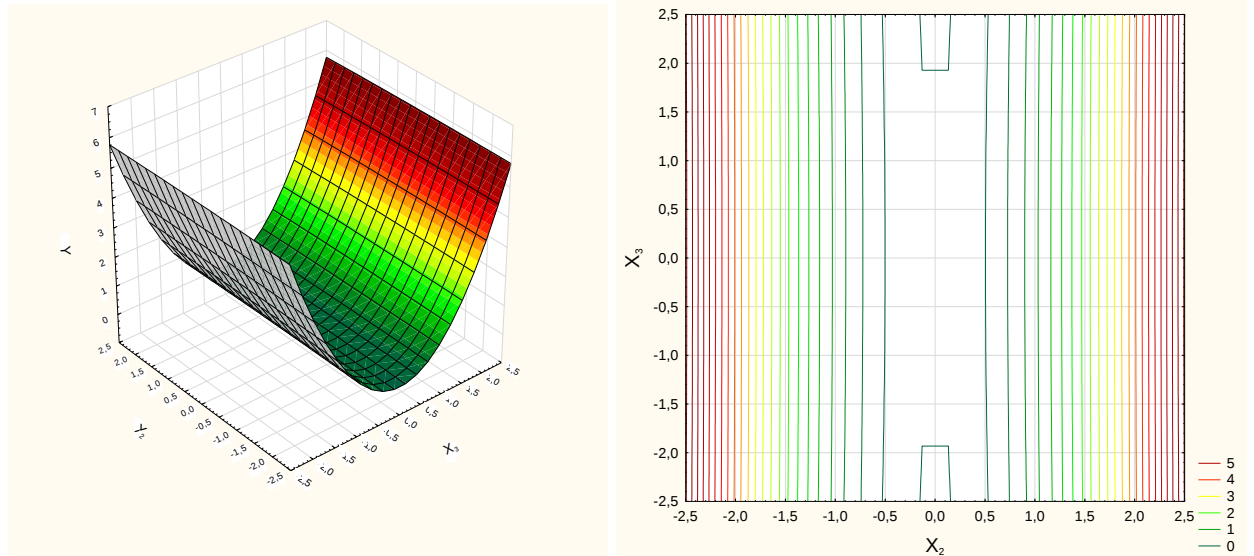


Рис. 3.3. Поверхня відгуку, що характеризує залежність об'єму сформованого поживного субстрату від тривалості перебування субстрату в реакторі та об'єму реактора V .

Третя серія досліджень була присвячена аналізу впливу вологості субстрату та об'єму реактора при фіксованому значенні $X_2=0$. У цьому випадку отримано рівняння: X_1 та X_3 при $X_2=0$ отримаємо:

$$y = 158,44 + 92,21X_3 - 13,73X_1 - 0,991X_1X_3 + 0,879X_3^2 + 0,113X_1^2 \quad (3.15)$$

Здійснивши диференціювання за X_1 та X_3 отримаємо систему рівнянь:

$$\begin{aligned} (\partial y / X_1) &= -13,73 - 0,991X_3 + 0,116X_1 = 0 \\ (\partial y / X_3) &= 92,21 - 0,991X_1 + 1,758X_3 = 0 \end{aligned} \quad (3.16)$$

Розв'язок системи (3.16) має вигляд $X_{1z}=104,62$ та $X_{3z}=1,83$.

Шукаємо центр поверхні та її координати:

$$y_z = 158,44 + 92,21 \cdot 1,83 - 13,73 \cdot 104,62 - 0,991 \cdot 104,62 \cdot 1,83 + 0,879 \cdot 1,83^2 + 0,113 \cdot 104,62^2$$

Звідси, при $X_{3z}=1,71$ та $X_{1z}=105,95$ $y_z = -45,71$.

Кут повороту осей:

$$\operatorname{ctg} 2\alpha = (0,113 - 0,879)/(-0,991) = 0,803; \quad \alpha = 36^{\circ} 92' \quad (3.17)$$

Додатне значення параметра (α) свідчить про поворот осей проти годинникової стрілки. Для переходу до канонічного вигляду було розв'язано характеристичне рівняння:

$$f(C) = \begin{vmatrix} 0,113 - C & 0,5 \cdot (-0,991) \\ 0,5 \cdot (-0,991) & 0,879 - C \end{vmatrix} = 0 \quad (3.18)$$

Обраховуємо корені характеристичного рівняння $C_{11} = -0,157$ та $C_{33} = 1,163$.

Отже, рівняння (3.16) в канонічному вигляді матиме наступний вигляд:

$$y - 45,71 = -0,157 \cdot X_1^2 + 1,163 \cdot X_3^2 \quad (3.19)$$

Візуалізація отриманого рівняння представлена на рис.3.4. у вигляді поверхні відгуку, яка відображає зв'язок об'єму виробленого субстрату від вологості сировини і об'єму завантаження. Отримана поверхня витягнута вздовж вісі X_3 , що показує більший вплив X_3 порівняно з X_1 . Отримано оптимальні параметри: об'єм завантаження $0,8 \dots 1,3 \text{ м}^3$; вологість сировини, що завантажується $55 \dots 62\%$

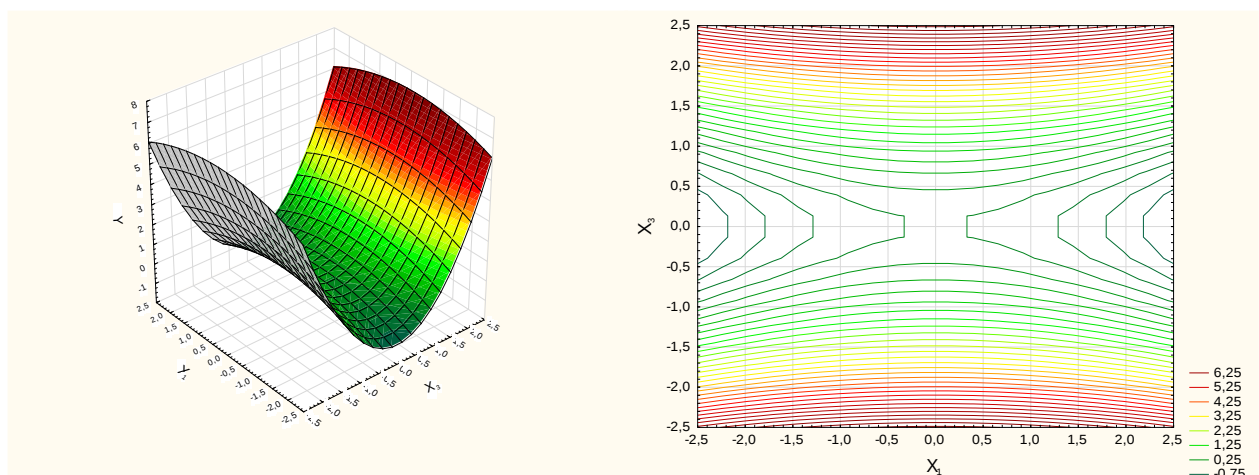


Рис. 3.4. Поверхня відгуку, яка характеризує залежність об'єму отриманого субстрату від його вологості W та об'єму завантаження V .

Обробку експериментальних результатів виконували із застосуванням програмних комплексів Microsoft Excel 2003 та Statistica 6.0.

Перевірку адекватності розробленої моделі здійснювали за критерієм Фішера при рівні довірчої ймовірності 95 %. Значення середньоквадратичної похибки не перевищувало 5 %, що свідчить про достатню достовірність отриманих результатів.

3.4. Висновки до розділу 3

У результаті проведеного системного аналізу розробленої математичної моделі, представленої в розділі 2 цієї роботи, було встановлено, що найбільш доцільним є керування параметрами, які безпосередньо визначають інтенсивність процесів анаеробного розкладання органічної біосировини та впливають на ефективність функціонування реакторної установки. До таких керованих факторів віднесено фізико-хімічні характеристики субстрату, насамперед його вологість W , %, тривалість перебування біомаси в реакторі τ , діб, а також конструктивні параметри технологічного обладнання, зокрема робочий об'єм завантаження V , м³.

Вибір саме цих параметрів обумовлений їхнім визначальним впливом на активність анаеробної мікрофлори, швидкість перебігу біохімічних процесів та стабільність утворення цільових продуктів переробки. Зміна вологості субстрату впливає на умови життєдіяльності мікроорганізмів, інтенсивність масообміну та доступність поживних речовин для метаногенних бактерій. Тривалість перебування субстрату в реакторі визначає повноту розкладання органічної речовини та ступінь завершеності процесів метаногенезу. Водночас робочий об'єм реактора безпосередньо пов'язаний із продуктивністю установки, особливостями перемішування субстрату та створенням сприятливих умов для розвитку анаеробних мікроорганізмів.

Комплексне регулювання зазначених факторів створює передумови для розроблення ефективного способу адаптації мезофільних метаногенних

мікроорганізмів до експлуатації в умовах знижених температур. Реалізація такого підходу дозволяє забезпечити стабільне функціонування біореакторів у психрофільному режимі, що є особливо актуальним для регіонів із тривалим холодним періодом року та обмеженими можливостями додаткового підігріву субстрату. Крім того, використання адаптованих мікробіологічних культур дає змогу зменшити енергетичні витрати на підтримання технологічного процесу та підвищити економічну ефективність анаеробної переробки органічних відходів.

Проведені експериментальні дослідження та статистична обробка отриманих результатів дали можливість встановити раціональні значення досліджуваних параметрів і визначити їх вплив на показники роботи реакторної установки. На основі аналізу поверхонь відгуку та результатів багатофакторного експерименту обґрунтовано оптимальні діапазони зміни технологічних і конструктивних факторів, які забезпечують найбільш ефективний перебіг процесу анаеробного розкладання біосировини та максимальне отримання кінцевих продуктів переробки.

За результатами виконаних досліджень визначено оптимальні значення параметрів, що мають найбільший вплив на наступні параметри процесу.

Виробництво поживного субстрату з органічної сировини дає найкращі результати по продуктивності при збереженні якості готового субстрату при наступних техніко-технологічних параметрах: вологість субстрату в межах 55...63%; тривалість перебування субстрату в реакторі від 27 до 31 діб; об'єм завантаження реактора $X_3=0,8\ldots1,2 \text{ м}^3$.

Перевірку адекватності розробленої моделі здійснювали за критерієм Фішера при рівні довірчої ймовірності 95 %. Значення середньоквадратичної похибки не перевищувало 5 %, що свідчить про достатню достовірність отриманих результатів.

ВИСНОВКИ

1. Дослідження гідродинамічних та термодинамічних закономірностей твердофазної ферментації вказує на специфічний характер масообміну, зумовлений відсутністю вільної гравітаційної рідини. Низька теплопровідність пористого шару органічних відходів створює високі ризики локального перегріву маси внаслідок екзотермічної активності мікробіоценозу. Доведено, що кондуктивного тепловідведення через конструкційні елементи реакторів недостатньо для стабілізації процесу. Це обумовлює необхідність інтеграції систем примусової аерації кондиційованим повітрям, де основним механізмом скидання надлишкової теплової енергії стає прихована теплота пароутворення. Подальше ущільнення субстрату та явище усадки в процесі деструкції вимагають точного розрахунку аеродинамічного опору шару для запобігання каналутворенню.

2. Порівняльний аналіз метаболічних шляхів біоконверсії підтверджує, що для отримання твердих профільованих субстратів аеробне розкладання є найбільш доцільним завдяки високій кінетиці процесу та здатності до самонагрівання. Водночас анаеробна технологія залишається раціональним вибором для утилізації рідких стоків із супутньою генерацією енергоносіїв.

3. Узагальнення вимог до кінцевої продукції показує, що параметри проектування технологічного обладнання перебувають у прямій залежності від сертифікаційних критеріїв субстратів. Необхідність забезпечення повної санітарної безпеки, що передбачає деактивацію патогенів та насіння бур'янів, накладає жорсткі вимоги на системи автоматизованого керування. Інженерні рішення повинні гарантувати утримання термофільного режиму на рівні 55 – 65°C в усьому об'ємі матеріалу, виключаючи появу зон недогріву.

4. Фінальні характеристики вологоємності, кислотності та фракційного складу субстрату визначають конфігурацію ліній механічної переробки, включаючи шредери, сепаратори та вузли гранулювання. Таким чином, вивчені теоретичні закономірності є фундаментальною основою для виконання подальших технологічних і конструкторських розрахунків

проектованого обладнання.

5. Проведений аналіз технологій твердофазної ферментації та конструкцій сучасного реакторного обладнання свідчить, що найбільш перспективним для виробництва органічних субстратів є обертовий барабанний реактор. Його конструкція забезпечує поєднання ефективної аерації, інтенсивного перемішування та рівномірного розподілу температури і вологості в об'ємі субстрату. Це створює передумови для подальшого аналізу технологічного процесу та обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів реактора у другому розділі.

6. На основі системного аналізу динамічної моделі процесу виділено базові параметри керування, серед яких визначальними є вологість завантаженої органічної сировини ($W, \%$), тривалість перебування маси в реакційній зоні (τ , діб) та об'єм завантаження обертової камери ($V, \text{м}^3$). Оптимізація цих чинників дозволяє розробити ефективний метод примусової адаптації мезофільних консорціумів мікроорганізмів до стабільної роботи в психрофільних умовах обертового реактора.

7. Оптимізація технологічного процесу ферментації органічних відходів в обертових реакторах барабанного типу досягається шляхом інтеграції в загальну схему стаціонарного інокулятора. Узагальнення результатів аналітичного огляду та теоретичного моделювання вказує на те, що сформульовані математичні залежності й обґрунтовані технологічні режими психрофільної ферментації потребують обов'язкового підтвердження в умовах, максимально наближених до реальних. Оскільки теоретичні розрахунки не можуть повною мірою врахувати випадкові динамічні збурення та реологічні особливості конкретних видів біосировини, подальший вектор дослідження логічно зміщується у площину експериментальної верифікації отриманих моделей, що вимагає розробки відповідної лабораторної бази та методики проведення натурних випробувань.

8. У результаті проведеного системного аналізу розробленої математичної моделі, представленої в розділі 2 цієї роботи, було встановлено,

що найбільш доцільним є керування параметрами, які безпосередньо визначають інтенсивність процесів анаеробного розкладання органічної біосировини та впливають на ефективність функціонування реакторної установки. До таких керованих факторів віднесено фізико-хімічні характеристики субстрату, насамперед його вологість W , %, тривалість перебування біомаси в реакторі τ , діб, а також конструктивні параметри технологічного обладнання, зокрема робочий об'єм завантаження V , м³.

9. Проведені експериментальні дослідження та статистична обробка отриманих результатів дали можливість встановити раціональні значення досліджуваних параметрів і визначити їх вплив на показники роботи реакторної установки. На основі аналізу поверхонь відгуку та результатів багатофакторного експерименту обґрунтовано оптимальні діапазони зміни технологічних і конструктивних факторів, які забезпечують найбільш ефективний перебіг процесу анаеробного розкладання біосировини та максимальне отримання кінцевих продуктів переробки.

10. За результатами виконаних досліджень визначено оптимальні значення параметрів, що мають найбільший вплив на наступні параметри процесу.

Виробництво поживного субстрату з органічної сировини дає найкращі результати по продуктивності при збереженні якості готового субстрату при наступних техніко-технологічних параметрах: вологість субстрату в межах 55...63%; тривалість перебування субстрату в реакторі від 27 до 31 діб; об'єм завантаження реактора $X_3=0,8\ldots1,2$ м³.

Перевірку адекватності розробленої моделі здійснювали за критерієм Фішера при рівні довірчої ймовірності 95 %. Значення середньоквадратичної похибки не перевищувало 5 %, що свідчить про достатню достовірність отриманих результатів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Голуб Г. А. Критерії оптимізації параметрів машин та обладнання // Вісник Львівського національного аграрного університету. Серія: Агроінженерні дослідження. 2008. № 12. С. 17–24.
2. Голуб Г. А., Дубровіна О. В. Обґрунтування рівня занурення та коефіцієнта заповнення біомасою обортового метантенка // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2012. Вип. 170, ч. 2. С. 55–61.
3. Голуб Г. А., Дубровіна О. В., Рубан Б. О., Войтенко В. О. Технічне забезпечення виробництва біогазу // Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. 2012. Вип. 10. С. 17–19.
4. Golub G., Kukharets S., Marus O. Scientific bases of production and use of biofuel in agroecosystems // Proceedings of the 8th International Research and Development Conference of Central and Eastern European Institutes. Poznan, Puszczkowo, Poland, 2013. P. 59–65.
5. Голуб Г., Кухарець С., Рубан Б. Особливості конструкції модульної біогазової установки з обортовим реактором // Техніка і технології АПК. 2014. № 9(60). С. 10–14.
6. Технологія переробки біологічних відходів у біогазових установках з обортовими реакторами / Г. А. Голуб та ін.; за ред. Г. А. Голуба. Київ : НУБіП України, 2014. 106 с.
7. Відновлювана енергетика в аграрному виробництві : навч. посіб. / за ред. О. В. Скидана, Г. А. Голуба. Київ : НУБіП України, 2018. 338 с.
8. Вечера О. В., Кухарець В. В. Аналіз параметрів аеробно-анаеробного стабілізування твердої фракції ефлюенту // Синтез та конверсія біосировини в агроєкосистемах. 2022. Т. 3, № 7. С. 112–118.
9. Голуб Г. А., Марус О. А., Деркач О. О. Дослідження енергоємності процесу змішування в біогазових реакторах обортового типу // Синтез та конверсія біосировини в агроєкосистемах. 2022. Т. 3, № 7. С. 45–52.

10. Кухарець С. М., Ярош Ю. Д., Голубенко А. А. Обґрунтування технології двостадійної біоконверсії органічної сировини для отримання високоякісних добрив // Синтез та конверсія біосировини в агроєкосистемах. 2022. Т. 3, № 7. С. 12–21.
11. Терещук М. М., Цивенкова Н. М., Чуба В. В. Математичне моделювання руху багатокомпонентного субстрату в рухомому робочому органі // Синтез та конверсія біосировини в агроєкосистемах. 2022. Т. 3, № 7. С. 88–95.
12. Марус О. А., Ткаченко С. І. Моделювання продуктивності біоенергетичних комплексів малої потужності в тваринництві // Синтез та конверсія біосировини в агроєкосистемах. 2022. Т. 3, № 7. С. 134–141.
13. Новітні технології біоконверсії : монографія / Я. Б. Блюм та ін. Київ : Аграр Медіа Груп, 2010. 326 с.
14. Ратушняк Г. С., Анохіна К. В. Енергоефективні технологічні процеси та обладнання біоконверсії : монографія. Вінниця : ВНТУ, 2013. 148 с.
15. Vechera O., Tereshchuk M., Chuba V., Tsyvenkova N. Investigation of aerobic solid fraction fermentation process parameters for organic material // Engineering for Rural Development. 2020. Vol. 19. P. 1450–1455. DOI: 10.22616/ERDev.2020.19.TF363.
16. Golub G., Myhailovych Y., Achkevych O. et al. Optimization of angular velocity of drum mixers // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2019. Vol. 7, No. 99. P. 64–72. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.166944.
17. Golub G., Trehub M., Holubenko A., Tsyvenkova N., Chuba V., Tereshchuk M. Determining of the influence of reactor parameters on the uniformity of mixing substrate components // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020. Vol. 6, No. 7(108). P. 60–70. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.217159.

18. Santos A., Dadalto F. O., Scatena R., Duarte C. R., Barrozo M. A. S. A hydrodynamic analysis of a rotating drum operating in the rolling regime // *Chemical Engineering Research and Design*. 2015. Vol. 94. P. 204–212. DOI: 10.1016/j.cherd.2014.07.028.
19. Liu Y., Gonzalez M., Wassgren C. Modeling granular material segregation using a combined finite element method and advection–diffusion–segregation equation model // *Powder Technology*. 2019. Vol. 346. P. 38–48. DOI: 10.1016/j.powtec.2019.01.086.
20. Liu Z., Wang X., Wang F. The progress of composting technologies from static heap to intelligent reactor: Benefits and limitations // *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 270. Art. 122328. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122328.
21. Singh W. R., Kalamdhad A. S., Singh J. The preferential composting of water fern and a reduction of the mobility of potential toxic elements in a rotary drum reactor // *Process Safety and Environmental Protection*. 2016. Vol. 102. P. 485–494. DOI: 10.1016/j.psep.2016.05.002.
22. Nayak A. K., Kalamdhad A. S. Sewage sludge composting in a rotary drum reactor: Stability and kinetic analysis // *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*. 2015. Vol. 4. P. 249–259. DOI: 10.1007/s40093-015-0104-4.
23. Sharma D., Saadi I., Oazana S., Lati R., Laor Y. Distribution of residence time in rotary-drum composting and implications for hygienization // *Waste Management*. 2024. Vol. 179. P. 22–31. DOI: 10.1016/j.wasman.2024.02.047.
24. Wang J. et al. Enhancing oxygen-dissolving capacity of rotary drum composting // *Agronomy*. 2024. Vol. 14. Art. 2641. DOI: 10.3390/agronomy14112641.
25. Stuart D. M., Mitchell D. A., Johns M. R., Litster J. D. Solid-state fermentation in rotating drum bioreactors: Operating variables affect performance through their effects on transport phenomena // *Biotechnology and Bioengineering*.

1999. Vol. 63, No. 4. P. 383–391. DOI: 10.1002/(SICI)1097-0290(19990520)63:4<383::AID-BIT1>3.0.CO;2-N.

26. Hardin M. T., Mitchell D. A., Howes T. Approach to designing rotating drum bioreactors for solid-state fermentation on the basis of dimensionless design factors // *Biotechnology and Bioengineering*. 2000. Vol. 67, No. 3. P. 274–282. DOI: 10.1002/(SICI)1097-0290(20000205)67:3<274::AID-BIT3>3.0.CO;2-I.

27. Mitchell D. A., Tongta A., Stuart D. M., Krieger N. The potential for establishment of axial temperature profiles during solid-state fermentation in rotating drum bioreactors // *Biotechnology and Bioengineering*. 2002. Vol. 80, No. 1. P. 114–122. DOI: 10.1002/bit.10356.

28. Schutyser M. A. I., Weber F. J., Briels W. J., Boom R. M., Rinzema A. Three-dimensional simulation of grain mixing in three different rotating drum designs for solid-state fermentation // *Biotechnology and Bioengineering*. 2002. Vol. 79, No. 3. P. 284–294. DOI: 10.1002/bit.10277.

29. Diaz A. B., De Ory I., Caro I., Blandino A. Solid-state fermentation in a rotating drum bioreactor for the production of hydrolytic enzymes // *Chemical Engineering Transactions*. 2009. Vol. 17. P. 1041–1046. DOI: 10.3303/CET0917174.

30. Alkarimiah R., Suja F. Effects of technical factors towards achieving the thermophilic temperature stage in composting process and the benefits of closed reactor system compared to conventional method: a mini review // *Applied Ecology and Environmental Research*. 2019. Vol. 17, No. 4. P. 9979–9996. DOI: 10.15666/aeer/1704_99799996.

31. Cucina M., Zadra C., Marcotullio M. C. et al. Recovery of energy and plant nutrients from a pharmaceutical organic waste derived from a fermentative biomass: integration of anaerobic digestion and composting // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2017. Vol. 5, Iss. 3. P. 3051–3057. DOI: 10.1016/j.jece.2017.06.003.

32. Geethamani R., Soundara B., Kanmani S. et al. Production of cost affordable organic manure using institutional waste by rapid composting method //

Materials Today: Proceedings. 2021. Vol. 45. P. 764–768. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.02.803.

33. Qian L., Zhao R., Wang Q. et al. Promotion of waste sludge and corn straw co-composting by biomass power plant ash // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2026. Vol. 14. Article 121070. DOI: 10.1016/j.jece.2026.121070.

34. Ryabchenko O., Golub G., Turčeková N. et al. Sustainable business modeling of circular agriculture production: case study of circular bioeconomy // Journal of Security and Sustainability Issues. 2017. Vol. 7, No. 2. P. 301–309. DOI: 10.9770/jssi.2017.7.2(10).

35. Akdeniz N. A systematic review of biochar use in animal waste composting // Waste Management. 2019. Vol. 88. P. 291–300. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.03.040.

36. Awasthi M. K., Liu T., Awasthi S. K. et al. Biotechnological strategies for transforming biowaste into resources for circular bioeconomy: a review // Bioresource Technology. 2022. Vol. 344. Article 126196. DOI: 10.1016/j.biortech.2021.126196.

37. Awasthi M. K., Sarsaiya S., Wainaina S. et al. Valorization of biomass residues for sustainable energy and bioproducts // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2020. Vol. 127. Article 109610. DOI: 10.1016/j.rser.2020.109610.

38. Ding S., Wang Y., Li X. et al. Improving food waste compost maturity through machine learning-based optimization // Bioresource Technology. 2022. Vol. 351. Article 126958. DOI: 10.1016/j.biortech.2022.126958.

39. Feng X., Zhang Y., Wang H. et al. Vermiculite and humic acid improve green waste compost quality // Environmental Technology & Innovation. 2021. Vol. 22. Article 101473. DOI: 10.1016/j.eti.2021.101473.

40. Gabhane J., William S. P. M. P., Bidyadhar R. et al. Additives aided composting of green waste // Bioresource Technology. 2012. Vol. 114. P. 699–703. DOI: 10.1016/j.biortech.2012.02.097.

41. Hazarika J., Kalamdhad A. S., Khwairakpam M. Biodegradability assessment of pulp and paper mill sludge through rotary drum composting // *Waste Management*. 2018. Vol. 76. P. 238–246. DOI: 10.1016/j.wasman.2018.03.025.
42. Kabak E. T., Akyol Ç., Demir S. et al. Prediction and optimization of nitrogen losses during composting using hybrid models // *Chemical Engineering Journal*. 2022. Vol. 430. Article 132876. DOI: 10.1016/j.cej.2021.132876.
43. Kausar H., Islam M. S., Saha C. K. et al. Assessment of pig manure biodegradation potential through rotary drum composting using different bulking agents // *Bioresource Technology*. 2023. Vol. 369. Article 128379. DOI: 10.1016/j.biortech.2022.128379.
44. Liu H., Chen Y., Wang X. et al. Production of high-quality sugarcane compost using bacterial consortium // *Applied Soil Ecology*. 2023. Vol. 185. Article 104802. DOI: 10.1016/j.apsoil.2023.104802.
45. Liu Z., Zhang Y., Wang L. et al. Advanced composting technologies promote environmental benefits and eco-efficiency // *Bioresource Technology*. 2022. Vol. 361. Article 127647. DOI: 10.1016/j.biortech.2022.127647.
46. Luo Y., Liang J., Zeng G. et al. Seed germination test for compost phytotoxicity evaluation: role, problems and prospects // *Waste Management*. 2018. Vol. 71. P. 109–114. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.09.023.
47. Oyetunji O., Akinyele B., Olaniran J. et al. Improving nutrient use efficiency and crop productivity using compost and fertilizers: a review // *Journal of Environmental Management*. 2022. Vol. 316. Article 115223. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.115223.
48. Pradhan G., Sahoo U. K., Mohanty M. et al. Waste compost application for atmospheric CO₂ capture in rice–wheat systems // *Science of the Total Environment*. 2023. Vol. 857. Article 159533. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.159533.
49. Qiao Y., Li H., Zhang X. et al. Comprehensive evaluation of composts from planting and breeding wastes on crop productivity // *Journal of Environmental*

Management. 2023. Vol. 345. Article 118902. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.118902.

50. Reyes-Torres M., Oviedo-Ocaña E. R., Dominguez I. et al. A systematic review on green waste composting: feedstock quality and optimization strategies // Waste Management. 2018. Vol. 77. P. 486–499. DOI: 10.1016/j.wasman.2018.04.037.

ДОДАТКИ