

**ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**Інженерно-технологічний факультет**

Кафедра інжинірингу технічних систем

**Пояснювальна записка**

до дипломної роботи

рівня вищої освіти «Магістр» на тему:

**Обґрунтування інженерно-технологічних параметрів  
обладнання для обробки рідкого гною**

**Виконав:** студент 2 курсу, групи МгАІ-1-23

за спеціальністю 208 «Агроінженерія»

\_\_\_\_\_ Радзійон Антон Володимирович

**Керівник:** \_\_\_\_\_ Трипутень Микола Мусійович

**Рецензент:** \_\_\_\_\_ Садченко Роман Вікторович

Дніпро 2024

**ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ  
АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
Інженерно-технологічний факультет

Кафедра інжинірингу технічних систем  
Рівень вищої освіти: «Магістр»  
Спеціальність: 208 «Агроінженерія»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри

ІТС

(назва кафедри)

доцент

(вчене звання)

Дудін В.Ю.

(підпис)

(прізвище, ініціали)

«12» листопада 2024 р.

**ЗАВДАННЯ  
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Радзіону Антону Володимировичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

**1. Тема роботи:** Обґрунтування інженерно-технологічних параметрів обладнання для обробки рідкого гною

керівник роботи: к.т.н., доцент Трипутень Микола Мусійович

( прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від

« 12 » листопада 2024 року № 3784

**2. Строк подання студентом роботи** 16.12.2024 р.

**3. Вихідні дані до роботи** Аналіз стану питання процесів та обладнання для отримання біогазу. Патентний пошук, аналіз літературних джерел, останніх досліджень з обраної тематики.

**4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)** 1. Аналіз стану питання з переробки рідкого гною. 2. Теоретичні дослідження процесу гідравлічного перемішування рідкого гною. 3. Лабораторні дослідження процесу гідравлічного перемішування рідкого гною. 4. Охорона праці. 5. Техніко-економічна оцінка удосконаленої біогазової установки. Загальні висновки. Бібліографічний список

## 5. Перелік демонстраційного матеріалу

1. Мета і задачі досліджень. Аналіз (4 аркуші, А4). 2. Теоретичні дослідження (3 аркуші, А4). 3. Експериментальні дослідження (3 аркуші, А4) 4. Охорона праці (1 аркуш, А4). 5. Економічні показники (1 аркуш, А4). 6. Висновки (1 аркуш, А4)

## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання ви- дав	завдання прийняв
1-5	Трипутень М.М., доцент		
Нормоконтроль	Івлєв В.В., доцент		

7. Дата видачі завдання: 26.09.2024 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітичний (оглядовий)	до 01.10.2024 р.	
2	Теоретичний	до 20.10.2024 р.	
3	Експериментальний	до 09.11.2024р.	
4	Охорона праці	до 19.11.2024 р.	
5	Економічний	до 26.11.2024 р.	
6	Демонстраційна частина	до 30.11.2024р.	

Студент

\_\_\_\_\_

( підпис )

Радзійон А.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_

( підпис )

Трипутень М.М.

(прізвище та ініціали)



## АНОТАЦІЯ

Радзійон А.В. Обґрунтування інженерно-технологічних параметрів обладнання для обробки рідкого гною /Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «магістр» за спеціальністю 208 «Агроінженерія» (спеціалізація «Механізація тваринництва»). – ДДАЕУ, Дніпро, 2024.

Вступна частина дипломної роботи містить обґрунтування актуальності теми, а також чітко сформульовані мету та завдання дослідження. У процесі аналізу сучасного стану питання виявлено, що одним із найраціональніших способів переробки гною є анаеробне зброджування, яке дозволяє отримувати біогаз.

У другому розділі виконано чисельне моделювання процесу перемішування субстрату в метантенку, обґрунтовано нову схему перемішування. Лабораторні дослідження підтвердили переваги розробленого обладнання в порівнянні зі стандартними рішеннями. Окрім цього, проведено оцінку розробленої конструкції з точки зору охорони праці, що дозволило виявити потенційні ризики та запропонувати заходи для їх мінімізації.

Також виконано економічне обґрунтування розробки, яке демонструє доцільність впровадження нової технології. У заключній частині роботи сформульовано висновки, що узагальнюють основні результати дослідження, а також наведено список використаної літератури.

**Ключові слова:** рідкий гній, анаеробне зброджування, змішування гомогенізація, біогаз, метантенк.

## ЗМІСТ

Вступ	8
1 АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ З ПЕРЕРОБКИ РІДКОГО ГНОЮ	10
1.1 Технології переробки рідкого гною свиней	10
1.2 Анаеробне зброджування гною	13
1.3 Типи анаеробних біореакторів	17
1.4 Залежність процесу зброджування від якості перемішування	22
1.5 Висновки до розділу	24
2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ГІДРАВЛІЧНОГО ПЕРЕМІШУВАННЯ РІДКОГО ГНОЮ	26
2.1 Моделювання гідравлічного перемішування субстрату в метантенку	26
2.2 Оцінка достовірності запропонованого способу чисельного моделювання	31
2.3 Розробка удосконалення системи гідравлічного перемішування	35
2.4 Висновки до розділу	38
3 ЛАБОРАТОРНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ГІДРАВЛІЧНОГО ПЕРЕМІШУВАННЯ РІДКОГО ГНОЮ	39
3.1 Результати чисельного моделювання процесу	39
3.2 Лабораторні дослідження процесу	43
3.3 Висновки до розділу	49
4 ОХОРОНА ПРАЦІ	50
4.1 Загальні вимоги охорони праці при обробці та переробці гною	50
4.2 Розробка проекту інструкції з охорони праці при роботі на біогазовій установці	51

4.3	Порядок дій у надзвичайних ситуаціях	53
4.4	Висновки до розділу	54
5	ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА УДОСКОНАЛЕНОЇ БЮГАЗОВОЇ УСТАНОВКИ	56
5.1	Вихідні дані	56
5.2	Розрахунок показників економічної ефективності	57
5.3	Висновки до розділу	58
	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	60
	БІБЛІОГРАФІЯ	62
	ДОДАТКИ	66

## ВСТУП

В більшості країн світу біогазові технології стали стандартом переробки біовідходів з метою отримання додаткових сировинних і енергетичних ресурсів. Головною причиною обмеженого застосування біогазових технологій в Україні є великі енерговитрати на технологічні потреби обладнання, при цьому слід зазначити, що основні енергетичні втрати виникають в метантенку. Інтенсифікація процесу метанового бродіння може здійснюватися мікробіологічними або інженерно-технологічними методами. Перемішування є ключовим способом підвищення ефективності роботи біогазової установки. Згідно ДСТУ 53790-2010, оптимальне перемішування субстрату в метантенку збільшує вихід біогазу на 50%. Результати експериментальних досліджень промислових апаратів метанового бродіння показали, що недостатнє перемішування знижує ефективний об'єм метантенка на 70% і є основною причиною відмови обладнання.

Застосування системи гідравлічного перемішування дозволяє підтримувати найбільш сприятливі гідродинамічні і температурні умови для життєдіяльності метаногенів спільноти бактерій протягом усього технологічного процесу. У зв'язку з цим, виникає задача розробки системи гідравлічного перемішування, орієнтованої на вдосконалення технологічного процесу з позицій енерго- і ресурсозбереження.

У літературі вкрай мало математичних моделей процесів гідродинаміки і масопереносу в метантенках, що пояснюється малою вивченістю фізичних аспектів процесів виробництва біогазу та складністю моделювання. Крім того, оцінка якості процесу перемішування на підставі цих моделей утруднена. З цього випливає необхідність розробки математичної моделі процесів гідродинаміки в метантенках з системою гідравлічного перемішування.

**Метою роботи** є підвищення ефективності анаеробної переробки органічних відходів в метантенку шляхом вдосконалення системи гідравлічного перемішування, на підставі математичного моделювання та дослідження процесів гідродинаміки.



Для досягнення зазначеної мети поставлено такі **задачі**:

1. На основі аналізу способів обробки рідкого гною визначити раціональну технологію та виявити її негативні сторони, які вимагають удосконалення.

2. Розробити модель процесу гідравлічного перемішування органічного субстрату для обґрунтування контрольованих і регульованих параметрів в метантенку біогазової установки (БГУ) та провести чисельне дослідження процесу гідравлічного перемішування в реакторі біогазової установки.

3. Розробити модернізований спосіб гідравлічного перемішування в метантенку біогазової установки, що забезпечує ефективність технологічного процесу та провести лабораторну перевірку отриманих теоретично положень.

4. Провести аналіз удосконаленого обладнання для обробки рідкого гною з точки зору охорони праці.

5. Визначити економічну ефективність удосконаленого обладнання для обробки рідкого гною.

*Об'єкт дослідження* - процес гідравлічного перемішування рідкого гною в метантенку біогазової установки.

*Предмет дослідження* – закономірності взаємозв'язку інженерно-технологічних параметрів обладнання для гідравлічного перемішування рідкого гною.

*Методи дослідження.* Для дослідження технологічних і конструкційних параметрів обладнання для гідравлічного перемішування рідкого гною використовуються теоретичні і лабораторні методи. Теоретичні дослідження виконані із застосуванням основних законів гідродинаміки, чисельного моделювання та обробки даних на ПЕОМ. Під час експериментальних досліджень застосовували методи математичної статистики і методики планування багатofакторного експерименту. Для дослідження процесу було розроблено оригінальний стенд, лабораторні випробування експериментальної системи перемішування рідкого гною проведені на кафедрі ІТС ДДАЕУ із застосуванням спеціально розробленої лабораторної установки.

# 1 АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ З ПЕРЕРОБКИ РІДКОГО ГНОЮ

## 1.1 Технології переробки рідкого гною свиней

Переробка та утилізація рідкого гною свиней є важливою складовою сталою управління відходами в сільському господарстві. Основними проблемами, пов'язаними з накопиченням гною, є забруднення довкілля, емісія парникових газів, забруднення водних ресурсів та неприємний запах. Науковці активно досліджують різні технології для ефективної переробки та утилізації рідкого гною, спрямовані на зменшення екологічного впливу та покращення економічної ефективності виробництва.

Одним із найбільш досліджуваних та ефективних способів переробки рідкого гною свиней є анаеробне зброджування. Цей процес дозволяє не лише утилізувати органічні відходи, але й виробляти біогаз (метан), який може бути використаний для енергетичних потреб. Дослідження показують, що анаеробне зброджування значно зменшує вміст патогенів у гної, а також сприяє зниженню емісії парникових газів, таких як метан і аміак. За даними дослідження, технології анаеробного зброджування можуть забезпечити до 70% зменшення викидів метану у порівнянні з традиційними методами зберігання гною.

Аеробне компостування є іншим поширеним методом переробки гною, зокрема для твердих залишків, що утворюються після розділення рідкої і твердої фракції гною. Компостування забезпечує окислення органічних речовин, що знижує об'єм гною та сприяє утворенню високоякісних добрив. Однак аеробне компостування має обмежену ефективність для рідкої фракції гною, що обмежує його використання в умовах значної кількості рідких відходів, таких як на свинофермах.

Механічне розділення (сепарація) рідкого гною на тверду та рідку фракції є важливою попередньою стадією для подальшої переробки. Ця технологія дозволяє ефективніше використовувати ресурси гною, адже тверда фракція може використовуватися для компостування або виробництва біоенергії, тоді

як рідка фракція підлягає додатковому очищенню або використанню як рідке добриво. Механічне розділення значно знижує вміст зважених речовин у рідкій фракції, що полегшує подальшу обробку .

Технології сепарації мають на меті розділення рідкого гною на тверду фракцію та рідку фракцію. Існує багато причин для розділення гною. Сепарація може зменшити об'єм рідкої фракції на 15-30% порівняно з необробленим гноєм (залежно від типу та ефективності сепаратора). Рідка фракція зазвичай потребує мало або зовсім не потребує перемішування перед внесенням. При внесенні на трав'яні угіддя вона менше забруднює листя рослин і, завдяки нижчому вмісту сухої речовини, швидше проникає в ґрунт після застосування та зменшує викиди аміаку порівняно з необробленим гноєм.

Однак загальні викиди аміаку з обох фракцій – твердої та рідкої – під час зберігання і внесення можуть бути вищими, ніж з необробленого гною, що значною мірою залежить від технік зберігання твердої фракції. Тому, якщо використовуються технології сепарації, важливо накривати тверду та рідку фракції під час зберігання. Залежно від використаної техніки сепарації, рідка фракція може мати також нижчий вміст фосфору, оскільки більша частина фосфору зв'язана з органічною речовиною і розподіляється у тверду фракцію. Це може призвести до більш збалансованого співвідношення азоту та фосфору в рідкій фракції і дозволити внесення на основі потреб в азоті без перевищення обмежень щодо внесення фосфору.

Тверда фракція, з набагато нижчим вмістом води, має більш раціональні логістичні витрати на транспортування на поля, які знаходяться на віддаленій відстані. Крім того, завдяки покращеній транспортованості, тверда фракція може бути вивезена за межі ферми як ґрунтовий амандмент або як субстрат для біогазової ферментації.

Існує багато типів технологій для розділення гною на тверду та рідку фракції. Це зазвичай включає відносно "грубу" сепарацію, оскільки ефективність розділення сухої речовини між фракціями може сильно відрізнятись в

залежності від численних факторів. Технології сепарації можуть бути пасивними або механічними. Пасивні техніки включають седиментацію, яку можна використовувати для шламів, і просочувальні стіни. Механічні техніки можуть бути більш ефективними, але вимагають більших інвестицій та витрат на експлуатацію. Механічні технології сепарації можуть включати ситові установки, стрічкові преси, шнекові преси, центрифуги-декантери. Хімічні добавки для коагуляції та флокуляції можуть бути використані для підвищення ефективності сепарації багатьох з цих технологій.

Мембранні технології та фільтрація є інноваційними методами для обробки рідкого гною. Мембрани можуть використовуватися для концентрування та видалення забруднювачів, таких як азот і фосфор, що дозволяє отримати очищену воду та концентровані поживні речовини, придатні для використання як добрива. Використання мембранної технології значно зменшує потребу в великих об'ємах зберігання гною і мінімізує ризики забруднення водних ресурсів .

Газифікація і піроліз є перспективними методами термічної переробки рідкого гною для отримання енергії. У процесі газифікації органічні речовини гною перетворюються на синтетичний газ (синтез-газ), який може бути використаний для виробництва тепла або електроенергії. Піроліз дозволяє отримати тверде паливо у вигляді біовугілля. Газифікація є екологічно чистим методом, що дозволяє мінімізувати викиди шкідливих речовин .

Використання водоростей для очищення рідкого гною є ще одним інноваційним підходом, який базується на здатності водоростей поглинати азот, фосфор та інші поживні речовини з рідких відходів. Цей метод дозволяє зменшити забруднення та одночасно отримувати біомасу водоростей, яку можна використовувати для виробництва біопалива або як добриво .

Технології переробки та утилізації рідкого гною свиней мають великий потенціал для покращення екологічної ситуації на фермах, зменшення викидів парникових газів та виробництва додаткових ресурсів, таких як біогаз та доб-

рива. Найбільш перспективними технологіями є анаеробне зброджування, механічне розділення гною, мембранні та термічні методи переробки. Кожна з цих технологій має свої переваги та недоліки, що потребує ретельного вибору відповідно до конкретних умов та потреб господарства.

## 1.2 Анаеробне зброджування гною

Анаеробне зброджування рідкого гною свиней є перспективним методом переробки органічних відходів, який знаходить широке застосування в агропромисловому секторі та є важливим елементом сталого розвитку тваринництва. Цей процес дозволяє ефективно утилізувати органічні відходи, отримуючи при цьому енергоносії у вигляді біогазу, а також добрива, які можуть бути використані в сільському господарстві.

Анаеробне зброджування — це біохімічний процес, під час якого органічні речовини розкладаються під дією мікроорганізмів в умовах відсутності кисню. Цей процес супроводжується утворенням біогазу, основними компонентами якого є метан ( $\text{CH}_4$ ) та вуглекислий газ ( $\text{CO}_2$ ). Літературні джерела свідчать, що біогаз із гною свиней містить до 60-70% метану, що робить його привабливим джерелом енергії для заміни традиційних викопних палив.

Процес анаеробного зброджування гною свиней відбувається в кілька етапів:

Гідроліз – розщеплення складних органічних сполук (білків, жирів, вуглеводів) на простіші сполуки.

Ацидогенез – утворення органічних кислот, водню, аміаку та вуглекислого газу.

Ацетогенез – перетворення органічних кислот на оцтову кислоту, водень та вуглекислий газ.

Метаногенез – утворення метану та вуглекислого газу в результаті діяльності метаногенних бактерій.

Переваги використання анаеробного зброджування

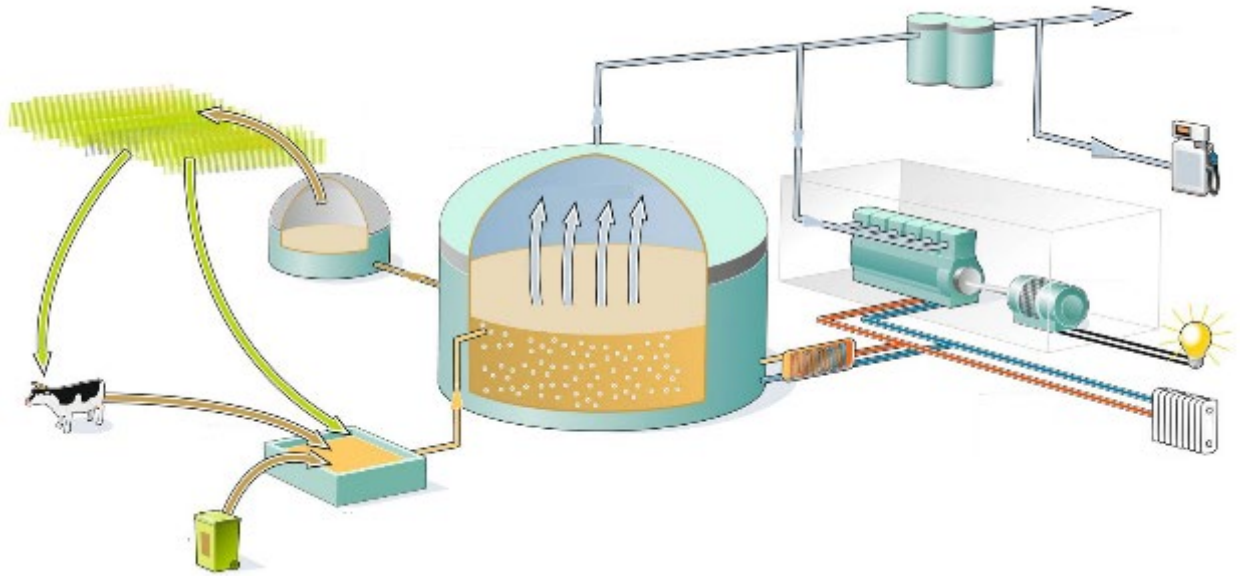


Рисунок 1.1 – Схема біогазової установки

Існує кілька технологій анаеробного зброджування (АЗ), хоча загальний принцип залишається незмінним. Це складний процес, але в основі він полягає в наступному:

**Підготовка сировини:** Вхідна сировина (органічні відходи) попередньо обробляється. У випадку твердих відходів, їх подрібнюють на дрібні частинки за допомогою шредера.

**Пастеризація:** Деякі установки передбачають стадію пастеризації, де відходи нагріваються в менших резервуарах протягом певного часу (зазвичай при температурі 70-80°C). Для підприємств, що обробляють харчові відходи, це є обов'язковою вимогою для знищення шкідливих патогенів.

**Головний процес зброджування:** Відходи надходять до основних біореакторів, яких може бути один або кілька, залежно від розміру біогазової установки. Основний процес АЗ відбувається в закритих анаеробних біореакторах у відсутності кисню. Є система змішування, яка перемішує вміст, щоб забезпечити рівномірність і ефективність природного процесу по всьому об'єму, максимізуючи виробництво біогазу. Біогаз збирається на верху дигестера та

захоплюється. Деякі установки розділяють процес на 2 стадії, де частина проходить в первинному біореакторі, а решта - у вторинному. Це займає від 15 до 30 днів залежно від технології АЗ.

Обробка залишків: Після обробки залишки (дігестат) надходять до окремого резервуара для зберігання. Це рідка маса, і зазвичай є домовленості для доставки її на сусідні ферми, де її розподіляють на полях як добриво. Альтернативно, деякі біогазові установки включають системи сушіння дігестату для отримання сухого дігестату. Його об'єм значно менший, що зменшує витрати на транспортування та потенційно має ринкову цінність (залежно від місцевих регуляцій і умов ринку).

Очищення біогазу: Біогаз виходить з біореакторів і проходить через систему очищення. Вона видаляє шкідливі гази та готує біогаз до спалювання в установці для когенерації тепла та електричної енергії (СНР).

Виробництво енергії: Потім біогаз надходить до двигуна, який генерує відновлювальну електрику та тепло. Електрика зазвичай продається в мережу або місцевим споживачам. Використання тепла може бути різноманітним і залежить від місцевих умов. Добрим прикладом є централізоване опалення.

Очищення біогазу до біометану: Альтернативно, на установці з очищення біогазу його очищають, внаслідок чого він стає біометаном. Це дозволяє ефективно використовувати біогаз (див. нижче для більш детальної інформації).

В загальному, технології біогазу діляться на дві категорії – вологі та сухі. Різниця в основному полягає в процентному вмісті сухої речовини в біореакторах, що, у свою чергу, впливає на весь процес.

Літературні джерела підкреслюють значний екологічний ефект від застосування цієї технології, оскільки вона дозволяє скоротити викиди парникових газів і аміаку, які є характерними для традиційних методів зберігання і переробки гною. Процес зменшує рівень викидів метану при зберіганні гною та запобігає забрудненню ґрунтових вод.

Важливим результатом анаеробного збродження є виробництво біогазу, який може використовуватися для виробництва теплової та електричної енергії. За даними досліджень, виробництво біогазу з гною свиней дозволяє частково замінити викопні енергоносії та зменшити залежність фермерських господарств від зовнішніх джерел енергії.

Отримання добрив. Після збродження гною залишається субстрат, відомий як дигестат, який зберігає високу поживну цінність і може використовуватися як органічне добриво. Це забезпечує кругове використання поживних речовин і мінімізує потребу в синтетичних добривах.

Зниження патогенності та неприємних запахів. Анаеробне збродження значно знижує кількість патогенних мікроорганізмів у гної, що робить його більш безпечним для подальшого використання як добрива. Крім того, процес знижує неприємні запахи, які часто супроводжують традиційні методи обробки гною.

Продуктивність процесу анаеробного збродження залежить від кількох факторів. Один із ключових – це вологість та склад гною. Гній свиней має високу вологість, що позитивно впливає на анаеробний процес, але вміст ліпідів, білків і вуглеводів також важливий для збалансованої ферментації. Для ефективного процесу необхідно забезпечити стабільні температурні умови (35-40°C для мезофільних умов або 50-55°C для термофільних).

Також значну увагу дослідники приділяють коферментації гною з іншими органічними відходами, такими як сільськогосподарські залишки, харчові відходи або інші біомаси. Додавання різних видів відходів покращує процес біодеградації та підвищує вихід метану, завдяки збалансованому вмісту вуглецю та азоту.

Однак існують певні виклики, пов'язані з анаеробним збродженням гною свиней. Серед них – висока вартість побудови та експлуатації біогазових установок, необхідність забезпечення постійної температури та складність управління процесом для максимізації виходу біогазу. Деякі дослідження також



вказують на проблеми з ефективністю переробки рідкого гною, особливо за умов великих обсягів відходів.

Перспективи розвитку полягають у вдосконаленні біогазових установок, покращенні систем управління процесом ферментації, а також у впровадженні нових методів коферментації з іншими органічними відходами. Крім того, важливим напрямком є дослідження нових видів мікроорганізмів, які здатні підвищити ефективність метаногенезу в умовах переробки свинячого гною.

Анаеробне зброджування гною свиней є ефективним методом переробки органічних відходів, який дозволяє не лише зменшити екологічне навантаження на навколишнє середовище, але й отримувати цінні продукти – біогаз і органічні добрива. Подальший розвиток цієї технології потребує вдосконалення технічних аспектів та покращення економічної рентабельності біогазових установок.

### **1.3 Типи анаеробних біореакторів**

Біореактори з повним перемішуванням (рис. 1.2) мають змішувальну систему, яка забезпечує повне зважування осаду в реакторі. Об'єм стічних вод, що виходять з біореактора з повним перемішуванням, дорівнює об'єму вхідної сировини. Періодично перемішувані біореактори є підкатегорією повністю перемішуваних біореакторів, у яких перемішування здійснюється імпульсами, а осаду дозволяють осідати протягом тривалих періодів між перемішуванням. Біореактори з повним перемішуванням найкраще працюють, коли вміст твердих часток у гної становить від 3 до 6%. За нижчої концентрації твердих часток об'єм біореактора має бути значно більшим, і енергія, необхідна для перемішування та нагрівання реактора, може перевищувати кількість енергії, що виробляється в біогазі.



Рисунок 1.2 - Біореактор з повним перемішуванням

Потокові біореактори (рис. 1.3) схожі на біореактори з повним перемішуванням тим, що гній, який надходить у біореактор, витісняє відповідний об'єм матеріалу, і рівна кількість матеріалу виходить назовні. Однак вміст потокового біореактора є досить густим, щоб частинки не осідали. Гній переміщується через біореактор як суцільний потік, звідси й назва "потоковий біореактор". Для роботи цих біореакторів не потрібне механічне перемішування. Вміст твердих речовин у гної має становити щонайменше 15%, а деякі оператори рекомендують вміст до 20%. Це означає, що іноді потрібно додавати додаткові матеріали, щоб збільшити вміст твердих речовин у гної для використання потокового біореактора. У деяких конструкціях стічні води повертають на початок біореактора для інокуляції субстрату активними мікроорганізмами.



Рисунок 1.3 - Поточковий біореактор

Змішаний поточковий біореактор є запатентованою модифікацією поточкового біореактора, в якому гній проходить через жолоб у формі шпильки (рис. 1.4). Вміст біореактора нагрівається вздовж центральної перегородки, а стиснутий біогаз повторно вводиться в реактор, створюючи спіральний потік, що сприяє перемішуванню гною під час його руху по жолобу.

Біореактори з накритими лагунами використовують переваги низьких витрат на обслуговування лагун, одночасно збираючи біогаз під непроникним покриттям (рис. 1.5). Перша секція двосекційної лагуни накрита, тоді як друга залишається відкритою (рис. 1.6). Обидві секції необхідні для ефективної роботи системи. Рівень рідини в першій секції залишається постійним для сприяння ефективному розщепленню гною. Друга секція використовується для зберігання, і її рівень рідини змінюється в міру виведення стоків для використання на полях. Осад може зберігатися в першій секції накритих лагун до 20 років.

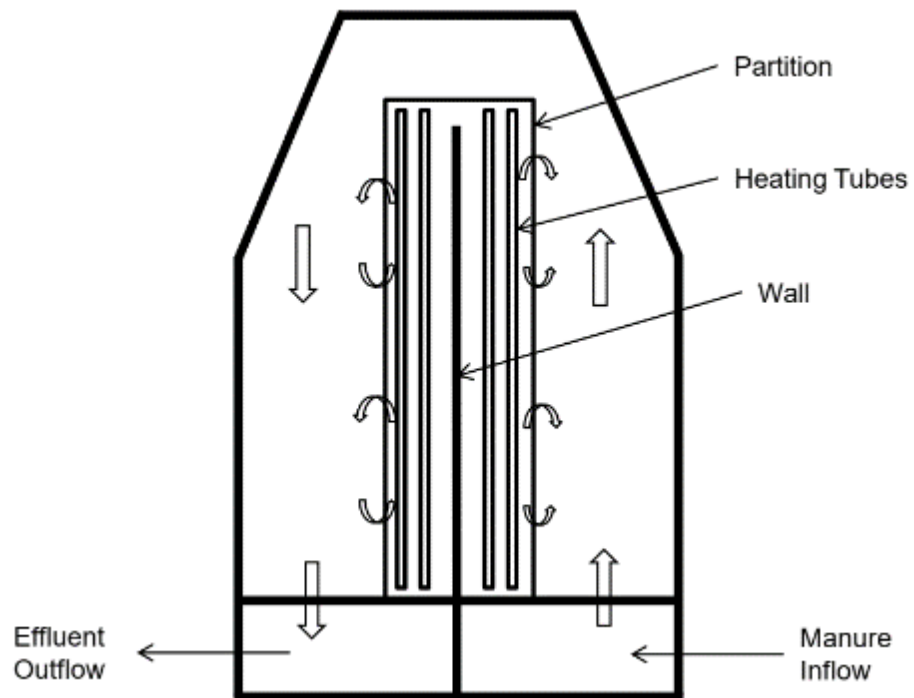


Рисунок 1.4 - Змішаний потоковий біореактор

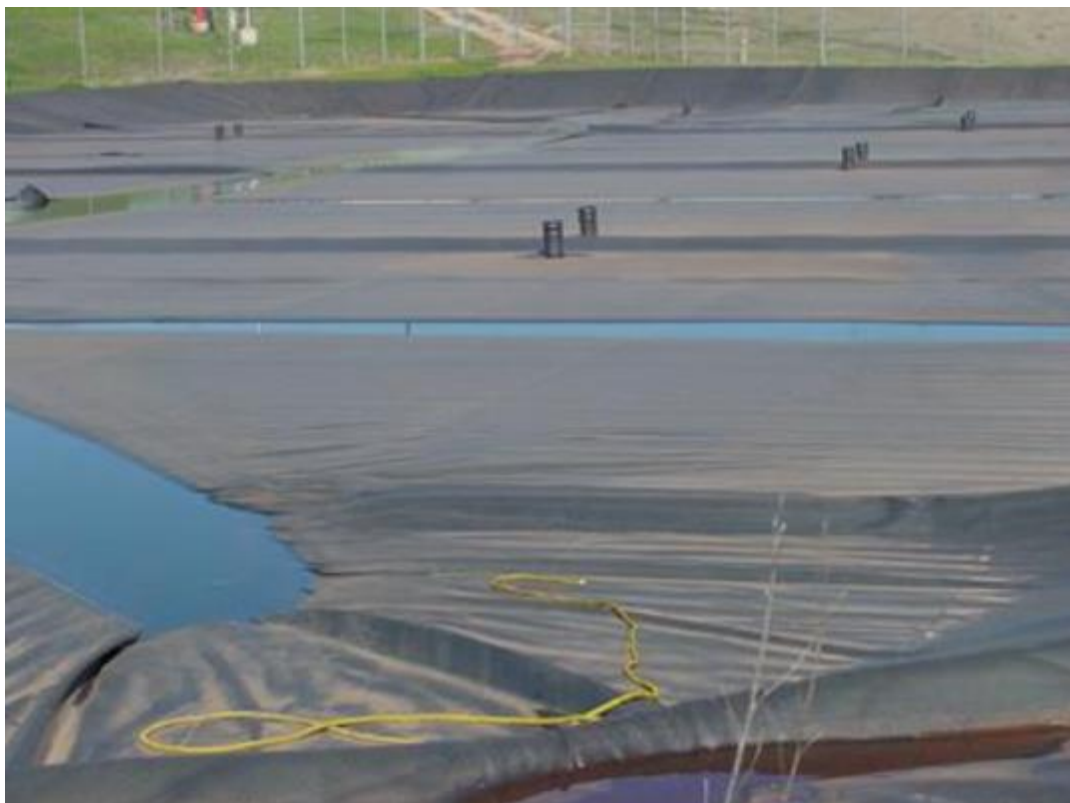


Рисунок 1.5 - Біореактор з накритими лагунами

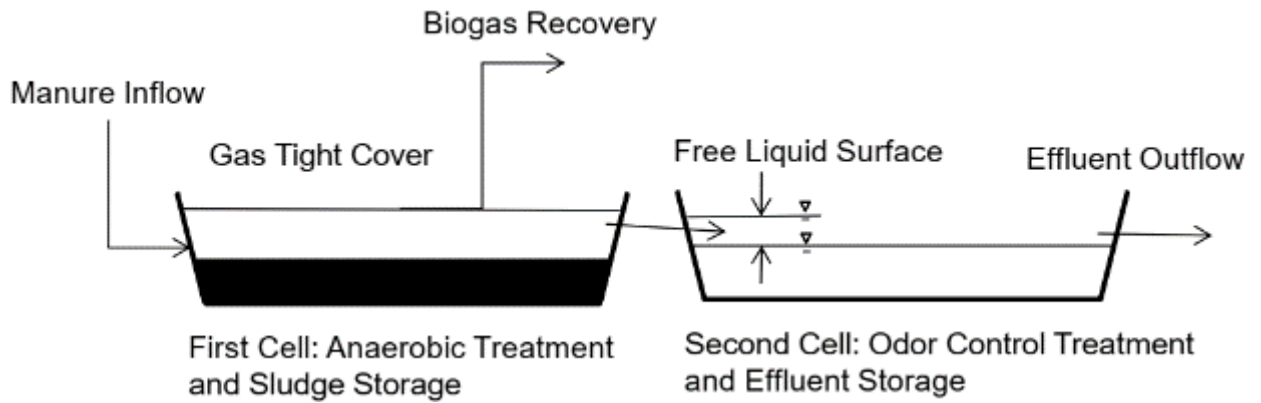


Рисунок 1.6 - Схема біореактора з накритими лагунами

Зберігання осаду в першій секції означає, що більшість поживних речовин добрив, особливо фосфор, залишаються в накритій лагуні до моменту очищення від осаду. Однак обігрів таких лагун для оптимального виробництва біогазу є дуже дорогим. Температура в накритих лагунах слідує за сезонними коливаннями, тому їх також іноді називають біореакторами з довільною температурою.

Анаеробні біореактори можуть бути організовані в одноступінчасті (всі процеси відбуваються в одному реакторі) або багаступінчасті системи (окремі реактори для різних процесів). Для цілей цього звіту ми розглянемо лише одноступінчасті біореактори: повністю змішані, з потоком впродовж (plug flow), змішані з потоком впродовж та покриті лагунні біореактори. Інші системи зброджування, описані нижче, можуть стати більш поширеними на фермах у водозборі Чесапекської затоки.

Системи з високим коефіцієнтом - це біореактори, які підвищують ефективність виробництва біогазу, утримуючи живу біомасу в реакторі зброджування. Реактори з фіксованою плівкою - це біореактори, в яких мікроорганізми, що виробляють біогаз, культивуються в біоплівках, що ростуть на твердих середовищах у реакторах. Реактори з контактною стабілізацією - це біореактори, в яких біологічно активні тверді частинки повертаються назад у реак-

тор після осадження або центрифугування рідкого продукту. Реактори з підніманням анаеробного осаду (UASB), реактори з індукованим осадом (IBR) та анаеробні реактори з послідовним пакетуванням (ASBR) - це біореактори, які використовують характеристики осадження твердих частинок для утримання мікроорганізмів у реакторі.

Анаеробні мембранні біореактори подібні до реакторів з фіксованою плівкою, оскільки біоплівка культивується на тонких текстильних листах. Рідини з високою органічною міцністю проходять через мембрану під тиском, де перетворюються на біогаз. Для підвищення виробництва біогазу в реактори UASB також додаються шматки тканини. Ці біореактори називаються реакторами з підвішеними частками, що прикріплені до поверхні.

Сухе анаеробне зброджування — це процес, при якому деградація твердих матеріалів відбувається в окремому реакторі перед перетворенням на метан. Це нова технологія, яка може потенційно забезпечити широке використання гною в спільному зброджуванні лігноцелюлозних матеріалів.

#### **1.4 Залежність процесу зброджування від якості перемішування**

Анаеробне зброджування є важливим процесом, що використовується для перетворення органічних відходів, таких як гній, у біогаз. Якість перемішування в цьому процесі має критичне значення, оскільки вона впливає на ефективність зброджування, добування біогазу та загальну продуктивність системи. Ось кілька ключових аспектів, які обґрунтовують важливість перемішування:

Рівномірне перемішування забезпечує кращий контакт між анаеробними мікроорганізмами та органічними речовинами. Згідно з дослідженнями, недостатнє перемішування може призвести до утворення «мертвих зон» в реакторах, де мікроорганізми не можуть ефективно перетворювати субстрат, що знижує загальну продуктивність системи.

Також погане перемішування може призвести до осадження твердих частинок на дно реактора, що зменшує доступність субстрату для мікроорганізмів. Наприклад, дослідження показали, що змішування підвищує розчинність органічних речовин у рідині, що сприяє їхньому швидшому зброджуванню.

Крім того, якість перемішування впливає на рівномірність розподілу температури та рН в реакторі, що є критичними параметрами для анаеробного зброджування. Дослідження показують, що коливання температури та рН можуть негативно вплинути на метаногенез. Ефективне перемішування допомагає уникнути таких коливань, забезпечуючи оптимальні умови для мікроорганізмів.

За даними досліджень, покращене перемішування може збільшити вихід біогазу до 30% у порівнянні з недостатньо перемішуваними системами. Наприклад, виявлено, що використання механічних змішувачів підвищує продуктивність біогазу завдяки поліпшенню доступності субстрату. Якісне перемішування дозволяє знизити час перебування субстрату в реакторі, що призводить до збільшення обсягу оброблюваного матеріалу і, відповідно, до підвищення загальної продуктивності системи.

Отже, змішування є важливим параметром у виробництві біогазу, а зміна швидкості змішування має значний вплив на процес зброджування. Наприклад, в дослідженнях використовували 10-літровий анаеробний реактор, що містив концентровану суміш гною великої рогатої худоби, для виробництва біогазу. Суміш гною мала 8% загальних твердих речовин (TS). Вони досліджували ефект двох типів змішування: безперервного та періодичного. Вони показали, що швидкість виробництва біогазу у безперервному методі є дещо вищою, ніж у періодичному. Також вимірювали швидкість виробництва метану, змінюючи положення мішалки в танках, що містили низько-концентровану суміш (TS=5%). Вони показали, що переміщення мішалки в танках з низьким органічним навантаженням не мало великого впливу на швидкість виробництва метану, і що швидкість виробництва метану була майже однаковою у всіх біогазових реакторах. У експериментальному дослідженні, яке виконувалося з

використанням чотирьох лабораторних реакторів об'ємом 3,73 л, було виявлено, що фактор змішування збільшив швидкість виробництва біогазу в порівнянні з підходом без змішування.

Однак існуючі дослідження показали, що більшість опублікованих результатів, що стосуються впливу змішування на продуктивність анаеробних реакторів, пов'язані з маломасштабними експериментами. Тому це дослідження стосується продуктивності реальних біореакторів у масштабуванні з точки зору виробництва метану, якості стічних вод тощо, що вважається перевагою для дослідження.

Математичне моделювання має потенціал забезпечити логічне пояснення взаємозв'язку між параметрами змішування та кінетикою анаеробного зброджування. Слід зазначити, що біологічні процеси за своєю природою є складними, тому дуже важко розробити математичні моделі, які б відображали поведінку реальних систем. Також варто зазначити, що досягти повного змішування в реальних реакторах дуже складно, і неналежний режим змішування є більш поширеним, ніж ідеальне змішування.

Якість перемішування є критичним аспектом процесу анаеробного зброджування, що впливає на ефективність зброджування, виходу біогазу та загальну продуктивність системи. Дослідження свідчать про те, що оптимізація процесу перемішування може суттєво поліпшити результати анаеробного зброджування. Отже, для досягнення максимальних результатів у виробництві біогазу та зменшення негативного впливу на навколишнє середовище, важливо зосередитися на поліпшенні якості перемішування в системах.

## **1.5 Висновки до розділу**

Інтенсифікація процесу метанового бродіння може здійснюватися мікробіологічними або інженерно-технологічними методами. Перемішування є ключовим способом підвищення ефективності роботи біогазової установки. Згідно ДСТУ 53790-2010, оптимальне перемішування субстрату в метантенку



збільшує вихід біогазу на 50%. Результати експериментальних досліджень промислових апаратів метанового бродіння показали, що недостатнє перемішування знижує ефективний об'єм метантенка на 70% і є основною причиною відмови обладнання.

Застосування системи гідравлічного перемішування дозволяє підтримувати найбільш сприятливі гідродинамічні і температурні умови для життєдіяльності метаногенів спільноти бактерій протягом усього технологічного процесу. У зв'язку з цим, виникає задача розробки системи гідравлічного перемішування, орієнтованої на вдосконалення технологічного процесу з позицій енерго- і ресурсозбереження.

## **2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ГІДРАВЛІЧНОГО ПЕРЕМІШУВАННЯ РІДКОГО ГНОЮ**

Ефективне проектування метантенків з гідравлічним способом перемішування базується на практичних знаннях про фізичні властивості зброджуваної сировини та конструктивне забезпечення процесу.

При моделюванні необхідно враховувати конструктивно-технологічні особливості гідравлічного перемішування. Гідравлічне перемішування здійснюється шляхом створення багаторазових циркуляційних потоків в апараті. Циркуляційне перемішування відбувається при русі рідини по замкнутому контуру, при цьому рідина надходить в резервуар у вигляді затопленого струменя, що витікає з підвідного патрубка. Рідина перекачується по замкнутому контуру насосом. Гідравлічні циркуляційні системи вимагають ретельного вибору відповідно до розмірів і формою реактора, щоб забезпечувати достатнє перемішування субстрату в усіх зонах реактора.

Слід зазначити, що особливості гідравлічного перемішування припускають низькі концентрації сухої речовини, а також низькі швидкості руху субстрату (не більше 0,6 м/с), що дозволяє забезпечити збереження умов для нормальної життєдіяльності метаногенеруючих бактерій.

### **2.1 Моделювання гідравлічного перемішування субстрату в метантенку**

Поряд з експериментальними дослідженнями процесу перемішування в метантенках останнім часом широко використовується числовий експеримент, який значно дешевше і доступніше. Для оцінки впливу перемішування на продуктивність метантенків Karim K. і Hoffmann R. провели ряд експериментів і прийшли до висновку, що істинний ефект перемішування не може бути виявлений в лабораторних масштабах. Проведення повномасштабних дослідів занадто дорого і часто неможливо. До того ж, з їх допомогою неможливо знайти значення основних характеристик процесу (таких, як швидкість, температура,

концентрація) у всій області рішення. На відміну від експерименту для розрахунку доступна практично вся досліджувана область метантенка і відсутні збурення процесу, що вносяться датчиками при експериментальному дослідженні.

Таким чином, чисельний метод дослідження є кращою альтернативою експерименту при оцінці впливу конструктивних параметрів системи гідравлічного перемішування на ефективність процесу метанового збродження.

При побудові математичної моделі прийняті наступні допущення:

- гідродинамічний режим циркуляції субстрату в метантенку передбачається турбулентним, із заданим профілем вектора швидкості на вході в резервуар;

- передбачається, що розглянута середовище (органічний субстрат) - в'язка рідина з щільністю і коефіцієнтом ефективної в'язкості, залежними від концентрації і температури;

- реологічна поведінка середовища ньютонівське;

- процес перемішування нестационарний;

- середня концентрація в процесі перемішування постійна;

- температура в метантенку постійна.

Для опису турбулентного течії субстрату в метантенке була обрана стандартна двухпараметрична  $k-\epsilon$  модель турбулентності. Дана модель використовується при моделюванні процесів перемішування в роботах Maier C., Weichselbaum W., Latha S., Bortman D., Sleing P., Meroney R.N., Colorado P.E., Mendoza A.M., Martinez T.M., A.G. Chmielewski і характеризується такими позитивними сторонами як стійкість до похибок, економічність і розумна точність для широкого діапазону промислових завдань.

При зроблених вище припущеннях математична модель даної задачі, отримана на основі рівнянь механіки суцільних середовищ, в декартовій системі координат має вигляд:

$$\begin{aligned} \rho(\alpha) \left( \frac{\partial V_x}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_x}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_e(\alpha) \frac{\partial V_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_e(\alpha) \frac{\partial V_x}{\partial y} \right) + \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_e(\alpha) \frac{\partial V_x}{\partial z} \right) + \frac{\partial \mu_e(\alpha)}{\partial x} \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial \mu_e(\alpha)}{\partial y} \frac{\partial V_y}{\partial x} + \frac{\partial \mu_e(\alpha)}{\partial z} \frac{\partial V_z}{\partial x}, \end{aligned} \quad (2.1)$$

$$\begin{aligned} \rho(\alpha) \left( \frac{\partial V_y}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_y}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_e(\alpha) \frac{\partial V_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_e(\alpha) \frac{\partial V_y}{\partial y} \right) + \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_e(\alpha) \frac{\partial V_y}{\partial z} \right) + \frac{\partial \mu_e(\alpha)}{\partial x} \frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\partial \mu_e(\alpha)}{\partial y} \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial \mu_e(\alpha)}{\partial z} \frac{\partial V_z}{\partial y}, \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned} \rho(\alpha) \left( \frac{\partial V_z}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_z}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_z}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_e(\alpha) \frac{\partial V_z}{\partial x} \right) + \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_e(\alpha) \frac{\partial V_z}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_e(\alpha) \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial \mu_e(\alpha)}{\partial x} \frac{\partial V_x}{\partial z} + \frac{\partial \mu_e(\alpha)}{\partial y} \frac{\partial V_y}{\partial z} + \\ &+ \frac{\partial \mu_e(\alpha)}{\partial z} \frac{\partial V_z}{\partial z} - \rho(\alpha)g, \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} \rho(\alpha) \cdot \left( \frac{\partial k}{\partial t} V_x \frac{\partial k}{\partial x} + V_y \frac{\partial k}{\partial y} + V_z \frac{\partial k}{\partial z} \right) &= \frac{\partial}{\partial x} \left( \left( \mu(\alpha) + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \left( \mu(\alpha) + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right) + \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} \left( \left( \mu(\alpha) + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial z} \right) + 2\mu_T \left[ \left( \frac{\partial V_x}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial V_y}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial V_z}{\partial z} \right)^2 + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial x} \right)^2 + \right. \\ &+ \left. \frac{1}{2} \left( \frac{\partial V_x}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial V_y}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial y} \right)^2 \right] - \rho(\alpha)\varepsilon, \end{aligned} \quad (2.4)$$

$$\begin{aligned} \rho(\alpha) \cdot \left( \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} V_x \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + V_y \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} + V_z \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) &= \frac{\partial}{\partial x} \left( \left( \mu(\alpha) + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \left( \mu(\alpha) + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} \left( \left( \mu(\alpha) + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial z} \right) + \frac{2C_{\varepsilon 1} \varepsilon \mu_T}{k} \left[ \left( \frac{\partial V_x}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial V_y}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial V_z}{\partial z} \right)^2 + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial x} \right)^2 + \right. \\ &+ \left. \frac{1}{2} \left( \frac{\partial V_x}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial V_y}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial y} \right)^2 \right] - \frac{C_{\varepsilon 2} \rho(\alpha) \varepsilon^2}{k}, \end{aligned} \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial \rho(\alpha)}{\partial t} + V_x \frac{\partial \rho(\alpha)}{\partial x} + V_y \frac{\partial \rho(\alpha)}{\partial y} + V_z \frac{\partial \rho(\alpha)}{\partial z} + \rho(\alpha) \left( \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) = 0, \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + V_x \frac{\partial \alpha}{\partial x} + V_y \frac{\partial \alpha}{\partial y} + V_z \frac{\partial \alpha}{\partial z} = 0, \quad (2.7)$$

де  $V_x, V_y, V_z$  - компоненти вектора швидкості  $V$ ;

$\rho(\alpha)$  - щільність органічного субстрату;

$\alpha$  - частка (концентрація) органічного субстрату;

$t$  - час;

$x, y, z$  - декартові координати;

$k$  - турбулентна кінетична енергія,

$\varepsilon$  - швидкість дисипації турбулентної кінетичної енергії.

Ефективне значення в'язкості органічного субстрату  $\mu_e$  дорівнює сумі ламінарної і турбулентної складових:  $\mu_e = \mu + \mu_T$ , а  $\mu_T$  - турбулентна в'язкість визначається співвідношенням Прандтля-Колмогорова  $\mu_T = \frac{C_\mu \rho(\alpha) k^2}{\varepsilon}$ . Емпіричні константи  $k$ - $\varepsilon$  моделі турбулентності мають таке значення:  $C_\mu = 0,09$ ,  $C_\varepsilon = 1,44$ .

При цьому щільність суміші  $\rho(\alpha)$  визначається щільністю фаз:

$$\rho(\alpha) = (1 - \alpha)\rho_1 + \alpha\rho_2, \quad (2.8)$$

де  $\rho_1$  - щільність несучої фази;

$\rho_2$  - щільність дисперсної фази.

Для отримання рішення системи диференціальних рівнянь необхідно задати граничні умови.

Початковий розподіл об'ємної концентрації при  $t = 0$  задається для умови осадження на дно резервуара у вигляді функції від координат  $\alpha_0 = f(x, y, z)$ .

Початкові гідродинамічні умови при  $t = 0$ :  $V = 0$ .

Граничні умови для швидкості:

- на твердих границях резервуара задаються умови прилипання рідини  $V=0$ ;
- на відкритій границі

$$(p_g - p)\bar{n} + 2\mu_e \mathbf{D} \cdot \bar{n} = 0, \quad (2.9)$$

де  $p_g$  - тиск газу,

$\bar{n}$  - нормаль до границі (вільної поверхні субстрату),

$\mathbf{D}$  - тензор швидкостей деформацій,  $\mathbf{D} = \frac{1}{2}(\nabla \vec{V} + (\nabla \vec{V})^T)$ , верхній символ

$T$  - символ транспонування.

- на вхідних отворах задаються профілі швидкості, відповідні сформованому профілю швидкості ньютонівської рідини в круглій трубі;

- вважаючи, що вихід з резервуара представляє трубу такої довжини, на виході з якої можна вважати рух рідини сталим, приймаємо в якості граничних умов на виході - умова стабілізації швидкості:  $\frac{\partial \vec{V}}{\partial \bar{n}_1} = 0$ , де  $\bar{n}_1$  - нормаль до по-

перечного перерізу вихідної труби.

Граничні умови для концентрації:

- на твердих і відкритій межах резервуара задаються умови  $\frac{\partial \alpha}{\partial \bar{n}} = 0$ , де  $\bar{n}$  - нормаль до границі;
- на вхідних отворах  $\alpha = \alpha_l$ , де  $\alpha_l = \text{const}$ ;
- на виході з метантенка - умова стабілізації концентраційних полів  $\left. \frac{\partial \alpha}{\partial \bar{n}_1} \right| = 0$ .

Таким чином, отримано математичну модель, що дозволяє проводити чисельні дослідження процесів гідравлічного перемішування в метантенку, а також визначати оптимальні конструктивні і режимні параметри реактора біогазової установки: форму, геометричні характеристики апарату і пристроїв,

що забезпечують циркуляцію субстрату, внутрішні конструктивні особливості, витрату органічного субстрату, час перемішування.

## 2.2 Оцінка достовірності запропонованого способу чисельного моделювання

Поставлена задача (2.1) - (2.7) вирішувалася з використанням програмного пакета COMSOL Multiphysics, призначеного для моделювання і вирішення завдань, заснованих на диференціальних рівняннях в частинних похідних. В основу програмного пакета закладений чисельний метод рішення задач прикладної фізики - метод кінцевих елементів. Програмне забезпечення пакету дозволяє здійснювати адаптивну побудову сітки і контроль помилок.

Достовірність отриманих результатів була доведена шляхом порівняння аналітичного рішення задачі витікання круглого струменя з отвору і рішення, отриманого із застосуванням програмного пакету COMSOL Multiphysics. В представлені аналітичні рішення, отримані Г. Шліхтінгом і В. Толміним, і експериментальні точки, отримані Г. Райхардтом. У COMSOL Multiphysics задача моделювалася в двовимірній геометрії з аксіальною симетрією. Робоча область представлялася у вигляді циліндра ( $0 \leq r \leq R$ ,  $0 \leq z \leq H$ ) з отвором радіуса  $r_0$  (центр отвору в точці з координатами  $(0,0)$ ). Для опису гідродинамічних процесів використовувалася  $k$ - $\epsilon$  модель турбулентності.

На рис. 2.1 зображені розподіл швидкості в круглому турбулентному вільному струмені і крива, отримана нами чисельним моделюванням. Як видно з рисунка в центральній області струменя спостерігається високий збіг всіх рішень і даних експериментального вимірювання, а ближче до границі струменя аналітичне рішення по Шліхтінга помітно відрізняється від інших. Чисельне рішення, отримане нами, досить добре узгоджується з аналітичним рішенням В. Толміна ( $\Delta \approx 0,02$ ) і експериментальними вимірами Г. Райхардта ( $\Delta \approx 0,019$ ), середнє відхилення від рішення Г. Шліхтінга становить  $\Delta \approx 0,032$ .

Таким чином, спостерігається достатня узгодженість між результатами, отриманими на підставі аналітичного рішення і в COMSOL Multiphysics.

Достовірність математичної моделі і методу рішення була проведена шляхом порівняння результатів експерименту і чисельних розрахунків часу перебування частинок потоку в апараті.

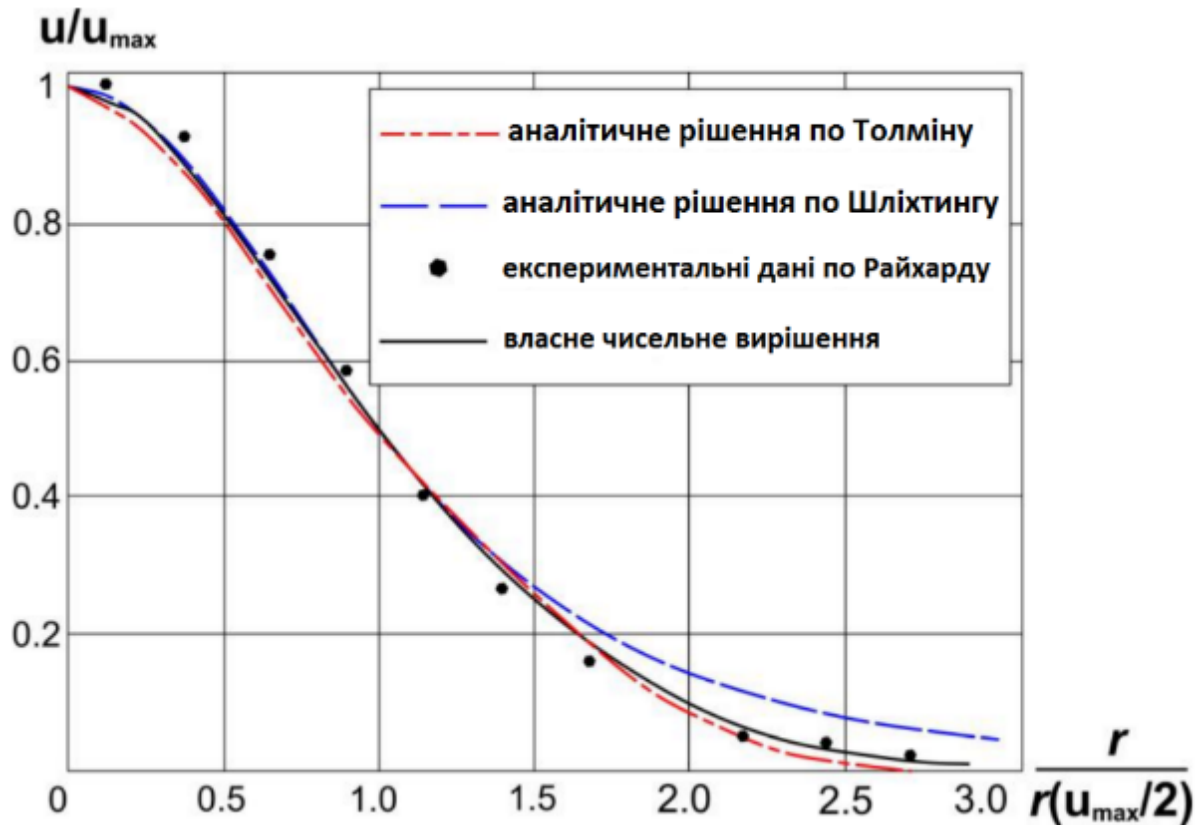


Рисунок 2.1 - Розподіл швидкостей в круглому турбулентному вільному струмені

Робоча область, змодельована в COMSOL Multiphysics, повністю відповідає експериментальній установці (рис. 2.1) і являє собою циліндричний резервуар з горизонтальним входним патрубком у верхній частині апарату, спрямованим до центру і вихідним патрубком по центру дна. Діаметр метантенка  $D=0,286$  м, висота метантенка  $H=0,495$  м, діаметр подає патрубку  $D_{\text{вх}} = 0,0183$



м, діаметр відповідного патрубку  $D_{\text{від}}=0,0254$  м. Витрата води живильному патрубку  $Q = 0,0125$  л/с. Обсяг резервуара  $W=32$  л.

Час перебування частинок потоку в апараті, що дорівнює гідравлічному часу утримання, розраховується за формулою:

$$HRT = \frac{W}{Q} = \frac{32}{0,0125} = 2560 \text{ с.} \quad (2.8)$$

Для визначення часу перебування, в потік на вході в апарат вводять індикатор, а на виході з апарату заміряють концентрацію індикатора як функцію часу. Ця вихідна крива називається функцією відгуку системи на типове збурення за складом потоку.

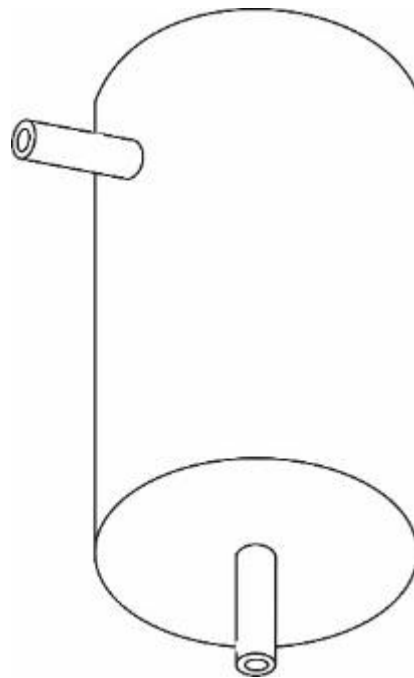


Рисунок 2.2 - Метантенк експериментальної установки

Як індикатор використовувалася пасивна домішка (родамін Б), яка не впливає на гідродинамічний режим в апараті. Використовувався стандартний імпульсний сигнал. Впорскування родаміну Б, концентрація якого 0,5 мг/мл,

здійснювався протягом 2 с (20 мл). Далі за допомогою шприца (20 мл) вводилася вода для прощтовхування родаміну Б. Експеримент проведений за допомогою оптичного методу площинний лазерно-індукованої флуоресценції (Planar Laser Induced Fluorescence, PLIF): концентрація визначалася за інтенсивністю світіння розчиненого в робочій рідині флуоресцентного барвника, що освітлюється лазерним ножем.

Для обґрунтування достовірності обраної моделі і методу рішення було проведено порівняння функції розподілу часу перебування, отриманої на основі експериментальних даних і чисельних розрахунків.

Функція розподілу часу перебування обчислювалася наступним чином:

$$E(\theta_i) = HRT \cdot \frac{\alpha_i}{\int_0^{1.9} \alpha_i dt}, \quad (2.8)$$

$$\theta_i = \frac{t_i}{HRT}, \quad (2.9)$$

де  $\theta_i$  - час перебування частинок потоку в апараті в момент часу  $t_i$ ;

$\alpha_i$  - концентрація флуоресцируючої рідини на виході в момент часу  $t_i$ .

Частка «мертвих зон» у метантенку визначалася як:

$$\frac{W_d}{W} = 1 - \int_0^{1.9} \theta \cdot E(\theta) d\theta, \quad (2.9)$$

де  $W_d$  - об'єм «мертвої зони» в метантенку;

$W$  - об'єм метантенка;

$\theta$  - час перебування частинок потоку в апараті.

На рис. 2.3 представлені розрахункова і експериментальна криві функції розподілу часу перебування частинок потоку в апараті.

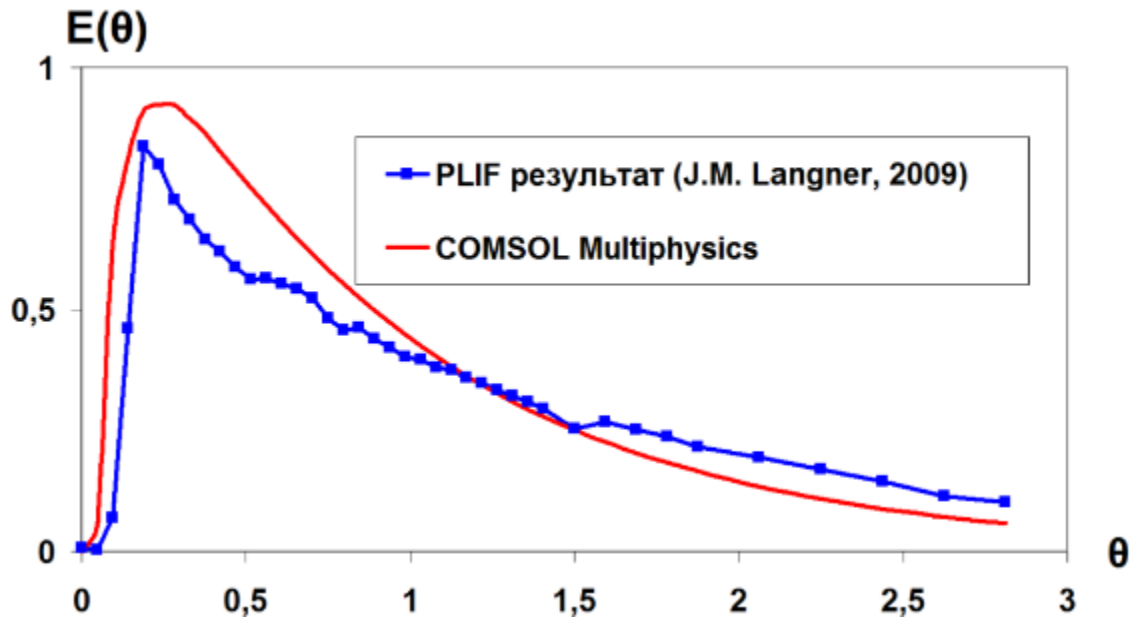


Рисунок 2.3 - Час перебування частинок потоку в потоці

Порівняльний аналіз розрахункової і експериментальної кривих показав, що використовувана модель адекватно описує гідродинамічні процеси, що відбуваються в метантенку.

### 2.3 Розробка удосконалення системи гідравлічного перемішування

Порівнювати будемо дві системи гідравлічного перемішування в метантенку циліндричної форми: типова і модернізована система. На рис. 2.4 представлені фотографії промислового метантенка з системою гідравлічного перемішування у вигляді зовнішньої циркуляційної труби.

*Типова система гідравлічного перемішування.* Рециркуляція органічного субстрату здійснюється за допомогою зовнішнього циркуляційного контуру, що представляє собою круглу трубу з відцентровим насосом, при цьому подача органічного субстрату здійснюється через бічну стінку в верхній частині метантенка, а відвід з придонної області апарату (рис. 2.5, а).

*Модернізована система гідравлічного перемішування.* На основі приведеного вище змодельований метантенк з системою гідравлічного перемішування, представлений на рис. 2.5, б.



Рисунок 2.4 - Зовнішня циркуляційна труба метантенка

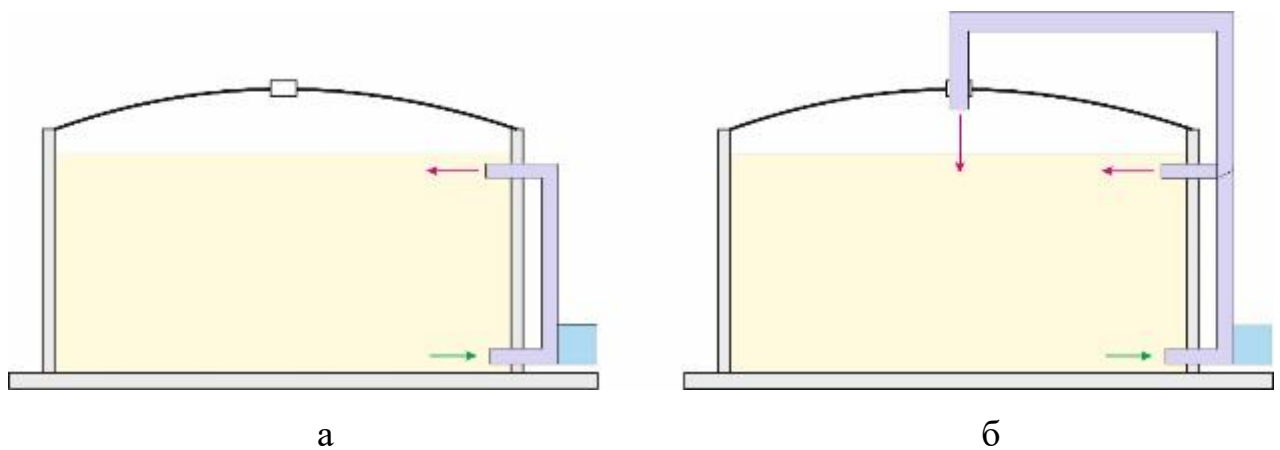


Рисунок 2.5 – Типова (а) та модернізована (б) система гідравлічного перемішування

Перевагою розробленої системи є те, що перемішування в метантенку здійснюється рециркуляцією субстрату, що подається не тільки через підвідний патрубков, розташований в верхній частині корпусу резервуару, але і через

патрубок по центру куполу. Таким чином, потік субстрату, що подається під тиском в придонну область метантенка, перешкоджає утворенню осаду, а субстрат, що подається на рівень дзеркала рідини, перешкоджає формуванню кірки на вільній поверхні.

Чисельні дослідження проведені для резервуарів з типовою і модернізованою системами перемішування з однаковими діаметрами вхідних і вихідних патрубків і при однаковій потужності на прокачування органічного субстрату. Потужність на прокачування органічного субстрату обрана, виходячи з вимог до швидкостей руху субстрату в метантенку ( $V \leq 0,6$  м/с), як найбільш сприятливого для життєдіяльності мікроорганізмів.

На рис. 2.6 представлені робочі області розглянутих метантенків.

Розміри досліджуваних метантенків: діаметр  $D=1,6$  м і висота  $H=1,6$  м; діаметр циркуляційних труб  $d_1=0,1$  м; відстань від дна апарату до центру відповідного патрубка  $h_1=1,5$  м; відстань від дна апарату до центру подає патрубка  $h_2=0,1$  м. Порівняння проведено для найбільш поширеного на практиці співвідношення висоти до діаметру метантенка  $H/D=1$ .

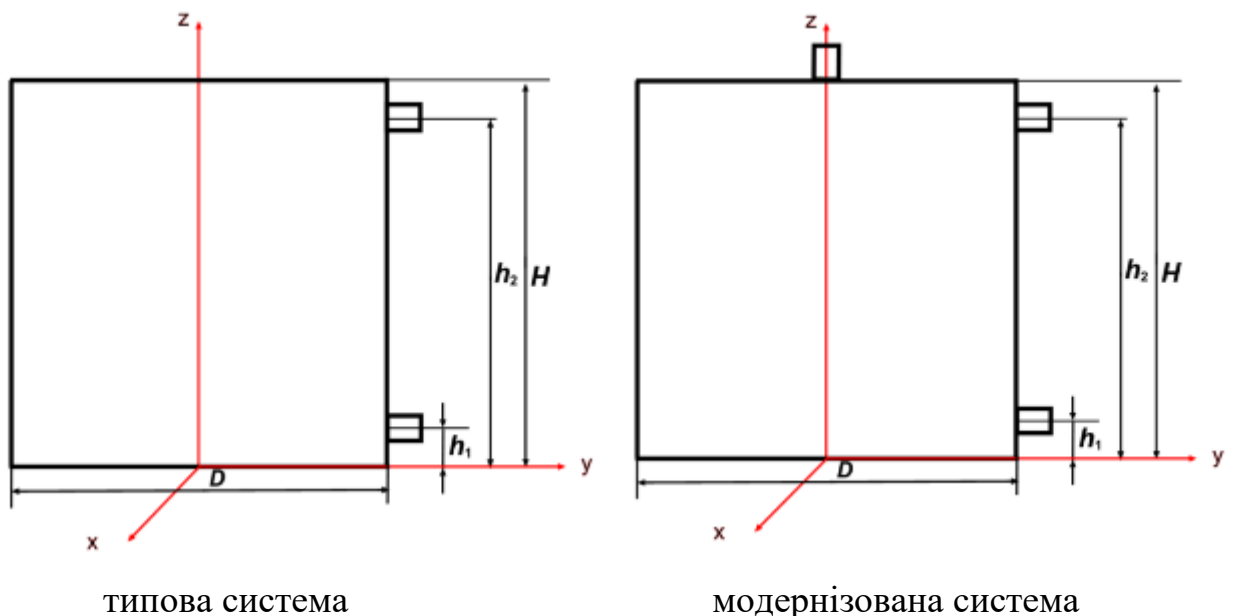


Рисунок 2.7 Метантенки з гідравлічною системою перемішування.  $H$  – висота метантенку;  $h_2$  – відстань від дна апарату до центру відповідного патрубка;  $h_1$  – відстань від дна апарату до центру подає патрубка,  $D$  – діаметр метантенка

## 2.4 Висновки до розділу

1. Розроблено моделі турбулентного течії субстрату в метантенку, для розв'язку якої використаємо програмний пакет COMSOL Multiphysics. Достовірність методу рішення була обґрунтована шляхом порівняння з експериментальними даними J. M. Langner. Отримані чисельні рішення узгоджуються з аналітичними рішеннями Ст. Толмина і Р. Шліхтінга, а також експериментальними вимірами Р. Райхардта.

2. Запропонована модернізована система гідравлічного перемішування в метантенку біогазової установки, відмітною особливістю якої є наявність двох вхідних патрубків: один з яких розташований в верхній частині корпусу резервуара, а другий – у верхній кришці корпусу резервуара.

### 3 ЛАБОРАТОРНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ГІДРАВЛІЧНОГО ПЕРЕМІШУВАННЯ РІДКОГО ГНОЮ

#### 3.1 Результати чисельного моделювання процесу

Задача вирішувалася з використанням програмного пакета COMSOL Multiphysics, призначеного для моделювання і вирішення завдань, заснованих на диференціальних рівняннях в частинних похідних. В основу програмного пакета закладений чисельний метод рішення задач прикладної фізики - метод кінцевих елементів. Програмне забезпечення пакету дозволяє здійснювати адаптивну побудову сітки і контроль помилок.

Процес перемішування визначається розподілом поля вектора швидкості в об'ємі метантенка. В процесі гідравлічного перемішування в метантенку виникають циркуляційні течії. На рис. 3.1 представлено розподіл ліній течій в об'ємі метантенків з розглянутими системами гідравлічного перемішування.

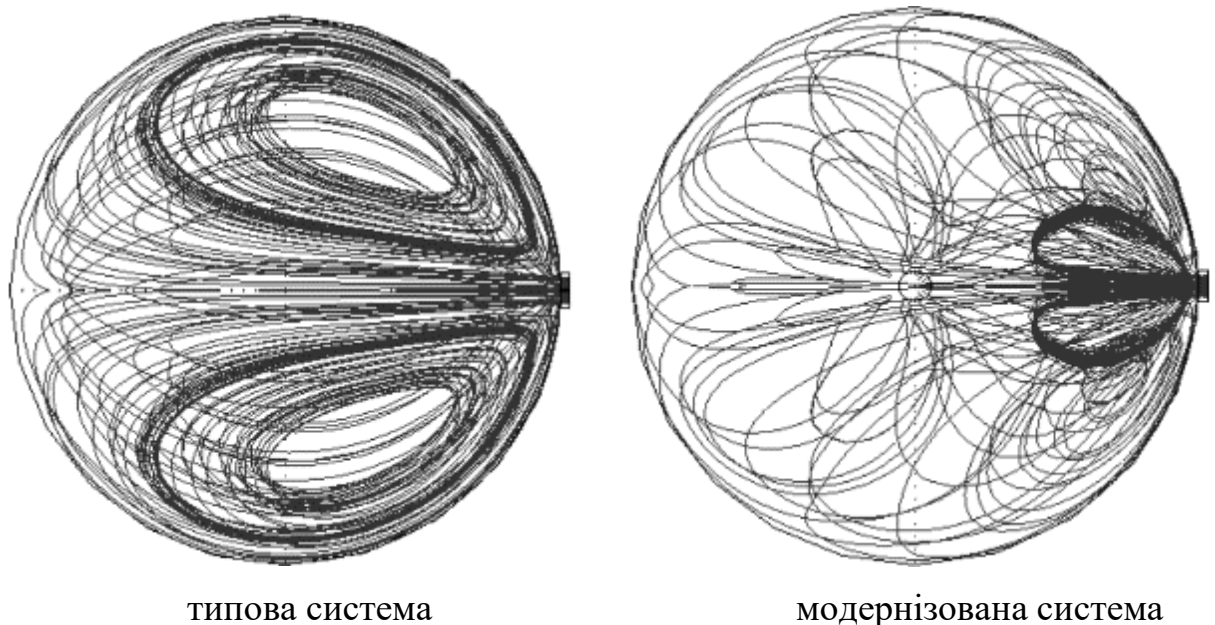


Рисунок 3.1 - Розподіл ліній течій в об'ємі метантенків з різними системами гідравлічного перемішування (вид зверху)

Відмінність у системах перемішування позначається на характері розподілу швидкості в метантенку. Розподіл компонент вектору швидкості на різних рівнях метантенка з типовою системою перемішування в площині  $x=0$  представлено на рис. 3.2.

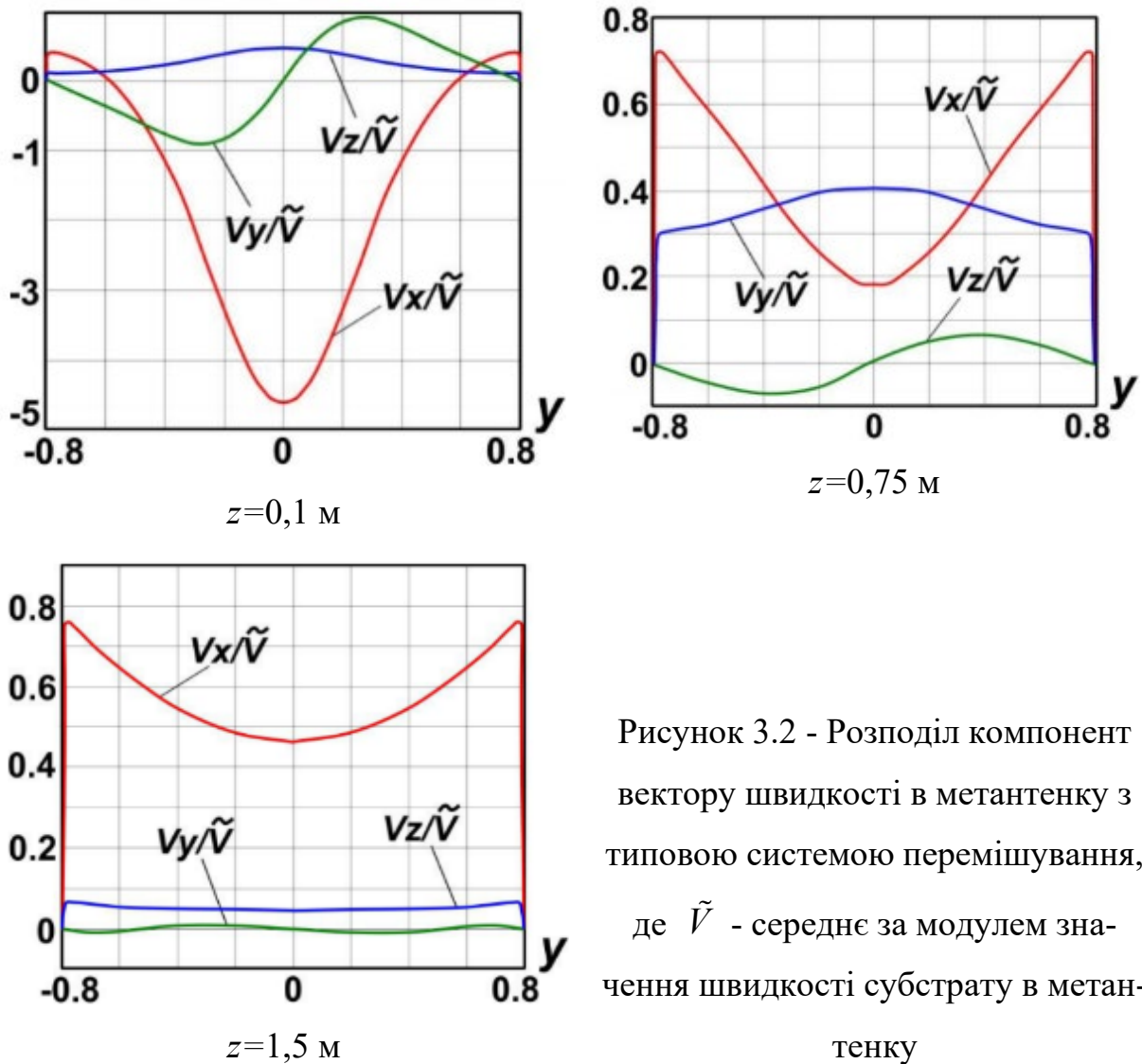


Рисунок 3.2 - Розподіл компонент вектору швидкості в метантенку з типовою системою перемішування, де  $\tilde{V}$  - середнє за модулем значення швидкості субстрату в метантенку

Рух середовища в нижній частині апарату визначається потоком з нагнітаючого патрубку, що забезпечує значне перевищення складової вектору швидкості  $V_x$  порівняно з компонентами  $V_y$ ,  $V_z$  (на рівні  $z=0,1$  м). При  $z=0,75$  м, в центрі метантенка значення  $V_y$  збільшуються порівняно з іншими компонентами вектора швидкості. При  $z=1,5$  м складова вектору швидкості  $V_y$  практи-



чно дорівнює нулю. Складова вектору швидкості  $V_x$  має максимальне значення в придонній області апарату, який поступово зменшується по центру апарату і зростає в пристінній області на рівні вихідних труб по мірі наближення до вільної поверхні.

На рис. 3.3 представлено розподіл компонент вектору швидкості на різних рівнях метантенка з модернізованою системою перемішування. Рух рідини біля вільної поверхні (на рівні  $z=1,5$  м) і в центральній частині апарату (на рівні  $z=0,75$  м) визначається поздовжньою складовою вектору швидкості  $V_z$ , а на рівні нижнього подає патрубку (на рівні  $z=0,1$ ) переважає  $V_x$  складова вектору швидкості.

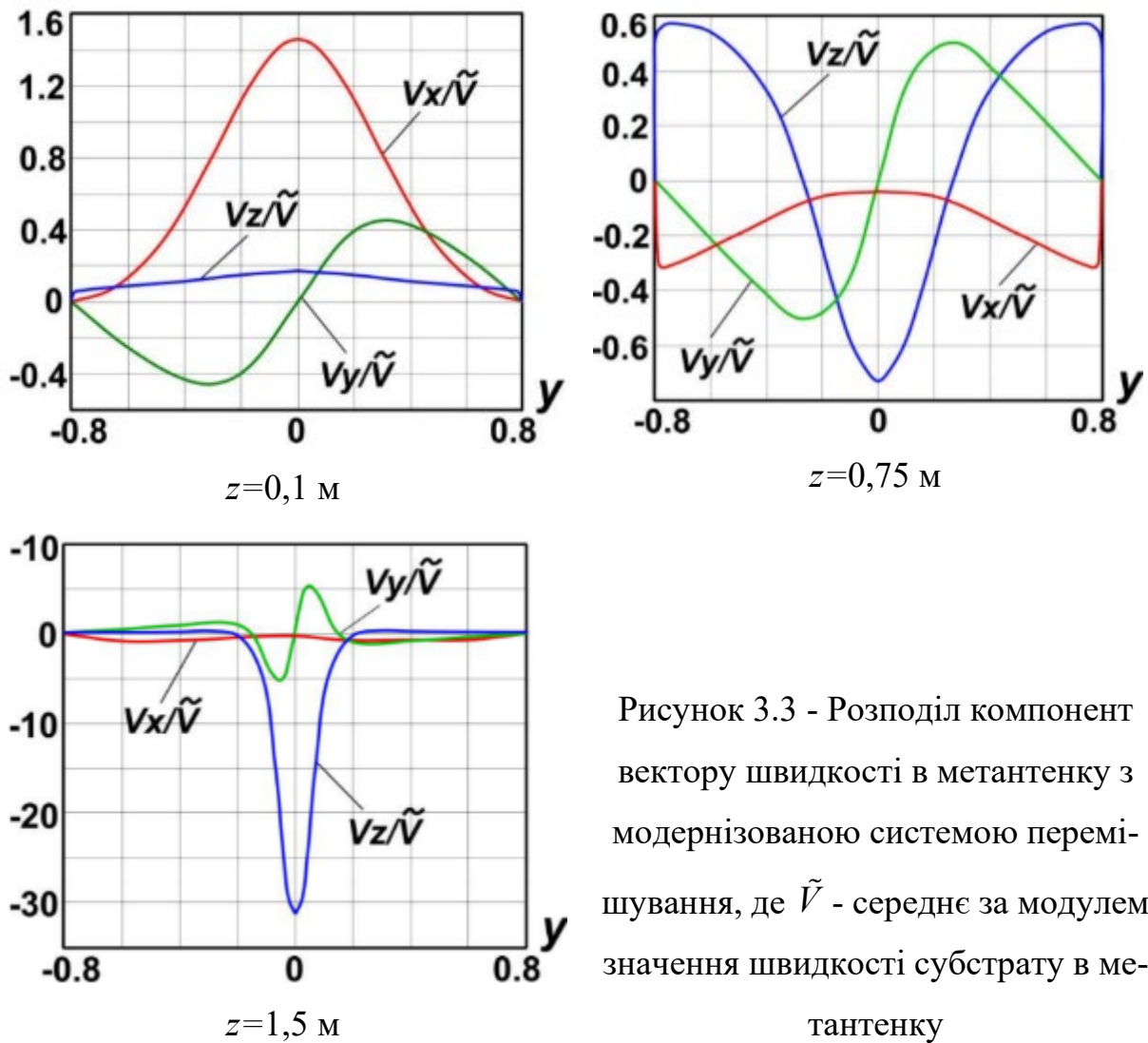


Рисунок 3.3 - Розподіл компонент вектору швидкості в метантенку з модернізованою системою перемішування, де  $\tilde{V}$  - середнє за модулем значення швидкості субстрату в метантенку

Для вивчення динаміки зміни розподілу твердої фази в об'ємі метантенка необхідно задати розподіл концентрації при  $t=0$ . У початковий момент часу воно задається у вигляді функції:

$$\alpha_0 = \alpha_{\max} \frac{\pi/2 - \arctg(b(z - h_0))}{\pi/2 + \arctg(bh_0)}, \quad (3.1)$$

де  $b$  - параметр, що характеризує ширину апроксимації висоти шару осаду;

$h_0$  - висота шару осаду;

$\alpha_{\max}$  - максимально можлива об'ємна концентрація дисперсної фази.

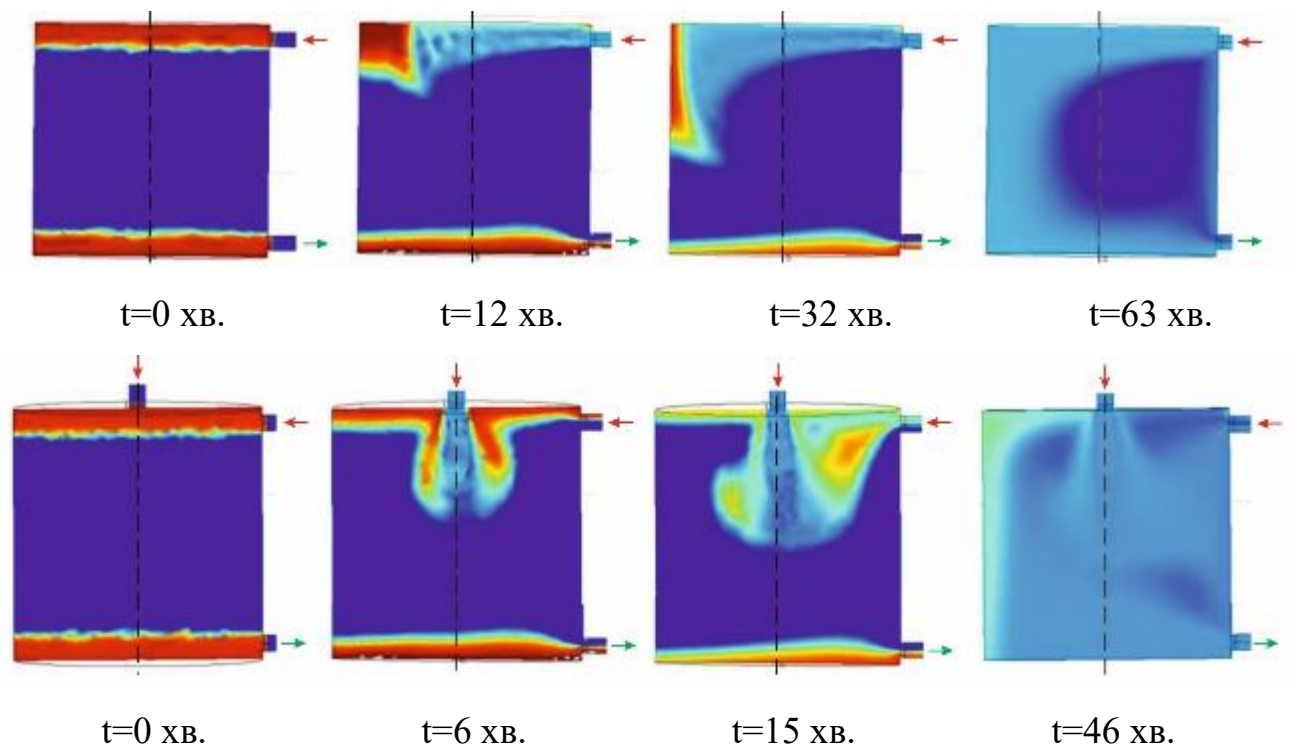


Рисунок 3.5 - Динаміка зміни концентраційних полів для метантенка з типовою (а) і модернізованої (б) системами перемішування

Концентраційні поля, відповідні розподілу твердої фази, визначаються картиною гідродинамічних полів в метантенку. На рис. 3.5 представлено порі-

вняння динаміки зміни концентраційних полів для розглянутих систем гідравлічного перемішування. Концентраційні поля, відповідні розподілу твердої фази, визначаються картиною гідродинамічних полів в метантенку.

Для типової і модернізованої систем перемішування осад розмивається під впливом потоку рідини, що випливає з верхнього патрубку, з часом розподіл дисперсної фази стає більш однорідним. Однак під впливом циркуляційних потоків в апараті з типовою системою перемішування відбувається зниження концентрації органічного субстрату в центральній частині апарату.

Отримані дані про розподіл швидкісних і концентраційних полів в метантенку представляють картину гідродинамічних процесів і процесів перемішування в апараті.

### **3.2 Лабораторні дослідження процесу**

Для більш цілісного уявлення процесів, що протікають під час перемішування, нами було проведено проведення лабораторні дослідження роботи типової та модернізованої систем. Для цього було реалізовано конструкцію лабораторного стенда, загальний вигляд якого представлено на рис. 3.6

В якості робочого середовища було використано воду, моделювання осаду проводили за допомогою подрібненої крейди, плаваючої кірки – двотактного мастила. Перекачування рідини проводили за допомогою насоса, з можливістю регулювання подачі в межах від 0 до 0,25 м<sup>3</sup>/год. Подачу насоса встановлювали виходячи з запропонованої вище швидкості руху рідини – 0,6 м/с та діаметрів патрубків 0,0125 мм на рівні 0,22 м<sup>3</sup>/год.

На першому етапі було проведено порівняння отриманих за допомогою програмного пакета COMSOL Multiphysics діаграм руху середовища та полів концентрацій з тими, які було отримано за допомогою лабораторного стенду. Як показали проведені дослідження, розподіл ліній течій в об'ємі метантенків с різними системами гідравлічного перемішування (вид зверху) має аналогічний до теоретичного (рис. 3.1) характер (рис. 3.7).

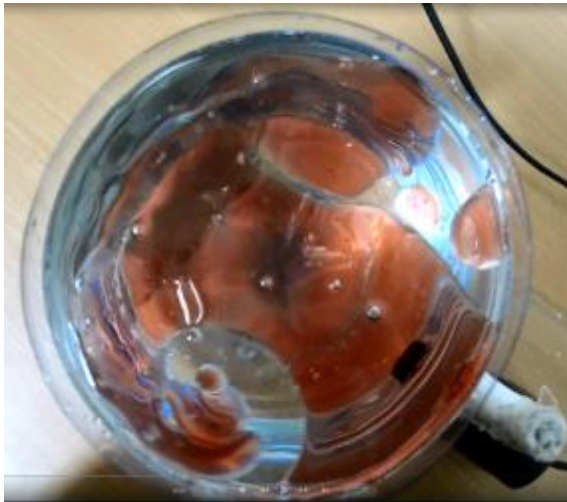


типова система



модернізована система

Рисунок 3.6 – Лабораторний стенд для дослідження різних систем перемішування



ТИПОВА СИСТЕМА



модернізована система

Рисунок 3.7 – Реальний розподіл ліній течій в об'ємі метантенків с різними системами гідравлічного перемішування (вид зверху)

Що стосується руху робочого середовища у вертикальній площині, то тут спостерігається наступна картина. При використанні типової системи перемішування, легка фракція циркулює у верхній частині метантенку, не переміщуючись всередину метантенку. В той же час, модернізована система дає змогу створити направлений потік, який підхоплює частинки легкої фракції та здвоєним потоком переміщує їх до центру реактора. Крім того, спостерігається ефект «розбивання» легкої фракції, що сприяє її рівномірному перерозподілу всередині реактора (рис. 3.8). Що стосується осаду на дні метантенку, то тут вертикальний потік в модернізованій системі збурює його та полегшує відбирання через нижній відвідний патрубок.



а



б

типова система

модернізована система

Рисунок 3.8 – Рух робочого середовища у вертикальній площині:

а – рух легкої фракції; б – процес перемішування

Якість змішування визначали візуально та за допомогою відбору проб через рівні проміжки часу. Після відбору проби відстоювали та визначали максимальну однорідність змішування виходячи зі вмісту крейди та мастила в кожній пробі, наприклад для часу 1,5 хв зразки проб приведено на рис. 3.9.

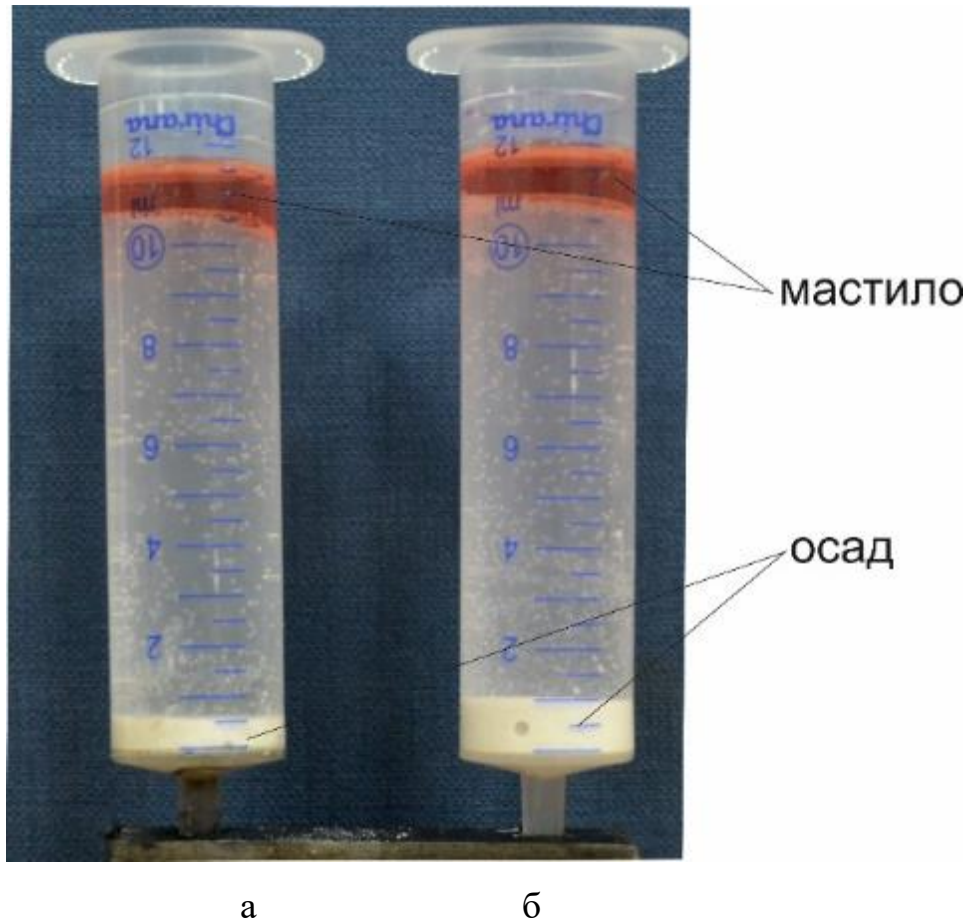


Рисунок 3.9 - Зразки проб для визначення однорідності змішування

За вмістом компонентів визначали однорідність змішування, використовуючи наступну методику.

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_1^n \frac{B_i}{B_o} \text{ при } B_i < B_o, \quad (3.2)$$

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_1^n \frac{2B_o - B_i}{B_o} \text{ при } B_i > B_o, \quad (3.3)$$

де  $n$  – число проб;

$B_i$  – фактичний вміст компонентів в суміші в  $i$ -ій пробі, мл;

$B_o$  – заданий вміст компонентів, мл.

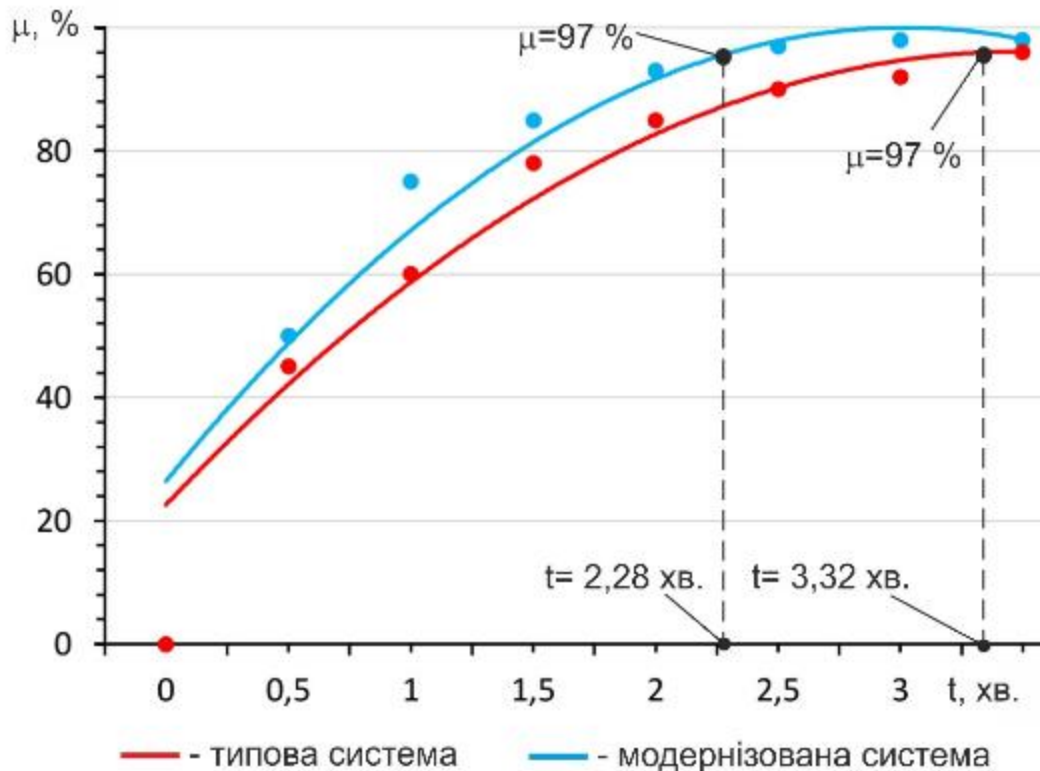


Рисунок 3.9 - Залежності однорідності змішування від часу

Фактичний вміст компонентів в суміші в  $i$ -ій пробі визначали наступним чином:

$$B_i = \frac{m_i}{m_{np}} \cdot 100, \quad (3.4)$$

де  $m_i$  – об'єм компонентів в пробі, мл;

$m_{np}$  – об'єм проби, мл.

В результаті проведених досліджень було отримано залежності однорідності змішування від часу для типової та модернізованої систем (рис. 3.10):



$$\text{типова система:} \quad \mu = -26,25 + 36,381t - 2,7143t^2, \quad (3.5)$$

$$\text{модернізована система:} \quad \mu = -30,143 + 42,548t - 3,4048t^2, \quad (3.6)$$

Як свідчать отримані дані, досягнення максимальної однорідності робочого середовища в реакторі, а саме 97%, досягається за 2,3 хв. при використанні модернізованої системи перемішування, що на 30 % менше, ніж при використанні типової схеми – 3,3 хв.

### 3.3 Висновки до розділу

1. Відмінність у системах перемішування позначається на характері розподілу швидкості в метантенку. Так рух рідини біля вільної поверхні (на рівні  $z=1,5$  м) і, особливо, в центральній частині апарату (на рівні  $z=0,75$  м) значно інтенсивніший для модернізованої системи перемішування за рахунок збільшення поздовжньої складової вектору швидкості  $V_z$ .

2. За допомогою програмного пакета COMSOL Multiphysics проведено моделювання процесу перемішування субстрату в метантенку об'ємом  $3 \text{ м}^3$ , в результаті чого встановлено, що для типової системи повний час перемішування складає 63 хв., а для модернізованої – 46 хв.

3. Дослідження процесу перемішування на лабораторному стенді свідчать про те, що досягнення максимальної однорідності робочого середовища в реакторі, а саме 97%, досягається за 2,3 хв. при використанні модернізованої системи перемішування, що на 30 % менше, ніж при використанні типової схеми – 3,3 хв. Це цілком підтверджує отримані за допомогою моделювання дані.

4. Модернізована система дає змогу створити направлений потік, який підхоплює частинки легкої фракції та здвоєним потоком переміщує їх до центру реактора. Крім того, спостерігається ефект «розбивання» легкої фракції, що сприяє її рівномірному перерозподілу всередині реактора. Що стосується осаду на дні метантенку, то тут вертикальний потік в модернізованій системі збурює його та полегшує відбирання через нижній відвідний патрубок.

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ

### 4.1 Загальні вимоги охорони праці при обробці та переробці гною

При обробці та переробці гною дотримання вимог охорони праці є критично важливим для захисту здоров'я працівників та зменшення негативного впливу на навколишнє середовище. Основні вимоги охорони праці в Україні регламентуються законодавством, яке враховує як національні, так і європейські стандарти.

По-перше, відповідно до статті 6 Закону України "Про охорону праці", підприємства зобов'язані проводити всебічну оцінку ризиків на всіх етапах обробки та переробки гною. Це включає в себе визначення небезпечних факторів, таких як:

Фізичні небезпеки (наприклад, механічні травми при використанні обладнання).

Хімічні ризики (викиди шкідливих газів або речовин).

Біологічні небезпеки (патогенні мікроорганізми, які можуть бути присутніми в гної).

Далі, стаття 18 цього ж закону передбачає навчання працівників з охорони праці. Всі працівники повинні проходити регулярні інструктажі, на яких їм пояснюють правила безпечної роботи, а також надають інформацію щодо використання засобів індивідуального захисту (ЗІЗ).

Забезпечення працівників відповідними ЗІЗ є обов'язковим. Згідно з пунктом 3.1.5 ДСанПіН 3.3.2.007-98 "Гігієнічні вимоги до організації праці в сільському господарстві", працівники повинні бути забезпечені:

Респираторами або масками для захисту дихальних шляхів від шкідливих газів, що можуть утворюватись під час розкладання органічних матеріалів.

Захисним одягом, що запобігає контакту шкіри з небезпечними матеріалами.

Захисними рукавичками для роботи з гноем та іншими агресивними речовинами.

Захисним взуттям для запобігання травм та забруднень.

Крім того, належна вентиляція в приміщеннях, де відбувається обробка гною, є критично важливою. Вимоги до вентиляції визначені Державними санітарними нормами і правилами (ДСанПіН), які покликані забезпечити якість повітря в робочих зонах та зменшити концентрацію шкідливих газів.

Контроль викидів забруднюючих речовин в атмосферу є ще одним важливим аспектом безпечної роботи. Згідно з Директивою 2010/75/ЄС про промислові викиди, підприємства, що обробляють органічні відходи, повинні дотримуватися екологічних стандартів та запроваджувати технології, які мінімізують викиди забруднюючих речовин у навколишнє середовище. Це може включати в себе використання очищення викидів, систем моніторингу та оптимізації процесів для зменшення шкідливих викидів.

Важливим аспектом є також екологічний моніторинг. Встановлення системи моніторингу для контролю за викидами, якість ґрунту та води, а також стан здоров'я працівників є невід'ємною частиною безпечної роботи в цій галузі.

Всі ці вимоги охорони праці не лише покликані захистити здоров'я працівників, але і забезпечити безпечне та екологічно чисте виробництво, що відповідає міжнародним стандартам. З дотриманням вищезазначених норм, процес обробки та переробки гною може стати не тільки безпечним, але і більш ефективним, що сприятиме розвитку сталого сільського господарства.

## **4.2 Розробка проекту інструкції з охорони праці при роботі на біогазовій установці**

Проект інструкції з охорони праці при роботі на біогазовій установці

### **1. Загальні положення**

1.1. Інструкція з охорони праці (далі — Інструкція) призначена для всіх працівників, які виконують роботи на біогазовій установці.

1.2. Перед початком роботи кожен працівник повинен ознайомитися з цією Інструкцією, а також з іншими нормативними документами, які регламентують охорону праці.

1.3. Всі працівники повинні проходити навчання та інструктажі з охорони праці, відповідно до законодавства України та внутрішніх нормативних актів підприємства.

## 2. Вимоги безпеки перед початком роботи

2.1. Перед початком роботи на біогазовій установці працівники повинні: Перевірити наявність та справність засобів індивідуального захисту (ЗІЗ): захисного одягу, респіраторів, окулярів, рукавичок та іншого.

Ознайомитися з планом евакуації на випадок надзвичайної ситуації.

Провести огляд робочого місця та перевірити відсутність небезпечних предметів і речовин.

2.2. У разі виявлення несправностей в обладнанні або небезпечних ситуацій, працівник зобов'язаний негайно повідомити керівництво та призупинити роботи.

## 3. Вимоги безпеки під час роботи

3.1. Під час роботи на біогазовій установці забороняється:

Входити в приміщення з відсутньою вентиляцією або з небезпечними концентраціями газів.

Використовувати відкритий вогонь поблизу біогазової установки.

Залишати без нагляду працююче обладнання.

3.2. Працівники повинні:

Дотримуватися встановлених режимів роботи та інструкцій до обладнання.

Регулярно перевіряти показники роботи біогазової установки, у тому числі рівень тиску, температуру та концентрацію газів.

Проводити змішування субстрату лише за наявності відповідних засобів захисту.

#### 4. Вимоги безпеки у разі виникнення надзвичайних ситуацій

4.1. У разі виявлення витоків газу або інших небезпечних ситуацій, працівник зобов'язаний:

Негайно припинити роботу.

Вимкнути електроживлення та відкрити вікна для провітрювання.

Повідомити керівництво та евакуюватися з небезпечної зони.

4.2. У випадку пожежі необхідно:

Використовувати вогнегасники, які розташовані в зоні біогазової установки.

Негайно повідомити службу порятунку та керівництво підприємства.

Дотримуватися плану евакуації.

#### 5. Заключні положення

5.1. Всі працівники зобов'язані дотримуватися вимог цієї Інструкції. У разі порушення, працівники можуть бути притягнуті до відповідальності.

5.2. Інструкцію з охорони праці при роботі на біогазовій установці слід переглядати та актуалізувати не рідше ніж один раз на рік або після зміни технологічного процесу.

5.3. Інструкція затверджується керівництвом підприємства та є обов'язковою для виконання всіма працівниками.

### **4.3 Порядок дій у надзвичайних ситуаціях**

Порядок дій під час пожежі на біогазовій установці

Негайна реакція на пожежу: при виявленні ознак пожежі (дим, полум'я, запаху горілого) потрібно негайно активувати сигнал тривоги (якщо такий є) та повідомити всіх працівників про загрозу. Якщо є можливість, не гаючи часу, вимкніть електроживлення обладнання.

Евакуація: залиште приміщення, слідуючи до найближчого виходу. Не користуйтеся ліфтами. Допоможіть іншим співробітникам, які потребують підтримки, покинути приміщення. Використовуйте запасні виходи, якщо основні виходи заблоковані.

Негайно зателефонуйте до пожежної служби за номером 101 (в Україні) або на місцевий номер служби порятунку. Повідомте про місце виникнення пожежі, тип установи (біогазова установка), і надайте інформацію про можливі небезпеки, такі як наявність небезпечних матеріалів або газів.

Оцінка ситуації: після евакуації залишайтеся на безпечній відстані від установи. Не повертайтеся до будівлі, поки не отримаєте підтвердження від пожежників, що це безпечно.

Допомога пожежним: при прибутті пожежної служби надайте їм всю необхідну інформацію про місцезнаходження вогню, обсяги горючих матеріалів та евакуйованих осіб. Слідкуйте за вказівками пожежників.

Після пожежі: не повертайтеся в будівлю, поки не отримаєте дозволу від пожежних служб. Проходьте медичний огляд, якщо були в контакті з димом або вогнем. Здійснюйте звітність про інцидент відповідно до внутрішніх правил підприємства та комунікуйте з керівництвом.

#### **4.4 Висновки до розділу**

Дотримання вимог охорони праці при обробці та переробці гною та роботі на біогазовій установці є критично важливим для забезпечення безпеки працівників і захисту навколишнього середовища. Основні вимоги включають проведення оцінки ризиків, навчання працівників, забезпечення засобами індивідуального захисту, належну вентиляцію приміщень та контроль викидів забруднюючих речовин.

Розробка інструкцій з охорони праці є важливим елементом, що забезпечує знання працівників щодо безпечних методів роботи та дій у надзвичайних ситуаціях. Інструкція повинна бути зрозумілою і доступною, а також регулярно переглядатися та актуалізуватися відповідно до змін у технологічному процесі.

Порядок дій у випадку пожежі чи інших надзвичайних ситуацій повинен бути чітко визначений, щоб забезпечити швидку та ефективну реакцію, включаючи евакуацію, інформування пожежної служби та надання допомоги рятувальникам. Здійснення цих заходів допоможе знизити ризики для здоров'я працівників та запобігти негативному впливу на екологію, що в кінцевому підсумку сприятиме сталому розвитку сільського господарства.

## 5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА УДОСКОНАЛЕНОЇ БІОГАЗОВОЇ УСТАНОВКИ

### 5.1 Вихідні дані

Задача даного розділу – провести порівняння типової системи перемішування субстрату в метантенку біогазової установки з отриманою в результаті досліджень модернізованою за техніко-економічними показниками. Порівняння будемо проводити для метантенку середньої потужності, об'ємом 150 м<sup>3</sup>, який розраховано для використання на свинофермі з поголів'ям 4 тис. голів. За основу візьмемо технічні характеристики метантенку біогазової установки БГУ-2-150 виробництва ТОВ «Агротехнолоджи», (Україна, [agrotechnology.com.ua](http://agrotechnology.com.ua)). Установка БГУ-2-150 включає в свій склад 2 метантенки об'ємом 150 м<sup>3</sup>, які оснащені гідравлічною системою перемішування субстрату, продуктивність при подачі якої складає 200 м<sup>3</sup>/год. При цьому потужність на привід качаючого вузла складає 32 кВт. Згідно технічної характеристики БГУ-2-150 повне перемішування субстрату в метантенку забезпечується роботою системи перемішування протягом 6 годин на добу. Модернізована система, розроблена в дипломній роботі, згідно отриманих результатів досліджень дозволяє зменшити час перемішування на 28...30 % за рахунок зміни напрямків потоків субстрату та встановлення додаткового подаючого патрубку. Ці заходи потребують збільшення потужності на привід качаючого вузла через збільшення необхідного рівня подачі субстрату та збільшення гідравлічних опорів в системі - подача 230 м<sup>3</sup>/год., потужність на привід - 38 кВт.

Таким чином, модернізована система переважає типову зменшенням часу роботи протягом доби, при цьому додатково необхідно встановити верхній підвідний патрубок та переобладнати качаючий вузол (насос та електродвигун його приводу) через необхідність збільшення продуктивності. Витрати на



переобладнання складуть приблизно 25 % відсотків від вартості типової гідравлічної системи перемішування субстрату. Вихідні дані для розрахунку зводимо в табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Вихідні дані до розрахунку техніко економічних показників

Показник	Варіанти	
	система БГУ-2-150	модернізована система
Продуктивність, м <sup>3</sup> /год.	200	230
Потужність приводу, кВт	32	38
Обслуговуючий персонал, люд.	1	1
Тривалість роботи протягом доби, год.	6	4,3
Строк служби, років	8	8
Коефіцієнт амортизаційних відрахувань, %	12,5	12,5
Коефіцієнт відрахувань на ТО та ремонт, %	11	11
Витрати на переобладнання, грн.	-	21250
Балансова вартість, грн.	85200	106450

## 5.2 Розрахунок показників економічної ефективності

Порівняння технологій прискореного компостування, зокрема базової та удосконаленої, буде проведено за питомими експлуатаційними витратами. До складу цих витрат входять різноманітні компоненти, такі як витрати на заробітну плату працівників, витрати на енергоресурси, амортизаційні відрахування, а також витрати на ремонт і технічне обслуговування обладнання. Для виконання розрахунків цих показників будемо використовувати методики та рекомендації

Таблиця 5.2 - Економічна ефективність застосування системи перемішування

Показники	Варіанти		Модерн. у % до базового
	система БГУ-2-150	модернізована система	
1	2	3	4
Продуктивність, м <sup>3</sup> /год.	200	230	115,0
Потужність приводу, кВт	32	38	118,8
Обслуговуючий персонал, люд.	1	1	100,0
Тривалість роботи протягом доби, год.	6	4,3	71,7
Строк служби, років	8	8	100,0
Витрати на переобладнання, грн.	-	21250	
Балансова вартість, грн.	85200	106450	124,9
Річні експлуатаційні витрати, грн.	243884,24	207486,13	85,1
в т.ч.: витрати на електроенергію	163987,20	139559,94	85,1
витрати на ТО та ремонт	9372,00	11709,50	124,9
амортизаційні відрахування	10650,00	13306,25	124,9
заробітна платня	59875,04	42910,44	71,7
Економія експлуатаційних витрат, грн.	-	36398,11	-
Строк окупності витрат на переобладнання, років	-	0,58	-

### 5.3 Висновки до розділу

Техніко-економічна оцінка типової та модернізованої систем гідравлічного перемішування субстрату в метантенку біогазової установки підтверджує ефективність результатів досліджень. Зменшення експлуатаційних витрат на

рівні 36398,11 грн. на рік досягається, в першу чергу, за рахунок економії витрат на електроенергію, що дозволяє окупити витрати на переобладнання системи за 0,58 року.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Технологічні рішення щодо обробки та переробки рідкого свинячого гною в світі схожі, спостерігається тенденція до розвитку біогазових технологій, світові лідери – Німеччина та Китай. Потенціал виробництва біогазу в Україні 22 млрд м<sup>3</sup>/рік. Перспективним заходом щодо підвищення енергетичної ефективності технології метанового бродіння є створення модернізованого способу гідравлічного перемішування в метантенку, що дозволяє створити найбільш сприятливі гідродинамічні і температурні умови для життєдіяльності бактерій метаногенів, а також забезпечує більш ефективне використання об'єму метантенка.
2. Розроблено моделі турбулентного течії субстрату в метантенку, для розв'язку якої використаємо програмний пакет COMSOL Multiphysics. Достовірність методу рішення була обґрунтована шляхом порівняння з експериментальними даними. Запропонована модернізована система гідравлічного перемішування в метантенку біогазової установки, відмінною особливістю якої є наявність двох вхідних патрубків: один з яких розташований в верхній частині корпусу резервуара, а другий – у верхній кришці корпусу резервуара.
3. За допомогою програмного пакета COMSOL Multiphysics проведено моделювання процесу перемішування субстрату в метантенку об'ємом 3 м<sup>3</sup>, в результаті чого встановлено, що для типової системи повний час перемішування складає 63 хв., а для модернізованої – 46 хв. Дослідження процесу перемішування на лабораторному стенді свідчать про те, що досягнення максимальної однорідності робочого середовища в реакторі, а саме 97%, досягається за 2,3 хв. при використанні модернізованої системи перемішування, що на 30 % менше, ніж при використанні типової схеми – 3,3 хв.

4. Розроблено вимоги охорони праці при роботі з біогазовою установкою, розраховано примусову вентиляцію приміщення, де встановлено газгольдер, приведено заходи щодо запобігання вибухонебезпечним ситуаціям та порядок основних дій у разі виникнення надзвичайної ситуації в ДДАЕУ.
5. Техніко-економічна оцінка типової та модернізованої систем гідравлічного перемішування субстрату в метантенку біогазової установки підтверджує ефективність результатів досліджень. Зменшення експлуатаційних витрат на рівні 36398,11 грн. на рік досягається, в першу чергу, за рахунок економії витрат на електроенергію, що дозволяє окупити витрати на переобладнання системи за 0,58 року.

## БІБЛІОГРАФІЯ

1. Паламар, В. М. Технологія анаеробного зброджування гною свиней для виробництва біогазу. Вісник аграрної науки, 2019, №3, с. 25-30.
2. Василенко, О. В., Клименко, В. О. Перспективи використання біогазових технологій на свинофермах. Агроекологічний журнал, 2020, №1, с. 15-22.
3. Коваленко, І. М., Левченко, М. П. Ефективність переробки рідкого гною свиней у біогазових установках. Технічні науки та технології, 2018, №4(14), с. 78-85.
4. Іваненко, М. В. Удосконалення технології механічного розділення рідкого гною свиней для зменшення забруднення довкілля. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України, 2019, №5, с. 49-54.
5. Литвиненко, Ю. С. Аеробне очищення гною свиней із використанням природних мікроорганізмів. Екологічні науки, 2021, №2, с. 33-39.
6. Герасимчук, В. В. Застосування біотехнологічних методів для утилізації свинячого гною та зниження екологічного навантаження. Екологія та природокористування, 2020, №7, с. 55-60.
7. Соколовська, Л. П. Оцінка ефективності використання біофільтрів для очищення стічних вод з свинарських комплексів. Вісник Дніпропетровського державного аграрно-економічного університету, 2019, №4, с. 87-92.
8. Бондар, І. М. Технологічні рішення для оптимізації утилізації рідких органічних відходів свинарства." Аграрна наука та практика, 2021, №1, с. 44-50.
9. Amon, T., Amon, B., Kryvoruchko, V., Zollitsch, W., Mayer, K., & Gruber, L. (2006). Biogas production from maize and dairy cattle manure – Influence of biomass composition on the methane yield. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 118(1-4), 173-182. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.05.007>

10. Angelidaki, I., Treu, L., Tsapekos, P., Luo, G., Campanaro, S., Wenzel, H., & Kougias, P. G. (2018). Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives. *Biotechnology Advances*, 36(2), 452-466. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2018.01.011>
11. Holm-Nielsen, J. B., Al Seadi, T., & Oleskowicz-Popiel, P. (2009). The future of anaerobic digestion and biogas utilization. *Bioresource Technology*, 100(22), 5478-5484. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.12.046>
12. Massé, D. I., Talbot, G., & Gilbert, Y. (2011). On farm biogas production: A method to reduce GHG emissions and develop more sustainable livestock operations. *Animal Feed Science and Technology*, 166-167, 436-445. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2011.04.075>
13. Mata-Alvarez, J., Mace, S., & Llabrés, P. (2000). Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives. *Bioresource Technology*, 74(1), 3-16. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(00\)00023-7](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(00)00023-7)
14. Neshat, S. A., Mohammadi, M., Najafpour, G. D., & Lahijani, P. (2017). Anaerobic co-digestion of animal manures and lignocellulosic residues as a potent approach for sustainable biogas production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 308-322. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.137>
15. Sawatdeenarunat, C., Surendra, K. C., Takara, D., Oechsner, H., & Khanal, S. K. (2015). Anaerobic digestion of lignocellulosic biomass: Challenges and opportunities. *Bioresource Technology*, 178, 178-186. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.09.103>
16. Ward, A. J., Hobbs, P. J., Holliman, P. J., & Jones, D. L. (2008). Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. *Bioresource Technology*, 99(17), 7928-7940. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.02.044>
17. Weiland, P. (2010). Biogas production: Current state and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 85(4), 849-860. <https://doi.org/10.1007/s00253-009-2246-7>

18. Angelidaki, I., Treu, L., Tsapekos, P., Luo, G., Campanaro, S., Wenzel, H., & Kougias, P. G. (2018). Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives. *Biotechnology Advances*, 36(2), 452-466.
19. Holm-Nielsen, J. B., Al Seadi, T., & Oleskowicz-Popiel, P. (2009). The future of anaerobic digestion and biogas utilization. *Bioresource Technology*, 100(22), 5478-5484.
20. Massé, D. I., Talbot, G., & Gilbert, Y. (2011). On farm biogas production: A method to reduce GHG emissions and develop more sustainable livestock operations. *Animal Feed Science and Technology*, 166-167, 436-445.
21. Mata-Alvarez, J., Mace, S., & Llabrés, P. (2000). Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives. *Bioresource Technology*, 74(1), 3-16.
22. Neshat, S. A., Mohammadi, M., Najafpour, G. D., & Lahijani, P. (2017). Anaerobic co-digestion of animal manures and lignocellulosic residues as a potent approach for sustainable biogas production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 308-322.
23. Sawatdeenarunat, C., Surendra, K. C., Takara, D., Oechsner, H., & Khanal, S. K. (2015). Anaerobic digestion of lignocellulosic biomass: Challenges and opportunities. *Bioresource Technology*, 178, 178-186.
24. Ward, A. J., Hobbs, P. J., Holliman, P. J., & Jones, D. L. (2008). Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. *Bioresource Technology*, 99(17), 7928-7940.
25. Weiland, P. (2010). Biogas production: Current state and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 85(4), 849-860.
26. Куценко Ю. М. Аналіз основних чинників анаеробного метанового збродження для отримання біогазу / Ю. М. Куценко, В. М. Коломицев // Праці ТДАТУ. – Мелітополь: ТДАТУ, 2011. – Вип. 11, т.3. – С. 49-56.
27. Кюрчев В. М. Альтернативне паливо для енергетики АПК : посібн. / В. М. Кюрчев, В. А. Дідур. Л. І. Грачова ; за ред. В. А. Дідура. – К.: Аграрна освіта, 2012. - 416 с.



28. Новітні технології біоенергоконверсії : Монографія / Я. Б. Блюм, Г. Г. Гелетуха, [та інш.] . – К.: «Аграр Медіа Груп», 2010. – 326 с.
29. Щербина О. М. Енергія для всіх: технічний довідник / О. М. Щербина – Ужгород : Видавництво Валерія Подяка. 2007. – 340 с.
30. Animal Agriculture In the U.S. - Trends in Production and Manure Management. <https://articles.extension.org/pages/74481/animal-agriculture-in-the-us-trends-in-production-and-manure-management>
31. Pig farms and manure management. <https://lpelc.exposure.co/pig-farms-and-manure-management>
32. Livestock Anaerobic Digester Database. <https://www.epa.gov/agstar/livestock-anaerobic-digester-database>
33. Evaluation of Manure Management Systems. <http://www.conservationwebinars.net/webinars/evaluation-of-manure-management-systems>.
34. The American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE). standard D384.2 "Manure Production and Characteristics", 2005.
35. Elnekave G. Tracing the mixing efficiency of a primary mesophilic anaerobic digester in a municipal wastewater treatment plant / G. Elnekave, N. Tufekci, S. Kimchie, G. Fresen Shelef // Environ. Bull. – 2006. – №15. – P.1098–1105.
36. Kalia A.K. Effect of mixing digested slurry on the rate of biogas production from dairy manure in batch fermenter / A.K. Kalia, S.P. Singh // Energy Sources. – 2001. – №23. – P.711–715.
37. Lu H. Macro-Mixing in a draft tube airlift bioreactor / H. Luo, Al-M. Dahhan // Chem. Eng. Sci. – 2008. – №63(6). – P.1572-1585.
38. Knadle B. Evaluation of Mixing in Anaerobic Digesters Using Hydraulic Recirculation / B. Knadle, C. Schmit, L. Johnson // WEFTEC. - 2009. - №17. -P. 6104-6120.
39. Schaefer R. Rehabilitation and Optimization of Anaerobic Digester Mixing Systems / R. Schaefer, J Gorgan // WATERCON. – 2012. – March 19.

## **ДОДАТКИ**

**ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**Інженерно-технологічний факультет**

Кафедра механізації виробничих процесів у тваринництві

## **Обґрунтування інженерно-технологічних параметрів обладнання для обробки рідкого гною**

демонстраційний матеріал до дипломної роботи освітнього ступеня «Магістр»

**Виконав:** студент 2 курсу, групи МГМ-1-23

Радзійон Антон Володимирович

**Керівник:** к.т.н., доцент

Трипутень Микола Мусійович

Дніпро 2024

## МЕТА І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

**Метою роботи** є підвищення ефективності анаеробної переробки органічних відходів в метантенку шляхом вдосконалення системи гідравлічного перемішування, на підставі математичного моделювання та дослідження процесів гідродинаміки.

Для досягнення зазначеної мети поставлено такі **задачі**:

1. На основі аналізу способів обробки рідкого гною визначити раціональну технологію та виявити її негативні сторони, які вимагають удосконалення.
2. Розробити модель процесу гідравлічного перемішування органічного субстрату для обґрунтування контрольованих і регульованих параметрів в метантенку біогазової установки (БГУ) та провести чисельне дослідження процесу гідравлічного перемішування в реакторі біогазової установки.
3. Розробити модернізований спосіб гідравлічного перемішування в метантенку біогазової установки, що забезпечує ефективність технологічного процесу та провести лабораторну перевірку отриманих теоретично положень.
4. Провести аналіз удосконаленого обладнання для обробки рідкого гною з точки зору охорони праці.
5. Визначити економічну ефективність удосконаленого обладнання для обробки рідкого гною.

**Об'єкт дослідження** - процес гідравлічного перемішування рідкого гною в метантенку біогазової установки.

**Предмет дослідження** – закономірності взаємозв'язку інженерно-технологічних параметрів обладнання для гідравлічного перемішування рідкого гною. **2**

## АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ

Переважаюча кількість, а саме біля 80 % рідкого гною – це вторинний продукт, який продукує галузь свинарства. Що стосується інших видів с.-г. тварин, то переважаюча більшість відходів - підстилковий (або твердий) гній. Тому, в першу чергу ми будемо брати до уваги галузь свинарства.

Таблиця 1 - Вихід гною на одиницю площі країни та с.-г угідь зокрема

Країна	Вихід гною від свиней, т/рік	Загальна площа країни, га	Вихід гною, т/га на рік	Площа с.-г. угідь*, га	Вихід гною, т/га с.-г. угідь на рік
Китай	525 600 000	959 700 000	0,55	556 300 000	0,94
Німеччина	30 660 000	35 737 600	0,86	17 000 000	1,80
<b>Данія</b>	13 140 000	4 239 400	3,10	2 200 000	<b>5,97</b>
Іспанія	28 470 000	50 599 000	0,56	29 700 000	0,96
<b>Нідерланди</b>	13 140 000	4 154 300	3,16	1 900 000	<b>6,92</b>
Франція	14 782 500	64 380 100	0,23	29 600 000	0,50
Польща	13 140 000	31 267 900	0,42	15 900 000	0,83
Росія	24 090 000	1 710 000 000	0,01	220 600 000	0,11
США	107 310 000	983 400 000	0,11	414 800 000	0,26
Бразилія	40 515 000	851 600 000	0,05	263 600 000	0,15
Білорусь	2 956 500	20 759 500	0,14	8 900 000	0,33
<b>Україна</b>	6 898 500	60 362 800	0,11	42 000 000	<b>0,16</b>

\* Дані <http://statinfo.biz>

## АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ

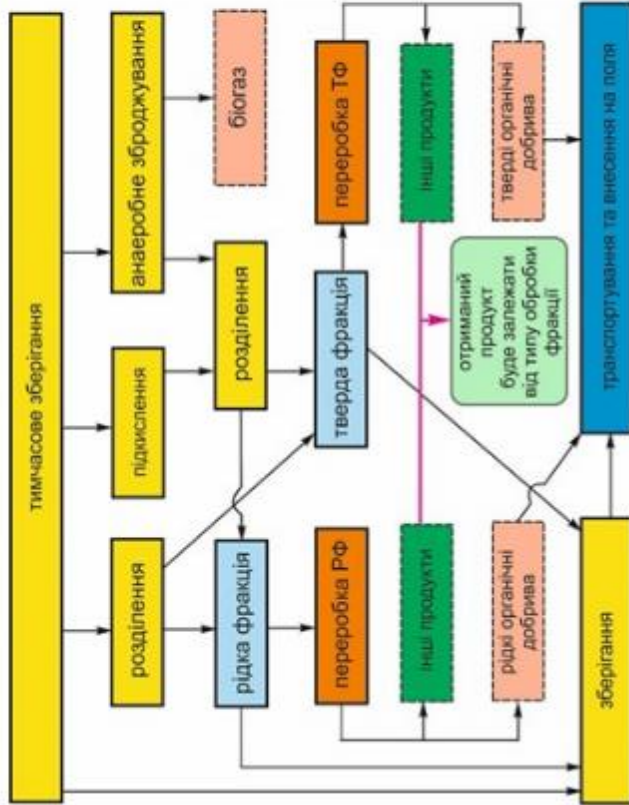


Рисунок 1 – Огляд технологій з переробки рідкого гною свиней

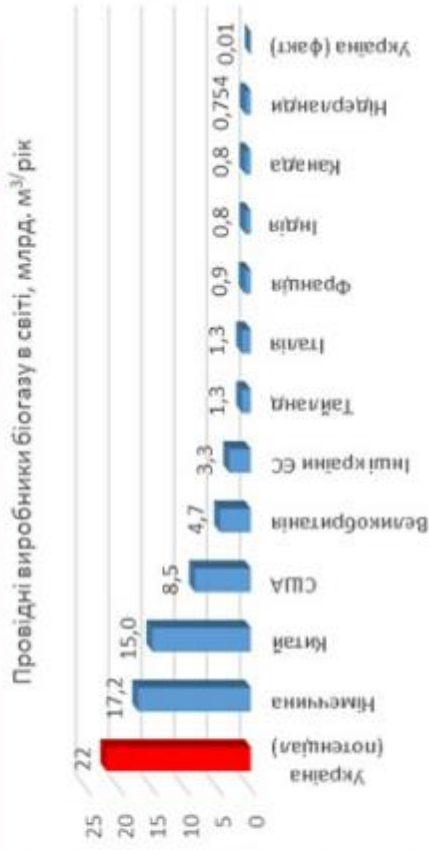


Рисунок 2 – Виробництво біогазу в світі (лідери)

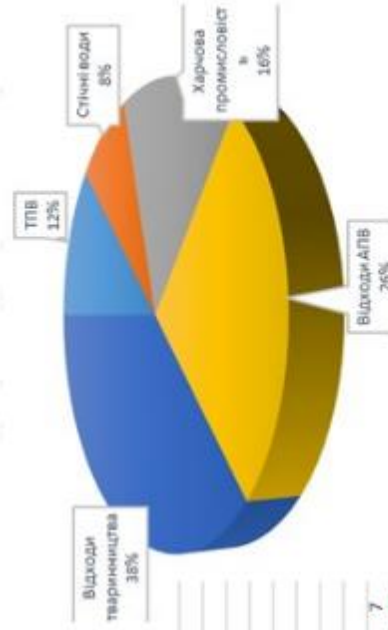


Рисунок 4 – Розподіл видів сировини для виробництва біогазу



Рисунок 3 – Кількість біогазових установок в країнах Європи

## АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ

Таблиця 2 - Вихід біогазу при різних способах перемішування

Спосіб перемішування	Вихід біогазу на літр субстрату, л/добу	Вихід метану на грам сухої речовини, л/г
Без перемішування	0,92	0,19
Механічне перемішування	1,14	0,23
Пневматичне перемішування	1,07	0,21
Гідравлічне перемішування	1,20	0,24

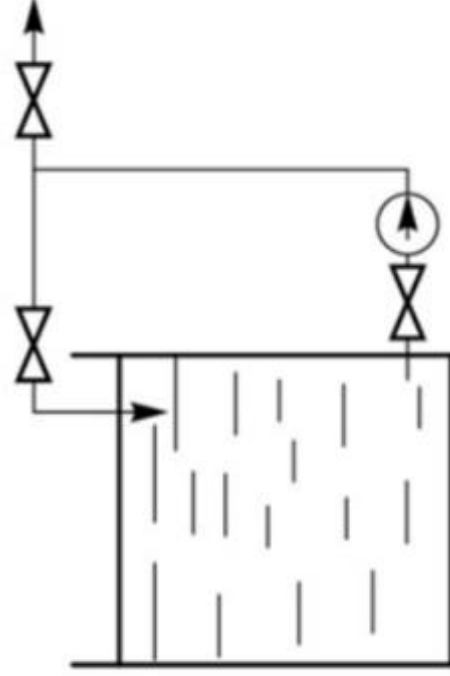


Рисунок 5 - Схема гідравлічного перемішування



Рисунок 6 - Система гідравлічного перемішування з зовнішньої циркуляційною трубою

## ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Математична модель руху субстрату в метантенку отримана на основі рівнянь механіки суцільних середовищ

$$\rho(\alpha) \left( \frac{\partial V_x}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_x}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_c(\alpha) \frac{\partial V_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_c(\alpha) \frac{\partial V_x}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_c(\alpha) \frac{\partial V_x}{\partial z} \right) + \frac{\partial \mu_c(\alpha)}{\partial x} \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial \mu_c(\alpha)}{\partial y} \frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\partial \mu_c(\alpha)}{\partial z} \frac{\partial V_x}{\partial z},$$

де  $V_x, V_y, V_z$  - компоненти вектора швидкості  $V$ ;

$\rho(\alpha)$  - щільність органічного субстрату;

$\alpha$  - частка (концентрація) органічного субстрату;

$t$  - час;

$x, y, z$  - декартові координати;

$k$  - турбулентна кінетична енергія,

$\varepsilon$  - швидкість дисипації турбулентної кінетичної енергії.

Задача вирішувалася з використанням програмного пакета **COMSOL Multiphysics**

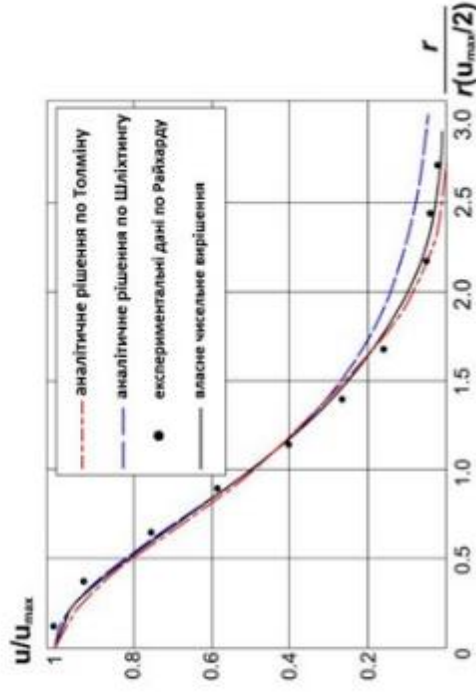


Рисунок 7 - Розподіл швидкостей в круглому турбулентному вільному струмені

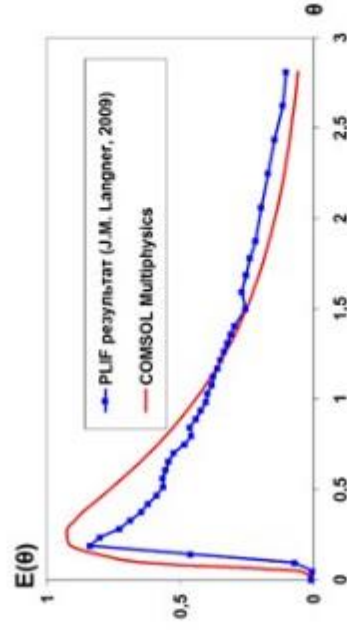


Рисунок 8 - Час перебування частинок потоку в потоці



## ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

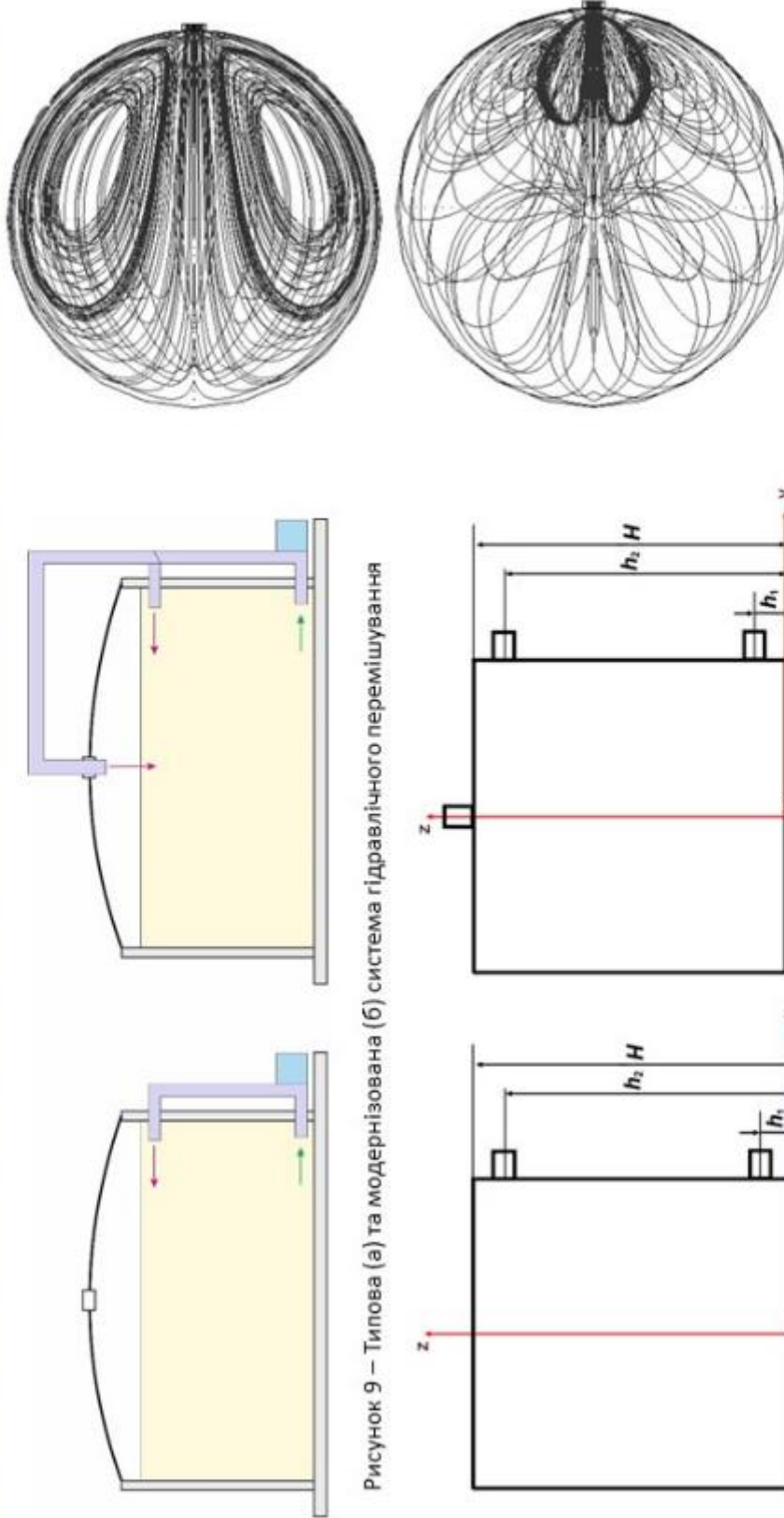


Рисунок 9 – Типова (а) та модернізована (б) система гідравлічного перемішування

Рисунок 10 – Моделі метантенків (COMSOL Multiphysics) з гідравлічною системою перемішування.  $H$  – висота метантенку;  $h_2$  – відстань від дна апарату до центру відповідного патрубку;  $h_1$  – відстань від дна апарату до центру подає патрубку,  $D$  – діаметр метантенка

Рисунок 11 - Розподіл ліній течій в об'ємі метантенків с різними системами гідравлічного перемішування (вид зверху)

## ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

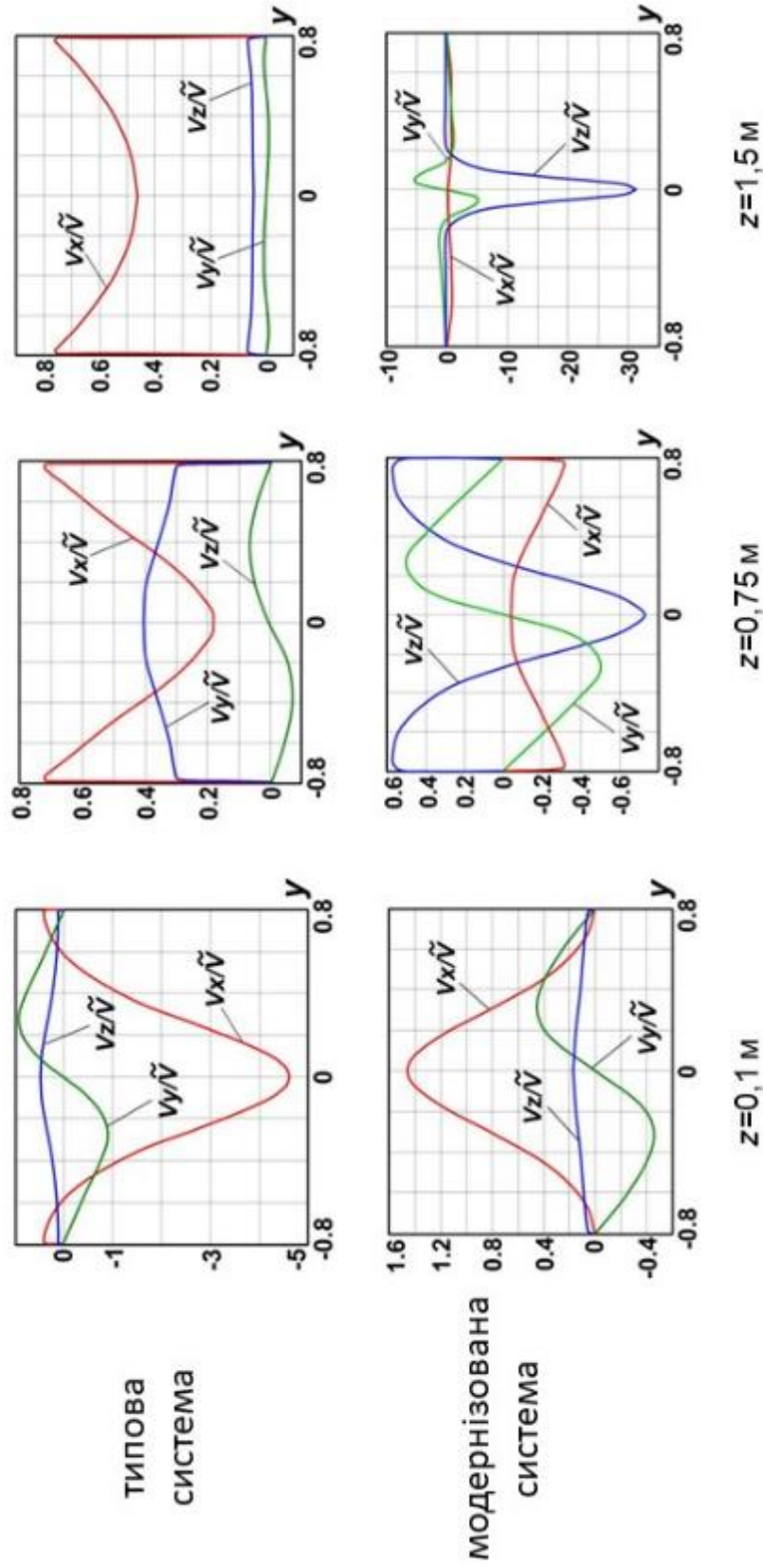


Рисунок 12 - Розподіл компонент вектору швидкості в метантенку з типовою системою перемішування, де  $\tilde{V}$  - середнє за модулем значення швидкості субстрату в метантенку

## ЛАБОРАТОРНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

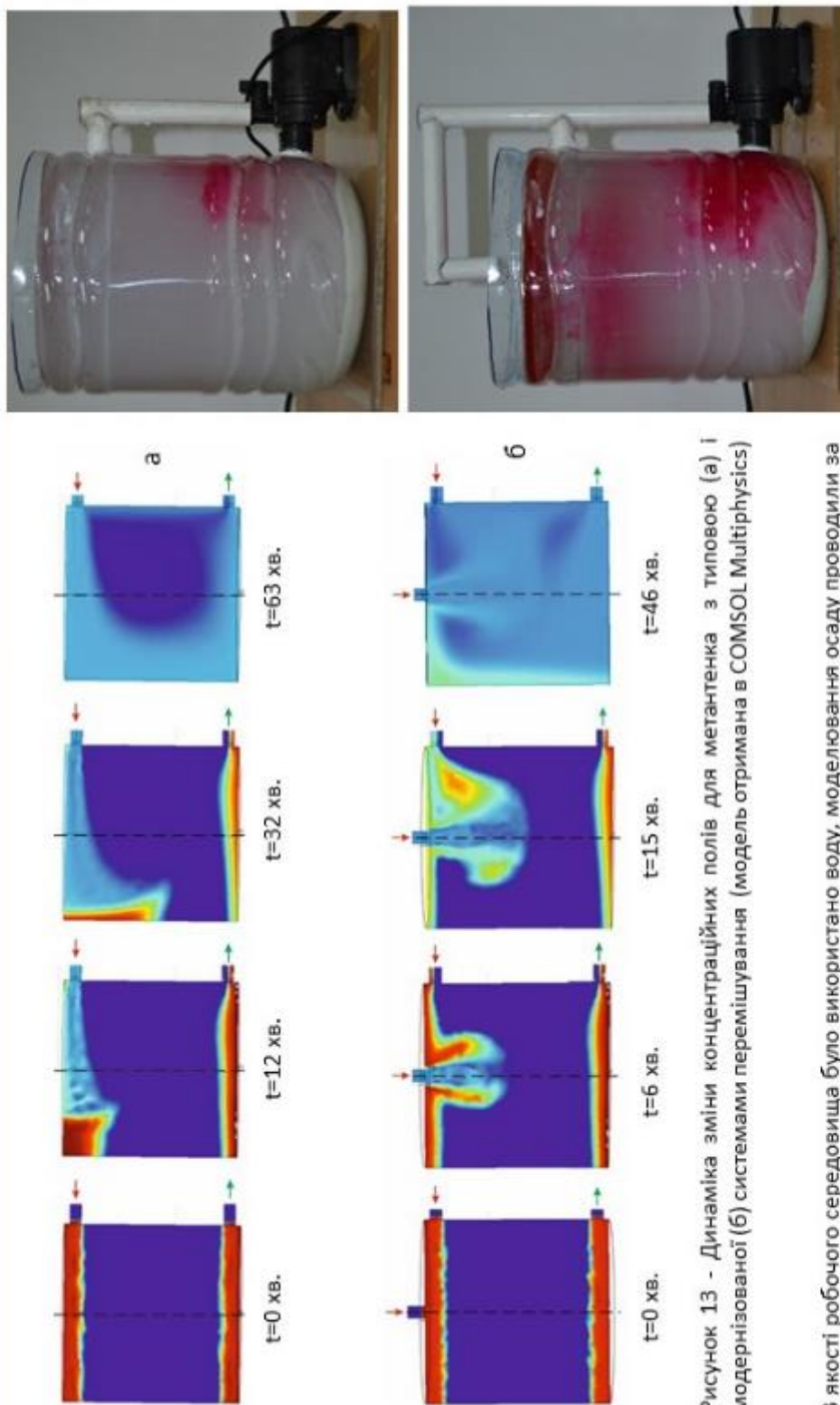


Рисунок 13 - Динаміка зміни концентраційних полів для метантенка з типовою (а) і модернізованою (б) системами перемішування (модель отримана в COMSOL Multiphysics)

В якості робочого середовища було використано воду, моделювання осаду проводили за допомогою подрібненої крейди, плаваючої кірки – двотактного мастила. Перекачування рідини проводили за допомогою насоса, з можливістю регулювання подачі в межах від 0 до 0,25 м<sup>3</sup>/год. Подачу насоса встановлювали виходячи з запропонованої вище швидкості руху рідини – 0,6 м/с та діаметрів патрубків 0,0125 мм на рівні 0,22 м<sup>3</sup>/год.



Рисунок 14 – Лабораторний стенд для дослідження різних систем перемішування

**ЛАБОРАТОРНІ ДОСЛІДЖЕННЯ**



типова система



модернізована система



типова система



модернізована система

Рисунок 15 – Рух робочого середовища у різних площинах

## ЛАБОРАТОРНІ ДОСЛІДЖЕННЯ



початок змішування



кінець змішування



типова система

модернізована система

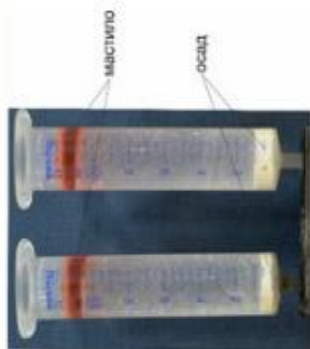


Рисунок 17 - Зразки проб для визначення однорідності змішування

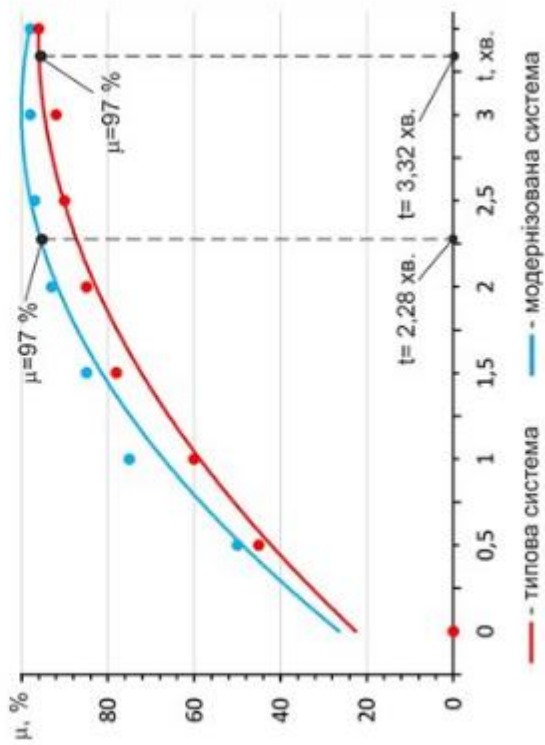


Рисунок 18 - Залежності однорідності змішування від часу

Рисунок 16 – Робота систем перемішування

## ОХОРОНА ПРАЦІ

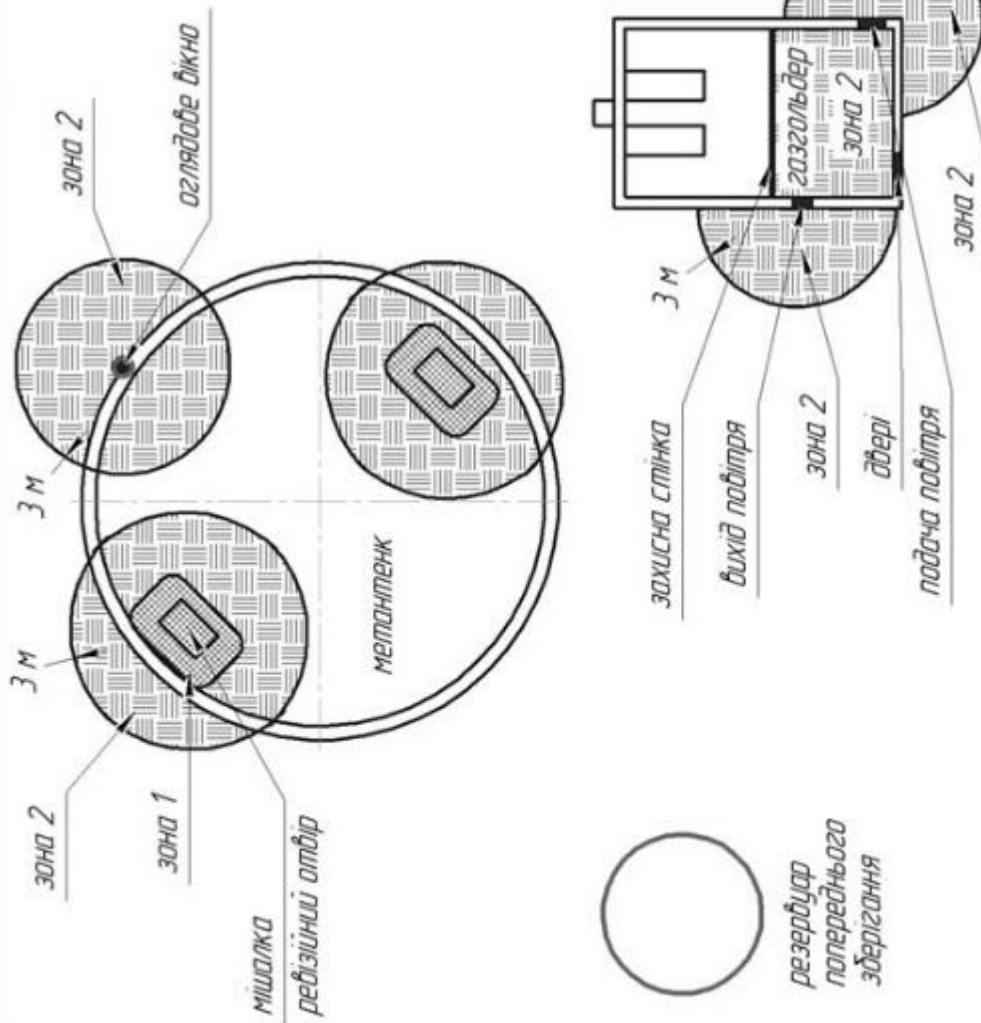


Рисунок 19 - Схематичне зображення вибухонебезпечних зон біогазової установки

Захисні дистанції орієнтуються на безпеку під час вибуху.

**Зона 0** належить до такої, в якій постійно існує небезпека вибуху (при нормальному робочому режимі зазвичай не виникає на біогазових установках).

**Зона 1** охоплює територію, на якій час від часу виникає вибухонебезпечне середовище з різних газів (напр. навколо горловини продувочного трубопроводу, газових факелів).

**Зона 2** охоплює територію на якій не може утворитися вибухонебезпечні середовища з газів.

## ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА РОЗРОБЛЕНОЇ СИСТЕМИ ПЕРЕМІШУВАННЯ

Показники	Варіанти		Модерн. у % до базового
	Система БГУ-2-150	модернізована система	
Продуктивність, м <sup>3</sup> /год.	200	230	115,0
Потужність приводу, кВт	32	38	118,8
Обслуговуючий персонал, люд.	1	1	100,0
Тривалість роботи протягом доби, год.	6	4,3	71,7
Строк служби, років	8	8	100,0
Витрати на переобладнання, грн.	-	21250	
Балансова вартість, грн.	85200	106450	124,9
Річні експлуатаційні витрати, грн.	243884,24	207486,13	85,1
в т.ч.: витрати на електроенергію	163987,20	139559,94	85,1
витрати на ТО та ремонт	9372,00	11709,50	124,9
амортизаційні відрахування	10650,00	13306,25	124,9
заробітна платня	59875,04	42910,44	71,7
Економія експлуатаційних витрат, грн.	-	36398,11	-
Строк окупності витрат на переобладнання, років	-	0,58	-

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Технологічні рішення щодо обробки та переробки рідкого свинячого гною в світі схожі, спостерігається тенденція до розвитку біогазових технологій, світові лідери – Німеччина та Китай. Потенціал виробництва біогазу в Україні 22 млрд м<sup>3</sup>/рік. Перспективним заходом щодо підвищення енергетичної ефективності технології метанового бродіння є створення модернізованого способу гідравлічного перемішування в метантенку, що дозволяє створити найбільш сприятливі гідродинамічні і температурні умови для життєдіяльності бактерій метаногенів, а також забезпечує більш ефективне використання об'єму метантенка.
2. Розроблено моделі турбулентного течії субстрату в метантенку, для розв'язку якої використано програмний пакет COMSOL Multiphysics. Достовірність методу рішення була обґрунтована шляхом порівняння з експериментальними даними. Запропонована модернізована система гідравлічного перемішування в метантенку біогазової установки, відмітною особливістю якої є наявність двох вхідних патрубків: один з яких розташований в верхній частині корпусу резервуара, а другий – у верхній кришці корпусу резервуара.
3. За допомогою програмного пакета COMSOL Multiphysics проведено моделювання процесу перемішування субстрату в метантенку об'ємом 3 м<sup>3</sup>, в результаті чого встановлено, що для типової системи повний час перемішування складає 63 хв., а для модернізованої – 46 хв. Дослідження процесу перемішування на лабораторному стенді свідчать про те, що досягнення максимальної однорідності робочого середовища в реакторі, а саме 97%, досягається за 2,3 хв. при використанні модернізованої системи перемішування, що на 30 % менше, ніж при використанні типової схеми – 3,3 хв.
4. Розроблено вимоги охорони праці при роботі з біогазовою установкою, розраховано примусову вентиляцію приміщення, де встановлено газгольдер, приведено заходи щодо запобігання вибухонебезпечним ситуаціям та поряток основних дій у разі виникнення надзвичайної ситуації в ДДАБУ.
5. Техніко-економічна оцінка типової та модернізованої систем гідравлічного перемішування субстрату в метантенку біогазової установки підтверджує ефективність результатів досліджень. Зменшення експлуатаційних витрат на рівні 36398,11 грн. на рік досягається, в першу чергу, за рахунок економії витрат на електроенергію, що дозволяє окупити витрати на переобладнання системи за 0,58 року.