

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерно-технологічний факультет
Кафедра технологічних процесів та обладнання переробних і харчових
виробництв

Допущений до захисту:
завідувач кафедри
д.т.н., професор Севостьянов І.В.

(підпис, вчене звання, прізвище, ініціали)
«___» _____ 2019 р.

**ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ ВИДАЛЕННЯ ГНОЮ ВЕЛИКОЇ РОГАТОЇ ХУДОБИ ТА
ПЕРЕРОБКИ ЙОГО НА БІОГАЗОВІЙ УСТАНОВЦІ**

Робота на здобуття освітнього ступеня «Магістр»
зі спеціальності 208 «Агроінженерія»

Виконав: студент групи 6-МП
Заболотний Руслан Ігорович

Керівник: к.т.н., доцент
Токарчук Олексій Анатолійович

Анотація

Заболотний Руслан Ігорович «Технічні засоби видалення гною великої рогатої худоби та переробки його на біогазовій установці» – рукопис. Магістерська робота виконана на кафедрі – «Технологічні процеси та обладнання переробних і харчових виробництв». Вінницький національний аграрний університет, Вінниця 2019р.

В роботі проаналізовано технічні засоби видалення гною ВРХ та розроблено математичну модель управління технологічними процесами підвищення продуктивності біогазових реакторів з утилізації органічних відходів на базі теорії нечіткої логіки та лінгвістичної змінної. Використання цієї методології дозволяє враховувати вплив кількісних та якісних факторів на процес термостабілізації та інтенсифікації анаеробних процесів.

Обґрунтовано та запропоновано раціональні технологічні схеми роботи біогазових реакторів з рекуперацією теплоти шламу та з тепловим насосом. Запропоновано принципові технологічні схеми для підготовки біогазу до використання в теплотехнічному обладнанні.

Обґрунтовано технології, апарати та реагенти для очищення біогазу. Виконано техніко-економічне обґрунтування роботи біореактора з активацією теплообміну при утилізації органічних відходів сільськогосподарських підприємств.

Ключові слова: гній, видалення гною, біогаз, біогазовий реактор, органічні відходи, утилізація.

Annotation

Zabolotny Ruslan "Technical means of removing cattle manure and processing it on a biogas plant" – manuscript. Master's work was performed at the department – "Technological processes and equipment of processing and food production". Vinnitsa National Agrarian University, Vinnitsa 2019

This paper analyzes the technical means of cattle manure removal were analyzed and a mathematical model of control of technological processes of increasing the productivity of biogas reactors for the utilization of organic wastes based on the theory of fuzzy logic and linguistic variable was developed. The use of this methodology allows to take into account the influence of quantitative and qualitative factors on the process of thermostabilization and intensification of anaerobic processes.

Rational technological schemes of operation of biogas reactors with heat recovery of sludge and with heat pump are substantiated and proposed. Principal technological schemes for preparation of biogas for use in heat engineering equipment are offered.

Technologies, apparatus and reagents for purification of biogas are substantiated. The feasibility study of bioreactor operation with activation of heat exchange during utilization of organic wastes of agricultural enterprises was performed.

Keywords: manure, manure removal, biogas, biogas reactor, organic waste, recycling.

ЗМІСТ

Вступ	7
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ...	12
1.1. Сучасні технології утилізації відходів сільськогосподарських підприємств та їх енергетичний потенціал	12
1.2. Класифікація засобів видалення гною.....	16
1.3. Особливості конструкцій біогазових реакторів та технологічні вимоги до процесу анаеробного бродіння при утилізації органічних відходів.....	27
1.4. Шляхи інтенсифікації та термостабілізації процесу виробництва біогазу з органічних відходів.....	25
1.5. Висновки та задачі досліджень	32
РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ОТРИМАННЯ БІОГАЗУ ПРИ КОЛИВАЛЬНІЙ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ПРОЦЕСУ АНАЕРОБНОГО БРОДІННЯ В БІОГАЗОВИХ РЕАКТОРАХ.....	35
2.1. Вибір об'єкта досліджень.....	35
2.2. Моделювання інтелектуальної підтримки прийняття рішень з управління технологічними механізмами підвищення продуктивності біогазових реакторів	36
2.3. Обґрунтування процесу активації роботи біореактора при коливальному перемішуванні субстрату.....	54
2.4. Висновки до розділу 2.....	64
РОЗДІЛ 3. ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	66
3.1. Програма досліджень.....	66
3.2. Методика проведення експериментальних досліджень із визначення впливу параметрів коливань на тепловіддачу від нагрівального елемента до субстрату.....	69
3.3. Лабораторна установка для визначення коливального впливу на термостабілізацію та інтенсивність теплообміну між субстратом і нагрівальним елементом в біореакторі.....	70

3.4. Методика проведення експериментальних досліджень із визначення впливу параметрів коливань на інтенсифікацію теплообміну в біореакторі.....	78
3.5 Висновки до розділу 3.....	80
РОЗДІЛ 4. АНАЛІЗ ТА УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ВПЛИВУ КОЛИВАННЯ СЕРЕДОВИЩА НА ІНТЕНСИФІКАЦІЮ ТА ТЕРМОСТАБІЛІЗАЦІЮ ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА БІОГАЗУ.....	
4.1. Результати дослідження впливу концентрації органічних речовин в субстраті на процес вільноконвективного теплообміну.....	81
4.2. Результати дослідження впливу частоти та амплітуди коливань на теплообмін між нагрівальною стінкою і водою	85
4.3. Результати дослідження впливу коливань на теплообмін між нагрівальною стінкою і субстратом	89
4.4 Співставлення результатів експериментального та теоретичного дослідження впливу коливань на теплообмін між нагрівальною стінкою і субстратом в біореакторі.....	91
4.4. Висновки до розділу 4	95
Загальні висновки.....	97
Список використаних джерел.....	99

ВСТУП

В умовах погіршення екологічної ситуації та подорожчання енергоносіїв значна увага приділяється енергозберігаючим технологіям перероблення органічних відходів. Наявні в Україні та в Вінницькому регіоні природні ресурси дозволяють використовувати свій потенціал для забезпечення з нетрадиційних джерел енергією життєдіяльності малих та великих фермерських господарств, сільськогосподарських товариств, невеликих міст. Сучасна альтернативна енергетика представлена широким спектром засобів та джерел, але, враховуючи природно-кліматичні умови України і Вінницького регіону зокрема, можна зробити висновок про перспективність впровадження біогазових технологій.

Анаеробне перероблення органіки дає змогу не тільки провести більш ефективно утилізацію відходів сільськогосподарського виробництва, але й отримати більш якісні органічні добрива та біогаз, що відіграє суттєву роль в процесі енергозабезпечення споживачів. Використання біогазу дозволяє, по-перше, децентралізувати енергоспоживання, по-друге, скоротити видобуток первинних енергоносіїв, що зменшить їх втрати та теплове навантаження на біосферу. Методи анаеробного перероблення біомаси в Україні зараз використовуються вкрай обмежено. Основною причиною є недостатня розробка енергетичних питань: великі витрати на термостабілізацію та підігрів субстрату, нераціональне використання біогазу, перевитрати електроенергії на власні потреби біогазової установки (БГУ). Практично відсутні експериментальні та теоретичні дослідження енергозберігаючих процесів біоконверсії при утилізації органічних відходів. Тому дослідження процесів утилізації відходів сільськогосподарських виробництв з метою обґрунтування параметрів і засобів інтенсифікації анаеробного бродіння в біореакторах для отримання біогазу є актуальним.

Мета і задачі досліджень. Робота присвячена удосконаленню параметрів робочих органів обладнання та технологічного процесу утилізації

органічних відходів сільськогосподарських підприємств шляхом анаеробного бродіння в біореакторах для отримання біогазу.

Для реалізації поставленої мети необхідно розв'язати наступні задачі :

- провести аналіз стану сучасних технологій, конструктивних рішень обладнання з утилізації органічних відходів сільськогосподарських підприємств;

- встановити закономірності руху робочих органів обладнання коливального перемішування субстрату в біогазових реакторах при утилізації органічних відходів;

- розробити аналітичну модель технологічного процесу отримання біогазу при анаеробному бродінні органічних відходів, що дозволить прогнозувати продуктивність біореактора в залежності від факторів впливу;

- обґрунтувати конструктивно-технологічні параметри біогазового реактору з обладнанням коливальної активації для утилізації органічних відходів;

- розробити експериментальну комп'ютеризовану установку з коливальним перемішувачем субстрату, провести експериментальні дослідження з метою визначення впливу параметрів коливань на інтенсифікацію технологічного процесу органічних відходів і перевірити адекватність отриманих теоретичних залежностей експериментальним даним;

- обґрунтувати раціональні технологічні схеми роботи біогазових реакторів з коливальним активатором при утилізації органічних відходів, оцінити на конкурентоспроможність та розробити рекомендації щодо його використання в сільськогосподарському виробництві;

Об'єктом дослідження є робочий процес перемішування органічних відходів при утилізації їх в біореакторі.

Предметом дослідження є обладнання та залежність показників інтенсифікації технологічних процесів утилізації органічних відходів сільськогосподарських виробництв шляхом анаеробного бродіння від конструктивних параметрів біореакторів.

Дослідження процесів активації виробництва біогазу відбувалося методами фізичного експерименту, обробка результатів - методами прикладної статистики, математична модель побудована із застосуванням основних положень теорії нечіткої логіки та лінгвістичної змінної.

Методи дослідження. В роботі використовувалися теоретичні і експериментальні методи досліджень. При інформаційно-аналітичному дослідженні методів та обладнання для утилізації органічних відходів застосовували Internet-мережу як джерело інформації. При проведенні експериментів та обробці експериментальних даних використовувалися методи математичної статистики у плануванні експерименту та проведенні регресійного аналізу. Дослідження процесів теплообміну відбувалося методами фізичного експерименту та на базі основних положень і гіпотез теоретичних основ механіки, гідродинаміки та тепло масообміну. При побудові математичних моделей застосовувалися основні положення теорії нечіткої логіки та лінгвістичної змінної.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Вперше теоретично обґрунтовано параметри робочих органів коливального перемішувача субстрату для інтенсифікації технологічних процесів утилізації органічних відходів сільськогосподарських господарств шляхом анаеробного бродіння в біореакторі з активатором.

2. Вперше запропоновано використати коливальні поля для підвищення ефективності тепловіддачі від твердої стінки нагрівача до двофазного середовища субстрату та для інтенсифікації процесів бродіння і виходу біогазу при утилізації органічних відходів.

3. Розроблено математичну модель управління продуктивністю роботи біогазового реактору з активатором при утилізації органічних відходів на базі теорії нечіткої логіки та лінгвістичної змінної, що дозволить прогнозувати продуктивність біореактора в залежності від впливаючих кількісних та якісних факторів.

4. Запропоновано та використано в теоретичних дослідженнях модель руху пластини активатора при коливальному перемішуванні субстрату в

біореакторі, яка дозволила отримати критеріальні рівняння, що описують теплообмінні процеси при коливальному омиванні поверхні нагріву.

5. Вперше експериментально виявлено та встановлено закономірності впливу частоти і амплітуди коливань пластини активатора на інтенсифікацію теплообміну в субстратах та виконано порівняння з вільноконвективними процесами теплообміну від твердої стінки до середовища.

Практичне значення та реалізація результатів досліджень.

В результаті теоретичних і експериментальних досліджень була обґрунтована принципова та конструктивна схема, розроблено та виготовлено дослідний зразок біореактора з нагрівачем-активатором. Запропонована методика порівняльних експериментальних досліджень дозволила знайти умови, коли споживана потужність і час бродіння менші, а продуктивність біореактора – більша в порівнянні з існуючими. Результати досліджень є основою для розроблення і вдосконалення роботи систем біоконверсії при утилізації органічних відходів. За результатами досліджень розроблена модель управління продуктивністю роботи біогазового реактору з перемішувачем субстрату при утилізації органічних відходів на базі теорії нечіткої логіки та лінгвістичної змінної, що дозволяє прогнозувати вихід біогазу в залежності від впливаючих кількісних і якісних факторів. Запропоновано конструкцію біогазового реактора з активацією теплообміну, За результатами багатофакторного експерименту виведена регресійна залежність, яка дає можливість оцінити вплив параметрів коливань на інтенсифікацію та термостабілізацію теплообміну в біореакторах. Застосування вдосконаленої конструкції біореактора дозволить підвищити продуктивність в середньому на 5...12 %.

Достовірність положень, висновків та одержаних результатів досліджень обумовлено використанням загальноприйнятих методів системного аналізу і синтезу, положень теорії технологічних процесів анаеробного бродіння, адекватністю аналітичних і експериментальних даних і підтверджено використанням результатів дослідження в практиці утилізації відходів сільськогосподарського виробництва при виробництві біогазу.

РОЗДІЛ I

СУЧАСНИЙ СТАН ПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1. Сучасні технології утилізації відходів сільськогосподарських підприємств та їх енергетичний потенціал

Нафтові та газові кризи, погіршення екологічної ситуації змусили суспільство шукати шляхи задоволення своїх енергетичних потреб не тільки серед вичерпних енергоресурсів, але і використовувати нетрадиційні джерела. Україна задовольняє власні потреби в енергоресурсах на рівні 53%, тобто всі інші ресурси доводиться імпортувати [1]. У середині минулого століття гостро постало питання енергозбереження та охорони навколишнього середовища. Внаслідок функціонування сільськогосподарських підприємств накопичується велика кількість органічних відходів, які забруднюють навколишнє середовище і займають корисну площу [2]. Утилізацію органічних відходів можна виконувати шляхами, що наведено на рис 1.1. Рационально утилізацію виконувати з одночасним отриманням добрив і біогазу [3-5, 14].

За рахунок анаеробної утилізації органічних відходів сільськогосподарських підприємств різних форм власності можна досягти значної економії ресурсів та коштів. Одночасно з утилізацією відходів отримуємо цінне паливо – біогаз і добриво. Найбільше поширення біогазові установки набули у країнах Сходу – Індії і Китаї. В Європі зосереджено 44% загальної сукупності біогазових установок, в Північній Америці -14% [2]. У Данії з 1997 року працює 20 біогазових установок, які в сукупності виробляють 2 ПДж енергії з органічних відходів [6]. У Німеччині працює біля 400 біогазових установок, у Італії, Франції і Португалії працює біля 60 установок у кожній з країн, у Швеції - 6 біоустановок [7]. У Фінляндії за рахунок біомаси покривається 21% загального споживання енергоресурсів, в основному за рахунок перероблення відходів з деревини [8]. У Австрії відновлювальні джерела забезпечують більше 23% споживання первинних

носіїв, частка біомаси у виробництві енергії складає 11% [9]. В Україні з біомаси виробляється біля 29 ПДж теплової енергії, що складає 0,5% від загального споживання енергетичних ресурсів [7]. Частка біоенергетики в загальній сукупності поновлювальних джерел енергії в Україні не перевищує 18%. На даний час в Україні працює декілька біогазових фермерських установок та промислових котлів для спалювання деревини. Загальна їх кількість не перевищує трьох десятків. У Вінницькій області працюють дві біогазові установки у фермерських господарствах.

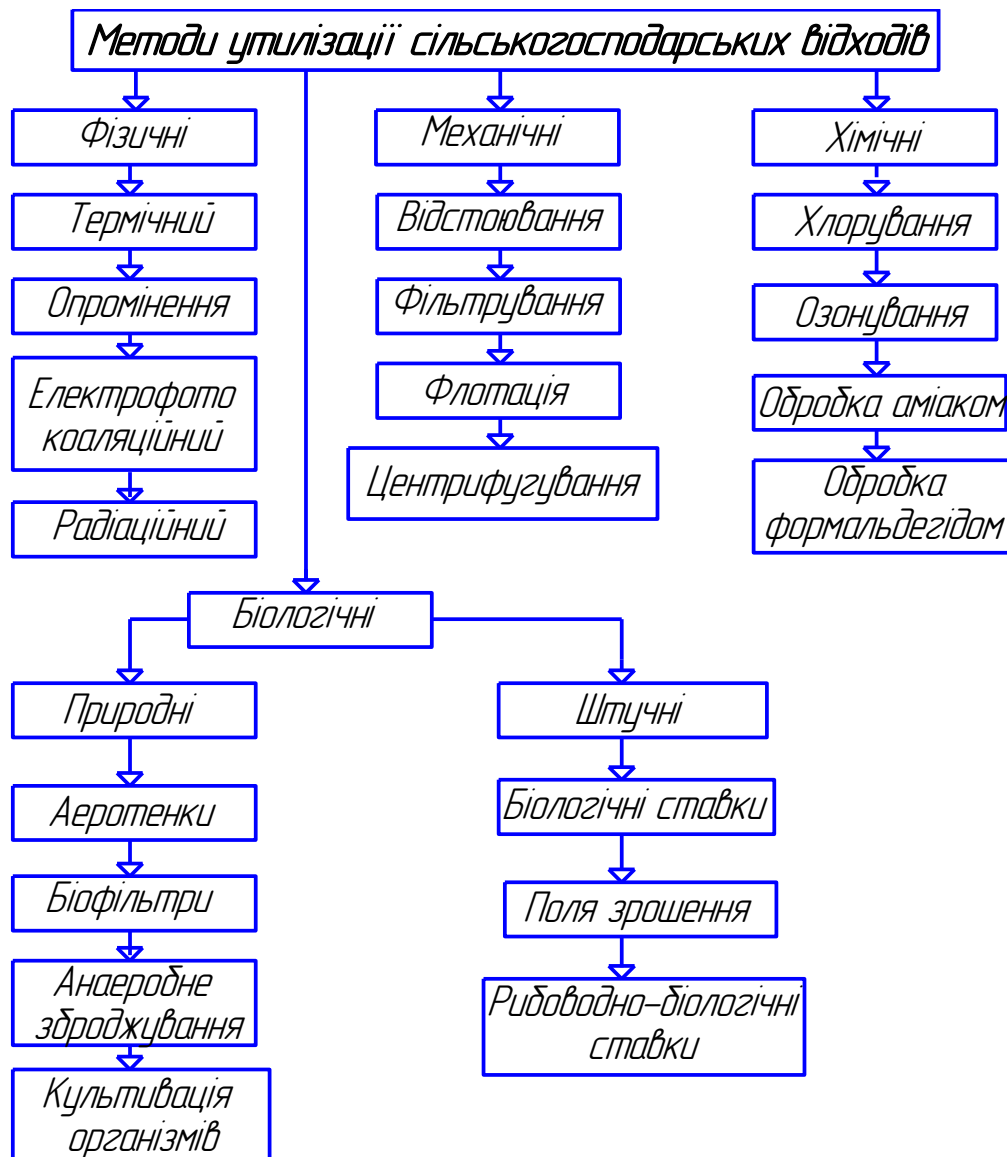


Рис. 1.1 – Методи утилізації сільськогосподарських органічних відходів

Законодавча база України сприяє поширенню енергозберігаючих технологій та альтернативних джерел енергії. Верховною Радою України було прийнято закон «Про енергозбереження» [10] та закон «Про альтернативні джерела енергії» [11], якими передбачено комплекс державних програм з енергозбереження та впровадження альтернативних джерел енергії. Відходи біомаси є цінною сировиною для харчової, хімічної, переробної, легкої промисловості та для систем біоконверсії. Необхідно враховувати, що в процесі господарської діяльності велика кількість біомаси залишається не використаною. До основних джерел біомаси належать:

- відходи тваринництва;
- рослинні залишки сільськогосподарських виробництв – солома, листя, стружка;
- тверді побутові відходи комунального господарства міст;
- промислові і побутові відходи міст.

На даний час біля м. Олександрівка Луганської області ведеться видобуток біогазу із сміттєзвалища. Накоплене сміття в обсязі $1,6 \cdot 10^6$ тонн з 1979 року потенційно дозволяло отримувати біогаз в обсязі 1300 м³/год. Продуктивність свердловин дозволила отримати у 2006 році 850 м³/год, потенційних запасів газу вистачить до 2030 року [12].

Відходи тваринництва є одним із найперспективніших джерел отримання енергії шляхом анаеробного бродіння в біореакторах [3-5]. Вони є в будь-якому сільському господарстві, не потребують попередньої обробки і сортування, їх зручно транспортувати.

Потенціал відходів тваринництва для їх використання в системах біоконверсії з метою утилізації відходів та енергозбереження в Україні значний (табл. 1.1) [13].

У коливанні поголів'я домашньої худоби намітилася тенденція до зменшення кількості тварин у колективних господарствах, але зростання їх в індивідуальних. Таким чином, загальна кількість виходу відходів, які можна використовувати в системах біоконверсії, залишається майже незмінною.

Енергетичний потенціал відходів тваринницького комплексу України

Тип джерела відходів	Вихід відходів, 10 ⁶ т/рік	Вихід біогазу, 10 ⁹ м ³ /рік	Нижча теплота згорання, МДж/м ³	Енергетичний потенціал відходів, млн. т. у.п. рік
Велика рогата худоба	58,4	1,46	23	1,144
Свині	4,79	0,124	21	0,088
Птахи	2,8	0,11	21	0,079
Всього	65,99	1,694	-	1,311

Рослинні залишки - це відходи сільського господарства. Ця біомаса у вигляді тирси, листя, гілок вивозиться на полігони, де гниє чи спалюється на місці, таким чином, погіршуючи екологічний стан довкілля. У сільськогосподарському виробництві основними залишками біомаси є солома та сіно. Для рослинних залишків характерною є особливість сезонної відтворюваності. Пік використання їх припадає на другу половину літа та осінь. Можливість використання рослинних залишків для виробництва енергії залежить від характеру переважної культури, якою засівають більші площі, і від кількості залишків, які можуть бути зібрані з одиниці посівної площі. Польові культури дають більше рослинних залишків, ніж овочеві. В Україні потенційні ресурси надлишку соломи складають близько 21 млн. тонн, що еквівалентно 10,1 млн. тонн умовного палива на рік [14]. У Вінницькій області великий потенціал для перероблення в біореакторах має солома, що залишається від зернових культур (табл. 1.2) [15]. Загальну кількість органічних відходів, що утворюються в СНД та Україні, наведено в таблиці 1.3.

Потенціал отримання біогазу в нашій країні надзвичайно великий. Перероблення органічних відходів у біогазових реакторах дозволило б вирішити у певній мірі енергетичну проблему села та фермерських господарств України.

Таблиця 1.2

Валовий збір зернових у Вінницькій області у 2018 році

№	Назва культури	Площа збору, тис. га	Об'єм зерна, тис. тонн	Об'єм соломи, тис. тонн
1	Озима пшениця	343	936	748,8
2	Жито озиме	27	61	48,8
3	Ячмінь озимий	20	56	44,8
4	Ячмінь ярий	209	520	416
5	Пшениця яра	15	36	28,8
6	Овес ярий	16	34	27,2
7	Просо	5	4	3,2
8	Гречка	54	36	28,8
9	Горох	40	84	67,2
10	Квасоля	11	23	18,4
11	Всього	740	1790	1432

Таблиця 1.3

Утворення органічних відходів (сухої речовини) в республіках СНД
і в Україні, млн. т

Галузі утворення органічних відходів	СНД	Україна
Тваринництво і птахівництво	230	46
Рослинництво	160	32
Тверді відходи міст	60	12
Стічні каналізаційні води	7	1,4
Відходи деревообробної, харчової і інших галузей промисловості	43	8,6

1.2. Класифікація засобів видалення гною

Залежно від способів утримання тварин і птиці, розмірів і будівельно-планувального вирішення ферм (комплексів), фізико-механічних і реологічних властивостей гною та інших умов застосовують три способи видалення гною: механічний, гідравлічний і комбінований.

Класифікація гноєзбиральних засобів наведена на рис. 1.2.

Засоби механізації для видалення гною за межі приміщення бувають механічні, гідравлічні та вакуумні.

Відповідно до технології утримання тварин гноєзбиральні засоби різняться за призначенням: для накопичення і видалення; для транспортування і обробки з метою подальшої утилізації.

Застосовують засоби механізації для періодичного видалення злежаного гною з корівників при утриманні корів на глибокій незмінній підстилці, для очищення від гною вигулювальних майданчиків, для видалення посліду із пташників.

1.2.1. Механічні засоби для видалення гною

При механічному способі прибирання гною використовують мобільні й стаціонарні технічні засоби. Мобільні – це бульдозери, бульдозерні навіски БН-1, тракторні навантажувачі-бульдозери ПБ-35 і навантажувачі фронтальні перекидні ПФП-1,2. Мобільні засоби застосовуються при безприв'язному утриманні тварин, на вигулювальних майданчиках, у проходах корівників тощо.

Стаціонарні засоби для видалення гною: ланцюгово-планчасті транспортери ТСН-3Б, ТСН-2, ТСН-160; штангові транспортери ТШ-30А; скреперні установки ТС-1, УС-10, УС-15, УСН-8. Встановлюють їх всередині приміщень у гнойових каналах.

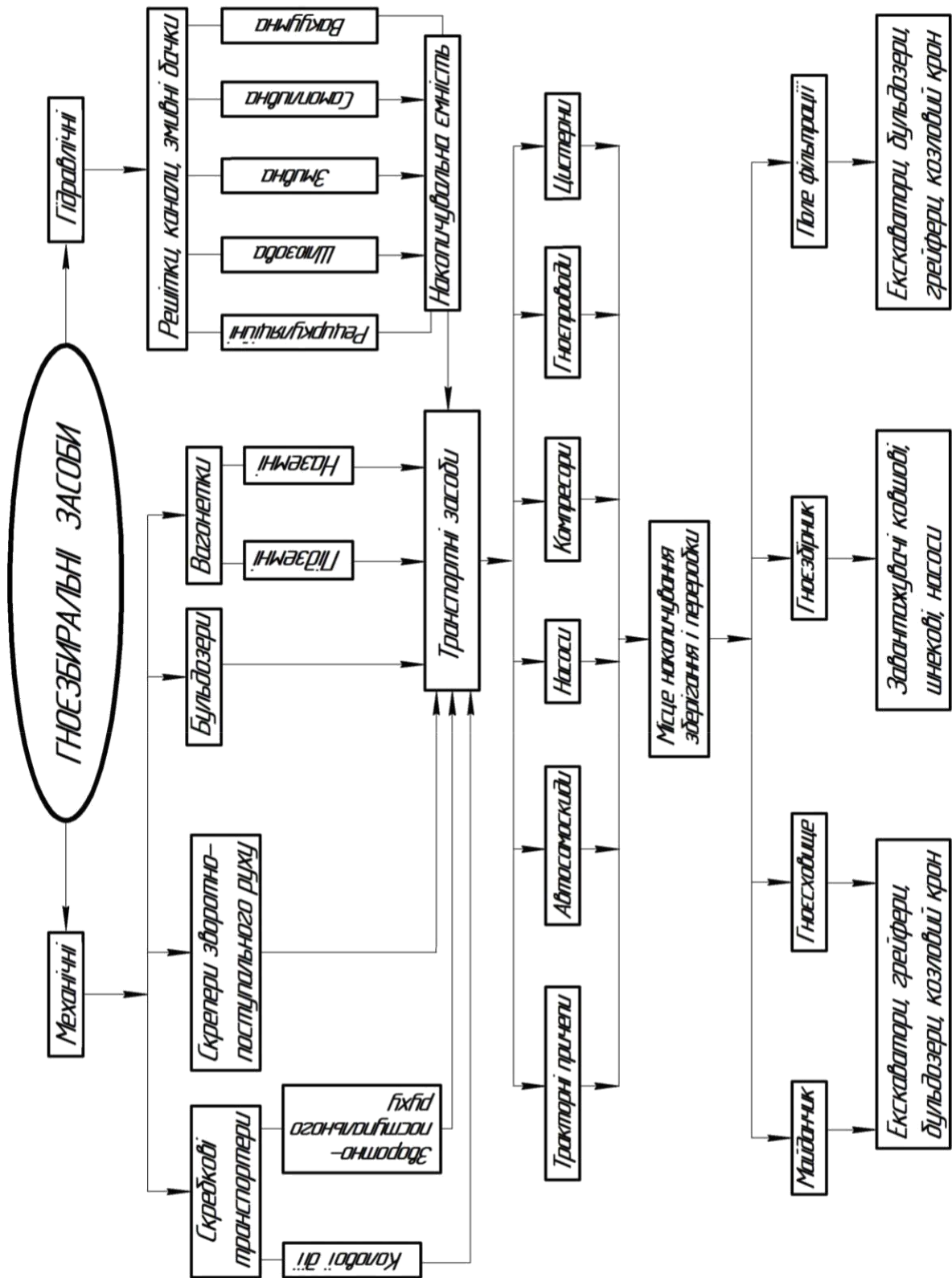


Рис. 1.2. – Класифікація гноєзбиральних засобів

Скребковий транспортер КСГ-8 (ТСН-3,0Б) складається з горизонтального і похилого транспортерів, які мають окремий привод і електрообладнання. Горизонтальний транспортер розташовується в гнойовому каналі й призначений для переміщення гною від стійл у торцеву частину приміщення. Поворотний пристрій забезпечує зміну напрямку руху ланцюга транспортера у місцях повороту. Це – зірочка, яка обертається в підшипниках на осі, що запресована в підп'ятник, котрий закріплений трьома анкерними болтами в підлозі приміщення.



Рис. 1.3. – Скребковий транспортер КСГ-8 (ТСН-3,0Б)

Похилий транспортер має привод, ланцюги зі скребками, натяжний та поворотний пристрої та опори. Будова поворотного пристрою і ланцюгів аналогічні будові цих механізмів горизонтального транспортера.

Похилий транспортер переміщує поданий горизонтальним транспортером гній у тракторний причеп. Горизонтальний транспортер складається з ланцюгів зі скребками, натяжного й поворотного пристроїв.

Скребки закріплені шарнірно так, щоб при русі не піднімалися від дна гнойового каналу й опускалися вниз під дією своєї ваги, полегшуючи скидання гною в похилий транспортер.

Гноєзбиральний транспортер ТСН-2,0Б відрізняється від КСГ-8 (ТСН-3,0Б) тим, що має кований ланцюг, що забезпечує транспортування густої і рідкої фракції гною, і в 2...3 рази збільшена його надійність. Горизонтальна частина транспортера ТСН-2,0Б може застосовуватися для транспортування гною до гноєсховища на відстані до 200м.



Рис. 1.3. – кований ланцюг транспортера ТСН-2,0Б

Робочий орган транспортера – це ланцюг з консольно закріпленими металевими скребками.

Гноєзбиральний транспортер КСГ-7 (ТСН-160А) складається з двох самостійних транспортерів (горизонтального й похилого), шафи керування, приводної станції, натяжного пристрою. Горизонтальний транспортер має скребки, відстань між якими 1,12м, й укладається в бетонний лоток, до якого армується сталеву смугою 4x20мм. Горизонтальний транспортер КСГ-7 (ТСН-160А) рухається зі швидкістю 0,18м/с і при коловому русі транспортує гній до похилого транспортера.

Один транспортер обслуговує 100...120 корів, розміщених на прив'язі в два ряди. Довжина ланцюга горизонтального транспортера не повинна перевищувати 160м.

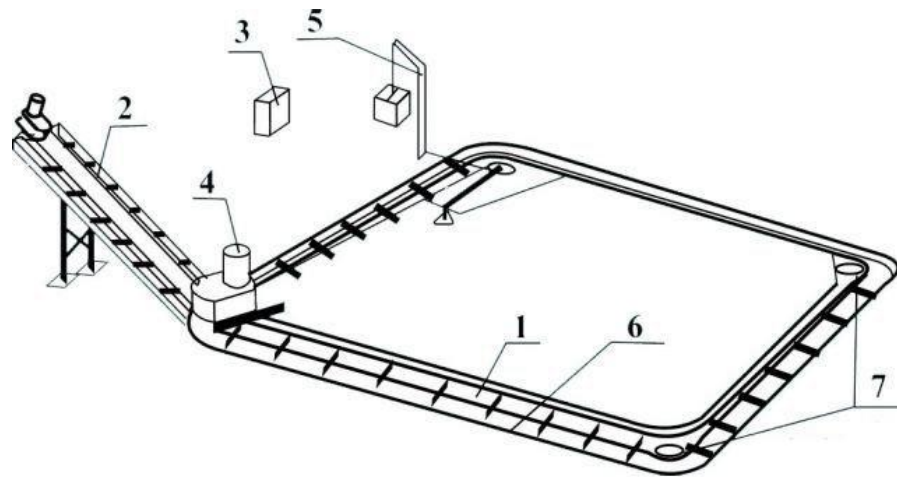


Рис. 1.4. – Гноєзбиральний транспортер КСГ-7 (ТСН-160А):

1 – горизонтальний транспортер; 2 – наклонний транспортер; 3 – пристрій керування; 4 – привід; 5 – натяжний пристрій; 6 – ланцюг зі скребками; 7 – поворотні пристрої.

Похилий транспортер, як і горизонтальний, має якірний ланцюг зі скребками, розміщеними з кроком 650мм, металевий жолоб із опорною стійкою, поворотний і натяжний пристрої і привод, що складається з електродвигуна і редуктора. Похилий транспортер встановлюється під кутом не більше 30° до горизонту і забезпечує подавання гною на висоту 2050мм від нульової позначки підлоги корівника.

У приміщенні, де встановлено похилий транспортер, температура повітря має бути не нижче $+10^\circ\text{C}$.

Установка скреперна УС-Ф-250 призначена для прибирання гною в корівниках довжиною 120м при безприв'язному боксовому утриманні великої рогатої худоби з відкритих поздовжніх гноєвих проходів. Вона складається з приводної станції й робочого контуру довжиною 250м, який має замкнену систему штанг і ланцюгів із поворотним пристроєм (літі ролики), чотири розсувні скребки, механізм реверсування і щит керування.

Довжину скребок можна регулювати за шириною гноєвого проходу від 1,8 до 3,0м при його глибині 0,2м. Для очищення стінок гноєвого проходу на кінцях скребок встановлено гумові очисники.

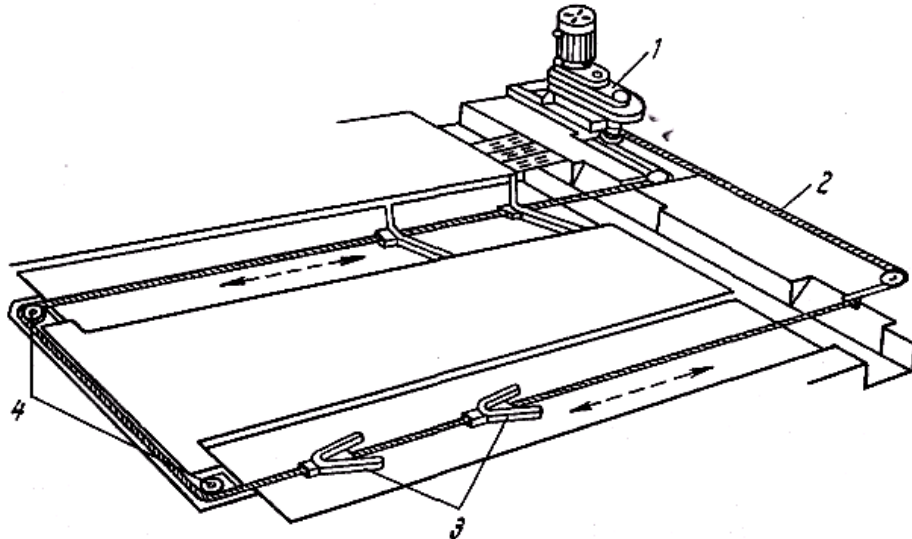


Рис. 1.4. – Установка скреперна УС-Ф-250:

1 – приводна станція; 2 – ланцюг; 3 – скрепери; 4 – поворотні пристрої

Установка працює в автоматичному режимі у зворотно-поступальному русі скреперів 18...20 годин на добу. Не працює тільки тоді, коли тварини відпочивають. Швидкість руху скреперів – 0,063м/с, що забезпечує прибирання гною за наявності корів, і виганяти їх із гноевих проходів немає потреби. При цьому вони вільно переступають через скребки. Одна установка обслуговує 200 корів, розміщених у двох групових станках.

Установка скреперна УС-10 обслуговує поголів'я великої рогатої худоби. Призначена для транспортування гною із поперечних каналів до гноезбірників. Вона складається з приводної станції з системою автоматичного реверсування, тягової штанги діаметром 20мм, на якій встановлено вісім скреперів, ланцюга якірного типу і щита керування. Відстань між скреперами – 10м при зворотно-поступальному русі штанги 12,5м. Ширина захвату скрепера в розкритому стані – 1,75м. Висота скребок – 0,15м. Коли відбувається робочий хід скребка, захоплюється порція гною і переміщується в бік гноезбірника на величину ходу штанги. При холостому ході скребки складаються за рахунок тертя об підлогу і не транспортують

гній. При наступному робочому ході порція гною транспортується далі й скидається в гноезбірник.

Основна установка УС-250 працює протягом доби, установка УС-10 працює періодично і вмикається автоматично 6 разів по 20 хвилин на добу. Швидкість руху штанг – 0,137м/с, встановлена потужність електродвигуна – 3кВт.

Конвеєр КСУ-Ф-1 призначений для прибирання гною з тваринницьких приміщень свиноферм і ферм ВРХ з-під щільної підлоги. Він складається з поздовжнього і поперечного транспортерів. Ширина гнойового каналу – 820мм, глибина – 800мм. Поздовжні конвеєри двоконтурні. Вони виконують зворотно-поступальний рух, забирають гній із приміщення і транспортують його в поперечний одноконтурний конвеєр. Поперечний транспортер теж виконує зворотно-поступальний рух і транспортує гній із приміщення в гноезбірник, який знаходиться біля тваринницького приміщення. Конвеєр КСУ-Ф-1 складається з приводної станції, скреперів, блоків, тяг, ланцюгів. Приводна станція призначена для виконання скреперами зворотно-поступального руху.

Насос відцентровий з подрібнювачем НЦИ-Ф-100 призначений для перемішування гною у гноєприймачах, подрібнення великих рослинних домішок, перекачування його трубопроводом або навантаження в транспортний засіб. Рекомендується використовувати для перекачування рідкого гною вологістю понад 92% із прямиків гноезбірників.



Рис. 1.5. – Насос відцентровий з подрібнювачем НЦИ-Ф-100

1.2.2. Гідравлічні системи видалення гною

Гідравлічні системи видалення гною поділяють на: змивні, самопливні, лотково-відстійні, лотково-змивні, рециркуляційні. Застосовують їх в основному на свинокомплексах.

При змивній системі рідкий гній видаляється із заглиблених каналів струменем води трьома способами: прямим змивом, за допомогою змивних насадок і бачків.

При прямому змиванні витрачається велика кількість води і створюється висока вологість всередині приміщення.

Змивні насадки встановлюють у поздовжніх каналах під кутом до дна каналу, вода подається під тиском.

Змивні бачки бувають з клапаном, швидкодіючою заслінкою і самоперекидною ємністю від 0,5 до 1м³. Скидання води в канал відбувається 1...2 рази на добу.

При лотково-відстійній системі видалення гною відбувається під дією сили ваги і додаткового змивання водою. Рекомендується для застосування на малих фермах. Система складається з поздовжніх лотків-каналів, поперечного каналу, зовнішнього самопливного гноєпроводу і гноєзбирача.

Поздовжні канали з напівкруглим дном ($R=15\text{см}$) завширшки по верху 60...70см (для свиней) і 70-80см (для ВРХ). Початкова глибина каналу 60...70см, дно має нахил у бік стікання гною 0,005...0,01, але не більше 0,015, інакше рідка фракція швидко стікатиме з каналу, не захоплюючи екскрементів. Поперечний канал може бути розташований у центрі приміщення або у торці. Нахил у ньому такий самий, як у поздовжніх. Системи обладнані шиберами, які перекривають кінці гноезбірних каналів. Розхід води – 3...5л/добу.

При лотково-змивній системі відбувається змивання каналів водою один-два рази на добу, витрата води 15...20л/гол.добу.

При рециркуляційній системі видалення гною змивання виконується освітленою і знезараженою гноївкою. Застосовується на великих фермах. Для цього споруджують центральну насосну станцію зі гноезбірником. Від неї всіма поздовжніми каналами прокладають напірний водопровід. Лотки виготовляють подібними до тих, що у лотково-відстійній системі. Перед запуском системи в гноезбірник заливають 10...12м³ води. Гній захоплює воду, подає її напірним водопроводом у поздовжні канали й транспортує трубопроводом у гноезбірник. Після запуску із гноезбірника забирається освітлена рідина. Цикл повторюється.

Самопливну систему видалення гною застосовують на свинофермах. Принцип дії ґрунтується на здатності рідкого гною (вологістю 88...92%) пересуватися самопливом. Вона складається з поздовжніх самопливних каналів, поперечного змивного каналу, гноезбірника і насосної станції. Самопливний гноєпровід будують із азбоцементних труб діаметром 300мм, укладених з нахилом 0,02...0,025. Шибери встановлюють на нижньому кінці поперечного каналу або на виході поздовжніх.

Ємність гноезбірника має бути такою, щоб вміщувати гній не менше, як з одного каналу. Подавання його зі гноезбірника у гноєсховище здійснюється відцентровим насосом.

Екскременти тварин через щілинні підлоги потрапляють у канали. Через 3...4 дні піднімають шибер, відкривають вентиля водопроводу і пропускають гнойову масу зовнішнім самопливним гноєпроводом у гноєзбірник. Після цього закривають шибери і змивають водою решітки щілинної підлоги. За один цикл подається 1...1,5л води на одну тварину. Дно каналу має бути покрите водою для ефективного видалення маси.

Для забезпечення роботоздатності самопливної системи необхідно знати довжину L , ширину B , глибину H каналів і нахил дна l_0 , які залежать від фізико-механічних (реологічних) властивостей екскрементів, в основному від їх в'язкості й опору зсуву.

Довжина самопливного каналу в приміщенні для утримання свиней з економічних міркувань не повинна перебільшувати 50м. Для великої рогатої худоби довжина каналів не повинна перевищувати 30м при ширині 0,7...1м і не більше 60м – при ширині 1,5...2,5м.

На принципі дії самопливної системи видалення гною ґрунтується спосіб, який набув поширення у багатьох закордонних країнах і отримав назву «вакуумний спосіб» видалення гною свиней вологістю 85...92%. Монтують його так. Копають траншею, ґрунт ретельно ущільнюють і витримують нахил у бік накопичувача гною 0,5см на 1п.м. Вкладають труби діаметром 315мм на дно траншеї. Монтують витяжно-всмоктувальний вентиль і витяжний вентиль біля коліна стояка труби.

Вакуумна система видалення гною працює так. Коли накопичився гній під щілинною підлогою, оператор за допомогою поводка піднімає за петлю корок, гній починає самопливом пересуватися в трійник і далі пластмасовою трубою до накопичувальної ємності біля приміщення свинарника. Відбувається засмоктування гною і протягом 5...7хв увесь гній потрапляє в накопичувальну ємність. Потім оператор встановлює корок у попереднє положення. Витяжно-всмоктувальний вентиль виконує дві операції: коли система не працює, то він працює як витяжна вентиляція, а коли відбувається

видалення гною із приміщення, через вентиль надходить повітря, яке допомагає транспортувати гній трубою в накопичувальну ємність. Залежно від способу утримання свиней видалення гною відбувається один раз на тиждень (при дорощуванні) або два рази на тиждень (при відгодівлі) [7, 11].

1.3 Особливості конструкцій біогазових реакторів та технологічні вимоги до процесу анаеробного бродіння при утилізації органічних відходів

Конструктивні особливості

Резервуар біогазової установки є її основною частиною, і вимоги до нього досить високі. До основних вимог відносять: гідравлічні, технологічні, теплотехнічні, економічні та естетичні.

За формою резервуари бувають (рис 1.6):

- яйцеподібні;
- циліндричні;
- кулеподібні;
- з конусом доверху; донизу; з обох боків;
- у вигляді траншеї;
- кубічні;
- еластичні.

Найоптимальнішими за своїми гідравлічними та експлуатаційними характеристикам є яйцеподібні резервуари. За ними по якості йдуть резервуари з конусами та циліндричні резервуари. Ці форми дозволяють зменшити гідравлічний опір при перемішуванні субстрату, уникнути застійних зон, в зв'язку з відсутністю кутків, локалізувати місця збирання шламу та біогазу. Основним матеріалом для виробництва резервуарів є бетон і полімерні матеріали.

За конструктивними особливостям біогазові установки поділяють на одно- та багатореакторні. Багатореакторні установки дозволяють досягти

безперервного циклу бродіння та мають велику продуктивність, що дозволяє забезпечити потреби великого господарства біогазом. Найпростіші за своїм виконанням циліндричні, кубічні та кулеподібні резервуари роблять із старих металевих діжок, цистерн та інших ємностей, що використовуються в промисловості. За якістю вони поступаються конусоподібним і яйцеподібним, але досить просто виготовляються і монтуються. Траншейні резервуари з бетону дозволяють переробляти велику кількість субстрату в безперервному режимі, одночасно транспортуючи його під дією гравітаційних сил до місць зберігання шламу.

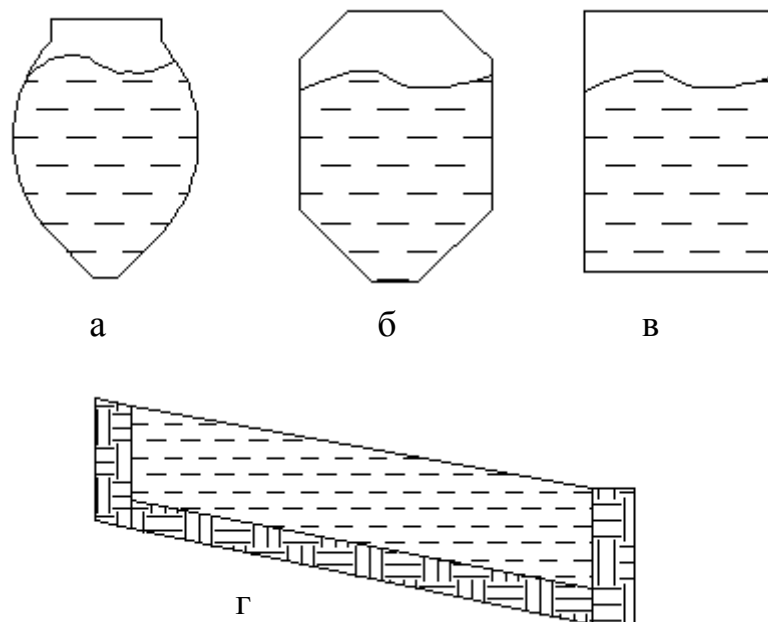


Рис 1.6 – Основні форми реакторів біогазових установок

а – яйцеподібний реактор, б - реактор з конусами доверху, донизу, в - циліндричний реактор, г - реактор-траншея

Недоліком траншейних реакторів є велика площа, що потребує теплоізоляції, великі лінійні розміри, ускладненість при перемішуванні та відборі газу. На рисунку 1.7 зображено типовий біореактор, що використовується в Україні та інших країнах [3, 5]. Еластичні біореактори (рис 1.8) виготовляють із гумоподібних матеріалів та розташовують у

виймаках землі. Перевагою таких конструкцій є динамічне спостереження за процесом накопичення газу і реагування збільшенням об'єму резервуару. Також внаслідок розтягнення він може вміщувати більше субстрату, ніж бетонний. Недоліком таких реакторів є те, що вони можуть використовуватись тільки у країнах з переважно теплим кліматом та мають великий коефіцієнт тертя, що збільшує енерговитрати на перемішування.

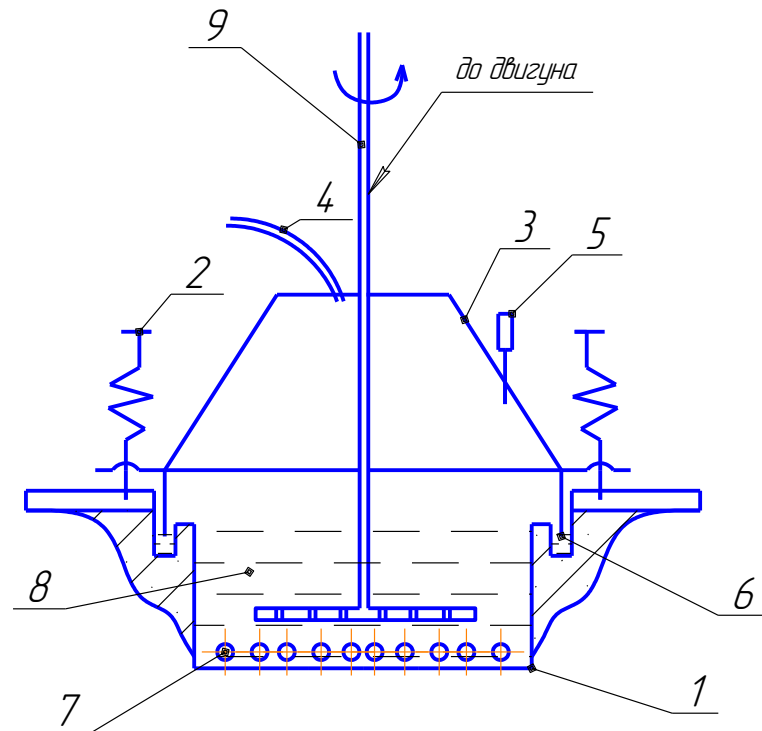


Рис 1.7 – Типова конструкція біореактора:

1 – корпус, 2 - напрямні ковпака, 3 – ковпак, 4 – газовідвідна трубка, 5 - манометр, 6 - гідрозатвори, 7 - нагрівальний елемент, 8 – субстрат, 9 - мішалка.

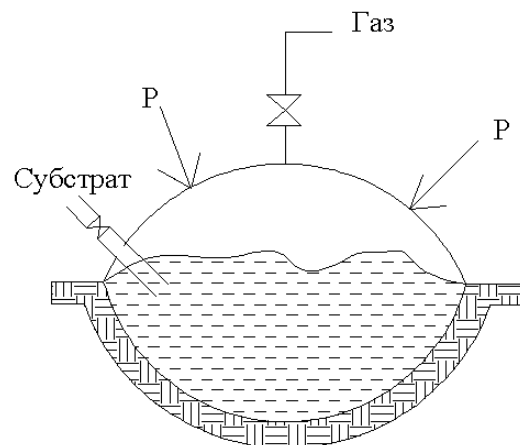


Рис 1.8 – Еластичний реактор

Оскільки розкладання органічних відходів відбувається внаслідок діяльності визначених типів бактерій, то істотний вплив на нього робить навколишнє середовище. Кількість газу, що виробляється, переважно залежить від температури: чим тепліше, тим більша швидкість і ступінь ферментації органічної сировини [3-5]. Саме тому перші установки для одержання біогазу з'явилися в країнах із теплим кліматом. Однак застосування надійної теплоізоляції, а іноді і підігрітої води, дозволяє освоїти застосування генераторів біогазу в районах, де температура взимку знижується до мінус 20°C [3, 15].

Існують також визначені вимоги до сировини. Вона повинна бути придатна для розвитку бактерій, мати органічну речовину, що біологічно розкладається, й у великій кількості воду (90-94 %). Бажано, щоб середовище було нейтральним і без речовин, що заважають дії бактерій. Такими речовинами є, наприклад, мило, пральні порошки, антибіотики тощо.

Для одержання біогазу можна використовувати рослинні і господарські відходи, гній, стічні води та інші відходи [3-5,7-9]. У процесі ферментації суміш у резервуарі має тенденцію до поділу на три фракції. Верхня – кірка, утворена з великих часток, які захоплюються пухирцями газу, що піднімаються. Через якийсь час вона може стати досить твердою і буде заважати виділенню біогазу. У середній частині ферментатора накопичується рідина. В нижній частині фракція випадає в осад.

Бактерії найбільш активні в середній зоні. Тому вміст резервуару необхідно періодично перемішувати, бажано до шести разів [3].

Способи перемішування наведено на рис 1.9. Перемішування може здійснюватися за допомогою механічних пристосувань гідравлічними засобами (під дією насосу), під напором пневматичної системи (часткова рециркуляція біогазу) чи за допомогою різних методів самоперемішування.

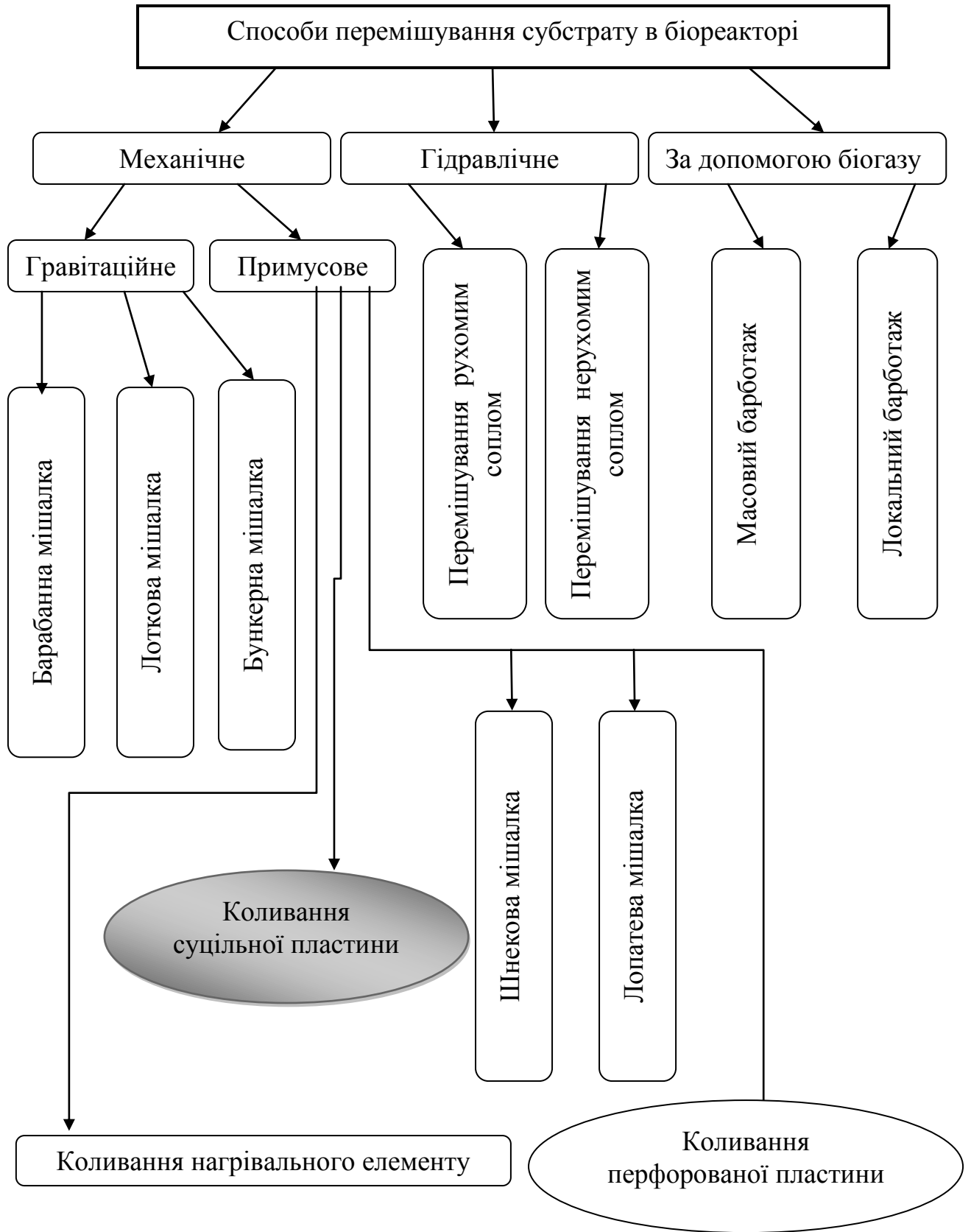


Рис 1.9 – Способи перемішування субстрату в біореакторі

Анаеробне бродіння в біореакторі – процес складний і нестабільний, на нього мають вплив як зовнішні, так і внутрішні чинники. Основні фактори, що впливають на процес бродіння [3-5,]:

- зовнішня температура;
- внутрішня температура середовища;
- лужність середовища, рН;
- наявність речовин інгібіторів;
- фракційний склад субстрату та його вологість і в'язкість;
- час бродіння;
- інтенсивність перемішування;
- вплив хімічного складу та типу вихідного матеріалу;
- термостабілізація процесу бродіння;
- тиск в системі;
- будова резервуару.

Вплив деяких із наведених чинників є досить значним і недотримання технологічних меж може зупинити процес. Інші мають не такий критичний вплив, але при сукупності дії всіх чинників їх ефект додається.

Лужність середовища повинна бути для нормального процесу бродіння в межах 1500-5000 мг CaCO_3 на 1 літр субстрату, а значення рН в межах 6,5-7,5. До речовин, що сповільнюють процес бродіння, належать солі важких металів, антибіотики, аміак, розчинники, лужні метали, поверхнево активні речовини, що містяться у пральних засобах. Наприклад, гранично допустима концентрація міді складає 10 мг на 1 літр субстрату, нітратів – 50 мг/л., аміаку 1500 мг/л. Субстрат для анаеробного бродіння – це суспензія з концентрацією сухої речовини 2-12%. Довжина стебел соломи, що може знаходитись в ньому, не повинна перевищувати 3 см. Більші значення наведених речовин призведуть до збільшеної в'язкості середовища, а відповідно до ускладнень при перемішуванні й утворенні бульбашок газу.

Велика в'язкість середовища не дозволить отриманим бульбашкам газу вільно прориватися через нього назовні.

Температурні режими протікання процесу бродіння

Процес бродіння протікає при трьох основних температурних режимах:

- психрофільному: температура бродіння 20 °С;
- мезофільному: оптимальна температура 32 - 33 °С;
- термофільному 52 - 54 °С.

Будь-які різкі зміни температури впливають негативно на процес бродіння. Для кожного режиму зброджування допустимі коливання температур $\pm 3^{\circ}\text{C}$. Метаболічна активність анаеробних бактерій знаходиться в прямій залежності від температури середовища. Згідно з останніми дослідженнями, зі зростанням температури вихід газу і розкладання органіки збільшується. Зі спаданням температури до 15 °С процес бродіння повністю припиняється [3-5].

При мезофільному процесі вихід газу буде складати 0,8-1,0 м³ на кілограм розкладеної органіки або 0,4-0,6 м³ на кілограм внесеної органічної маси. Для підвищення вироблення біогазу з субстрату необхідно збільшити час бродіння або температуру бродіння. В обох випадках при порушенні термостабілізації процес бродіння погіршує своє протікання.

Час бродіння залежить від типу субстрату, заданого ступеня розкладання органічних речовин, типу реактора, температурних режимів та інших чинників. Реактор може працювати в безперервному та в дискретному режимі.

Безперервний режим дозволяє постійно отримувати біогаз, але вимагає великої кількості органічної маси та спеціальних конструкцій реакторів.

Найбільший вихід біогазу спостерігається при надходженні в реактор такої кількості органічної маси, яка на даний час вже розклалася. В іншому випадку кількість наявних бактерій буде не в змозі розкласти нову порцію органіки і процес буде відбуватися повільніше. Дискретний режим дозволяє

отримати більшу кількість біогазу з одиниці маси речовини, але потребує на ферментацію більше часу. Збільшення часу бродіння дозволяє більш глибоко розкласти органічні речовини, таким чином, зменшуючи токсичність шламу, що залишається після бродіння, покращити якість біогазу, збільшуючи концентрацію CH_4 . Оптимальним вважається час бродіння - 10-20 діб [3]. За цей період досягається максимальна якість отриманого біогазу та максимальне розкладання органіки. Оптимальне завантаженням робочого об'єму біореактора для різних видів органічних речовин наведено в таблиці 1.4 [3]:

Таблиця 1.4

Завантаження робочого об'єму реактора, час перебування і розкладання органічних речовин при температурі 33°C

Вид джерела органічних відходів	Завантаження органіки на 1м ³ реактора на добу, кг	Час бродіння, діб	Ступінь розкладання маси, %
Дійні корови	6,0	15	40
Бички	4,5	10	40
Свині	3,0	10	50
Кури	1,5	50	55

Продукт анаеробного бродіння – біогаз є багатокомпонентним газом, склад якого варіюється в залежності від вихідної сировини, умов та часу бродіння. Основними компонентами біогазу є метан (50-70%), вуглекислий газ (25-45%). Також до складу входять сірководень та водень, загальна частка яких не перевищує 3%. Рівень баластових домішок в біогазі досягає рівня 50%, які не тільки перешкоджають використанню газу, але і шкодять обладнанню, трубопроводам та газгольдерам [3]. Основні фізико-хімічні властивості біогазу наведено в таблиці 1.5. В результаті бродіння утворюється з органічної маси шлам, який є надзвичайно цінним добривом, що містить у собі велику кількість аміаку, з'єднань калію та фосфору.

Фізико-хімічні властивості біогазу

Характеристика	Кількісний показник
Об'ємна теплота згорання, МДж/м ³	21,5
Межа спалахування у повітрі, %	6-12
Температура спалахування, °С	650-750
Критичний тиск біогазу, МПа	7,5
Критична температура, °С	-2,5
Нормальна густина, кг/м ³	1,2
Густина відносно повітря	0,83

Шлам не має характерного запаху, що властивий вихідній масі до бродіння. В результаті термічної обробки гинуть бактерії та личинки шкідників. Оптимальним терміном бродіння для знешкодження переважної більшості бактерій є тридцять днів. Менший час бродіння може призвести до неповної стерилізації субстрату. Після обробки в біогазовій установці шлам можна зразу вивозити на поля в якості добрива, ніякої бактеріологічної небезпеки він не несе. Одночасно з бактеріями знешкоджується насіння рослин, що може знаходитися в субстраті. Біошлам доцільно розділяти на компоненти: рідка – тверда фаза. Рідкою фазою виконують полив, а тверду гранулюють, висушують і вносять як добриво восени.

1.4. Шляхи інтенсифікації та термостабілізації процесу виробництва біогазу з органічних відходів

Рентабельність біогазових установок пропорційна витратам енергії на обігрів реактора. Мікробіологічні особливості протікання процесу анаеробного бродіння вимагають дотримання меж температурних режимів і температурної стабілізації, рівномірного прогріву середовища, відсутності

зон переохолодження і перегріву. Поширення розвитку біогазових установок потребує зниження їх капітальної і експлуатаційної собівартості. Інтенсифікація теплообміну між нагрівальним елементом і субстратом дозволить зменшити площі теплообмінних апаратів у реакторі, активізувати термостабілізуючі процеси та знизити вартість спорудження реактора [18].

У літературних джерелах викликають зацікавленість наступні *методи* інтенсифікації вільноконвективного теплообміну за умов зовнішнього омивання поверхні [17, 18]:

1) утворення вимушеної течії біля нагрівальної поверхні за рахунок встановлення вертикальних обмежуючих стінок;

2) збільшення поверхні теплообміну ребренням, яке може як збільшувати, так і зменшувати інтенсивність теплообміну [19];

3) локальний та масовий барботаж теплообмінної поверхні струминами біогазу, при цьому інтенсивність теплообміну зростає у 1,5...2,0 рази [18].

3) вібрація теплообмінної поверхні збільшує інтенсивність тепловіддачі для води до 20 разів, але здебільшого небажана через конструктивні ускладнення систем тепlopостачання та віброприводу;

3) вібрація середовища, акустичні методи, досяжна інтенсифікація теплообміну 2...3 рази [18];

Метод, заснований на вібрації середовища, найбільше відповідає умовам біогазової установки, оскільки, окрім інтенсифікації тепловіддачі, відбувається додаткове перемішування. Також серед найбільш ефективних способів збільшення інтенсивності теплообміну при обтіканні тіл рідиною одне з перших місць займає вібрація середовища, що забезпечує за оптимальних умов зростання інтенсивності теплообміну в 2...4 рази в порівнянні з вільною конвекцією. Висока інтенсивність теплообміну при вібрації середовища і відносно невелика витрата потужності на його здійснення, простота і гнучкість управління цим процесом – все це забезпечує переваги вібраційної активації по відношенню до інших способів

інтенсифікації теплообміну в рідинах та газах. Вказані переваги привели до досить широкого розповсюдження вібраційної активації в сучасній техніці. Омивання поверхонь хвилями рідини використовується в енергетичному машинобудуванні, металургії, хімічній технології, системах кондиціонування і в інших галузях техніки [24].

Дослідження термостабілізаційних процесів в елементах БГУ необхідно розглядати в контексті особливостей протікання процесів біоконверсії як характерного випадку поставленої задачі та в світлі вивчення закономірностей тепловіддачі від поверхні за умов вібраційного омивання поверхні.

В ході анаеробного бродіння біомаси необхідно дотримуватися певних меж температурних режимів [3-5]:

психрофільний - температура субстрату до $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, коливання $\pm 3...4\text{ }^{\circ}\text{C}$;

мезофільний - температура субстрату $35\text{ }^{\circ}\text{C}$, коливання $\pm 2,8\text{ }^{\circ}\text{C}$;

термофільний - температура субстрату $55\text{ }^{\circ}\text{C}$, коливання $\pm 0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Вказані особливості систем біоконверсії накладають обмеження на характеристики теплоенергетичного обладнання, оскільки низькі температурні напори ($1...5\text{ }^{\circ}\text{C}$) в теплообмінниках вимагають встановлення великих за площею поверхонь.

Конвективний теплообмін може протікати при великій різноманітності зовнішніх та внутрішніх умов, але можна виділити два найголовніших процеси тепловіддачі, які є найпоширенішими. При дослідженнях тепловіддачі визначають температуру поверхні нагріву t_n , при відомому питомому тепловому потоці q , або ж, навпаки, при відомій температурі нагрівника визначають, який тепловий потік проходить через одиницю площі нагрівальної поверхні. Визначення типу задачі диктується характеристиками протікання технологічного процесу та вимогами до температурних меж. Так, при експлуатації систем біоконверсії визначальним є дотримання меж температурних режимів в об'ємі середовища. На відміну від біогазових установок в більшості реакторів хімічної та біотехнічної промисловості

відбуваються екзотермічні процеси, і тому проблемою термостабілізації процесів теплообміну є відведення теплоти назовні. Дослідження теплообміну в контексті інтенсифікації шляхом омивання вібраційним рідинним середовищем необхідно розглядати з позицій зовнішнього омивання тіл.

Термогравітаційну конвекцію, що виникає в обмеженому об'ємі, розглядають з позиції турбулізації течій біля горизонтального циліндра, який виступає в ролі нагрівника. Авторами [26] за критерій турбулізації прийнято критерій Релея $R_a = G_r \cdot P_r$. При значеннях критерія до $R_a \leq 1$ говорять про плівкову течію навколо теплообмінної поверхні. При значеннях $R_a = 10^9$ і більше виникає турбулентна течія. Проміжне значення між ними відповідає ламінарному режиму.

Математичне зображення процесів активації теплообміну шляхом вібраційного впливу може бути побудоване на відомих залежностях теплових та матеріальних балансів, рівнянь теплопередачі та гідродинаміки. Використовуючи рівняння енергії, руху, нерозривності та теплопередачі, систему рівнянь, що описують процеси теплопередачі та руху при вібрації однокомпонентної ньютонівської рідини, можна записати у наступному вигляді [20]:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + \omega_x \frac{\partial t}{\partial x} + \omega_y \frac{\partial t}{\partial y} + \omega_z \frac{\partial t}{\partial z} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right), \quad (1.1)$$

$$\frac{D\vec{\omega}}{d\tau} = \vec{g} \cdot \beta \cdot \vartheta - \frac{1}{\rho} \cdot \nabla p + \nu \cdot \Delta^2 \cdot \vec{\omega}, \quad (1.2)$$

$$\alpha = -\frac{\lambda}{\vartheta_c} \cdot \left(\frac{\partial \vartheta}{\partial n} \right)_{n=0}, \quad (1.3)$$

$$\operatorname{div} \vec{\omega} = 0. \quad (1.4)$$

Математичне формулювання зовнішньої задачі при вібраційній активації теплообміну за умови сталості теплового потоку $q = \text{const}$ в безрозмірному вигляді можна представити у вигляді рівняння

$$\frac{\alpha \cdot l}{\lambda} = F \left(\frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot l^3}{\nu^2}, \text{Pr}, \frac{\omega \cdot d^2}{\nu}, \frac{\Delta A \cdot \omega^2 \cdot l^3}{\nu^2} \right). \quad (1.5)$$

Процеси вільної конвекції від горизонтального циліндра та омивання його середовищем досліджено в певній мірі. Узагальнені результати у вигляді емпіричних рівнянь наведено в [23].

Локальне газорідинне омивання поверхні теплообміну досліджувався в роботах [18]. Дослідження проводилися як на воді, так і на суспензії при масовій концентрації сухої речовини 3,5 і 8%. Виявлено зростання тепловіддачі в середньому 1,5-2,3 рази.

Вплив обмежувальних стінок на зростання тепловіддачі досліджувалось в [23], виявлено зростання тепловіддачі в 1,4-1,5 рази.

У роботі [21] досліджувалися процеси тепло- і масопередачі від горизонтального циліндру, що коливається в повітрі. Виявлено зростання інтенсивності тепловіддачі в 6,5 разів в порівнянні з вільною конвекцією. Автори дослідили тепловіддачу від ніхромових проволокон, що коливалися в повітрі, отримано зростання тепловіддачі в 4 рази. Дослідження [11] свідчать про зростання тепловіддачі в 10-12 разів від горизонтального циліндра, що коливається в воді та гліцерині.

Коливання рідини при малих комплексах Прандтля та амплітудах і вплив його на інтенсифікацію теплообміну в воді при вертикальних та горизонтальних коливаннях досліджено в [18]. Виявлено зростання коефіцієнту тепловіддачі в 2-2,5 рази.

У результаті аналізу літературних джерел виявлено, що в Україні є значний потенціал ресурсів для анаеробної конверсії органічних сільськогосподарських відходів. Використання саме анаеробної утилізації дозволить отримати екологічні і енергетичні складові ефективності процесу, знизити навантаження на біосферу, звільнити площі під полігонами, запобігти зараженню земель і води, отримати цінне органічне добриво і біогаз.

Процес утилізації сільськогосподарських відходів шляхом анаеробного бродіння в біореакторах ускладнюється необхідністю дотримання меж температурних режимів, великим енергоспоживанням установки, відсутністю комплексного контролю та управління над процесами бродіння, значними капіталовкладеннями у будівництво, суттєву частку в яких складає теплопостачальна частина.

Інтенсифікація теплообміну за рахунок вібрації середовища дозволить термостабілізувати процес бродіння, позбутися застійних зон, досягти активного перемішування і зменшення площ нагрівальних елементів, що приведе до зниження капітальних та експлуатаційних витрат, дозволить отримати з об'єму реактора більше біогазу.

У переважній частині джерел досліджуються процеси вільної конвекції, локального та масового барботажу, штучного створення підйомних течій. Відсутні емпіричні залежності для тепловіддачі за умов високих амплітуд та малих частот, малих питомих теплових потоків ($q < 5$ кВт). Не досліджено процеси віброактивації теплообміну в субстратах.

1.5. Висновки та задачі досліджень

1. В Україні на даний час вкрай обмежено використовуються ресурси біомаси, тоді як частка енергії з відновлювальних джерел в європейських країнах складає в середньому 18-22%. Обмеження поширення біогазових технологій з утилізації сільськогосподарських відходів на території України відбуваються через труднощі технологічного процесу та значну вартість установок.

2. Методи інтенсифікації теплообміну та шляхи досягнення термостабілізації процесу бродіння, гідродинаміка та теплообмін за умов коливання середовища як методу інтенсифікації досліджено недостатньо.

У літературних джерелах основна увага приділяється дослідженням

процесів вільної конвекції, локального та масового барботажу, штучного створення підйомних течій. Відсутні емпіричні залежності для тепловіддачі за умов високих амплітуд та малих частот, малих питомих теплових потоків ($q < 5$ кВт). Не досліджено процеси коливальної активації теплообміну у субстратах.

3. Відомі конструкції реакторів з утилізації сільськогосподарських відходів потребують модифікації та удосконалення для зниження вартості капітальних та експлуатаційних затрат, підвищення глибини розкладання органічної речовини та ступеня очищення біогазу.

4. Сформульовано робочу гіпотезу дослідження, яка полягає в тому, що одним із суттєвих шляхів інтенсифікації та термостабілізації процесу анаеробного бродіння органічних відходів у біореакторах з виробництва біогазу є коливальне перемішування субстрату, що дозволить збільшити вихід біогазу, зменшити площі нагрівальних елементів, здешевити біореактор та дотримуватися технології виробництва.

Реалізація висунутої гіпотези потребує провести дослідження технологічного процесу утилізації відходів сільськогосподарських виробництв шляхом анаеробного бродіння в біореакторах для отримання біогазу. Для реалізації цієї мети необхідно розв'язати наступні задачі:

- провести аналіз стану сучасних технологій, конструктивних рішень обладнання з утилізації органічних відходів сільськогосподарських підприємств;

- встановити закономірності руху робочих органів обладнання коливального перемішування субстрату в біогазових реакторах при утилізації органічних відходів;

- розробити аналітичну модель технологічного процесу отримання біогазу при анаеробному бродінні органічних відходів, що дозволить прогнозувати продуктивність біореактора в залежності від впливаючих факторів;

- обґрунтувати конструктивно-технологічні параметри біогазового реактору з обладнанням коливальної активації для утилізації органічних відходів;

- розробити експериментальну комп'ютеризовану установку з коливальним перемішувачем субстрату, провести експериментальні дослідження з метою визначення впливу параметрів коливань на інтенсифікацію технологічного процесу органічних відходів і перевірити адекватність отриманих теоретичних залежностей експериментальним даним;

- обґрунтувати раціональні технологічні схеми роботи біогазових реакторів з коливальним активатором при утилізації органічних відходів, оцінити на конкурентоспроможність та розробити рекомендації щодо його використання в сільськогосподарському виробництві;

- провести дослідження способів підготовки біогазу та запропонувати найбільш раціональні до практичного використання та обґрунтувати їх економічну ефективність.

РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ОТРИМАННЯ БІОГАЗУ ПРИ КОЛИВАЛЬНІЙ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ПРОЦЕСУ АНАЕРОБНОГО БРОДІННЯ В БІОГАЗОВИХ РЕАКТОРАХ

2.1. Вибір об'єкту моделювання

Аналіз сучасних технологій утилізації відходів сільськогосподарських підприємств показав, що на даний час найбільш перспективним способом є анаеробна біоконверсія. Технологія метанового бродіння вимагає дотримання меж температурних режимів, термостабілізації процесу, інтенсифікації теплообміну між нагрівником і субстратом. Сучасні біореактори вимагають встановлення великих площ нагрівальних елементів, споживають значну частку виробленої енергії на виробництво біогазу. В існуючих реакторах внаслідок температурних розшарувань глибоке розкладання органічної речовини потребує багато часу [3-5].

Для утилізації органічних відходів сільськогосподарських підприємств найбільш ефективною конструкцією біогазового реактора є реактор з коливально активуючою пластиною (рис 2.1) [13]. Рух пластини за допомогою віброприводу на базі гідроциліндру, кривошипно-шатунного механізму чи іншого збурювача дозволить активізувати теплообмін між нагрівальним елементом та субстратом у реакторі, термостабілізувати процес бродіння, зменшити площі нагрівальних елементів і збільшити ККД реактору.

Біореактор містить резервуар 1, (рис 2.1) який зверху закривається теплою на каркасі 8, ковпак 3, який рухається по напрямним ковпака 2 і в якому розміщені труба споживача 4, й манометр 5 та гідрогермитизатор 6. Всередині реактора розміщений підігрівач біомаси 7 та біомаса 9, яку приводить у рух пластина-активатор 10, що кінематично пов'язана в один механізм з кривошипно-шатунним збурювачем, який приводиться в дію електродвигуном.

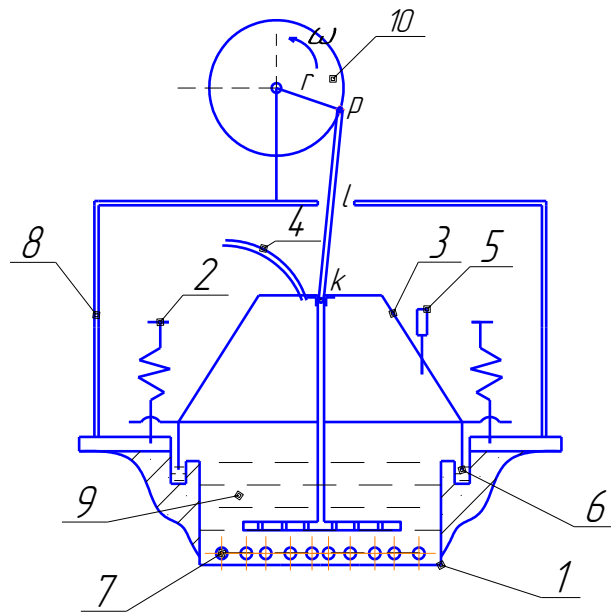


Рис. 2.1 – Біогазовий реактор з віброактивацією бродіння

Біореактор працює за таким принципом. При завантаженні біомаси в резервуар останній закривають ковпаком, що рухається по напрямним ковпака 2 та герметизується гідрогерметизатором 6. У ковпаці 3 розташований манометр 5 для спостереження за тиском газу та труба споживача 4 для відведення газу. Електродвигун примушує здійснювати коливальні рухи пластину – активатор 10. Імпульсні коливання суміші дозволяють більш активно перемішуватись субстрату. Також за рахунок омивання поверхні підігрівача 7 біомаси інтенсифікується тепловіддача від стінки нагрівального елемента до середовища. Також пульсація рідини дозволить біогазу більш легко прориватися крізь суміш та відбиратися через трубу споживача 4. Оскільки такий реактор раніше не досліджувався, то його приймаємо за об'єкт моделювання.

2.2 Моделювання інтелектуальної підтримки прийняття рішень з управління технологічними процесами підвищення продуктивності біогазових реакторів

Математичному моделюванню технологічних процесів біогазових реакторів у системах біоконверсії та прогнозуванню продуктивності роботи біореакторів сприяє моделювання багатофакторного процесу на базі даних, що реєструються як вихідні показники. Прогнозування ефекту виходу біогазу в залежності від факторів, що впливають на цей процес, доцільно виконувати на основі експертних кількісних і якісних оцінок. В якості інтенсифікуючих чинників прийняті: барботування, оребрення та вібрація нагрівального елемента в субстраті [25].

Для створення експертно-моделюючої системи для багатофакторного аналізу процесів управління біореакторами використано математичний апарат, що базується на теорії нечіткої логіки та лінгвістичної змінної [31]. Цей метод як взаємозв'язана сукупність математичних моделей, алгоритмів й формалізованих методик дозволяє використовувати експертно-лінгвістичну інформацію для прогнозування продуктивності реактора від факторів, що її обумовлюють, а також від факторів, що впливають на процес теплообміну між нагрівником і субстратом [24].

Для встановлення ієрархічних зв'язків факторів, що впливають на вихід біогазу в біореакторах, виконано їх класифікацію за ознаками: тип і якість сировини, конструкція реактора, стабільність температурного режиму. Розглянувши вихід біогазу на системному рівні, лінгвістичну змінну $L_{вих}$, що характеризує вихід біогазу, можна представити у вигляді співвідношення

$$L_{вих}=f(X,Y,Z), \quad (2.1)$$

де X – лінгвістична змінна (ЛЗ), що описує вплив типу і якості сировини;

Y – ЛЗ, що описує вплив конструкції реактора; Z -ЛЗ, що описує вплив стабільності температурного режиму.

ЛЗ, що описує вплив типу і якості сировини, може бути зображена виразом

$$X=f(x_1, x_2, x_3), \quad (2.2)$$

де x_1 – ЛЗ "тип сировини"; x_2 – ЛЗ "подрібненість сировини"; x_3 – ЛЗ "вологість сировини".

Лінгвістичну змінну, що описує вплив конструкції реактора, можна розгорнути в співвідношення

$$Y=f(y_1, y_2, y_3), \quad (2.3)$$

де y_1 - ЛЗ "звичайний"; y_2 - ЛЗ "утеплений "; y_3 - ЛЗ "з інтенсифікацією теплообміну та контролем параметрів";

Лінгвістичну змінну, що описує вплив стабільності температурного режиму, можна розгорнути в співвідношення

$$Z=f(z_1, z_2, z_3), \quad (2.4)$$

де z_1 - ЛЗ "градієнт температур між нагрівником та середовищем"; z_2 - ЛЗ «інтенсифікація теплообміну»; z_3 - ЛЗ "тип теплообмінника";

В рівняння (2.4) входять змінні, які, в свою чергу, залежать від інших факторів:

$$z_2=f(q_1, q_2, q_3), \quad (2.5)$$

де q_1 –перемішування в горизонтальній площині, q_2 -барботування, q_3 -коливальна активація.

$$q_3=f(u_1, u_2), \quad (2.6)$$

де u_1 – частота вібрацій, u_2 -амплітуда коливань.

За результатами аналізу сукупності співвідношень (2.1)...(2.6) побудовано дерево логічного висновку. Корінь дерева логічного висновку відповідає значенню продуктивності біогазового реактора, а висячі вершини - факторам, що впливають на її величину (рис 2.2).

Оцінка значень лінгвістичних змінних, які наведено в співвідношенні (2.1), проводиться за допомогою системи якісних термінів: Н - низька; нС - нижче середнього; С - середня; вС - вище середнього; В - висока. Кожний з цих термінів становить відповідну нечітку множину, тобто деяку властивість, яка розглядається як лінгвістичний терм [40]. Для лінгвістичних змінних, які впливають на продуктивність біореактора, оціночні терми наведено в табл.

Фактори як лінгвістичні змінні

Параметр	Позначення й назва змінної	Універсальна множина	Терми для оцінки
1	2	3	4
Тип і якість сировини (X)	x ₁ - тип сировини	(1...3), у.о.	низька(н), середня (ср), висока (в)
	x ₂ - подрібненість	(0,01-1), мм	здрибно(зд), нездрибно(нз)
	x ₃ - вологість сировини	(80...98), %	низька(н), нормальна(нр), висока(в)
Конструкція біореактора (Y)	y ₁ - конструктивне виконання	(1...3) у.о.	циліндричний (ц) траншейного типу (тр) кулеподібний (к)
	y ₂ - термічний опір стінки реактора	(1,0-3,0), м ² ×°C/Вт	низька(н), помірна(п) висока (в)
	y ₃ - якість автоматизованого управління	(1...4) у.о.	низька(н), помірна(п) висока (в)
Стабільність режиму (Z)	z ₁ - градієнт температур між нагрівальним елементом і субстратом	(0...30) Δt, °C	низький(н), задовільний(з), високий(в)
	z ₂ - інтенсифікація теплообміну	$K = \frac{Nu}{Nu_0} = 1.5...5$	низька(н), середня(ср), висока(в)
	z ₃ - тип теплообмінника	(1...2) у.о.	вмонтований(вм) трубчастий(тр)
	q ₁ - перемішування в гориз. площині	$K = \frac{Nu}{Nu_0} = 0...3$	відсутнє(в), середнє (с), високе(вс)
	q ₂ - барботування теплообмінника біогазом	$V_{прив} (0...40) 10^{-4}, \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$	відсутнє (в), середнє (с), високе(вс)
	q ₃ - коливальна активація	$K = \frac{Nu}{Nu_0} = 0...5$	відсутня (в), середня (с), висока(в)
	u ₁ - частота коливань	(0...10), Гц	низька(н), середня(с), висока(в)
	u ₂ - амплітуда коливань	(0...100), мм	низька(н), середня (с), висока(в)

У табл. 2.1 використано наступні позначення: у.о. - умовні одиниці, Δt – різниця температур між температурою стінки і температурою субстрату, $K = Nu/Nu_0$ - відношення критерію Нуссельта при активації теплообміну і при вільній конвекції. $V_{\text{прив}}$ - приведена швидкість барботування.

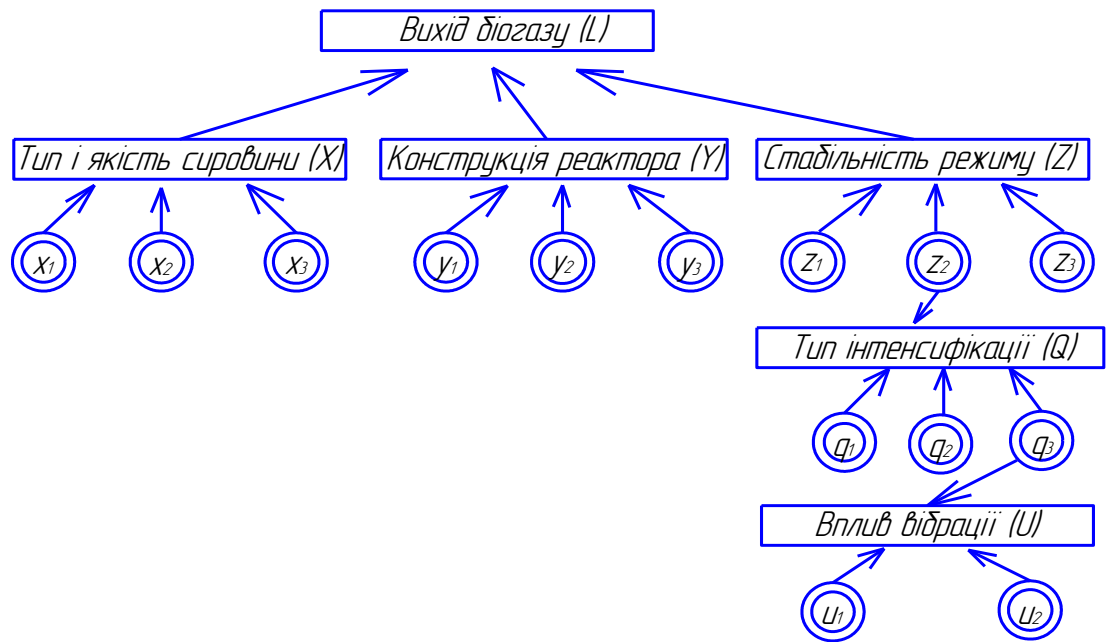


Рис. 2.2 – Дерево логічного висновку ієрархічних зв'язків факторів, що впливають на прийняття рішень з управління механізмами підвищення продуктивності біореакторів

Для розроблення математичної моделі оцінювання ступеня виходу біогазу в біореакторах та прийняття організаційно-технологічних рішень щодо зменшення капітальних та експлуатаційних затрат в системах біоконверсії як джерело інформації використовуються експертні оцінки, які мають якісний характер і доступні проектувальникам даних систем [33-35]. Метод побудови функцій належності передбачає фазифікацію нечітких оцінок факторів впливу. Етап фазифікації включає вибір нечітких термів для лінгвістичної оцінки факторів впливу, що задані на відповідних універсальних множинах (табл. 2.2).

Нечіткою множиною, за допомогою якої формалізується терм \tilde{S} , є сукупність пар [39,40]:

$$\tilde{S} = \left\{ \frac{\mu_s(u_1)}{u_1}, \frac{\mu_s(u_2)}{u_2}, \dots, \frac{\mu_s(u_n)}{u_n} \right\}, \quad (2.7)$$

де $\{u_1, u_2, \dots, u_n\} = U$ – універсальна множина, на якій задається нечітка множина $S \in U$.

$\mu_s(u_i)$ – ступінь належності елементу $u_i \in U$ до нечіткої множини \tilde{S} .

Розв'язання задачі фазифікації ґрунтується на ідеї розподілу ступенів належності універсальної множини згідно їх рангів.

Таблиця 2.2

База знань про співвідношення (2.1)

ЯКЩО			ТО
Вплив типу і якості сировини (X)	Вплив конструкції реактора (Y)	Вплив стабільності режиму (Z)	Продуктивність біореактора ($L_{\text{вих}}$)
Низький (Н)	Низький (Н)	Низький (Н)	Низький (Н)
Нижче середніх (нС)	Нижче середніх (нС)	Нижче середніх (нС)	
Низький (Н)	Низький (Н)	Низький (Н)	Нижче середнього (нС)
Нижче середніх (нС)	Нижче середніх (нС)	Нижче середніх (нС)	
Середні (С)	Середні (С)	Середні (С)	
Нижче середніх (нС)	Нижче середніх (нС)	Нижче середніх (нС)	Середній (С)
Середні (С)	Середні (С)	Середні (С)	
Вище середніх (вС)	Вище середніх (вС)	Вище середніх (вС)	
Середні (С)	Середні (С)	Середні (С)	Вище середнього (вС)
Вище середніх (вС)	Вище середніх (вС)	Вище середніх (вС)	
Високі (В)	Високі (В)	Високі (В)	
Вище середніх (вС)	Вище середніх (вС)	Вище середніх (вС)	Високий (В)
Високі (В)	Високі (В)	Високі (В)	

Лінгвістичним висловлюванням, які наведено в табл. 2.2, відповідає система нечітких логічних рівнянь, що характеризують поверхню належності змінних по відповідному терму

$$\mu_H(L_{\text{ВИХ}}) = \mu_H(X) \dot{\cup} \mu_H(Y) \dot{\cup} \mu_H(Z) \dot{\cup} \mu_{HC}(X) \dot{\cup} \mu_{HC}(Y) \dot{\cup} \mu_{HC}(Z), \quad (2.8)$$

$$\mu_{HC}(L_{\text{ВИХ}}) = \mu_H(X) \dot{\cup} \mu_H(Y) \dot{\cup} \mu_H(Z) \dot{\cup} \mu_{HC}(X) \dot{\cup} \mu_{HC}(Y) \dot{\cup} \mu_{HC}(Z) \dot{\cup} \mu_C(X) \dot{\cup} \mu_C(Y) \dot{\cup} \mu_C(Z), \quad (2.9)$$

$$\mu_C(L_{\text{ВИХ}}) = \mu_{HC}(X) \dot{\cup} \mu_{HC}(Y) \dot{\cup} \mu_{HC}(Z) \dot{\cup} \mu_C(X) \dot{\cup} \mu_C(Y) \dot{\cup} \mu_C(Z) \dot{\cup} \mu_{BC}(X) \dot{\cup} \mu_{BC}(Y) \dot{\cup} \mu_{BC}(Z), \quad (2.10)$$

$$\mu_{BC}(L_{\text{ВИХ}}) = \mu_C(X) \dot{\cup} \mu_C(Y) \dot{\cup} \mu_C(Z) \dot{\cup} \mu_{BC}(X) \dot{\cup} \mu_{BC}(Y) \dot{\cup} \mu_{BC}(Z) \dot{\cup} \mu_B(X) \dot{\cup} \mu_B(Y) \dot{\cup} \mu_B(Z), \quad (2.11)$$

$$\mu_B(L_{\text{ВИХ}}) = \mu_{BC}(X) \dot{\cup} \mu_{BC}(Y) \dot{\cup} \mu_{BC}(Z) \dot{\cup} \mu_B(X) \dot{\cup} \mu_B(Y) \dot{\cup} \mu_B(Z). \quad (2.12)$$

Оцінка рівнів лінгвістичних змінних, які зв'язують вплив типу і якості сировини (X) на продуктивність біореактора з типом сировини (x_1), подрібненістю (x_2), вологістю (x_3), наведено в табл. 2.3.

Лінгвістичним висловлюванням, що наведено в табл. 2.3, відповідає система нечітких логічних рівнянь, які характеризують поверхню належності змінних по відповідному терму

$$\mu_H(X) = \mu_H(x_1) \dot{\cup} \mu_{H3}(x_2) \dot{\cup} \mu_6(x_3) \dot{\cup} \mu_H(x_1) \dot{\cup} \mu_{H3}(x_2) \dot{\cup} \mu_H(x_3), \quad (2.13)$$

$$\mu_{HC}(X) = \mu_H(x_1) \dot{\cup} \mu_{30}(x_2) \dot{\cup} \mu_6(x_3) \dot{\cup} \mu_{cp}(x_1) \dot{\cup} \mu_{H3}(x_2) \dot{\cup} \mu_H(x_3) \dot{\cup} \mu_H(x_1) \dot{\cup} \mu_{H3}(x_2) \dot{\cup} \mu_H(x_3), \quad (2.14)$$

$$\mu_C(X) = \mu_H(x_1) \dot{\cup} \mu_{30}(x_2) \dot{\cup} \mu_H(x_3) \dot{\cup} \mu_{cp}(x_1) \dot{\cup} \mu_{30}(x_2) \dot{\cup} \mu_6(x_3) \dot{\cup} \mu_{cp}(x_1) \dot{\cup} \mu_{H3}(x_2) \dot{\cup} \mu_H(x_3), \quad (2.15)$$

$$\mu_{BC}(X) = \mu_H(x_1) \dot{\cup} \mu_{30}(x_2) \dot{\cup} \mu_H(x_3) \dot{\cup} \mu_{cp}(x_1) \dot{\cup} \mu_{30}(x_2) \dot{\cup} \mu_H(x_3) \dot{\cup} \mu_6(x_1) \dot{\cup} \mu_{30}(x_2) \dot{\cup} \mu_H(x_3), \quad (2.16)$$

$$\mu_B(X) = \mu_{cp}(x_1) \dot{\cup} \mu_{30}(x_2) \dot{\cup} \mu_H(x_3) \dot{\cup} \mu_6(x_1) \dot{\cup} \mu_{30}(x_2) \dot{\cup} \mu_H(x_3). \quad (2.17)$$

Таким чином, розробляються лінгвістичні висловлювання і відповідні системи нечітких логічних рівнянь для кожної змінної на всіх рівнях, які впливають на продуктивність біореактора при утилізації органічних відходів.

База знань про співвідношення (2.2)

ЯКЩО			ТО
Тип сировини (x_1)	Подрібненість (x_2)	Вологість (x_3)	Якість сировини (X)
Низька (н)	Нездрібнено (нз)	Висока (в)	Низька (H)
Низька (н)	Нездрібнено (нз)	Нормальна (н)	
Низька (н)	Здрібнено (зд)	Висока (в)	Нижче середньої (нС)
Середня (ср)	Нездрібнено (нз)	Нормальна (н)	
Низька (н)	Нездрібнено (нз)	Низька (н)	
Низька (н)	Здрібнено (зд)	Нормальна (н)	Середня (С)
Середня (ср)	Здрібнено (зд)	Висока (в)	
Висока (в)	Нездрібнено (нз)	Нормальна (н)	
Низька (н)	Здрібнено (зд)	Низька (н)	Вище середнього (вС)
Середня (ср)	Здрібнено (зд)	Нормальна (н)	
Висока (в)	Здрібнено (зд)	Нормальна (н)	
Середня (ср)	Здрібнено (зд)	Низька (н)	Висока (В)
Висока (в)	Здрібнено (зд)	Низька (н)	

Таблиця 2.4

База знань про співвідношення (2.4)

ЯКЩО			ТО
Градiєнт температур (z_1)	Інтенсифікація теплообміну (z_2)	Тип теплообмінника (z_3)	Стабільність режиму (Z)
Високий (в)	Низька (н)	Трубчатий (тр)	Низька (H)
Високий (в)	Низька (н)	Вмонтований (вм)	
Високий (в)	Середня (ср)	Трубчатий (тр)	Нижче середньої (нС)
Задовільний (з)	Низька (н)	Трубчатий (тр)	
Задовільний (з)	Середня (ср)	Трубчатий (тр)	
Задовільний (з)	Середня (ср)	Вмонтований (вм)	Середня (С)
Низький (н)	Середня (ср)	Трубчатий (тр)	
Задовільний (з)	Висока(в)	Трубчатий (тр)	
Задовільний (з)	Середня (ср)	Вмонтований (вм)	Вище середнього (вС)
Задовільний (з)	Висока(в)	Вмонтований (вм)	
Низький (н)	Середня (ср)	Вмонтований (вм)	
Низький (н)	Висока(в)	Трубчатий (тр)	Висока (В)
Низький (н)	Висока(в)	Вмонтований (вм)	

Лінгвістичним висловлюванням, що наведено в табл. 2.4, відповідає система нечітких логічних рівнянь, які характеризують поверхню належності змінних по відповідному терму

$$\mu_n(Z) = \mu_\epsilon(z_1) \dot{\cup} \mu_n(z_2) \dot{\cup} \mu_{mp}(z_3) \dot{\cup} \mu_\epsilon(z_1) \dot{\cup} \mu_n(z_2) \dot{\cup} \mu_{\epsilon m}(z_3), \quad (2.18)$$

$$\mu_{nC}(Z) = \mu_\epsilon(z_1) \dot{\cup} \mu_{cp}(z_2) \dot{\cup} \mu_{mp}(z_3) \dot{\cup} \mu_\epsilon(z_1) \dot{\cup} \mu_n(z_2) \dot{\cup} \mu_{mp}(z_3) \dot{\cup} \mu_\epsilon(z_1) \dot{\cup} \mu_{cp}(z_2) \dot{\cup} \mu_{tr}(z_3), \quad (2.19)$$

$$\mu_C(Z) = \mu_\epsilon(z_1) \dot{\cup} \mu_{cp}(z_2) \dot{\cup} \mu_{\epsilon m}(z_3) \dot{\cup} \mu_n(z_1) \dot{\cup} \mu_{cp}(z_2) \dot{\cup} \mu_{mp}(z_3) \dot{\cup} \mu_\epsilon(z_1) \dot{\cup} \mu_\epsilon(z_2) \dot{\cup} \mu_{mp}(z_3), \quad (2.20)$$

$$\mu_{BC}(Z) = \mu_\epsilon(z_1) \dot{\cup} \mu_{cp}(z_2) \dot{\cup} \mu_{\epsilon m}(z_3) \dot{\cup} \mu_{\epsilon d}(z_1) \dot{\cup} \mu_\epsilon(z_2) \dot{\cup} \mu_{\epsilon m}(z_3) \dot{\cup} \mu_n(z_1) \dot{\cup} \mu_{cp}(z_2) \dot{\cup} \mu_{\epsilon m}(z_3), \quad (2.21)$$

$$\mu_B(Z) = \mu_n(z_1) \dot{\cup} \mu_B(z_2) \dot{\cup} \mu_{mp}(z_3) \dot{\cup} \mu_n(z_1) \dot{\cup} \mu_\epsilon(z_2) \dot{\cup} \mu_{\epsilon m}(z_3). \quad (2.22)$$

Таблиця 2.5

База знань про співвідношення (2.3)

ЯКЩО			ТО
Конструктивне виконання (y ₁)	Термічний опір стінки реактору (y ₂)	Якість автоматизованого управління (y ₃)	Вплив конструкції біореактора (Y)
траншейне (тр)	низький (н)	низька(н)	Низький (H)
траншейне (тр)	середній (с)	низька(н)	
траншейне (тр)	середній (с)	середній (с)	Нижче середнього (HC)
циліндричний (ц)	низький (н)	середній (с)	
траншейне (тр)	середній (с)	середній (с)	
циліндричний (ц)	середній (с)	середній (с)	Середній (C)
кулеподібний(к)	середній (с)	середній (с)	
траншейне (тр)	середній (с)	високий (в)	
циліндричний (ц)	високий (в)	середній (с)	Вище середнього (BC)
кулеподібний(к)	високий (в)	середній (с)	
траншейне (тр)	високий (в)	високий (в)	
циліндричний (ц)	високий (в)	високий (в)	Високий (B)
кулеподібний(к)	високий (в)	високий (в)	

Лінгвістичним висловлюванням, що наведено в табл. 2.5, відповідає система нечітких логічних рівнянь, які характеризують поверхню належності змінних по відповідному терму

$$\mu_n(Y) = \mu_{mp}(y_1) \dot{\cup} \mu_n(y_2) \dot{\cup} \mu_n(y_3) \dot{\cup} \mu_{mp}(y_1) \dot{\cup} \mu_c(y_2) \dot{\cup} \mu_n(y_3), \quad (2.23)$$

$$\mu_{nC}(Y) = \mu_{mp}(y_1) \dot{\cup} \mu_c(y_2) \dot{\cup} \mu_c(y_3) \dot{\cup} \mu_y(y_1) \dot{\cup} \mu_n(y_2) \dot{\cup} \mu_c(y_3) \dot{\cup} \mu_{mp}(y_1) \dot{\cup} \mu_c(y_2) \dot{\cup} \mu_c(y_3), \quad (2.24)$$

$$\mu_c(Y) = \mu_y(y_1) \dot{\cup} \mu_c(y_2) \dot{\cup} \mu_c(y_3) \dot{\cup} \mu_k(y_1) \dot{\cup} \mu_c(y_2) \dot{\cup} \mu_c(y_3) \dot{\cup} \mu_{mp}(y_1) \dot{\cup} \mu_c(y_2) \dot{\cup} \mu_c(y_3), \quad (2.25)$$

$$\mu_{vC}(Y) = \mu_y(y_1) \dot{\cup} \mu_v(y_2) \dot{\cup} \mu_c(y_3) \dot{\cup} \mu_k(y_1) \dot{\cup} \mu_v(y_2) \dot{\cup} \mu_c(y_3) \dot{\cup} \mu_{mp}(y_1) \dot{\cup} \mu_v(y_2) \dot{\cup} \mu_v(y_3), \quad (2.26)$$

$$\mu_v(Y) = \mu_y(y_1) \dot{\cup} \mu_v(y_2) \dot{\cup} \mu_v(y_3) \dot{\cup} \mu_k(y_1) \dot{\cup} \mu_v(y_2) \dot{\cup} \mu_v(y_3). \quad (2.27)$$

В таблицю 2.6 зведено логічні висловлювання, що стосуються факторів впливу на теплообмін: оребрення, барботування, коливальна активація.

Таблиця 2.6

База знань про співвідношення (2.5)

ЯКЩО			ТО
Перемішування(q_1)	Барботування (q_2)	Колив. активація (q_3)	Інтенсифікація(Q)
Відсутнє (в)	Низьке(н)	Низьке(н)	Низький (Н)
Низьке(н)	Відсутнє (в)	Низьке(н)	
Низьке(н)	Низьке(н)	Відсутнє (в)	
Відсутнє (в)	Відсутнє (в)	Низьке(н)	Нижче середньої (нС)
Середнє (с)	Низьке(н)	Відсутнє (в)	
Низьке(н)	Середнє (с)	Відсутнє (в)	
Середнє (с)	Середнє (с)	Відсутнє (в)	Середній (С)
Високе (вс)	Відсутнє (в)	Відсутнє (в)	
Відсутнє (в)	Високе (вс)	Відсутнє (в)	
Середнє (с)	Високе (вс)	Відсутнє (в)	Вище середнього (вС)
Середнє (с)	Відсутнє (в)	Середнє (с)	
Високе (вс)	Відсутнє (в)	Середнє (с)	
Високе (вс)	Високе (вс)	Відсутнє (в)	
Середнє (с)	Середнє (с)	Високе (вс)	
Високе (вс)	Середнє (с)	Високе (вс)	Високий (В)

Лінгвістичним висловлюванням, що наведено в табл. 2.6, відповідає система нечітких логічних рівнянь, які характеризують поверхню належності змінних по відповідному терму

$$\mu_n(Q) = \mu_v(q_1) \dot{\cup} \mu_n(q_2) \dot{\cup} \mu_n(q_3) \dot{\cup} \mu_n(q_1) \dot{\cup} \mu_v(q_2) \dot{\cup} \mu_n(q_3) \dot{\cup} \mu_n(q_1) \dot{\cup} \mu_n(q_2) \dot{\cup} \mu_v(q_3), \quad (2.28)$$

$$\mu_{нс}(Q) = \mu_{\delta}(q_1) \dot{\cup} \mu_{\delta}(q_2) \dot{\cup} \mu_{н}(q_3) \dot{\cup} \mu_{с}(q_1) \dot{\cup} \mu_{н}(q_2) \dot{\cup} \mu_{\delta}(q_3) \dot{\cup} \mu_{н}(q_1) \dot{\cup} \dot{\cup} \mu_{с}(q_2) \dot{\cup} \mu_{в}(q_3), \quad (2.29)$$

$$\mu_{с}(Q) = \mu_{с}(q_1) \dot{\cup} \mu_{с}(q_2) \dot{\cup} \mu_{\delta}(q_3) \dot{\cup} \mu_{\deltaс}(q_1) \dot{\cup} \mu_{\delta}(q_2) \dot{\cup} \mu_{\delta}(q_3) \dot{\cup} \mu_{\delta}(q_1) \dot{\cup} \dot{\cup} \mu_{\deltaс}(q_2) \dot{\cup} \mu_{\delta}(q_3), \quad (2.30)$$

$$\mu_{вс}(Q) = \mu_{с}(q_1) \dot{\cup} \mu_{\deltaс}(q_2) \dot{\cup} \mu_{\delta}(q_3) \dot{\cup} \mu_{с}(q_1) \dot{\cup} \mu_{\delta}(q_2) \dot{\cup} \mu_{с}(q_3) \dot{\cup} \mu_{\deltaс}(q_1) \dot{\cup} \dot{\cup} \mu_{в}(q_2) \dot{\cup} \mu_{с}(q_3), \quad (2.31)$$

$$\mu_{в}(Q) = \mu_{\deltaс}(q_1) \dot{\cup} \mu_{вс}(q_2) \dot{\cup} \mu_{\delta}(q_3) \dot{\cup} \mu_{\delta}(q_1) \dot{\cup} \mu_{\delta}(q_2) \dot{\cup} \mu_{\deltaс}(q_3) \dot{\cup} \mu_{\deltaс}(q_1) \dot{\cup} \dot{\cup} \mu_{\delta}(q_2) \dot{\cup} \mu_{\deltaс}(q_3). \quad (2.32)$$

Таблиця 2.7

База знань про співвідношення (2.6)

ЯКЩО		ТО
Частота (u_1)	Амплітуда (u_2)	Коливальна активація (q_3)
Низька(н)	Низька(н)	Низька (H)
Низька(н)	Середнє (с)	
Середнє (с)	Низька(н)	Нижче середньої ($нС$)
Низька(н)	Висока (вс)	
Середнє (с)	Середнє (с)	Середня ($С$)
Високе (вс)	Низька(н)	
Середнє (с)	Висока (вс)	Вище середнього ($вС$)
Висока (вс)	Середнє (с)	
Висока (вс)	Висока (вс)	Висока (B)

Лінгвістичним висловлюванням, що наведено в табл. 2.7, відповідає система нечітких логічних рівнянь, які характеризують поверхню належності змінних по відповідному терму

$$\mu_{н}(q_3) = \mu_{н}(u_1) \dot{\cup} \mu_{н}(u_2) \dot{\cup} \mu_{н}(u_1) \dot{\cup} \mu_{с}(u_2), \quad (2.33)$$

$$\mu_{нс}(q_3) = \mu_{с}(u_1) \dot{\cup} \mu_{н}(u_2) \dot{\cup} \mu_{н}(u_1) \dot{\cup} \mu_{\deltaс}(u_2), \quad (2.34)$$

$$\mu_{с}(q_3) = \mu_{с}(u_1) \dot{\cup} \mu_{с}(u_2) \dot{\cup} \mu_{\deltaс}(u_1) \dot{\cup} \mu_{н}(u_2), \quad (2.35)$$

$$\mu_{вс}(q_3) = \mu_{с}(u_1) \dot{\cup} \mu_{\deltaс}(u_2) \dot{\cup} \mu_{\deltaс}(u_1) \dot{\cup} \mu_{с}(u_2), \quad (2.36)$$

$$\mu_{в}(q_3) = \mu_{\deltaс}(u_1) \dot{\cup} \mu_{вс}(u_2). \quad (2.37)$$

Техніка нечіткого логічного висновку, що застосовувалася до інформації, яка зібрана на попередніх етапах, дозволяє обчислити показник, який прогнозується як нечіткі множини. Нечіткі множини визначають ступінь інтенсифікації теплообміну між нагрівником і середовищем для фіксованого вектора факторів, що впливають. Щоб перейти від отриманих нечітких множин до кількісної оцінки, необхідно виконати процедуру дефазифікації, тобто перетворення нечіткої інформації в чітку форму. Серед різних методів дефазифікації найбільш поширеним є метод «Centroid» - центр тяжіння плоскої фігури, яка обмежена функцією належності нечіткої множини та горизонтальною координатою. Дефазифікацією нечіткої множини $L = \sum_{i=1}^n \mu_A(u_i) / u_i$ за методом «Centroid» називається обчислення величини $L = \text{centroid}(\tilde{L})$ за формулою

$$L = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_A(u_i) \cdot u_i}{\sum_{i=1}^n \mu_A(u_i)} \quad (2.38)$$

Для прикладу проведено дефазифікацію на рівні типу і якості сировини, для чого обчислено значення функцій належності методом парних порівнянь. Фактор x_1 – тип сировини [1...3] умовні одиниці. Матриця, що відображає парні порівняння різних величин сировини з точки зору їх близькості до терму «низька», має вигляд (табл 2.8).

Таблиця 2.8

Парні порівняння величин з точки зору їх близькості до терму «низька»

	u_1	u_2	u_3
u_1	1	7/9	3/9
u_2	9/7	1	5/7
u_3	9/3	7/5	1

Відповідно даних таблиці 2.8 отримано ступені належності елементів $u_1 \dots u_3$ до терму «низька»

$$u_{\text{низька}}(u_1) = \frac{1}{1 + \frac{7}{9} + \frac{3}{9}} = 0,47, \quad (2.39)$$

$$u_{\text{низька}}(u_2) = \frac{1}{1 + \frac{9}{7} + \frac{5}{7}} = 0,33, \quad (2.40)$$

$$u_{\text{низька}}(u_3) = \frac{1}{1 + \frac{9}{3} + \frac{7}{5}} = 0,19. \quad (2.41)$$

Аналогічно визначено матриці парних порівнянь для термів «середня» та «висока» та відповідні ступені належності. Результати наведено в табл. 2.9. Отримані результати функцій належності пронормовано на одиницю шляхом ділення на найбільший ступінь належності.

Таблиця 2.9

Матриці парних порівнянь та ступені належності

Терми для оцінки	Матриця парних порівнянь	Ступені належності																
низька	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>u_1</th> <th>u_2</th> <th>u_3</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <th>u_1</th> <td>1</td> <td>$7/9$</td> <td>$3/9$</td> </tr> <tr> <th>u_2</th> <td>$9/7$</td> <td>1</td> <td>$5/7$</td> </tr> <tr> <th>u_3</th> <td>$9/3$</td> <td>$7/5$</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>		u_1	u_2	u_3	u_1	1	$7/9$	$3/9$	u_2	$9/7$	1	$5/7$	u_3	$9/3$	$7/5$	1	$u(u_1)=0,47$ $u(u_2)=0,33$ $u(u_3)=0,19$
	u_1	u_2	u_3															
u_1	1	$7/9$	$3/9$															
u_2	$9/7$	1	$5/7$															
u_3	$9/3$	$7/5$	1															
середня	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>u_1</th> <th>u_2</th> <th>u_3</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <th>u_1</th> <td>1</td> <td>$9/5$</td> <td>$7/5$</td> </tr> <tr> <th>u_2</th> <td>$5/9$</td> <td>1</td> <td>$3/5$</td> </tr> <tr> <th>u_3</th> <td>$5/7$</td> <td>$5/3$</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>		u_1	u_2	u_3	u_1	1	$9/5$	$7/5$	u_2	$5/9$	1	$3/5$	u_3	$5/7$	$5/3$	1	$u(u_1)=0,23$ $u(u_2)=0,46$ $u(u_3)=0,29$
	u_1	u_2	u_3															
u_1	1	$9/5$	$7/5$															
u_2	$5/9$	1	$3/5$															
u_3	$5/7$	$5/3$	1															
висока	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>u_1</th> <th>u_2</th> <th>u_3</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <th>u_1</th> <td>1</td> <td>$9/7$</td> <td>$9/3$</td> </tr> <tr> <th>u_2</th> <td>$7/9$</td> <td>1</td> <td>$7/5$</td> </tr> <tr> <th>u_3</th> <td>$3/9$</td> <td>$5/7$</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>		u_1	u_2	u_3	u_1	1	$9/7$	$9/3$	u_2	$7/9$	1	$7/5$	u_3	$3/9$	$5/7$	1	$u(u_1)=0,19$ $u(u_2)=0,33$ $u(u_3)=0,47$
	u_1	u_2	u_3															
u_1	1	$9/7$	$9/3$															
u_2	$7/9$	1	$7/5$															
u_3	$3/9$	$5/7$	1															

В результаті чого тип сировини представлений у вигляді таких нечітких множин:

- тип сировини «низька»

$$= \left\{ \frac{1}{1}; \frac{0,7}{2}; \frac{0,4}{3} \right\};$$

- тип сировини «середня»

$$= \left\{ \frac{0,5}{1}; \frac{1}{2}; \frac{0,63}{3} \right\};$$

- тип сировини «висока»

$$= \left\{ \frac{0,4}{1}; \frac{0,7}{2}; \frac{1}{3} \right\};$$

Нечіткі множини $\mu(x_1)$ описано за допомогою графіків, які наведено на рис 2.3.

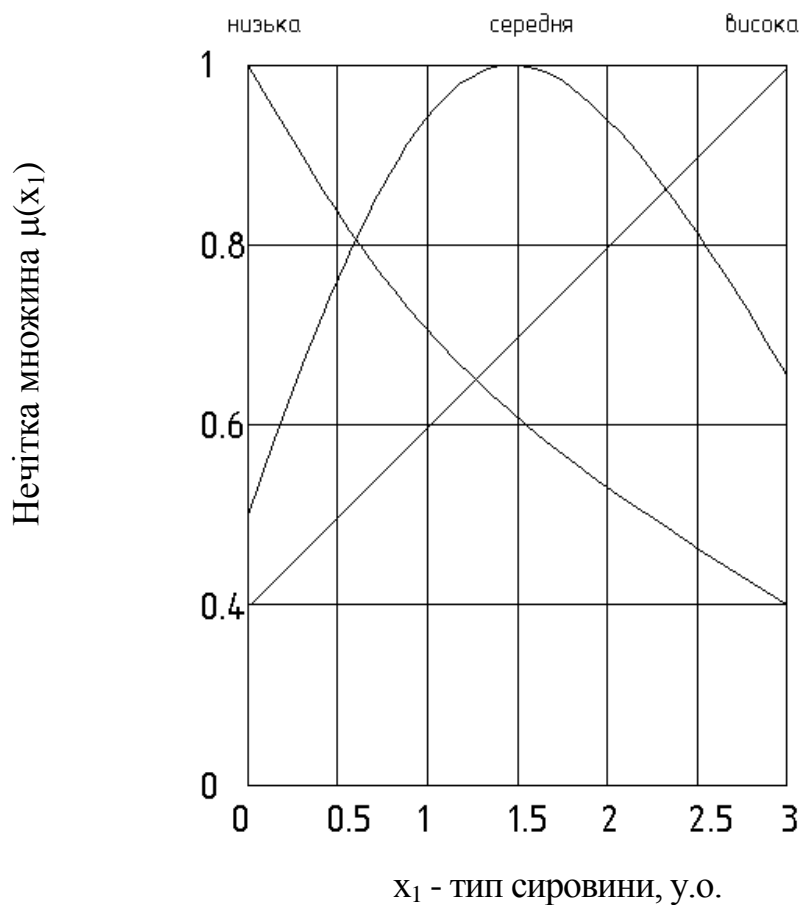


Рис 2.3 – Функції належності для лінгвістичної змінної «тип сировини»

Моделювання інтелектуальної підтримки прийняття рішень з управління технологічними механізмами підвищення продуктивності біогазових реакторів на базі теорії нечіткої логіки та лінгвістичної змінної виконуються за допомогою розробленої структурної моделі прийняття рішень. Визначено кількість біогазу, що може бути вироблена біореактором за добу, при таких вихідних умовах:

- тип сировини відповідає рівню 3 у.о.;
- подрібненість складає в середньому 0,3 мм;
- вологість 96 %;
- конструктивне виконання 2 у.о., що відповідає типу циліндричного реактора;
- термічний опір стінки реактора $2.8 \text{ м}^2 \times \text{°C} / \text{Вт}$;
- якість автоматизованого управління 2,8 у.о.;
- градієнт температур між нагрівальним елементом і субстратом 17 °C ;
- інтенсифікація теплообміну $K=2,5$;
- теплообмінник відповідає оцінці 1,4 у.о.;
- перемішування $K=0$ – відсутнє;
- барботування $20 \text{ м}^3 / \text{м}^2 \text{ с}$;
- віброактивація $K=0$ - відсутнє;
- частота коливань 0 Гц;
- амплітуда коливань 0 мм.

Для визначення продуктивності біореактора необхідно обчислити значення і функції належності факторів, що впливають на величину X - «тип і якість сировини», Y - «конструкція біореактора», Z - «стабільність режиму». Потім необхідно провести дефазифікацію вихідного показника, тобто перетворити нечітку інформацію в чітку форму.

Значення і функції належності факторів, що впливають на величину X - «тип і якість сировини», зведено в таблицю 2.10

Використовуючи аналітичні формули (2.13 – 2.17) та значення функції належності і змінних x_1, x_2, x_3 (табл. 2.10), отримаємо значення функції належності терм-оцінок змінної X .

$$\mu_n(X) = 0,4 \cup 0,48 \cup 1 \cup 0,4 \cup 0,48 \cup 0,63 = 0,4; \quad (2.42)$$

$$\mu_{nC}(X) = 0,4 \cup 0,76 \cup 1 \cup 0,63 \cup 0,48 \cup 0,63 \cup 0,4 \cup 0,48 \cup 0,4 = 0,48; \quad (2.43)$$

$$\mu_c(X) = 0,4 \cup 0,76 \cup 0,63 \cup 0,63 \cup 0,76 \cup 1 \cup 0,63 \cup 0,48 \cup 0,4 = 0,63; \quad (2.44)$$

$$\mu_{BC}(X) = 0,4 \cup 0,76 \cup 0,4 \cup 0,63 \cup 0,76 \cup 0,4 \cup 1 \cup 0,76 \cup 0,4 = 0,4; \quad (2.45)$$

$$\mu_B(X) = 0,63 \cup 0,76 \cup 0,4 \cup 1 \cup 0,76 \cup 0,4 = 0,4. \quad (2.46)$$

Таблиця 2.10

Значення і функції належності факторів, що впливають на величину X - «тип і якість сировини»

Фактор (U^*)	Значення	Значення функції належності термів для оцінки фактора U^*	Значення функції належності змінної (X)
x_1	3 у.о.	$\mu_n(x_1)=0,4$ $\mu_c(x_1)=0,63$ $\mu_B(x_1)=1$	$\mu_n(X)=0,4$ $\mu_{nC}(X)=0,48$ $\mu_c(X)=0,63$ $\mu_{BC}(X)=0,4$ $\mu_B(X)=0,4$
x_2	0,3 мм	$\mu_{зд}(x_2)=0,76$ $\mu_{нв}(x_2)=0,48$	
x_3	96 %	$\mu_n(x_3)=0,4$ $\mu_c(x_3)=0,63$ $\mu_B(x_3)=1$	

Використавши рівняння (2.23 – 2.27) та значення функції належності і змінних y_1, y_2, y_3 (табл. 2.11), отримаємо значення функції належності терм-оцінок змінної Y .

$$\mu_n(Y) = 0,38 \cup 0,26 \cup 0,84 \cup 0,38 \cup 0,63 \cup 0,84 = 0,84; \quad (2.47)$$

$$\mu_{nC}(Y) = 0,38 \cup 0,63 \cup 0,58 \cup 0,72 \cup 0,26 \cup 0,58 \cup 0,38 \cup 0,63 \cup 0,58 = 0,63; \quad (2.48)$$

$$\mu_c(Y) = 0,72 \cup 0,63 \cup 0,58 \cup 0,45 \cup 0,63 \cup 0,58 \cup 0,38 \cup 0,63 \cup 0,28 = 0,63; \quad (2.48)$$

$$\mu_{BC}(Y) = 0,72 \cup 0,84 \cup 0,58 \cup 0,45 \cup 0,84 \cup 0,58 \cup 0,38 \cup 0,84 \cup 0,28 = 0,84; \quad (2.50)$$

$$\mu_B(Y) = 0,72 \cup 0,84 \cup 0,28 \cup 0,45 \cup 0,84 \cup 0,28 = 0,84.$$

(2.51)

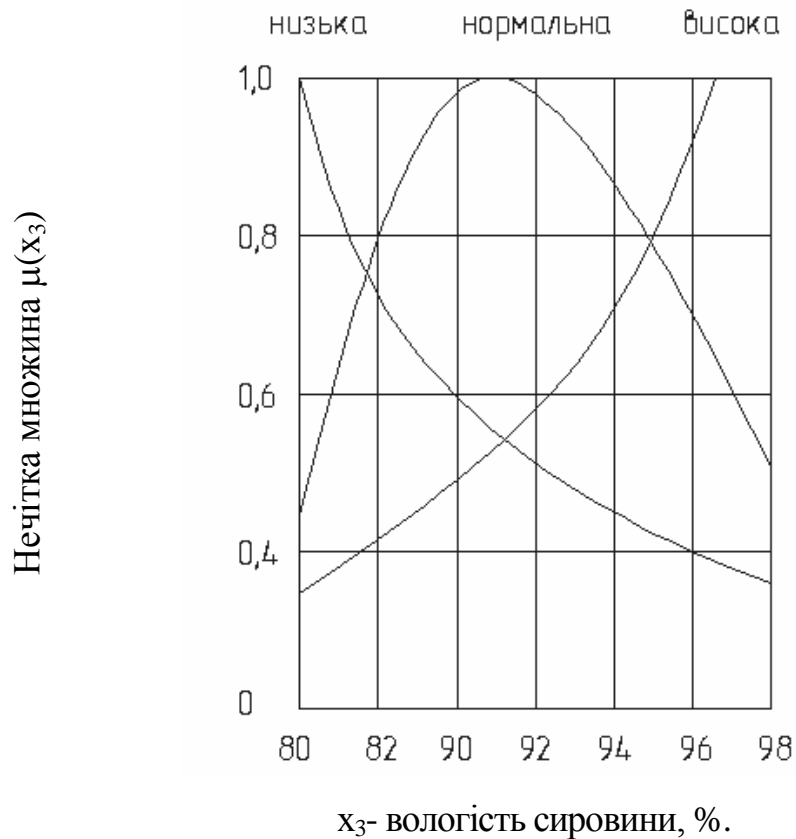


Рис 2.4 Функції належності для лінгвістичної змінної «вологість сировини»

Таблиця 2.11

Значення і функції належності факторів, що впливають на величину Y -
«конструкція біореактора»

Фактор (U^*)	Значення	Значення функції належності термів для оцінки фактора U^*	Значення функції належності змінної (Y)
y_1	2 у.о.	$\mu_{TP}(y_1)=0,38$ $\mu_{II}(y_1)=0,72$ $\mu_K(y_1)=0,45$	$\mu_n(Y)=0,84$ $\mu_{nC}(Y)=0,63$ $\mu_{BC}(Y)=0,84$ $\mu_B(Y)=0,84$
y_2	2.8 $m^2 \times ^\circ C/Вт$	$\mu_n(y_2)=0,26$ $\mu_{II}(y_2)=0,63$ $\mu_B(y_2)=0,84$	
y_3	1,5 у.о.	$\mu_n(y_3)=0,84$ $\mu_{II}(y_3)=0,58$ $\mu_B(y_3)=0,28$	

Використовуючи аналітичні формули (2.18 – 2.22) та значення функції належності і змінних z_1, z_2, z_3 (табл. 2.12), отримуємо значення функції належності терм-оцінок змінної Z .

$$\mu_H(Z) = 0,56 \dot{\cup} 0,70 \dot{\cup} 0,76 \dot{\cup} 0,56 \dot{\cup} 0,70 \dot{\cup} 0,4 = 0,70; \quad (2.52)$$

$$\mu_{HC}(Z) = 0,56 \dot{\cup} 0,63 \dot{\cup} 0,76 \dot{\cup} 0,82 \dot{\cup} 0,70 \dot{\cup} 0,76 \dot{\cup} 0,82 \dot{\cup} 0,63 \dot{\cup} 0,76 = 0,76; \quad (2.53)$$

$$\mu_C(Z) = 0,82 \dot{\cup} 0,63 \dot{\cup} 0,4 \dot{\cup} 0,38 \dot{\cup} 0,63 \dot{\cup} 0,76 \dot{\cup} 0,82 \dot{\cup} 0,34 \dot{\cup} 0,76 = 0,76; \quad (2.54)$$

$$\mu_{BC}(Z) = 0,82 \dot{\cup} 0,63 \dot{\cup} 0,4 \dot{\cup} 0,82 \dot{\cup} 0,34 \dot{\cup} 0,4 \dot{\cup} 0,38 \dot{\cup} 0,63 \dot{\cup} 0,4 = 0,63; \quad (2.55)$$

$$\mu_B(Z) = 0,38 \dot{\cup} 0,56 \dot{\cup} 0,76 \dot{\cup} 0,38 \dot{\cup} 0,34 \dot{\cup} 0,4 = 0,38. \quad (2.56)$$

Таблиця 2.12

Значення і функції належності факторів, що впливають на величину Z - «стабільність режиму»

Фактор (U^*)	Значення	Значення функції належності термів для оцінки фактора U^*	Значення функції належності змінної (X)
z_1	17 °С.	$\mu_H(z_1)=0,38$ $\mu_C(z_1)=0,82$ $\mu_B(z_1)=0,56$	$\mu_H(Z)=0,70$ $\mu_{HC}(Z)=0,76$ $\mu_C(Z)=0,76$ $\mu_{BC}(Z)=0,63$ $\mu_B(Z)=0,38$
z_2	$K=2,5$	$\mu_H(z_2)=0,70$ $\mu_C(z_2)=0,63$ $\mu_B(z_2)=0,34$	
z_3	1,4 у.о.	$\mu_{TP}(z_3)=0,76$ $\mu_{BM}(z_3)=0,4$	

Визначимо значення функції належності терм оцінок функції $L_{вих}$, використовуючи рівняння (2.8-2.12)

$$\mu_H(L_{вих}) = 0,4 \dot{\cup} 0,84 \dot{\cup} 0,70 \dot{\cup} 0,48 \dot{\cup} 0,63 \dot{\cup} 0,76 = 0,70, \quad (2.57)$$

$$\mu_{HC}(L_{вих}) = 0,4 \dot{\cup} 0,84 \dot{\cup} 0,70 \dot{\cup} 0,48 \dot{\cup} 0,63 \dot{\cup} 0,76 \dot{\cup} 0,63 \dot{\cup} 0,63 \dot{\cup} 0,76 = 0,76, \quad (2.58)$$

$$\mu_C(L_{вих}) = 0,48 \dot{\cup} 0,63 \dot{\cup} 0,76 \dot{\cup} 0,63 \dot{\cup} 0,63 \dot{\cup} 0,76 \dot{\cup} 0,4 \dot{\cup} 0,84 \dot{\cup} 0,63 = 0,76, \quad (2.59)$$

$$\mu_{BC}(L_{вих}) = 0,63 \dot{\cup} 0,63 \dot{\cup} 0,76 \dot{\cup} 0,4 \dot{\cup} 0,84 \dot{\cup} 0,63 \dot{\cup} 0,4 \dot{\cup} 0,84 \dot{\cup} 0,38 = 0,76, \quad (2.60)$$

$$\mu_B(L_{\text{вих}}) = 0,4 \cdot 0,84 + 0,63 \cdot 0,4 + 0,84 \cdot 0,38 = 0,84. \quad (2.71)$$

Для даного прикладу за умови, що нижня і верхня межа вихідної величини продуктивності біогазового реактора складають $\underline{Q} = 1,6 \text{ м}^3/\text{доба}$, $\overline{Q} = 8 \text{ м}^3/\text{доба}$, проведено дефазифікацію за формулою (2.38)

$$Q = \frac{1,6 \cdot 0,7 + 3,2 \cdot 0,76 + 4,8 \cdot 0,76 + 6,4 \cdot 0,76 + 8 \cdot 0,84}{0,7 + 0,76 + 0,76 + 0,76 + 0,84} = 4,92 \text{ м}^3/\text{добу}.$$

Модель нечіткого логічного висновку разом з процедурою дефазифікації забезпечує можливість спостереження за змінами вихідного показника – ступеня підвищення продуктивності біореактора в залежності від кількісних і якісних факторів, що наведено вище. Використавши дану математичну модель в комплексі для всіх підрівнів та рівнів, можна отримати прогнозовану оцінку активуючого впливу наведених факторів на продуктивність біореактора при утилізації органічних відходів сільськогосподарських підприємств.

2.3 Обґрунтування процесу активації роботи біореактора при коливальному перемішуванні субстрату

Коливання рідини за допомогою клапана-пульсатора, кривошипно-шатунного механізму тощо дозволяє утворити в зоні теплообмінної поверхні штучну турбулізацію, що викличе руйнування в'язкого пристінного шару, інтенсивного омивання нагрівальної стінки та інтенсифікації теплообміну. Розглянемо рух кривошипно-шатунного механізму, який використовувався як збудувач пульсацій в експериментальній установці (рис 2.5):

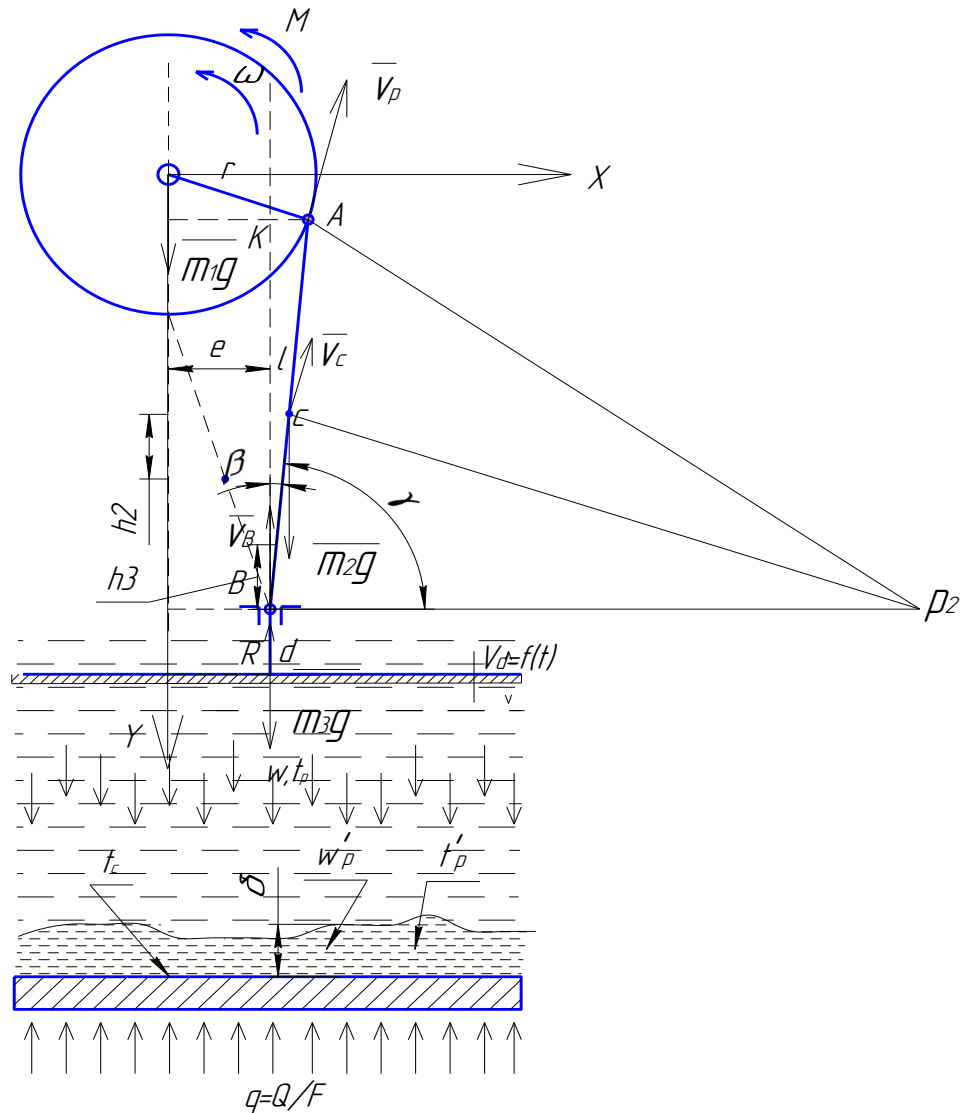


Рис. 2.5 – Кривошипно-шатунний механізм з пластиною-активатором

Рівняння руху пластини – активатора знайдемо, розв’язавши рівняння Лагранжа (2.72)

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi} = Q_{\varphi} \quad (2.72)$$

Загальна кінетична енергія системи визначається як сума кінетичних енергій руху складових кривошипно-шатунного механізму (2.73)

$$T = T_1 + T_2 + T_3 \quad (2.73)$$

Для визначення кінетичних енергій складових системи запишемо кінематичні співвідношення між елементами (2.74-2.85)

Ввівши систему координат, як показано на рис 2.5, запишемо кінематичні співвідношення між складовими механізму активатора та рівняння швидкостей, за умови, що миттєвий центр швидкостей – точка P_2

$$KA = r \cdot \sin(\varphi) - \varepsilon \quad (2.74)$$

$$KB = \sqrt{l^2 - (r \cdot \sin(\varphi) - \varepsilon)^2} \quad (2.75)$$

$$\begin{bmatrix} Y_B = r \cdot \cos(\varphi) + KB \\ X_B = \varepsilon \end{bmatrix} \quad (2.76)$$

$$\begin{bmatrix} X_c = \varepsilon + KA/2 = \varepsilon + (r \cdot \sin(\varphi) - \varepsilon)/2 \\ Y_c = r \cdot \cos(\varphi) + KB/2 = r \cdot \cos(\varphi) + 0.5 \cdot \sqrt{l^2 - (r \cdot \sin(\varphi) - \varepsilon)^2} \end{bmatrix} \quad (2.77)$$

$$\begin{bmatrix} V_B = \dot{Y}_B = \dot{\varphi} \cdot r \cdot \sin(\varphi) + \frac{-(r \cdot \sin(\varphi) - \varepsilon) \cdot r \cdot \cos(\varphi) \cdot \dot{\varphi}}{\sqrt{l^2 - (r \cdot \sin(\varphi) - \varepsilon)^2}} \\ V_C = \sqrt{\dot{X}_c^2 + \dot{Y}_c^2} = - \\ - \sqrt{\frac{r^2 \dot{\varphi}^2 \cdot \cos^2(\varphi)}{4} + \left[-r \cdot \dot{\varphi} \cdot \sin(\varphi) - \frac{\dot{\varphi} \cdot r \cdot \cos(\varphi) (r \cdot \sin(\varphi) - \varepsilon)^2}{\sqrt{l^2 - (r \cdot \sin(\varphi) - \varepsilon)^2}} \right]} \end{bmatrix} \quad (2.78)$$

Відстань h_2 , яку пройде центр мас ланки РК – точка С при русі механізму, визначимо згідно рівняння

$$h_2 = r + \sqrt{l^2 - \varepsilon^2} / 2 - \left(r \cdot \cos(\varphi) + \sqrt{l^2 - 0.5 \cdot (r \cdot \sin(\varphi) - \varepsilon)^2} \right) \quad (2.79)$$

Відстань h_3 , що проходить точка В при русі механізму, визначимо згідно рівняння

$$h_3 = r + \sqrt{l^2 - \varepsilon^2} - \left(r \cdot \cos(\varphi) + \sqrt{l^2 - (r \cdot \sin(\varphi) - \varepsilon)^2} \right) \quad (2.80)$$

Знайдемо рівняння, що описують значення узагальненої сили Q_φ

$$Q_\varphi = \frac{\delta A}{\delta \varphi} \quad (2.81)$$

Загальна робота сил, що діють на даний механізм активатора, складається з роботи сили ваги ланки кривошипу – A_{m_2g} , сили ваги повзуна A_{m_3g} , роботи моменту сил, що приводить у рух активатор – A_M , роботу сили опору середовища руху пластини – активатора – A_R .

$$A = A_{m_2g} + A_{m_3g} + A_M + A_R . \quad (2.82)$$

Знайдемо значення цих робіт:

$$A_{m_2g} = -m_2 \cdot g \cdot \left[r \cdot (1 - \cos(\varphi)) + \frac{\sqrt{l^2 - \varepsilon^2} - \sqrt{l^2 - (r \cdot \sin(\varphi) - \varepsilon)^2}}{2} \right]. \quad (2.83)$$

$$A_{m_3g} = -m_3 \cdot g \cdot \left[r \cdot (1 - \cos(\varphi)) + \sqrt{l^2 - \varepsilon^2} - \sqrt{l^2 - (r \cdot \sin(\varphi) - \varepsilon)^2} \right]. \quad (2.84)$$

$$A_M = M \cdot \varphi. \quad (2.85)$$

Силу опору середовища руху пластини-активатора прийемо у вигляді:

$$R = C \cdot S \cdot \frac{\rho \cdot w_{\max}^2}{2}, \quad (2.86)$$

де C – дослідний коефіцієнт [75], що залежить від співвідношення сторін пластини, w_{\max} – максимально допустима швидкість руху субстрату ($w_{\max}=0,7\text{м/с}$). Використання значення сили опору середовища у вигляді (2.86) дозволяє нам брати до уваги тільки технологічно максимально допустиме значення швидкості руху субстрату, таким чином спрощуючи інженерний розв'язок рівняння (2.72).

$$A_R = -0.245 \cdot m_3 \cdot \rho \cdot C \cdot S \cdot \left(r + \sqrt{l^2 - \varepsilon^2} - \left(r \cdot \cos(\varphi) + \sqrt{l^2 - (r \cdot \sin(\varphi) - \varepsilon)^2} \right) \right). \quad (2.87)$$

Тоді вираз для знаходження узагальненої сили буде мати вигляд

$$\begin{aligned}
Q = M - m_2 g \cdot & \left(r \cdot \sin(\varphi) + \frac{r \cdot \cos(\varphi) \cdot (r \cdot \sin(\varphi) - \varepsilon)}{2 \cdot \sqrt{l^2 - (r \cdot \sin(\varphi) - \varepsilon)^2}} \right) - \\
& - m_3 g \cdot \left[r \cdot \sin(\varphi) + \frac{r \cdot \cos(\varphi) \cdot (r \cdot \sin(\varphi) - \varepsilon)}{2 \cdot \sqrt{l^2 - (r \cdot \sin(\varphi) - \varepsilon)^2}} \right] - \\
& - 0.245 \cdot m_3 \cdot \rho \cdot C \cdot S \cdot \left(r + \sqrt{l^2 - \varepsilon^2} - \left(r \cdot \cos(\varphi) + \sqrt{l^2 - (r \cdot \sin(\varphi) - \varepsilon)^2} \right) \right)
\end{aligned} \quad (2.88)$$

Кінетична енергія системи - це сума кінетичних енергій складових ланок. Врахувавши особливості руху кожного із складових, запишемо рівняння для визначення кінетичних енергій ланок коливального активатора

$$T = T_1 + T_2 + T_3 \quad (2.89)$$

Кінетична енергія першого тіла – рух обертальний

$$T_1 = \frac{J \cdot \dot{\varphi}^2}{2} = \frac{m_1 \cdot r^2 \cdot \dot{\varphi}^2}{4} \quad (2.90)$$

Кінетична енергія другого тіла – рух плоскопаралельний

$$\begin{aligned}
T_2 = \dot{\varphi} \cdot r^2 \cdot m_2 \cdot 0.5 & \left[\left[\frac{r \cdot \cos(\varphi) + \sqrt{[l^2 - (r \cdot \sin(\varphi) - \varepsilon)^2]} \cdot \tan(\varphi) - \varepsilon}{l^2 - (r \cdot \sin(\varphi) - \varepsilon)^2} \right]^2 \right] + \\
& + 0.25 \cdot l^2 - [r \cdot \cos(\varphi) + \sqrt{[l^2 - (r \cdot \sin(\varphi) - \varepsilon)^2]} \cdot \tan(\varphi) - \\
& - \varepsilon] \cdot (r \sin(\varphi) - \varepsilon) + \frac{l^2}{12 \cdot [l^2 - (r \cdot \sin(\varphi) - \varepsilon)^2]} \quad (2.91)
\end{aligned}$$

Кінетична енергія третього тіла – рух поступальний

$$T_3 = \dot{\varphi}^2 \cdot r^2 \cdot \left[\frac{m_3 \left[(r - \varepsilon) \cdot \cos(\varphi) + \sqrt{l^2 - (r \cdot \sin(\varphi) - \varepsilon)^2} \right]^2}{2 \cdot (\cos(\varphi))^2 \cdot [l^2 - (r \cdot \sin(\varphi) - \varepsilon)^2]} \right] \quad (2.92)$$

Вираз для визначення кінетичної набуде вигляду

$$T = \dot{\varphi}^2 \cdot r^2 \left[0.25 \cdot m_1 + \frac{m_3 \left[(r - \varepsilon) \cdot \cos(\varphi) + \sqrt{l^2 - (r \cdot \sin(\varphi) - \varepsilon)^2} \right]^2}{2 \cdot (\cos(\varphi))^2 \cdot [l^2 - (r \cdot \sin(\varphi) - \varepsilon)^2]} \right] +$$

$$\begin{aligned}
& + m_2 \cdot 0.5 \left[\left[\frac{[r \cdot \cos(\varphi) + \sqrt{[l^2 - (r \cdot \sin(\varphi) - \varepsilon)^2]} \cdot \tan(\varphi) - \varepsilon]^2}{l^2 - (r \cdot \sin(\varphi) - \varepsilon)^2} \right] + \right. \\
& + 0.25 \cdot l^2 - [r \cdot \cos(\varphi) + \sqrt{[l^2 - (r \cdot \sin(\varphi) - \varepsilon)^2]} \cdot \tan(\varphi) - \\
& \left. - \varepsilon] \cdot (r \sin(\varphi) - \varepsilon) + \frac{l^2}{12 \cdot [l^2 - (r \cdot \sin(\varphi) - \varepsilon)^2]} \right]. \quad (2.93)
\end{aligned}$$

Часткова похідна від кінетичної енергії по куту повороту

$$\begin{aligned}
\frac{\delta T}{\delta \varphi} = & (m_3^2 \cdot \frac{[(r - e) \cdot \cos(\varphi) + l^2 - (r \cdot \sin(\varphi) - e)^2]}{\cos(\varphi)^2 \cdot [l^2 - (r \cdot \sin(\varphi) - e)^2]}) \cdot [-r - \\
& - e] \cdot \sin(\varphi) - 2(r \cdot \sin(\varphi) - e) \cdot r \cdot \cos(\varphi)] + \\
& + m_3^2 \cdot \frac{[(r - e) \cdot \cos(\varphi) + l^2 - (r \cdot \sin(\varphi) - e)^2]^2}{\cos(\varphi)^3 \cdot [l^2 - (r \cdot \sin(\varphi) - e)^2]} \cdot \sin(\varphi) + \\
& + m_3^2 \cdot \frac{[(r - e) \cdot \cos(\varphi) + l^2 - (r \cdot \sin(\varphi) - e)^2]^2}{\cos(\varphi) \cdot [l^2 - (r \cdot \sin(\varphi) - e)^2]^2} \cdot (r \cdot \sin(\varphi) - e) \cdot r + \quad (2.94) \\
& + 0.5 \cdot m_2 \cdot \left[2 \cdot \frac{[r \cdot \cos(\varphi) + [l^2 - (r \cdot \sin(\varphi) - e)^2]^{\frac{1}{2}} \cdot \tan(\varphi) - e]}{[l^2 - (r \cdot \sin(\varphi) - e)^2]} \right. \\
& \cdot \left[-r \cdot \sin(\varphi) - \frac{1}{[l^2 - (r \cdot \sin(\varphi) - e)^2]^{\frac{1}{2}}} \cdot \tan(\varphi) \cdot (r \cdot \sin(\varphi) - \right. \\
& \left. - e) \cdot r \cdot \cos(\varphi) + [l^2 - (r \cdot \sin(\varphi) - e)^2]^{\frac{1}{2}} \cdot (1 + \tan(\varphi)^2) + \right.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + 2 \cdot \frac{\left[r \cdot \cos(\varphi) + \left[l^2 - (r \cdot \sin(\varphi) - e)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \tan(\varphi) - e \right]^2}{\left[l^2 - (r \cdot \sin(\varphi) - e)^2 \right]} \cdot (r \cdot \sin(\varphi) - e) \cdot r \cdot \cos(\varphi) - \\
& - \left[-r \cdot \sin(\varphi) - \frac{1}{\left[l^2 - (r \cdot \sin(\varphi) - e)^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \cdot \tan(\varphi) \cdot (r \cdot \sin(\varphi) - e) \cdot \right. \\
& \cdot r \cdot \cos(\varphi) + \left. \left[l^2 - (r \cdot \sin(\varphi) - e)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \cdot (1 + \tan(\varphi)^2) \right] \cdot (r \cdot \sin(\varphi) - e) - \\
& - \left[r \cdot \cos(\varphi) + \left[l^2 - (r \cdot \sin(\varphi) - e)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \tan(\varphi) - e \right] \cdot r \cdot \cos(\varphi) + \\
& + 24 \cdot \frac{l^2}{\left[12 \cdot l^2 - 12 \cdot (r \cdot \sin(\varphi) - e)^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \cdot \\
& \cdot (r \cdot \sin(\varphi) - e) \cdot r \cdot \cos(\varphi) \Big] \cdot \dot{\varphi}^2 \cdot r^2
\end{aligned}$$

Позначимо у (2.90) вираз у дужках через «D», тоді похідна по часу

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\delta T}{\delta \dot{\varphi}} \right) = 2 \cdot \ddot{\varphi} \cdot r^2 \cdot D. \quad (2.95)$$

Рівняння Лагранжа (2.72) запишеться у вигляді

$$2 \cdot \ddot{\varphi} \cdot r^2 \cdot D - \frac{\delta T}{\delta \varphi} = Q_{\varphi}, \quad (2.96)$$

де $\frac{\delta T}{\delta \varphi}$ і Q_{φ} визначаються згідно рівнянь (2.91) і (2.87) відповідно. Отримане

нелінійне диференціальне рівняння перетворимо на систему лінійних диференціальних рівнянь першого порядку шляхом заміни

$$\begin{cases} \ddot{\varphi} = \dot{z} \\ \dot{\varphi} = z \end{cases} \quad (2.97)$$

Дану систему вирішено чисельним методом Рунге – Кутта у математичному пакеті MachCad 2011 за допомогою написаної програми “Rung” та отримано рішення у вигляді значень функції $\omega=f(\varphi)$.

Використавши рішення системи (2.94), можна визначити значення швидкості пластини – активатора. Рідина під дією пластини також починає здійснювати коливальні рухи і омиває теплообмінну поверхню. Навколо теплообмінної поверхні знаходиться пристінний шар, в якому перенесення тепла здійснюються в основному за рахунок теплопровідності (рис 2.6).

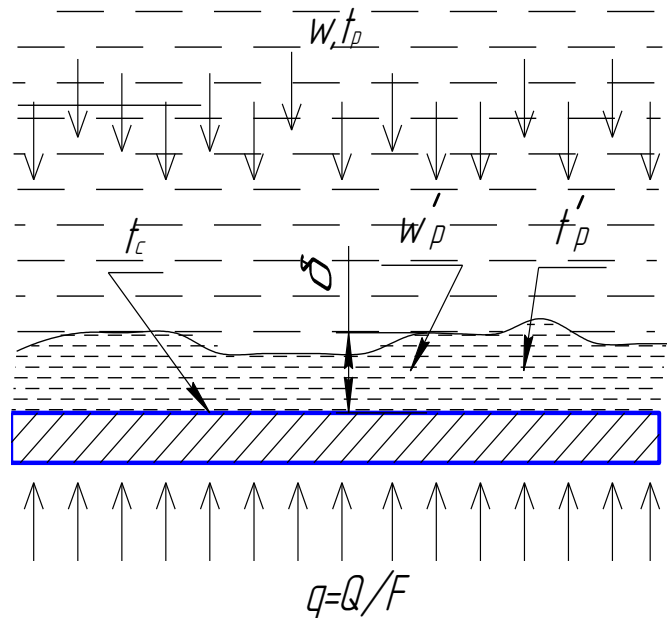


Рис. 2.6 – Теплова і гідродинамічна ситуація навколо теплообмінної поверхні згідно гіпотез Рейнольдса і Прандтля

Згідно рівняння Фур'є запишемо, що тепловий потік q визначається

$$q = \lambda \cdot \frac{t'_p - t_c}{\delta'_t}, \quad (2.98)$$

де δ'_t – товщина теплового шару, t'_p – температура рідини в пристінному шарі.

Згідно [25] товщина в'язкого пристінного гідродинамічного δ' та теплового шару δ'_t визначається за залежностями

$$\delta' \approx 12 \frac{\nu}{\sqrt{s/\rho}}, \quad (2.99)$$

$$\delta'_t \approx 12 \frac{\nu \cdot \text{Pr}^{-0.33}}{\sqrt{s/\rho}}, \quad (2.100)$$

Теплофізичні властивості субстрату визначаються згідно рівнянь [17]

$$\rho = 1000 + 2,4 \cdot c, \quad (2.101)$$

$$c_p = c_{cyx} \cdot c + c_e \cdot (1 - c), \quad (2.102)$$

$$\mu = \mu_e \cdot \left[1 + 10 \cdot \left(\frac{10 \cdot (c - 2)}{(11 - \beta_u \cdot c)} + c \right) \right], \quad (2.103)$$

де c – вміст сухих речовин, 2-15%; c_{cyx} – теплоємність сухої речовини субстрату; c_e – теплоємність води; μ_e – в'язкість води при даній температурі; β_u - коефіцієнт, що залежить від виду стоків і складає 0,7...0,75 для великої рогатої худоби та $\beta_u = 0,6...0,7$ для свиней.

Згідно рівняння Ньютона значення дотичного напруження визначається як

$$s = \mu_e \frac{w'}{\delta'} = \mu_e \cdot \left[1 + 10 \cdot \left(\frac{10 \cdot (c - 2)}{(11 - \beta_u \cdot c)} + c \right) \right] \cdot \frac{w'}{\delta'}, \quad (2.104)$$

де w' - швидкість руху частинок субстрату, що потрапили в пристінний шар.

Згідно теорії Рейнольдса, доповненої гіпотезою Прандтля, потік рідини, що омиває теплообмінну поверхню та має середню швидкість w , потрапляючи в пристінний шар, гальмується та набуває швидкості w' . Температура рідини всередині потоку t_p , температура рідини всередині пристінного шару t'_p . Згідно закону збереження імпульсу сила опору руху набуде вигляду

$$S = G'(w - w'), \quad (2.105)$$

де G' - кількість рідини, що потрапила в пристінний шар за одиницю часу.

Кількість тепла, що перенесе рідина G' , визначиться згідно виразу

$$Q = G' \cdot c_p \cdot (t_p - t'_p). \quad (2.106)$$

Тоді, враховуючи, що $S = s \cdot F$ і $Q = q \cdot F$, отримаємо

$$q = c_p \cdot s \cdot \frac{t_p - t'_p}{w - w'}. \quad (2.107)$$

З рівнянь (2.100) і (2.104) визначено швидкість в пристінному шарі w'

$$w' = 12\sqrt{s/\rho}. \quad (2.108)$$

З рівнянь (2.98) та (2.106) визначено температурні градієнти

$$t'_p - t_c = q \cdot \delta'_t / \lambda, \quad (2.109)$$

$$t_p - t'_p = \frac{q \cdot (w - w')}{c_p \cdot s}. \quad (2.110)$$

Склавши вирази (2.109) і (2.110), отримаємо

$$t_p - t_c = \frac{q \cdot (w - w')}{c_p \cdot s} + q \cdot \delta'_t / \lambda. \quad (2.111)$$

Перетворимо рівняння (2.111), враховуючи, що $\alpha = \frac{q}{t_c - t_p}$

$$\alpha = \left[\frac{w - 12\sqrt{s/\rho}}{c_p \cdot s} + \frac{12 \cdot \nu}{\lambda \sqrt{s/\rho}} \right]^{-1}. \quad (2.112)$$

Значення ізобарної теплоємності, густини та в'язкості можна визначити за допомогою рівнянь (2.101-2.103).

Швидкість руху рідини w визначено з рішення системи (2.97), прийнявши, що рідина рухається до теплообмінної поверхні зі швидкістю руху пластини активатора.

В критеріальному вигляді рівняння (2.112) запишеться як

$$Nu = \frac{d}{\lambda} \left[\frac{w - 12\sqrt{s/\rho}}{c_p \cdot s} + \frac{12 \cdot \nu}{\lambda \sqrt{s/\rho}} \right]^{-1}. \quad (2.113)$$

Значення дотичного напруження s при вібраційному омиванні одиночної циліндричної поверхні на даний час невідоме. В першому наближенні можна прийняти значення дотичного напруження, визначеного для турбулентного омивання пластини [34], перетворивши його наступним чином

$$s = 0.037 \cdot \rho \cdot \left(\frac{w_A}{2} \right)^2 \cdot (w_A \cdot d / 2 \cdot \nu)^{-0.2}, \quad (2.114)$$

де: W_A - амплітудне значення швидкості омивання циліндру.

Таким чином, рівняння (2.110) дає змогу визначити значення критерію Нусельта при коливальному омиванні теплообмінної циліндричної поверхні в біореакторах з утилізації органічних відходів сільськогосподарських підприємств. Достовірність отриманих результатів необхідно перевірити дослідним шляхом.

2.4 Висновки до розділу 2

1. Обґрунтовано об'єкт моделювання – біогазовий реактор з віброактивацією теплообміну, який дозволяє інтенсифікувати та термостабілізувати анаеробний процес біоконверсії. Достовірність математичного моделювання процесів отримання біогазу при термостабілізації теплообміну та інтенсифікації теплообміну в біогазових реакторах може бути підтверджено експериментальним шляхом. З цією метою необхідно провести експериментальні дослідження теплових і гідродинамічних процесів в біогазовому реакторі при коливальному омиванні стінки нагрівального елемента.

2. Узагальнена математична модель управління технологічними процесами підвищення продуктивності біогазових реакторів з утилізації органічних відходів представлена у вигляді дерева логічного висновку, що дозволило класифікувати фактори, які впливають на вихід біогазу. Прогнозована продуктивність біогазового реактора та фактори інтенсифікації та термостабілізації анаеробного бродіння органічних відходів розглядаються як лінгвістичні змінні, що характеризуються за допомогою нечітких термів на відповідних універсальних множинах.

3. Лінгвістичним висловлюванням відповідає система нечітких логічних рівнянь, які характеризують поверхню належності змінних відповідному терму. Визначено функції належності нечітких оцінок впливу таких факторів на вихід біогазу, як тип і якість органічної сировини, конструкція біогазового реактора та стабільність режиму. Перехід від отриманих нечітких множин до кількісної оцінки впливу цих факторів на вихід біогазу з органічних відходів, здійснюється виконанням процедури дефазифікації, тобто перетворенням нечіткої інформації в чітку форму.

4. Розроблена математична модель руху кривошипно-шатунного механізму, який використовується в якості збудувача пульсацій субстрату в біореакторі. Отримано нелінійне диференціальне рівняння, що описує рух коливального перемішувача. Наведено методику та програму розрахунку параметрів руху механізму активатора в середовищі MachCad 2001.

5. Результати аналітичних досліджень теплових і гідродинамічних процесів при коливальному омиванні стінки нагрівального елемента свідчать, що коливальні рухи рідини створюють штучну турбулізацію, яка активує теплообмін за рахунок інтенсивного омивання нагрівальної стінки. Запропоновано та використано в теоретичних дослідженнях модель руху пластини активатора при коливальному перемішуванні субстрату в біореакторі, яка дозволила отримати критеріальні рівняння, що описують теплообмінні процеси при коливальному омиванні поверхні нагріву.

РОЗДІЛ 3. ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Програма досліджень

Дана робота присвячена обґрунтуванню оптимальних параметрів біореактора при утилізації сільськогосподарських відходів для виробництва біогазу. Необхідно інтенсифікувати та термостабілізувати процес виробництва біогазу, що забезпечить високі якісні і кількісні показники роботи, низьку матеріаломісткість та просту конструкцію. Для вирішення цього завдання необхідно провести теоретичні та експериментальні дослідження. Зокрема, визначити вплив коливань середовища на активацію теплообміну між нагрівальним елементом і водою, виявити вплив коливальної дії на тепловіддачу горизонтального циліндра до субстрату, дослідити вплив параметрів субстрату при дії коливань на зміну коефіцієнту тепловіддачі. Визначити термостабілізуючий вплив коливальної інтенсифікації в біореакторі.

Тому була прийнята наступна програма експериментальних досліджень.

1. Розробити експериментальну установку для визначення коливального впливу на інтенсивність теплообміну між нагрівальним елементом і субстратом і термостабілізацію процесу виробництва біогазу.

2. Розробити комп'ютерну програму управління робочими параметрами експериментальної установки.

3. Встановити вплив низькочастотних коливань рідини на тепловіддачу горизонтального циліндру. Дослідити розподіл температур по об'єму реактора при коливальній активації.

4. Експериментально дослідити інтенсивність тепловіддачі від горизонтального циліндру до субстрату з концентрацією сухої речовини 8 % при вільній конвекції.

5. Експериментально дослідити інтенсивність тепловіддачі від горизонтального циліндру до субстрату з концентрацією сухої речовини 8 % при коливальній активації теплообміну.

Інтервали варіювання основних параметрів дослідження наведено в табл. 3.1, а схема досліджень зображена на рис 3.1.

Таблиця 3.1.

Інтервали варіювання основних параметрів досліджень

Параметр	Позначення	Одиниці	Межі варіювання
Питомий тепловий потік	q	Вт/м ²	500...16000
Температурний напір	Δt	°С	0,5...25
Температура середовища в об'ємі	$t_{\text{сер}}$	°С	18...43
Температура на стінці нагрівального елемента	$t_{\text{ст}}$	°С	20...55
Частота коливань	f	Гц	0...5
Амплітуда коливань	A	мм	0...100
Концентрація сухої речовини	c	%	8

В таблиці 3.2 наведено рівні та інтервали варіювання основних факторів.

Виходячи з 95%-го рівня надійності дослідів, як найбільш розповсюдженого при технічних дослідженнях [45-47], при проведенні дослідів обмежились трикратною повторювальністю.

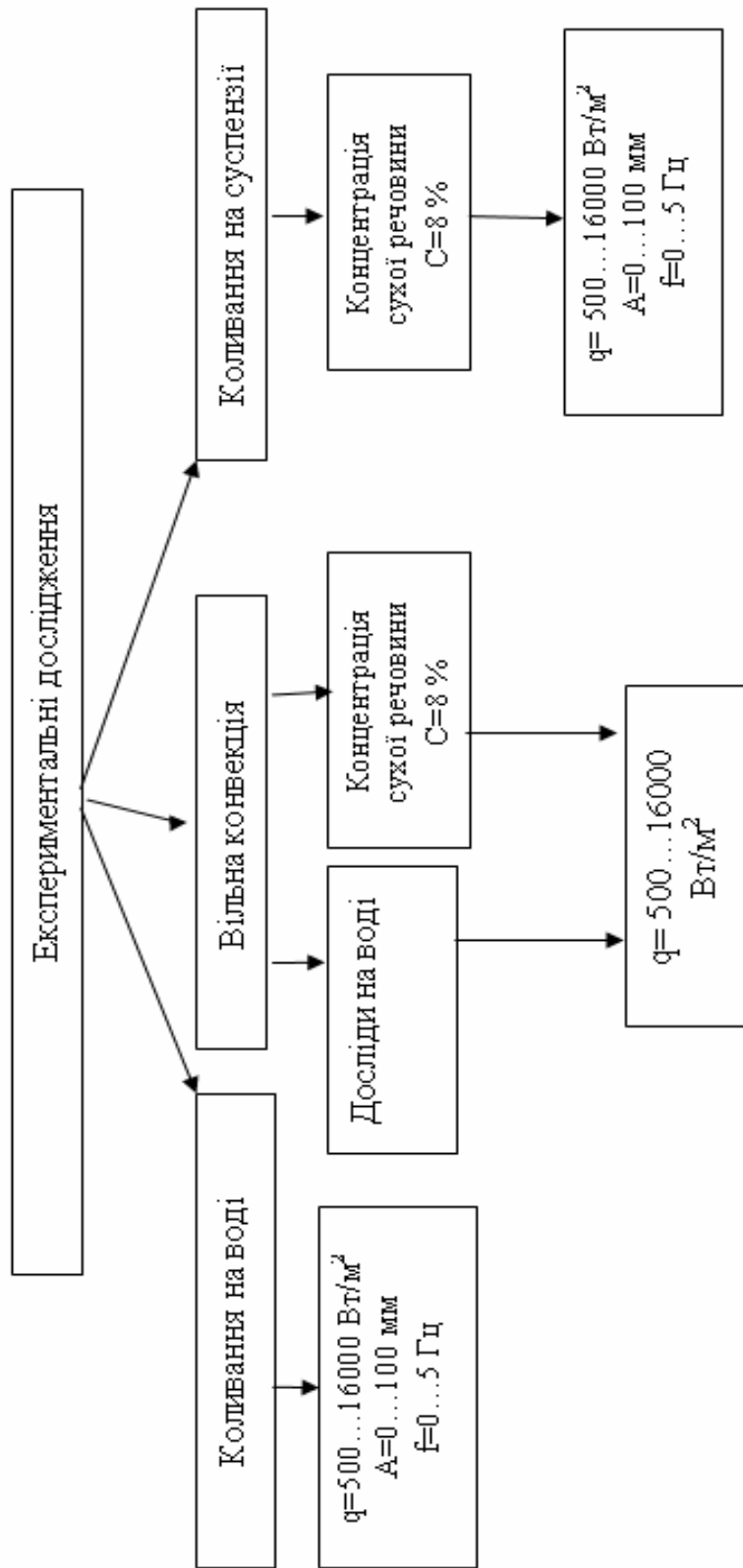


Рис 3.1 – Схема проведення експериментальних досліджень

3.2 Методика проведення експериментальних досліджень із визначення впливу параметрів коливань на тепловіддачу від нагрівального елемента до субстрату

При визначенні коефіцієнта тепловіддачі від горизонтального циліндра до субстрату за умов вільної конвекції виконується вимірювання напруги, сили струму, що подаються на нагрівальний елемент, температур стінки та середовища. Всі термодатчики градуювалися за умов однакової температури та їх покази порівнювалися з показами еталонного термометра і в подальшому в покази вносилися відповідна поправка. Досліди проводилися за умов досягнення сталості температури середовища і стінки нагрівального елемента, що свідчить про стаціонарність режиму. Показником стаціонарності вважається зміна температури не більше $0,1^{\circ}\text{C}$ за 5 хв. Теплова потужність нагрівника регулювалася за допомогою лабораторного автотрансформатора. За визначальний розмір в процесі досліджень прийнято зовнішній діаметр нагрівального елемента.

В процесі досліджень вимірювалися наступні величини:

- температура рідини за допомогою трьох термошупів на базі датчиків DS 1626S;
- напруга і струм, що подається на нагрівник, і обчислювалася теплова потужність;
- температура на кожному з трьох термодатчиків, що закладені у стінку нагрівального елемента;
- час проведення експерименту фіксувався хронометром.

Температура середовища t_p - визначається як середньоарифметична величина між показниками трьох термошупів на відстані 50-70 мм від осі нагрівального елемента. Величина температури на стінці визначається як середнє значення показів 3 термодатчиків, що закладені у стінці.

Середнє значення поверхневого коефіцієнта тепловіддачі визначається за законом Ньютона-Ріхмана [23]:

$$\alpha = \frac{I \cdot U}{F \cdot (t_{cm} - t_p)}, \quad (3.1)$$

де I - величина сили струму на нагрівальному елементі, А

U - напруга на нагрівальному елементі, В;

$F = \pi \cdot d \cdot L$ – площа поверхні нагрівального елементу, м².

3.3. Лабораторна установка для визначення коливального впливу на термостабілізацію та інтенсивність теплообміну між субстратом і нагрівальним елементом в біореакторі

Для перевірки достовірності результатів теоретичних досліджень та встановлення раціональних конструктивно-технологічних параметрів біогазового реактору розробленої конструкції [46] була виготовлена експериментальна установка, принципову схему якої наведено на рис. 3.2, а її загальний вигляд - на рис. 3.5. Вона складається з ємності з прозорими стінками, коливального активатора, нагрівального елементу і термошупів, блоку управління параметрами досліджень та комп'ютера, в якому була закладена програма управління.

Ємність з прозорими стінками 1 (рис. 3.2), що має розміри основи 600x320 мм, заповнена середовищем на висоту 190 мм. На глибині 110 мм під рівнем встановлено нагрівальний елемент 2, всередині якого розміщено прямий електричний нагрівник довжиною 440 мм та електричним опором 38 Ом.

Нагрівник зовнішнім діаметром 12 мм встановлено в товстостінну трубку, виготовлену зі сталі Ст.3. Зовнішній діаметр трубки 25 мм, внутрішній 16 мм. Простір між стінками трубки і нагрівника заповнено кварцовим піском. Торцеві стінки нагрівника теплоізовані азбестовою

набивкою товщиною 25 мм. Найменша відстань від теплообмінної поверхні до огорожуваних стінок складає 80 мм. Напруга на нагрівник подається через блок живлення 8, а навантаження контролюється вольтметром. Вимірювання температур проводиться за допомогою термодатчиків DALLAS DS 1626S. Проградувані термодатчики ізольовані термостійким лаком. Термодатчики щільно прилягають до внутрішньої стінки труби. Інформація від них по шині даних направляється в мікрокомп'ютер 10. Термощупи виконано з аналогічних термодатчиків і інформація від них також передається до мікрокомп'ютера..

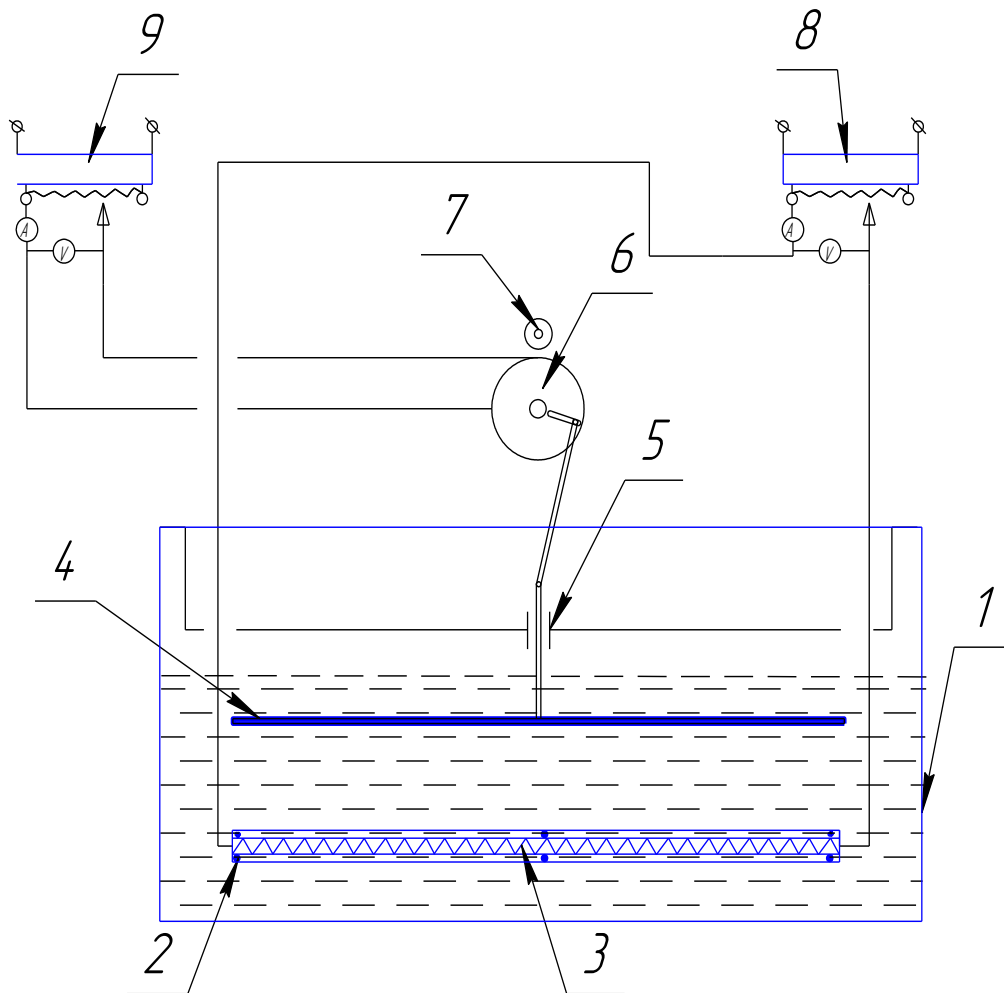


Рис. 3.2. – Принципова схема експериментальної установки для дослідження впливу коливань на інтенсивність тепловіддачі

Температура повітря в приміщенні вимірюється термометром ТЛ-4 з точністю 0,5°C. Термощупами на базі термодатчиків DS 1626S вимірюється

температура в різних місцях об'єму рідини. Координата щупа визначається за допомогою метричної лінійки з точністю 1 мм. Коливання середовища здійснюється за рахунок коливальних рухів металевієї пластини 4 товщиною 0,55 мм, яка посередині прикріплена до повзуна кривошипно-шатунного механізму 5. Вал кривошипно-шатунного механізму 5 закріплено на валу двигуна постійного струму 6 потужністю 150 Вт. Вимірювання кількості обертів валу кривошипно-шатунного механізму 5 виконується імпульсним тахометром 7. Сигнал від імпульсного тахометра 7 поступає на мікрокомп'ютер 10. Від мікрокомп'ютера оброблена інформація направляється на стаціонарний комп'ютер, в якому за допомогою спеціально розробленої програми вона подається у графічному вигляді і записується у текстовий файл. Принципову схему інформаційних зв'язків експериментальної установки наведено на рис. 3.3.

Алгоритм програми реалізований на мові програмування Object Pascal з використанням IDE Delphi 7. Робочі вікна програми обробки та збору даних від експериментальної установки наведено на рис 3.4.

В головному вікні 1 (рис 3.4) будуються графіки залежності температур і кількості обертів валу двигуна від часу дослідження. На інформаційній панелі 2 у відповідних комірках фіксуються дані параметри динамічно у вигляді числових значень. Кнопки 3 - "R" "P" "S" відповідно: початок зчитування даних, пауза і стоп – зупинка експерименту. У вікнах 4 і 5 відбувається налагодження роботи програми і роботи COM порту:

- інтервал таймера (1-20 сек, з інтервалом 0,1 сек);
- режим роботи програми (безперервно, дискретно);
- мінімальні значення відображення для всіх параметрів;
- максимальні значення відображення для всіх параметрів.

Параметри налаштування COM порту:

- номер порту;
- швидкість передачі/прийому даних;

- кількість біт інформації;
- тип контролю достовірності інформації;
- кількість стоп-біт.

Регулятором напруги нагрівника є автотрансформаторний блок з дискретним виходом. До складу регулятора входить блок гнучкого підстроювання напруги, що складається з керованого транзисторного опору для встановлення необхідного значення напруги. Індукційний тахометр - це соленоїд, в якому генерується струм при кожному оберті валу з магнітом двигуна-збурювача вібрації. Коливальний пристрій складається з двигуна постійного струму, системи приводів у вигляді кривошипно-шатунного механізму та пристроїв регулювання частоти і амплітуди.

Регулювання амплітуди коливань збурюючої пластини здійснюється шляхом переміщення кривошипу по валу і фіксації його в положенні, відповідному необхідній амплітуді. Частота обертання двигуна регулюється за допомогою реостата, що розміщений в блоці управління. Окрім реостата, в блоці управління знаходяться перетворювач струму – випрямник для живлення електродвигуна, трансформатор живлення нагрівального елемента та стабілізатор напруги.

На рис 3.3 зображено: 1- регулятор напруги нагрівника, 2- регулятор напруги віброустановки, 3 - блок живлення датчиків температури, 4 – пристрій спряження №1, 5- індуктивний тахометр, 6- коливальний пристрій, 7,8,9- датчики температури DS1626S для вимірювання температури рідини, 10 – електричний нагрівальний елемент з датчиками температури DS1626S для вимірювання температури стінки нагрівника, 11,12 – пристрої спряження №2 та №3.

Всі пристрої спряження конструктивно виконано у вигляді мікрокомп'ютера, загальний вигляд якого показано на рис 3.7. Мікрокомп'ютер виконано на базі однокристального мікроконтролера PIC

16F876. Структурно-логічні схеми програми обробки та збору даних від експериментальної установки зображено на рис 3.6.

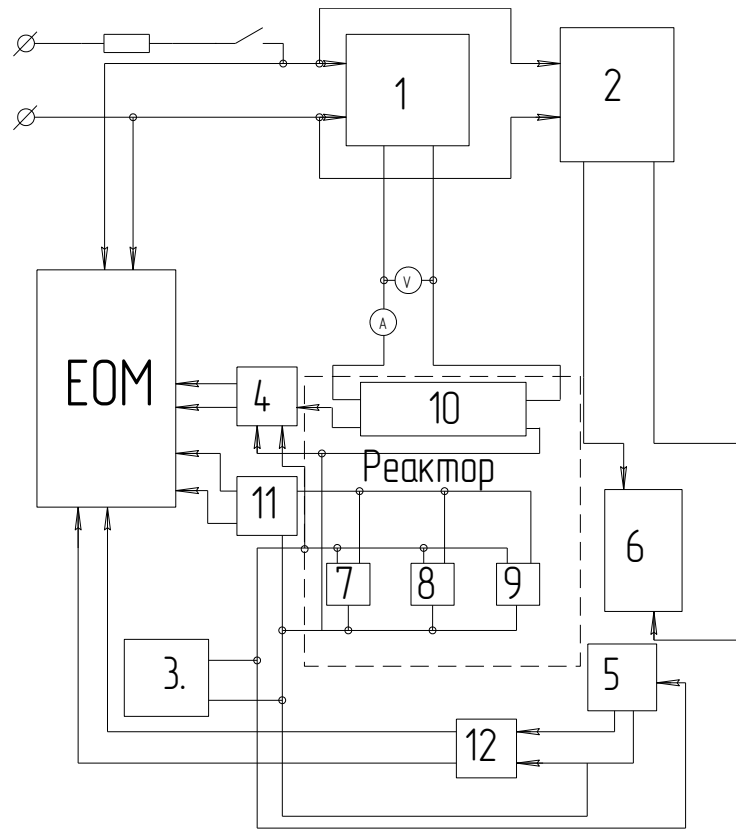


Рис. 3.3. – Принципова схема інформаційних зв'язків дослідної установки для визначення впливу коливань на інтенсивність тепловіддачі

Програма дозволяє записувати дані з інтервалом в 1 секунду у текстовий файл, який потім можна прочитати у табличному редакторі. Запис даних ведеться у форматі: дата, час, кількість обертів валу двигуна, температура першого датчика, температура другого датчика, температура третього датчика, усереднена температура датчиків, що розміщенні в нагрівальному елементі.

Загальний вигляд файлу звіту з проведеного експерименту зображено на рис 3.8.

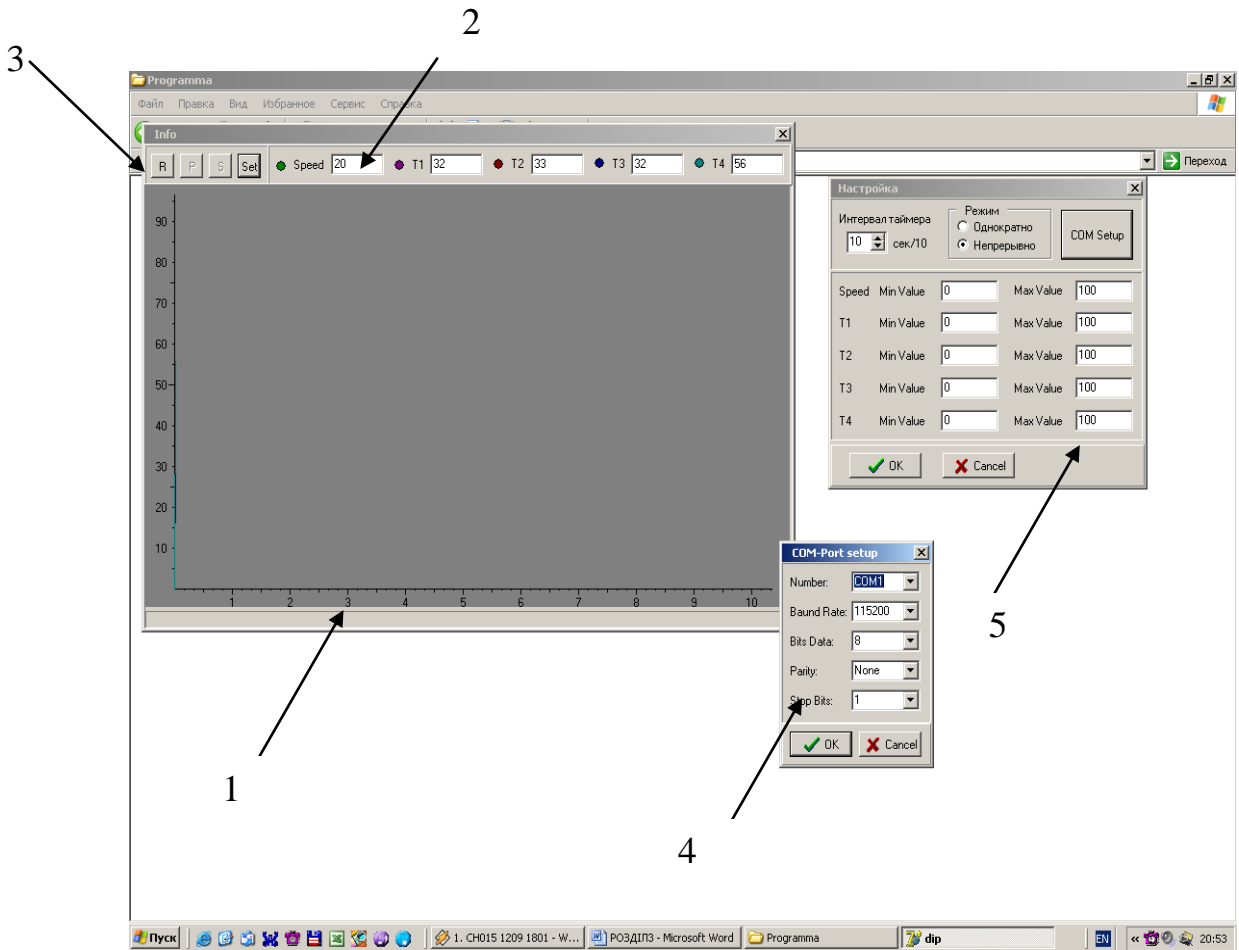


Рис. 3.4. – Робочі вікна програми оброблення та збору даних від експериментальної установки



Рис. 3.5.– Загальний вигляд експериментальної установки для дослідження впливу коливань на інтенсивність тепловіддачі

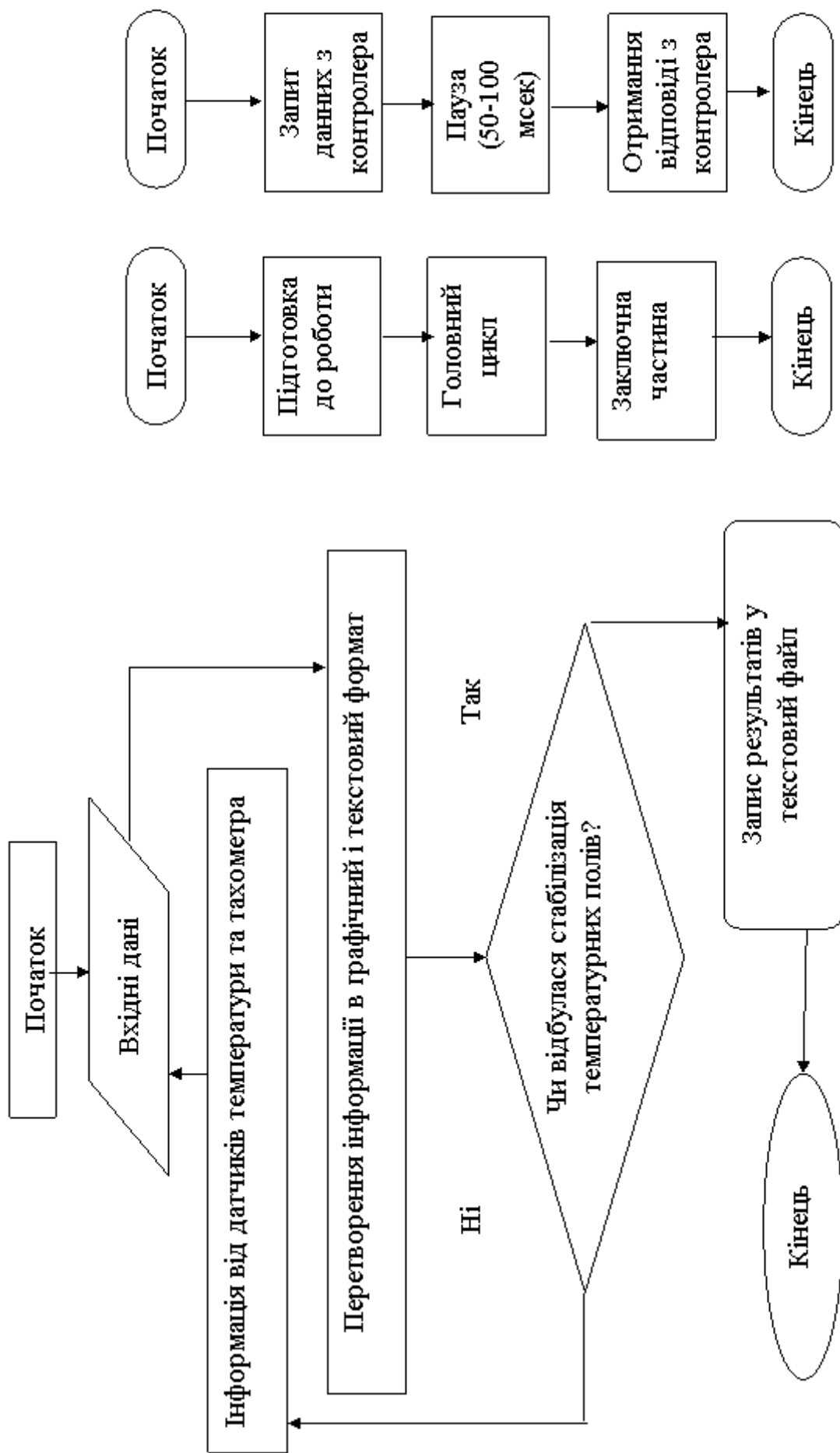


Рис. 3.6 – Структурно-логічні схеми програми обробки та збору даних від експериментальної установки

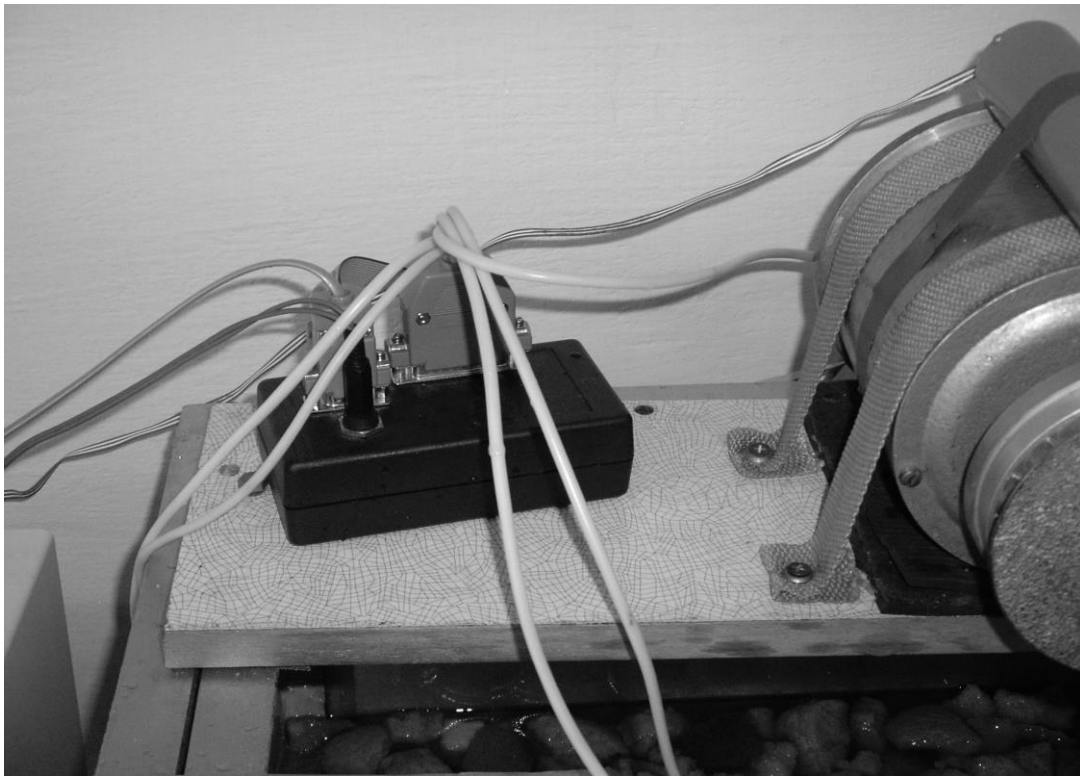


Рис. 3.7. – Загальний вигляд мікрокомп'ютера PIC 16F876.

Дана експериментальна установка дозволяє визначити раціональні параметри коливальної активації теплообміну від горизонтального циліндру до одно- та двофазного середовища, а також встановити залежність коефіцієнту тепловіддачі від в'язкості середовища при вібраційному омиванні нагрівального елемента [48, 49].

В процесі аналізу та обробки результатів досліджень використовуються в основному розрахункові величини, які пов'язані з параметрами, що виміряні в дослідах. Відносна похибка вимірювання сили струму та напруги не перевищує відповідно 2,3% і 1,3 %. Похибка вимірювання температур середовища та стінки нагрівального елемента складає до 0,15 °С, похибка визначення температурного напору 0,72...11%. Відносні похибки визначення питомого теплового потоку та коефіцієнту тепловіддачі не перевищують відповідно 2,3...4,7% і 2,8...14,2%

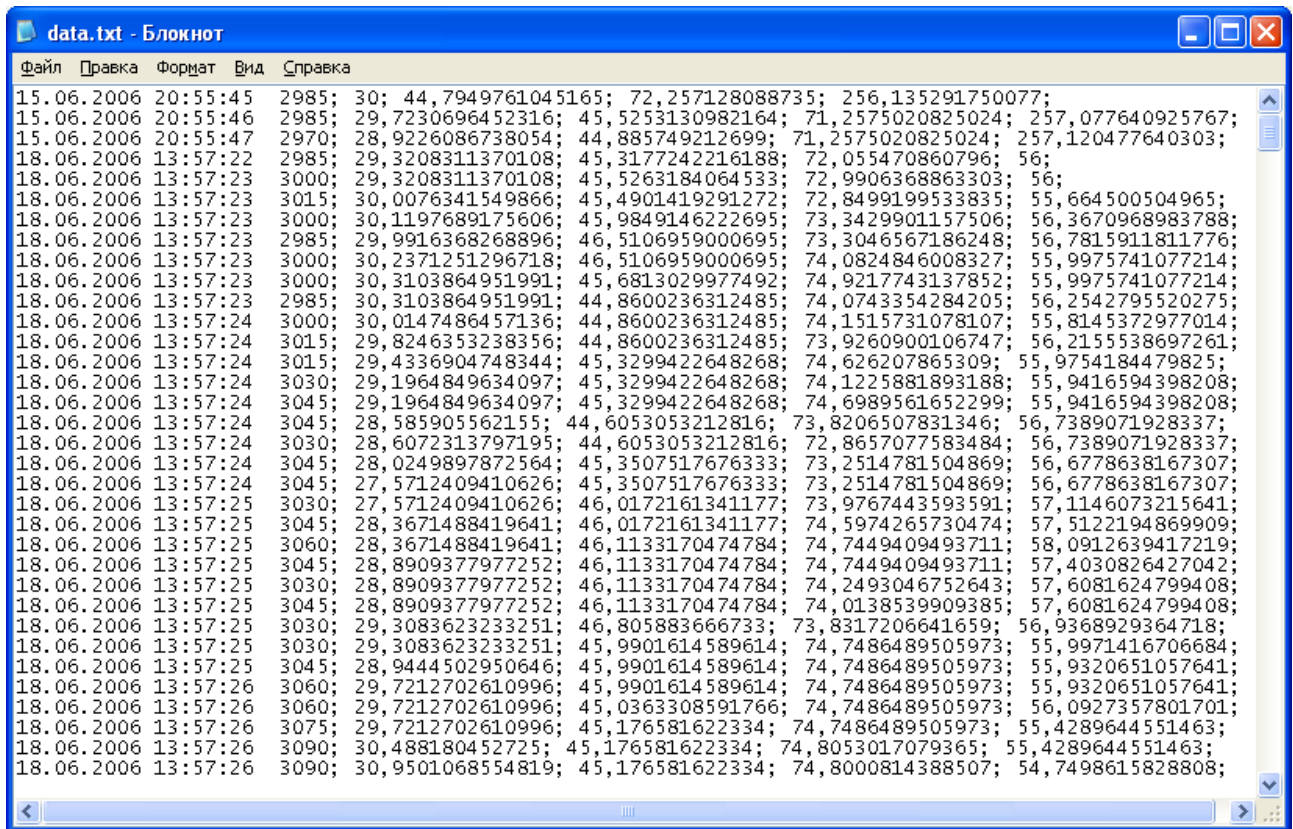


Рис. 3.8 – Загальний вигляд файлу звіту проведеного експерименту

3.4. Методика проведення експериментальних досліджень із визначення впливу параметрів коливань на термостабілізацію та інтенсифікацію теплообміну в біореакторі

Для визначення впливу коливань середовища на тепловіддачу горизонтального циліндру була проведена серія дослідів з варіюванням частотно-амплітудних характеристик коливань, в'язкості середовища та теплових потоків.

При визначенні коефіцієнту тепловіддачі від горизонтального циліндра до субстрату за умов коливань середовища виконувалось вимірювання напруги, сили струму, що подаються на нагрівальний елемент, температур стінки та середовища. Згідно плану експерименту на валу кривошипно-

шатунного механізму встановлювався відповідний ексцентриситет, що пропорційний амплітуді коливання, а в блоці управління відповідним регулюванням встановлювалась потрібна величина напруги, що подається на двигун, для утворення необхідної частоти обертання. Досліди проводилися за умов досягнення сталості температури середовища і стінки нагрівального елемента, що свідчить про стаціонарність режиму. Показником стаціонарності вважається зміна температури не більше $0,1^{\circ}\text{C}$ за 5 хв. Теплова потужність нагрівника регулювалася за допомогою лабораторного автотрансформатора. Після досягнення сталості режиму утворювалася вібрація середовища, що діяла на нагрівник до досягнення стабілізації теплових потоків та стаціонарності режиму при вібраційному впливі.

У процесі досліджень вимірювалися наступні величини:

- температура рідини за допомогою трьох термощупів;
- частота обертання валу двигуна за допомогою імпульсного тахометра;
- напруга і струм, що подаються на нагрівник;
- температура на кожному з трьох термодатчиків, що закладені у стінку нагрівального елемента;
- час проведення експерименту.

Температура середовища t_p визначається як середньоарифметична величина між показниками трьох термощупів на відстані 50-70 мм від осі нагрівального елемента. Величина температури на стінці визначається як середнє значення показів 3 термодатчиків, що закладені у стінці нагрівального елемента.

Середнє значення поверхневого коефіцієнта тепловіддачі визначаємо за законом Ньютона-Ріхмана (3.1).

3.5 Висновки до розділу 3

1. Для дослідження теоретично обґрунтованих параметрів інтенсифікації теплообміну розроблена експериментальна установка, що дозволить дослідити тепловіддачу від горизонтальної циліндричної теплообмінної поверхні до середовища в об'ємі за умов зовнішньої задачі теплообміну. Наведено характеристики приладів вимірювання та програмного забезпечення для контролювання основних параметрів, які визначають тепловіддачу від нагрівального елемента до субстрату.

2. Представлена методика проведення дослідів. План проведення досліджень включає експерименти з вільноконвективного теплообміну у суспензіях, а також з теплообміну від нагрівального елемента до субстрату і води за умов коливального середовища. Межі варіювання початкових параметрів досліджень: теплового потоку, температур, швидкостей руху субстрату – відповідають умовам роботи реактора біогазової установки з утилізації органічних відходів.

3. Використання напрацьованих в області теплотехнічного експерименту рекомендацій щодо комп'ютерного збору даних та обчислювальної техніки на стадії обробки даних забезпечують достовірність отриманих результатів. Очікувані похибки визначення питомого теплового потоку від нагрівального елемента до субстрату та коефіцієнту тепловіддачі не перевищують відповідно 2,3...4,7% і 2,8...14,2%

РОЗДІЛ 4. АНАЛІЗ ТА УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ВПЛИВУ КОЛИВАННЯ
СЕРЕДОВИЩА НА ІНТЕНСИФІКАЦІЮ ТА ТЕРМОСТАБІЛІЗАЦІЮ
ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА БІОГАЗУ

4.1 Результати дослідження впливу концентрації органічних речовин в субстраті на процес вільноконвективного теплообміну

Вибір визначальної температури рідини-субстрату в біореакторі, має вирішальне значення при дослідженні процесів теплообміну при накладанні температурних полів в умовах вимушеної конвекції. Вибір визначальної температури поверхні теплообміну обґрунтовано в розділі 3. Температура „віддалині від стінки” при локальному газорідинному омиванні теплообмінної поверхні обґрунтовано в дослідженнях [18, 21]. Згідно результатів даних досліджень, достатня стабілізація температурного поля в різних напрямках досягається на відстані два діаметри від осі нагрівального елемента. Автори [45] рекомендують вимірювати температуру рідини за межами прикордонного шару, що за обрахунками для умов роботи біогазової установки складає 1...5 мм від поверхні нагрівального елемента.

Для вибору визначальної температури рідини термощупами виконувалися вимірювання температури на різній відстані від стінки нагрівального елемента за умов вільної конвекції в суспензії та при коливанні середовища. Вимірювання температури виконувалися в вертикальному та горизонтальному напрямках від нагрівального елемента (рис. 4.1-4.2). Дослідження проводилися при значенні питомого теплового потоку $q = 0.5...8 \text{ кВт/м}^2$. Характер розподілу температури суспензії при вільній конвекції та при коливанні середовища різний. Як видно з рис. 4.1, відносна стабілізація температурного поля в суспензії за умов вільної конвекції відбувається на відстані 60-80 мм, що становить 2,5-3 діаметра нагрівального елемента. Спостерігається значний (до $\Delta t=10...15^\circ\text{C}$)

температурний градієнт як між грійною стінкою і середовищем, так і між різними точками середовища (рис 4.1). Це обумовлено утворенням твердими частками суспензії «комірок», в яких рідина не зазнає значного впливу конвективних потоків.

При коливанні середовища відбувається вирівнювання полів температур, активне перемішування і зменшення градієнту температур до $\Delta t = 5 \dots 8^\circ \text{C}$ між нагрівальним елементом і субстратом (рис 4.2). Причому на початковій стадії коливального перемішування активне зменшення градієнту температур відбувається в основному внаслідок зменшення температури стінки. Прогрівання субстрату відбувається повільніше.

Згідно результатів експериментальних досліджень, що зображені на рис. 4.2, нами рекомендовано за визначальну температуру рідини при коливальній активації брати середнє значення з трьох термодатчиків, що розташовані на відстані 1,5-2 діаметра від нагрівального елемента.

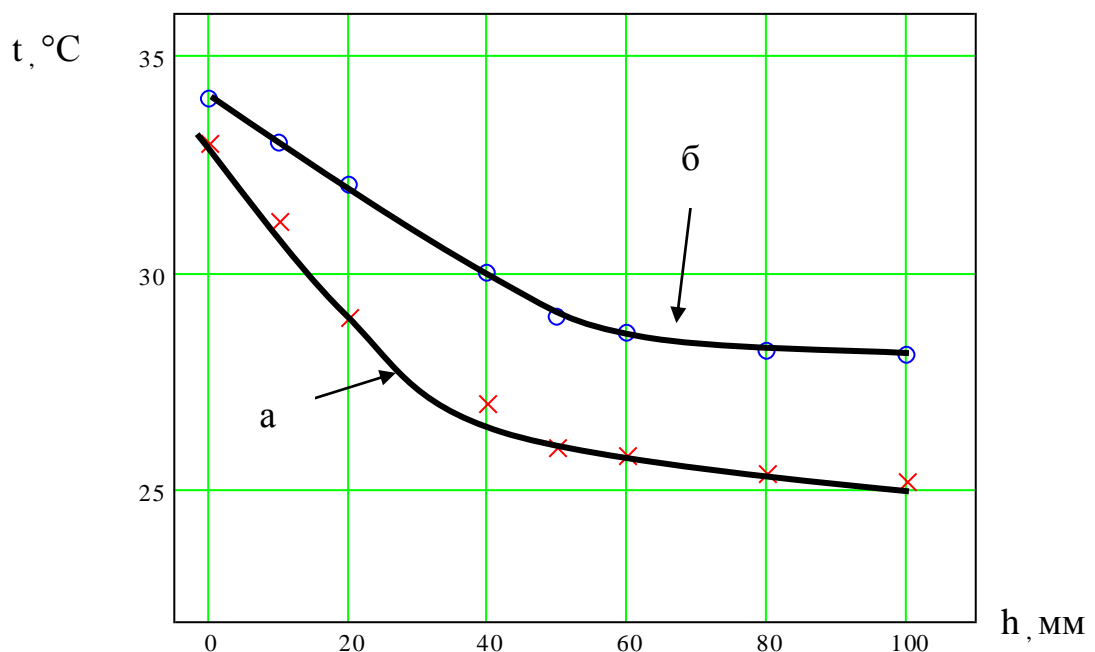


Рис. 4.1 – Розподіл температур біля теплообмінної поверхні на відстані h від стінки в субстраті при вільній конвекції: а) в горизонтальній площині; б) в вертикальній площині над нагрівальним елементом

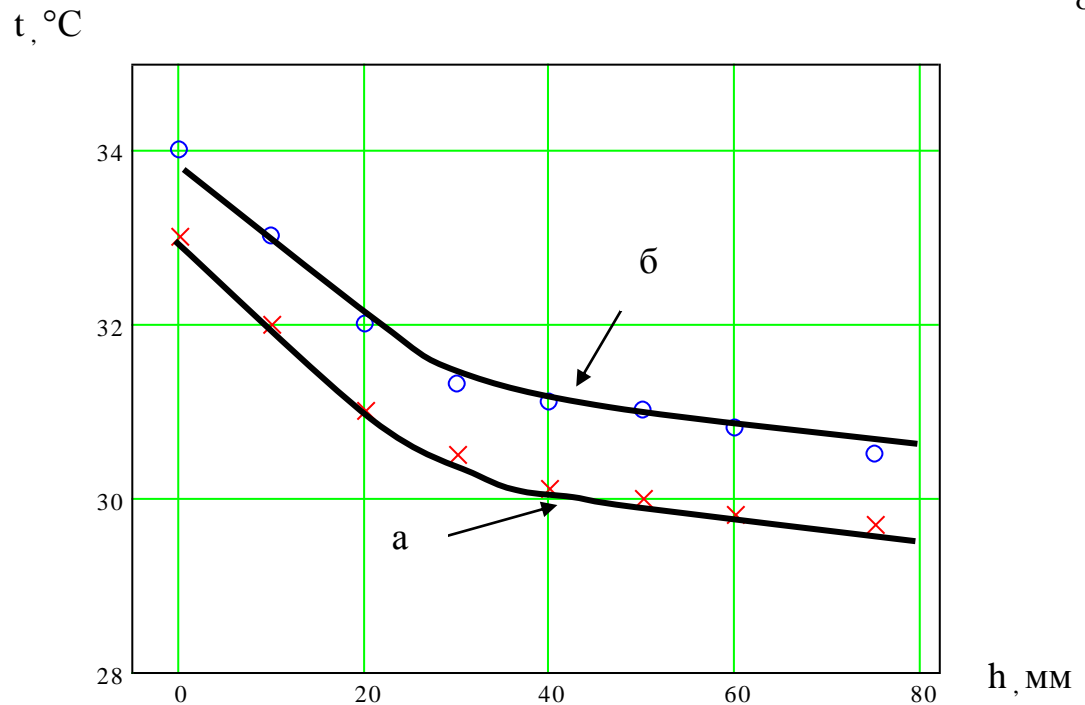


Рис. 4.2 – Розподіл температур біля теплообмінної поверхні на відстані h від стінки в субстраті при коливальній активації:

а - значення температури субстрату в горизонтальній площині;

б - значення температури субстрату в вертикальній площині.

Дослідження інтенсивності тепловіддачі від нагрівального елемента до середовища «вода – тверді частинки» виконувалось на експериментальній установці, описаній в розділі 3. Більші значення температур у вертикальній площині пояснюються вертикальним напрямом конвективних потоків. Вільноконвективний теплообмін від горизонтального циліндру до води в певній мірі досліджено [23-25]. Але емпіричних рівнянь для оцінки коефіцієнту тепловіддачі в суспензіях в літературних джерелах нами не знайдено. При проведенні експерименту візуально виділялися три зони розшарування в суспензії: нижня частина складається з дрібнодисперсних часток сухої речовини з еквівалентним діаметром $d_e=1...12$ мм, середня частина – це суміш води с частками, у верхній частині відбувається скупчення легких часток $d_e \geq 12$ мм (рис 4.3).

З часом концентрація верхнього шару часток починає зменшуватися. Відношення початкової концентрації $C_{\text{поч}}$ до кінцевого значення C через добу

складає в середньому $C_{\text{поч}}/C \approx 0,6$. У процесі бродіння суміш набуває більше однорідної структури, з осадом дрібних часток в нижній частині реактора.

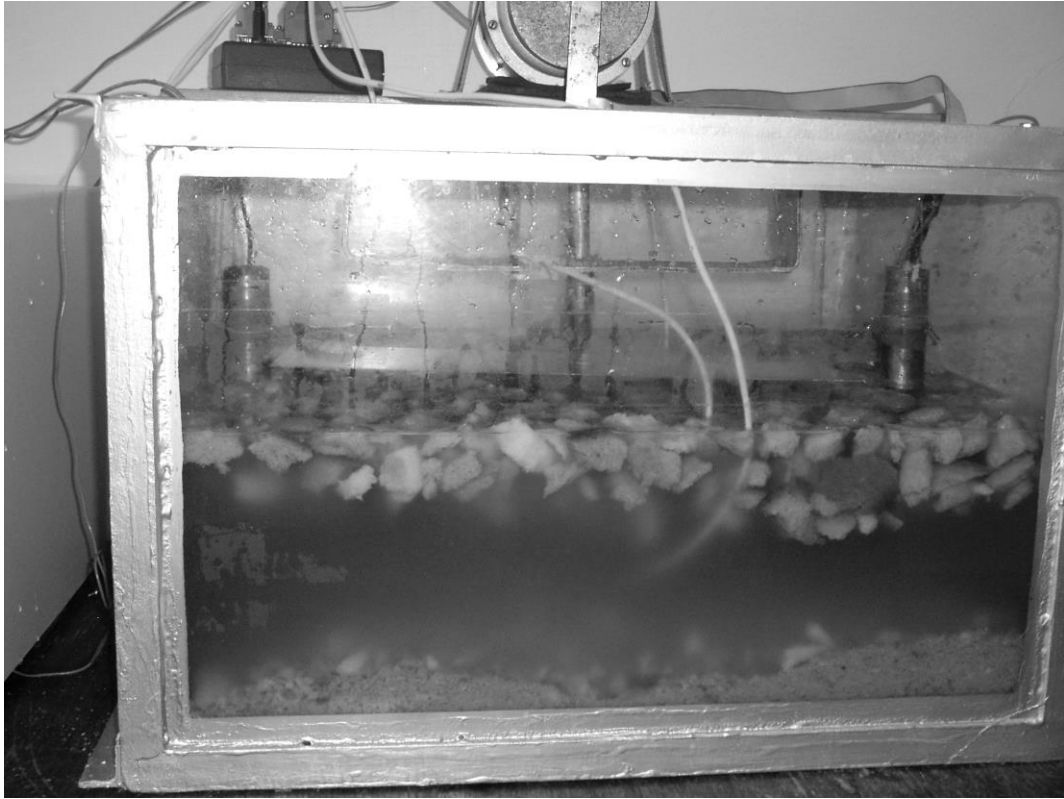


Рис 4.3 – Розшарування суспензії в реакторі при вільноконвективному теплообміні

Діапазон зміни параметрів дослідження:

- питомий тепловий потік $q = 500-16000 \text{ Вт/м}^2$;
- концентрація сухої речовини $C=3,5\%$ і $C=8\%$;
- температура рідини $t_p = 20 \dots 45 \text{ }^\circ\text{C}$.

Концентрація сухої речовини $C=8\%$ відповідає параметрам субстрату на основі відходів тварин та зеленої маси. В процесі оброблення даних для визначення нелінійної регресійної моделі вільноконвективного теплообміну постало питання у виборі базової моделі залежності. Відома з літературних джерел [23] залежність критерію Нуссельта від теплофізичних властивостей рідини має вигляд

$$Nu = 0,5 \cdot (Gr_p \cdot Pr_p)^{0,25} \cdot (Pr_p / Pr_c)^{0,25} . \quad (4.1)$$

За базову модель вільноконвективного теплообміну прийнято формулу (4.2), яка характеризує залежність критерію Нуссельта від теплофізичних властивостей субстрату

$$Nu = A \cdot (Gr_p \cdot Pr_p)^n \cdot (Pr_p / Pr_c)^m, \quad (4.2)$$

де A , m , n – коефіцієнти, які визначаються за результатами статистичного аналізу експериментальних даних.

Використавши пакет програм статистичної обробки даних Statistica 5.5, виконано регресійний аналіз результатів експериментальних досліджень (табл. 4.1). За результатами аналізу отримано рівняння (4.3) і за допомогою методу Хука-Дживіса досягнуте максимальне значення коефіцієнту детермінації $R=0,87$

$$Nu = 3,52 \cdot (Gr_p \cdot Pr_p)^{0,1} \cdot (Pr_p / Pr_c)^{0,66}. \quad (4.3)$$

Проаналізувавши результати досліджень, виявлено, що значення коефіцієнту тепловіддачі від грійної стінки до суспензії з концентрацією сухої речовини $C=8\%$ в середньому складає $0,83 \dots 0,97$ відповідного значення до води.

Суттєвий вплив має місце розташування нагрівального елемента. При традиційному розташуванні нагрівального елемента в нижній зоні спостерігається суттєве зростання градієнту температур у вертикальному і горизонтальному напрямках ($\Delta t = 6 \dots 15 \text{ }^\circ\text{C}$)

4.2 Результати дослідження впливу частоти та амплітуди коливань на теплообмін між нагрівальною стінкою і водою

Для виявлення впливу коливальної інтенсифікації теплообміну розглянуто процеси вимушеної конвекції та досліджено інтенсивність теплообміну між горизонтальним циліндром та середовищем. Коливальне перемішування дозволяє попередити налипання часточок суспензії на нагрівальний елемент, уникнути застійних зон і активізувати теплообмін.

Як середовище в другій серії дослідів використовувалась вода. Активація теплообміну здійснювалася пластиною, яка має геометричні розміри 160 x 380 мм і розташована над нагрівальним елементом на відстані 120 мм.

Діапазон зміни основних параметрів:

- питомий тепловий потік $q = 0,5 \dots 16 \text{ кВт/м}^2$;
- температура рідини вдалині від стінки $t_p = 20 \dots 43 \text{ }^\circ\text{C}$;
- температурний напір $\Delta t = 1 \dots 18 \text{ }^\circ\text{C}$;
- амплітуда коливань пластини $A = 0 \dots 100 \text{ мм}$;
- частота коливань пластини $f = 0 \dots 5 \text{ Гц}$.

Швидкість омивання віброуючою хвилею приймалася у зв'язку зі незначною відстанню між нагрівальним елементом і пластиною, рівною швидкості руху пластини. Використання коливань з амплітудою до 100 мм дозволяє активно перемішувати субстрат. Низькі частоти (до 10 Гц) унеможливають створення значних швидкостей руху субстрату. Обмеження швидкостей перемішування субстрату обґрунтовано в [3]. Аналізуючи результати, слід відмітити, що основними активуючими чинниками теплообміну є турбулентні течії рідини, обумовлені коливанням. Значного впливу теплового потоку на інтенсивність теплообміну не виявлено.

Для побудови регресійної моделі інтенсивності теплообміну за результатами експериментальних досліджень (табл. 4.1) використаємо за базову модель

$$Nu = A \cdot Re_{\Delta u}^n \cdot Pr^m, \quad (4.4)$$

де A , m , n – коефіцієнти, які визначаються за результатами статистичного аналізу експериментальних даних, $Re_{\Delta u}^n$ – коливальний критерій Рейнольдса, який визначається за формулою:

$$Re_{\Delta u} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot d \cdot A / \nu. \quad (4.5)$$

Використавши пакет програм статистичної обробки даних Statistica 5.5, проведено регресійний аналіз експериментальних даних (табл.4.1). За результатами аналізу за допомогою симплекс-методу максимальне значення коефіцієнту детермінації досягнуто на рівні $R=0.67$

$$Nu = 0,0014 \cdot Re^{1,35} \cdot Pr^{-1,54} . \quad (4.6)$$

Зростання коефіцієнту тепловіддачі порівняно до вільної конвекції характеризується коефіцієнтом пропорційності K . Залежність для визначення коефіцієнту пропорційності K отримано за результатами експериментальних даних. За допомогою методу Квазі - Ньютона при коефіцієнті детермінації $R=0,73$ отримано рівняння для значення коефіцієнту пропорційності:

$$K = \frac{\alpha}{\alpha_0} = 0,0028 \cdot Re_{\Delta u}^{1,05} \cdot Pr^{-1,95} . \quad (4.7)$$

За результатами аналізу експериментальних даних встановлено, що в діапазоні вимірювань отримане значення зростання коефіцієнту тепловіддачі від горизонтального нагрівального трубчастого елемента до води перевищує значення для вільної конвекції в середньому в 1,5...2,8 рази. Суттєвий вплив на інтенсифікацію теплообміну має як коливання середовища, так і тепловий потік. Причому зростання частоти коливань впливає на зростання коефіцієнту тепловіддачі від горизонтального циліндра до води суттєвіше, ніж зростання амплітуди в середньому на 15-25 %.

У таблиці 4.1 наведено вибіркві дані експериментальних досліджень, що є підґрунтям отриманих результатів. Результати експериментів наведено для значень амплітуди $A=0,04$ і $0,06$ м, і вони є частиною загального масиву даних, що отримані при проведенні досліджень.

Вибіркові дані експериментальних досліджень впливу коливань середовища на тепловіддачу горизонтального циліндра

№ досліджу	Напруга на ТЕНі, В	Амплітуда, м	Частота f, Гц	Питомий тепловий потік q , Вт/м ²	Швидкість v , м/с	Коефіцієнт тепловіддачі $\alpha_{\text{вібр}}$, Вт/м ² °С
1	63	0,06	1,8	3058,7	0,67	826
2	63	0,04	2,1	3058,7	0,52	611
3	63	0,04	3,5	3058,7	0,87	1019
4	100	0,04	2,0	7633,6	0,50	954
5	100	0,04	3,2	7633,6	0,80	1624
6	100	0,06	2,2	7633,6	0,82	1122
7	140	0,06	2,0	14962	0,75	1257
8	140	0,04	2,3	14962	0,58	1662
9	140	0,04	2,7	14962	0,66	2493
10	140	0,04	1,4	14962	0,35	673

Проаналізувавши рівняння (4.6), побудовано поверхню впливу аргументів, що входять в дане рівняння – Re і Pr , на значення функції – критерію Нуссельта (рис 4.4).

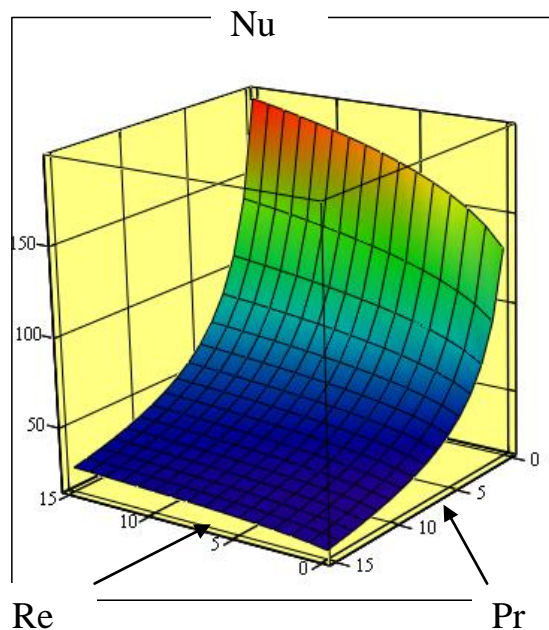


Рис 4.4 – Поверхня впливу критеріїв Рейнольдса і Прандтля на значення критерію Нуссельта відповідно рівнянню (4.6)

4.3 Результати дослідження впливу коливань на теплообмін між нагрівальною стінкою і субстратом

Тепловіддача від стінки нагрівального елемента до суспензії з концентрацією сухої речовини $C=3,5\%$ і $C=8\%$ відповідає умовам роботи біогазового реактору. Використання коливань середовища дозволить попередити налипання часточок суспензії на нагрівальний елемент, уникнути застійних зон і активізувати теплообмін.

Як середовище в третій серії дослідів використовувалась суспензія з концентрацією сухої речовини $C=8\%$. Активація теплообміну здійснювалась пластиною, яка має геометричні розміри 160 x 380 мм і розташована над нагрівальним елементом на відстані 120 мм.

Діапазон зміни основних параметрів дослідження:

- питомий тепловий потік $q = 0,5 \dots 16 \text{ кВт/м}^2$;
- температура рідини вдалині від стінки $t_p = 20 \dots 43 \text{ }^\circ\text{C}$;
- температурний напір $\Delta t = 1 \dots 18 \text{ }^\circ\text{C}$;
- амплітуда коливань пластини $A = 0 \dots 100 \text{ мм}$;
- частота коливань пластини $f = 0 \dots 5 \text{ Гц}$;
- концентрація сухої речовини $C=8\%$;

Активне коливання дозволяє утворити середовище в біореакторі з мінімальним розшаруванням. Активному перемішуванню в більшій мірі піддаються легкі частки в верхній зоні і вода. Важкі частки нижньої зони виконують коливання в зоні, що не перевищує товщини свого шару намулювання. Таким чином, спостерігається двофазне середовище: перша фаза – вода – легкі частки, друга – важкий намул в нижній частині реактора (рис 4.5). З часом легкі часточки розпадаються на більш дрібні і в середовищі утворюються інші фази: намул з дрібних часток в нижній частині і водоспиртова суміш у верхній частині.

Для побудови регресійної моделі інтенсивності теплообміну за результатами експериментальних досліджень використаємо за базову модель рівняння (4.4).

Використовуючи пакет програм статистичної обробки даних Statistica 5.5, виконано регресійний аналіз експериментальних даних (табл.4.2). За результатами аналізу за допомогою методу Хука-Дживіса [45-47] максимальне значення коефіцієнту детермінації $R=0.78$ досягнуте для

$$Nu = 40,48 \cdot Re_{\Delta u}^{0,17} \cdot Pr^{-1,01}, \quad (4.8)$$

де $Re_{\Delta u}$ – коливальний критерій Рейнольдса, який визначається за формулою (4.5).

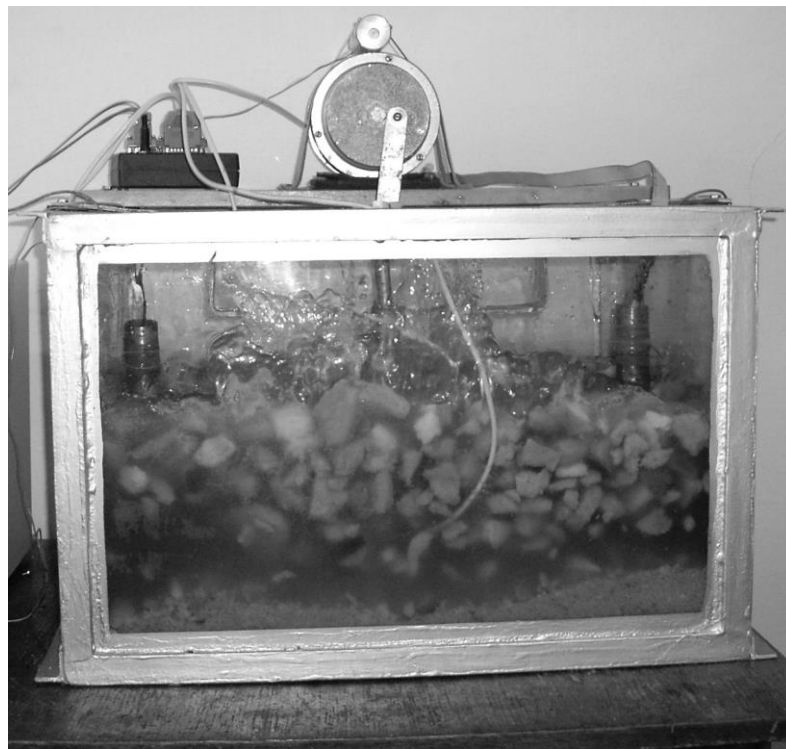


Рис 4.5 – Розшарування середовища при коливальному перемішуванні

Результати співставлення свідчать про достовірність отриманої регресійної залежності (4.8) і відповідність її експериментальним даним.

Вибіркові дані експериментальних досліджень впливу коливань у суспензії з $C=8\%$ на тепловіддачу горизонтального циліндра

№ досліджу	Напруга на ТЕНі, В	Амплітуда, м	Частота коливань f, Гц	Питомий тепловий потік q, Вт/м ²	Швидкість v, м/с	Коефіцієнт тепловіддачі $\alpha_{\text{вibr}}$, Вт/м ² °С
1	63	0,04	2,4	3029	0,6	644,6
2	63	0,06	2,5	3029	0,94	977
3	63	0,08	1,3	3029	0,65	727
4	100	0,04	3,3	7634	0,83	820
5	100	0,06	2,0	7634	0,75	942
6	100	0,08	0,5	7634	0,25	783
7	140	0,04	2,8	14962	0,7	835
8	140	0,06	2,0	14962	0,75	1160
9	140	0,04	3,3	14962	0,84	895
10	140	0,08	1,0	14962	0,5	856

4.4 Співставлення результатів експериментального та теоретичного дослідження впливу коливань на теплообмін між нагрівальною стінкою і субстратом в біореакторі

В другому розділі нами було аналітично обґрунтовано отримане рівняння для критерію Нуссельта при коливальному омиванні теплообмінної поверхні. Використання результатів серії експериментальних досліджень дало можливість співставити аналітичні і експериментальні результати.

Розрахунки аналітичного значення коефіцієнту тепловіддачі виконано за допомогою математичного пакету MatchCad 2001. На рис 4.6 представлено співставлення розв'язання рівняння (2.94) з врахуванням рівняння (2.95) та теплофізичних властивостей субстрату з результатами експериментальних досліджень - рівняння (4.8).

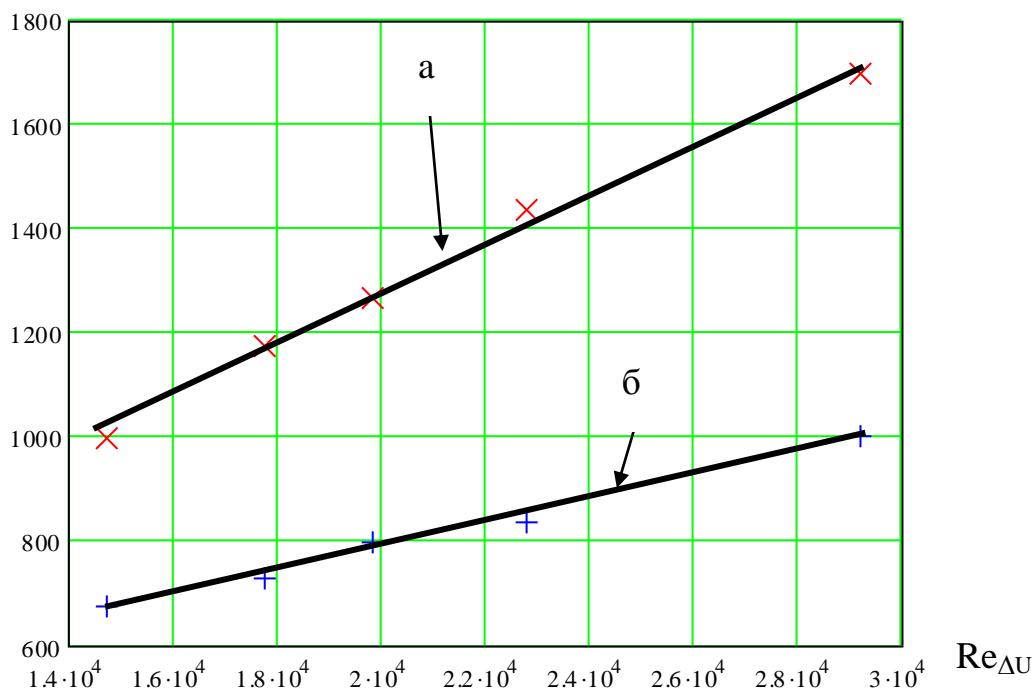


Рис. 4.6 – Співставлення розв’язання рівняння (2.94) з результатами експериментальних досліджень - рівняння (4.8): а – аналітичні результати; б – експериментальні результати.

Співставлення експериментальних та розрахункових результатів свідчить про достовірність математичної моделі теплових і гідродинамічних процесів при вібраційному омиванні стінки нагрівального елемента. Для використання аналітичних результатів в практичних розрахунках, ґрунтуючись на результати співставлення результатів експериментів, введемо корегуючий коефіцієнт ψ в розроблену математичну модель. Значення коефіцієнта $\psi = 0,62$ визначено із співставлення отриманих експериментальних і розрахункових результатів. Для розрахунку значення критерію Нусельта для умов роботи біогазових реакторів при значенні питомого теплового потоку $q = 0,5 \dots 16$ кВт/м²; амплітуди коливань пластини $A = 0 \dots 100$ мм; частоти коливань пластини $f = 0 \dots 5$ Гц; можна рекомендувати наступну залежність:

$$Nu = 0.62 \frac{d}{\lambda} \left[\frac{w - 12\sqrt{s/\rho}}{c_p \cdot s} + \frac{12 \cdot v}{\lambda\sqrt{s/\rho}} \right]^{-1}, \quad (4.9)$$

Значення дотичного напруження s визначається за рівнянням (2.95). Введення коефіцієнта $\psi = 0,62$ можна пояснити також і тим, що активне омивання циліндра, на відміну від пластини, відбувається лише в частині набігання хвилі на його поверхню. Тобто, омивання активним потоком відбувається в напівциліндрі, що направлений перпендикулярно до хвилі. Інша частина циліндру омивається менш активно дотичним і зворотним потоком. Таким чином, для біогазових реакторів, що працюють в діапазоні параметрів, які відповідають діапазонам досліджень (табл. 1.1), можна рекомендувати наступну залежність для визначення коефіцієнту тепловіддачі від горизонтального трубчастого нагрівника при концентрації сухої речовини $C=8\%$ в субстраті при активації теплообміну шляхом коливань

$$Nu = 40,48 \cdot Re^{0,17} \cdot Pr^{-1,01}. \quad (4.10)$$

При інших значеннях в'язкості середовища в діапазоні проведених досліджень доцільно для прогнозування інтенсифікації теплообміну використовувати аналітичну залежність (4.9).

Проаналізувавши рівняння (4.8), побудовано поверхню впливу аргументів, що входять в дане рівняння – Re і Pr , на значення функції – критерію Нусельта (рис 4.7).

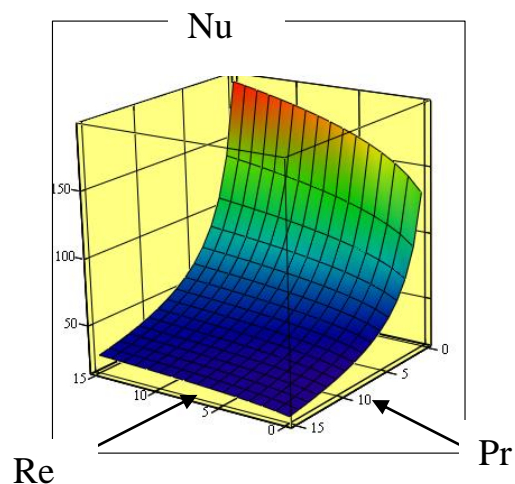


Рис 4.7 – Поверхня впливу критеріїв Рейнольдса і Прандтля на значення критерію Нусельта відповідно рівнянню (4.8)

З рис 4.7 видно, що суттєвий вплив на зростання критерію Нусельта має критерій Рейнольдса, зв'язок між ними прямо пропорційний. При зростанні критерію Прандтля відбувається зменшення значень функції. Активний вплив вібрацій на теплообмін спостерігається при значенні $Pr \leq 10$.

На рис 4.8 зображено лінії рівня поверхні $Nu = f(Re, Pr)$ (рис 4.9), що зображують інтенсивність зростання критерію Нусельта від аргументів у проекції на площину XY.

Проаналізувавши вплив коливань на теплообмін між нагрівальним елементом і субстратом, виявили, що вібрація середовища є не єдиним чинником зростання коефіцієнту тепловіддачі.

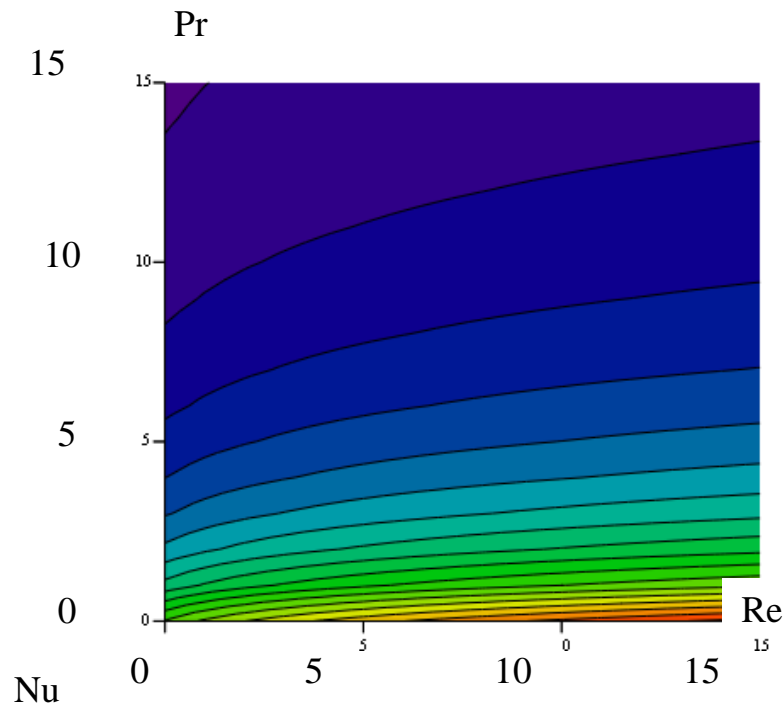


Рис 4.8 – Лінії рівня поверхні впливу критеріїв Рейнольдса і Прандтля на значення критерію Нусельта відповідно рівняння (4.8)

У порівнянні з вільноконвективними процесами теплообміну, де тепловий потік суттєво не впливає на тепловіддачу, при коливанні спостерігається пряма залежність коефіцієнту тепловіддачі від віброшвидкості і теплового потоку. Це пояснюється тим, що при

вимушеному омиванні поверхні руйнується в'язкий прикордонний шар і накопичене тепло передається потоку суспензії. А кількість накопиченого тепла прямо пропорційна питомому тепловому потоку. В порівнянні з вібрацією на воді коефіцієнти тепловіддачі менші і складають, в середньому 0,83...0,97 відповідного показника для води. Це обумовлено з підвищеною в'язкістю і неоднорідністю субстрату. При дослідженнях на воді виявлено, що суттєвіший вплив на зростання інтенсивності тепловіддачі має частота коливань, тоді як у суспензії активніше впливає амплітуда коливань.

4.5 Висновки до розділу 4

1. За результатами аналізу впливу коливання рідини на інтенсивність тепловіддачі від твердої стінки до води і субстрату обґрунтовано вибір визначальної температури рідини та температури стінки при різних способах організації конвекції. Експериментально доведено, що за визначальну температуру для суспензії при коливальній активації можна брати температуру на відстані 1,5-2 діаметра нагрівального елемента, а для суспензій при вільній конвекції – 2,5-3 діаметра, що підтверджує термостабілізаційну дію коливальної активації.

2. Для характеристики впливу коливань на гідродинамічну ситуацію навколо теплообмінної поверхні введено безрозмірний критерій $Re_{\Delta u}$ – коливальний критерій Рейнольдса. Це дозволяє враховувати вплив частоти і амплітуди коливань на інтенсивність теплообміну.

3. Досліджено гідродинамічні та теплообмінні особливості в коливальному нерівномірному в'язкому середовищі, що омиває теплообмінну поверхню. Визначено, що коефіцієнт тепловіддачі до суспензії складає в середньому 0,83...0,97 відповідного показника для води.

4. Розроблено критеріальні залежності для визначення інтенсивності тепловіддачі за умов нерівномірного коливального омивання поверхні та при вільній конвекції в субстратах. Аналіз поверхні впливу

критерію Нусельта свідчить, що суттєвий вплив на зростання критерію Нусельта має критерій Рейнольдса, зв'язок між ними прямо пропорційний.

5. Виявлено, що коливальне перемішування середовища інтенсифікує у водному середовищі вільноконвективну тепловіддачу в 1,5...3 разів, в суспензії $C=8\%$ в 1,3...2,5 рази. Таким чином, використання коливальної активації теплообміну у біореакторах дозволяє термостабілізувати та інтенсифікувати процес виробництва біогазу та економити матеріальні ресурси за рахунок зменшення площ теплообмінних пристроїв.

6. Теоретично встановлені математичні моделі теплових і гідродинамічних процесів в біогазовому реакторі під впливом коливань задовільно співставляються з результатами експериментальних досліджень. Введення корегуючого коефіцієнту $\psi=0,62$ в розроблену математичну модель дозволило використовувати аналітичну модель у практичних розрахунках теплообміну в біогазових реакторах для утилізації органічних відходів.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. За результатами аналізу стану сучасних технологій утилізації відходів сільськогосподарського виробництва встановлено, що найбільш енергозберігаючим є біогазове перероблення органіки, яке дозволяє децентралізувати енергоспоживання та отримати екологічно якісні добрива. На сьогоднішній день відсутні науково-обґрунтовані рекомендації параметрів робочих органів для перемішування субстрату з метою інтенсифікації та термостабілізації анаеробних процесів перероблення органіки в біогазових установках.

2. Розроблено математичну модель процесу активації роботи біореактора при коливальному перемішуванні субстрату. Розв'язанням диференційного рівняння Лагранжа знайдено закон руху пластини активатора. На основі законів теплопровідності, конвективного тепломасопереносу та збереження імпульсів розроблено критеріальне рівняння, що описує теплообмінні процеси між нагрівальним елементом і субстратом при коливальному омиванні стінки нагрівника.

3. Теоретично обґрунтовано вдосконалення конструктивно-технологічних параметрів біогазових реакторів. Розроблено математичну модель управління технологічними процесами підвищення продуктивності біогазових реакторів з утилізації органічних відходів в біореакторах на базі теорії нечіткої логіки та лінгвістичної змінної. Використання цієї методології дозволяє враховувати вплив кількісних та якісних факторів на процес термостабілізації анаеробних процесів. Встановлено, що одним із найсуттєвіших факторів термостабілізації та інтенсифікації анаеробних процесів в біогазових установках при утилізації органічних відходів з метою підвищення їх продуктивності є коливальна активація теплообміну.

4. Для уточнення теоретично обґрунтованих параметрів робочих органів активатора інтенсифікації анаеробного бродіння в біогазових реакторах розроблена експериментальна установка. Установка дозволяє дослідити вплив робочих параметрів активатора на тепловіддачу від

теплообмінної поверхні до середовища в об'ємі за умов зовнішньої задачі теплообміну з коливальною активацією. Комп'ютеризований збір даних та їх обробка за спеціально розробленою програмою дозволили забезпечити достатню достовірність отриманих експериментальних результатів. Очікувані похибки визначення питомого теплового потоку від нагрівального елемента до субстрату та коефіцієнту тепловіддачі не перевищують відповідно 2,3...4,7% і 2,8...14,2%

5. За результатами аналізу впливу коливання рідини, що створюється рухом пластини активатора на інтенсивність тепловіддачі від нагрівальної стінки до води і субстрату, обґрунтовано вибір визначальної температури рідини та температури стінки при різних способах організації конвекції. Експериментально доведено, що за визначальну температуру для суспензії при коливальній активації можна приймати температуру на відстані 1,5...2,0 діаметра нагрівального елемента, а для суспензій при вільній конвекції - 2,5...3,0 діаметра. Виявлено, що коливання середовища пластиною активатором інтенсифікує у водному середовищі вільноконвективну тепловіддачу в 1,5...3,0 рази, в суспензії $C=8\%$ в 1,3...2,5 рази. Таким чином, використання пластини активатора для інтенсифікації теплообміну у біореакторах дозволяє термостабілізувати та інтенсифікувати процес виробництва біогазу та економити матеріальні ресурси за рахунок зменшення площ теплообмінних пристроїв.

6. Обґрунтовано та запропоновано раціональні технологічні схеми роботи біогазових реакторів з рекуперацією теплоти шламу та з тепловим насосом. Запропоновані енергозберігаючі схеми дозволяють скоротити витрати теплоти на нагрівання вхідної органічної сировини в біореактор до 70% - з тепловим насосом і до 50% - з рекуперативним теплообмінником. Розроблено схему автоматизованого управління робочими параметрами біореактора з інтенсифікацією теплообміну при утилізації органічних відходів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гелетуха Г.Г., Марценюк З.А. Энергетический потенциал биомассы в Украине // Пром. теплотехника. – 1998. – № 4. – С. 52–55.
2. Гелетуха Г.Г., Колейкін К.О. Біогаз зі звалищ. Перспективи використання в Україні // «Зелена енергетика» – 2002. – №1. – С. 13–16.
3. Баадер Б., Доне Е., Брендерфер М. Биогаз: Теория и практика. /Пер. з нім. М. І. Серєбряного –М.: Колос, 1982. –148 с.
4. Бойлс Д. Биоэнергия: технология, термодинамика, издержки. /Пер. з англ. М.Ф. Пушкарьова – М.: Агропромиздат, 1987. – 152 с.
5. Соуфер С., Заборски О. Биомасса как источник энергии. /Пер. з англ. А.П. Чочиа – М.: Мир, 1985. – 368 с.
6. Матвеев Ю. Біогазові установки Данії // "Зелена енергетика" – 2004. – № 2. – С. 11–13.
7. Гелетуха Г.Г., Железная Т.А., Жовмир Н.М., Матвеев Ю.Б. Современное состояние и перспективы развития биоэнергетики в Украине // "Промышленная теплотехника" – 2005. – №1. – С. 78–85.
8. Гелетуха Г.Г., Железная Т.А. Біоенергетика у Фінляндії // "Зелена енергетика" – 2002. – №3. – С. 16.
9. Гелетуха Г.Г., Железна Т.А. Біоенергетика в Австрії // "Зелена енергетика" – 2003. – №2. – С. 18–19.
10. Закон України « Про энергозбереження»: Офіц. текст зі змінами станом на 09.02.2006. – Режим доступу <http://zakon1.rada.gov.ua/cgi-bin/laws/main.cgi?nreg=74%2F94-%E2%F0>
11. Закон України « Про альтернативні джерела енергії» Офіц. текст станом на 20.02.2003 – Режим доступу <http://zakon1.rada.gov.ua/cgi-bin/laws/main.cgi?nreg=555-15>
12. Матвеев Ю.Б. Біогаз із Луганського полігона ТПВ // "Зелена енергетика" –2003. – №2. – С 8–10.

13. Сербін В.А. Нетрадиційні та поновлювальні джерела енергії в системах ТГВ: Навч. посібник – Макіївка: ДонДАБА, 2003. – 153 с.
14. Вольчин І., Потапов А., Гелетуха Г., Жовмір М. Електроенергетика України повинна "позеленіти" // "Зелена енергетика", №3 2003. с.16–18.
15. Петрук В.Г., Петрук Д.В., Денисюк Н.М. Экономические аспекты использования соломы как альтернативного источника энергии в Винницкой области // Праці за матеріалами I всеукраїнської науково-технічної конференції «Енергія з біомаси». – Київ – 2002.
16. Джеджула В.В., Демченко Л.Л. Альтернативні джерела енергозабезпечення фермерських господарств //Індивідуальний житловий будинок. Книга за матеріалами третьої республіканської науково-технічної конференції. – Вінниця. – 2001. – С. 137–141.
17. Ткаченко С.Й., Степанов Д.В., Резидент Н.В. Методичні основи моделювання системи термостабілізації реактора біогазової установки //Праці за матер. IV всеукр. наук-техн. конф. «Сучасні технології, матеріали та конструкції в будівництві». – Вінниця. – 2004. – С. 70–79.
18. Ратушняк Г.С., Джеджула В.В. Інтенсифікація теплообміну та термостабілізація біореакторів //Вісник ВПІ.– 2006.– № 2. – С. 26–31.
19. Виробництво біогазу на станціях очистки стічних вод //Ринок інсталяційний. – 2000. – № 11. – С. 34 –35.
20. Семененко И.В. Проектирование биогазовых установок. – К.: Техніка, 1992.–346 с.
21. Ткаченко С.Й., Степанов Д.В., Джеджула В.В. Закономірності розподілу температурних напорів за умов локального газорідного омивання поверхні// Вісник ВПІ, 2003. № 4. – С. 42–45.
22. Бергелс А. Интенсификация теплообмена. В кн. Теплообмен. Достижения. Проблемы. Перспективы // Избранные труды 6-й Международной конференции по теплообмену – Л.: Химия. – 1968. – С. 45–192.
23. Исаченко В.П. и др. Теплопередача. Учебник для вузов. Изд.–е 3–е перераб. и доп. – М.: Энергия. – 1975. – 488 с.

24. Галицейский Б.М., Рыжов Ю.А., Якуш Е.В. Тепловые и гидродинамические процессы в колеблющихся потоках – М.: Машиностроение. 1977.– 256 с.
25. Михеев М.А, Михеева И.М. Основы теплопередачи – М.: Энергия. 1977 – 344 с.
26. Малинин В.Г. Ламинарная свободная конвекция около горизонтальных цилиндрических поверхностей. Автореф. дис. канд. техн. наук, – Мн. – 1978. – 24 с.
27. Авдеев А.А. Гидродинамика барботажа //Теплоэнергетика. – 1983.– № 11.– С. 42–46.
28. Соколов В.Н., Соломахин А.Д. Теплообмен между газожидкостной системой и теплообменным элементом // ЖПХ. – 1962. – № 11.– С. 2570–2573.
29. Lemlich R., Chung–Kong Hwu. The effect of acoustic vibration on forced convective heat transfer. // American institute of chemical engineering journal, USA – 1961 – vol. 7. – №1. – P. 102–106.
30. Lemlich R. Effect of vibration of natural convective heat transfer. // Industrial and engineering chemistry – 1955 – vol. 47. – № 6. – P. 1213 –1223.
31. Lemlich R., Rao M. A. The effect of transverse vibration on free convection from a horizontal cylinder. – International journal of heat and mass transfer – 1965 – vol. 61. – № 57. – P. 85 –88.
32. Кремнев О.А., Сатановский А.В., Лопатин В.В. Исследование теплообмена при вибрации нагретых цилиндрических тел в жидкостях. // Тепло – и мас- соперенос. Т1., М.: Энергия. 1968. – С. 301–308.
33. Біопалива (технології, машини і обладнання) / В.О. Дубровін та інш.– К.: ЦТІ „Енергетика і електрифікація”, 2004.- 137с.
34. Fand R.U., Kaye J. Acoustic streaming near a heated cylinder. // The journal of the acoustical society of America. vol. 32. – 1966 – №5. – P. 579– 584.

35. Ратушняк Г.С., Джеджула В.В. Підвищення продуктивності біогазового реактора управлінням параметрами вільноконвективних процесів теплообміну// Вісник Хмельницького національного університету. – 2006. – №2. – С. 29–32.
36. Деклараційний пат. № 7184 Україна. Біогазовий реактор / Ратушняк Г.С., Джеджула В.В., Державний департамент інтелектуальної власності. – № 20041008416; Заяв. від 18.10.2004; Опубл. 15.06.2005; Бюл № 6.
37. Искович-Лотоцкий Р.Д., Матвеев И.Б., Крат В.А. Машины вибрационного и виброударного действия. – К.: Техника, 1982. – 208 с.
38. Деклараційний пат. № 15894 Україна. Біогазовий реактор/ Ратушняк Г.С., Джеджула В.В., Державний департамент інтелектуальної власності. – № u 2006 01110; Заяв. від 06.02.2006; Опубл. 17.07.2006; Бюл № 7.
39. Ротштейн О.П., Ларюшкін Є.П., Котельніков Д.І. Багатофакторний аналіз технологічного процесу біоконверсії на основі лінгвістичної інформації // Вісник ВПІ. – 1997. – №3. – С. – 38–45.
40. Ротштейн А.П. Интеллектуальные технологии идентификации. Нечеткие множества, генетические алгоритмы, нейронные сети – Вінниця: УНІВЕРСУМ–Вінниця. 1999. – 320 с.
41. Митюшкин Ю.И., Мокин Б.И., Ротштейн А.П. Soft Computing: идентификация закономерностей нечеткими базами знаний. – Вінниця: УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2002. – 145 с.
42. Ларюшкін Є.П. Розробка експертно–моделюючої системи багатофакторного аналізу для управління технологічним процесом біоконверсії: Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.13.07 /ВДТУ. –2001. – Вінниця. – 30 с.
43. Ратушняк Г.С., Джеджула В.В. Моделювання віброінтенсифікуючих процесів в біореакторах на основі лінгвістичної інформації // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2006. – № 3. – С. 74 – 80.

44. Ратушняк Г.С., Джеджула В.В. Автоматичне управління в системах біоконверсії // Тези доповідей XIII Міжнародної конференції з автоматичного управління. – 2006. – С. 227.
45. Веденяпин Г.В. Общая методика экспериментального исследования и обработки опытных данных. – М.: Колос. 1973. – 199 с.
46. Осипова В.А. Экспериментальное исследование процессов теплообмена. – М.: Энергия. 1979. – 320 с.
47. Чкалова О.Н. Основы научных исследований. – К.: Вища школа. 1978. – 118 с.
48. Деклараційний пат. № 13260 Україна. Експериментальна установка для вимірювання середніх температур стінки та температурних напорів/ Ратушняк Г.С., Джеджула В.В., Державний департамент інтелектуальної власності.– № и 2005 09738; Заяв від 17.10.2005; Опубл. 15.03.2006; Бюл № 3.
49. Ратушняк Г.С., Джеджула В.В. Контроль параметрів температурних напорів в одно– та багатофазних середовищах //Вісник ВПІ. – 2005. – № 6. – С. 193–195.
50. Ткаченко С.И., Степанов Д.В., Співак О.Ю. Стабілізований теплообмін в системі : нагрівальний елемент – обмежений об'єм рідини – навколишнє повітря // Вісник ТУП. –№ 1. –2001. – С. 74–76.
51. Степанов Д.В., Боднар Л.А. Теплообмінні пристрої в системі біоконверсії// Вісник ВПІ. – 2005. – № 1. – С. 55–57.
52. Теплообменные аппараты бродильной промышленности / Николаев Л.К., Листовский Р.Р.– М.: Пищевая промышленность. 1973 .– 177 с.
53. Ратушняк Г.С., Джеджула В. В. Енергозбереження в системах виробництва біогазу// Тези доповідей Міжнародної конференції «І всеукраїнський з'їзд екологів», 2006 – С. 229.
54. ТУ "Біогаз метантенків." ТУУ–204. 14069366–13–97.
55. Ратушняк Г.С., Джеджула В.В. Інтенсифікація виробництва та підготовка біогазу до використання в теплотехнічному обладнанні// Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання, КНУБА, К.: 2005.– № 8 – С. 52 – 60.