

Національний університет харчових технологій

Пішеніна Надія Володимирівна

УДК 536.24:620.92

**УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ ІНТЕНСИВНОСТІ
ТЕПЛООБМІНУ В ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ СИСТЕМАХ ПЕРЕРОБКИ
ОРГАНІЧНИХ ВІДХОДІВ**

05.14.06 — технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ-2013

Дисертацією є рукопис

Робота виконана у Вінницькому національному технічному університеті

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор,
Ткаченко Станіслав Йосипович,
Вінницький національний технічний університет,
завідувач кафедри теплоенергетики

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,
Василенко Сергій Михайлович,
Національний університет харчових технологій,
м. Київ, професор кафедри теплоенергетики
та холодильної техніки

кандидат технічних наук, доцент,
Барабаш Петро Олексійович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут», м. Київ,
доцент кафедри теоретичної та промислової
теплотехніки

Захист відбудеться « 22 » травня 2013 року о 16-й годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 26.058.05 Національного університету харчових технологій за адресою: 01601, м. Київ, вул. Володимирська, 68, ауд. А-311

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету харчових технологій за адресою: 01601, м. Київ, вул. Володимирська, 68

Автореферат розісланий «22» квітня 2013 року.

Вчений секретар
Спеціалізованої вченої ради
К 26.058.05,
к.т.н., доц.



В. М. Філоненко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Актуальність теми

На сьогодні діючі вітчизняні системи переробки органічних відходів (СПОВ) характеризуються невисокою продуктивністю, значними енерговитратами на власні потреби, високою матеріаломісткістю, що призводить до підвищення техногенного навантаження на навколишнє середовище в процесі виготовлення, експлуатування та утилізації таких систем. Існуючі методи створення теплотехнологічних систем не дозволяють здійснити усунення цих недоліків.

Розв'язання цієї проблеми в достатньому обсязі неможливе так як, зокрема, не вирішені на науковому рівні питання визначення інтенсивності теплообміну до складних органічних рідин, субстратів, сумішей, які є робочим середовищем в елементах систем переробки відходів. Це зумовлено тим, що інформація про теплофізичні та реологічні властивості, хімічний склад натурних рідин обмежена, крім того, їх властивості змінюються в процесі переробки та в залежності від передісторії. Отже, проблеми створення методичних основ синтезу енергоефективних систем переробки органічних відходів, визначення інтенсивності теплообміну в складних середовищах є актуальними.

Зв'язок роботи з науковими програмами, темами

Тема дисертації відповідає напрямку досліджень кафедри теплоенергетики Вінницького національного технічного університету. Матеріали дисертаційної роботи відповідають розділам:

— держбюджетної теми 82-Д-276 «Зменшення шкідливих викидів в навколишнє середовище в підсистемах енергозабезпечення систем біоконверсії» (№ держ. реєстрації 0105U002425); автором виконано підрозділ теми 4.2.2.3.;

— держбюджетної теми 82-Д-312 «Зменшення техногенного навантаження на навколишнє середовище енергозберігаючих систем утилізації органічних відходів» (№ держ. реєстрації 0108U000667). Автором виконано підрозділи теми 2.2.1, 3.2.3, 4.1.1 – 4.1.4, 4.1.6, 5.1, 5.7;

— держбюджетної теми 82-Д-334 «Наукові основи мінімізації техногенних ризиків в умовах виробки енергоносіїв із органічних відходів». Етап I «Аналіз і систематизація інформації по органічних відходах, можливостях отримання з них енергоносіїв, апаратурно-схемному оформленню систем та методів оцінки техногенних ризиків» (№ держ. реєстрації 0111U001106). Автором виконано підрозділи теми 2.1.1 – 2.1.3, 2.2.1, 3.1;

— Етап II «Формування узагальненого та конкретних апаратно-схемних ланцюгів. Розробка критеріїв якості системи виробництва енергоносіїв із органічних відходів. Аналіз результатів теоретичних і експериментальних досліджень робочих процесів в системах виробництва енергоносіїв із органічних відходів». Автором виконано підрозділи теми 2.1 – 2.5, 3.1 – 3.3.

Мета і завдання дослідження

Мета роботи – підвищення енергоефективності, зниження ресурсоемності та техногенного навантаження на навколишнє середовище систем переробки органічних відходів шляхом теоретичного і експериментального обґрунтування їх синтезу, удосконалення способів і методів математичного і фізичного моделювання теплообмінних процесів в елементах систем. Для досягнення поставленої мети потрібно виконати такі **завдання**:

— здійснити аналіз існуючих схемних, технологічних і технічних рішень СПОВ, факторів, що впливають на енергоефективність СПОВ, методів створення теплотехнологічних систем СПОВ;

— провести обґрунтування складу функцій якості та математичного опису СПОВ;

запропонувати та реалізувати подальший розвиток та дослідження оригінального експериментально-розрахункового методу (ЕРМ) визначення інтенсивності теплообміну в складних сумішах з обмеженою інформацією по теплофізичним властивостям;

— удосконалити портативний базовий експериментальний стенд для встановлення закономірностей теплообміну в натурних сумішах за умов вільної і вимушеної конвекції, методика проведення досліджень, здійснити обробку їх результатів та аналіз;

— дослідити закономірності теплообмінних процесів та уточнити умови теплообміну в робочих елементах базового експериментального стенду ЕРМ;

— реалізувати наукові результати в дослідженнях теплотехнологічних підсистем і елементів систем переробки органічних відходів.

Об'єкт дослідження – теплообмінні процеси в реонестабільних неньютонівських рідинах.

Предмет дослідження – методи визначення інтенсивності теплообміну в елементах енергоефективних систем переробки органічних відходів, методи синтезу систем.

Методи дослідження – в роботі використані експериментальні та теоретичні методи дослідження. Експериментальні дослідження інтенсивності теплообміну в натурних сумішах виконувались на спеціально створеному стенді. Математична обробка результатів експериментальних досліджень проводилась з використанням методів прикладної статистики — пакетів прикладних програм (Statistika, MS Excel). Теоретичні дослідження ґрунтуються на базових засадах теорії подібності. Адекватність математичних моделей встановлювалась шляхом порівняльного аналізу результатів числових експериментів із результатами обробки експериментальних даних здобувача і даних інших дослідників.

Наукова новизна отриманих результатів визначається тим, що:

1. Набуло подальшого розвитку уявлення про закономірності теплообміну ньютонівських та неньютонівських рідин та сумішей, за властивостями близькими до ньютонівських, в посудині з розмірами (згідно з існуючими уявленнями про теплообмін) на межі «великий об'єм»—«обмежений об'єм» у разі вільної і вимушеної конвекції в умовах макрогідродинамічної і теплової нестабільності. В результаті експериментальних досліджень, встановлено, що:

– закономірності теплообміну в умовах вільної конвекції можна описати критеріальними рівняннями зі структурою, яка відповідає рівнянням теплообміну у «великому об'ємі» зі квазістабільною вільною конвекцією ньютонівської рідини;

– закономірності теплообміну в умовах вимушеної конвекції можна описати критеріальними рівняннями з безрозмірними визначальними параметрами ньютонівської рідини, які враховують вплив вимушеної (Re) і вільної конвекції ($Gr \cdot Pr$) на інтенсивність теплообміну.

2. Вперше: експериментально встановлена залежність інтенсивності теплообміну в складних сумішах (органічні відходи тваринництва, субстрат) від біотех-

нологічної і теплогідродинамічної передісторії, що дозволило запропонувати метод оцінки теплообміну в реонестабільних сумішах, завдяки врахуванню особливостей їх поведінки в різних умовах; запропоновано та експериментально і теоретично обґрунтовано вибір «модельної рідини» для опису поведінки реонестабільної неньютонівської суміші в умовах, коли руйнується її реологічна структура і вона практично перетворюється в суміш з фізичними властивостями ньютонівської рідини. Запропоновані і науково обґрунтовані методи вибору «модельної» та «частково-модельної рідини» дозволяють, використовуючи відомі критеріальні залежності для ньютонівських рідин, визначати коефіцієнти теплообміну в натурних об'єктах БГУ.

3. Удосконалено методичні основи математичного моделювання системи виробництва енергоносіїв із органічних відходів, на відміну від існуючих, завдяки застосуванню експериментально-розрахункового методу і введенню техногенного навантаження в перелік функцій якості системи.

Практичне значення та реалізація результатів досліджень полягає в розробці методичних основ синтезу СПОВ. Рекомендується практичне використання експериментально-розрахункового методу для створення замкнених математичних моделей. Результати роботи є теоретичною основою для розробки та вдосконалення СПОВ, підвищення їх енергетичної і екологічної ефективності. Результати досліджень впроваджено на підприємствах: ПП «Немирівський спиртовий завод», м. Немирів, ТЗОВ «Завод газового обладнання «Альфа-Газпромкомплект», м. Тернопіль, в навчальний процес на кафедрі теплоенергетики Вінницького національного технічного університету.

Особистий внесок здобувача полягає в удосконаленні експериментального стенду і проведенні експериментально-розрахункових досліджень. Здобувачу належить основний вклад в удосконалення методичних основ експериментально-розрахункового методу. Формування концепції експериментально-розрахункового методу для реонестабільних рідин проведено у співавторстві з науковим керівником.

У роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачу належать: проведення числових досліджень, аналіз і порівняння результатів різних авторів, формування початкових даних для програми оцінювання техногенного навантаження життєвого циклу об'єкта [1, 4, 5, 7]; аналіз технологічних та конструктивних рішень діючих біогазових установок з позицій їх продуктивності, розробка методів і засобів зниження матеріаломісткості установок [2]; систематизація сукупностей параметрів, що визначають процеси на окремих ділянках, створення схеми проведення досліджень для підвищення енергоефективності біогазової установки [3]; обґрунтування функцій якості для оцінки енергоефективності роботи біогазової установки, проведення числових досліджень, узагальнення результатів [8]; розробка принципової схеми базового експериментального стенду, проведення експериментальних і теоретичних досліджень, аналіз результатів [9, 10, 12, 17]; огляд патентної інформації, аналіз переваг і недоліків аналогу і прототипу, опис запропонованої схеми [13, 15]; проведення експериментальних та числових досліджень, встановлення адекватності результатів досліджень [14, 16].

Апробація роботи

Основні результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на:

науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів університету за участю працівників науково-дослідних організацій та інженерно-технічних працівників м. Вінниці та області в 2008—2012 роках; Міжнародній науково-технічній конференції «Інноваційні технології в будівництві» (м. Вінниця, 2010, 2012 рр.); Всеукраїнській науково-технічній конференції «Енергоефективність в галузях економіки України» (м. Вінниця, 2011 р.); XI Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих учених та студентів «Еколого-енергетичні проблеми сучасності» (м. Одеса, 2011 р.); X Міжнародній конференції «Контроль і управління в складних системах (КУСС–2010)» (м. Вінниця, 2010 р.); II Міжнародній науково-технічній конференції «Земля України – потенціал енергетичної та екологічної безпеки держави» (м. Вінниця, 2011 р.); Міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених і студентів «Сучасні екологічно безпечні та енергозберігаючі технології в природокористуванні» (м. Київ, 2011 р.); Міжнародній науково-практичній конференції, присвяченій 55-річчю від дня утворення кафедри теплоенергетики та холодильної техніки Національного університету харчових технологій (м. Київ, 2012 р.).

Публікації. За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 16 друкованих праць. З них 10 статей у наукових фахових виданнях України, три патенти України на корисну модель, один патент України на винахід, тези двох доповідей.

Обсяг та структура роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (174 найменування) і додатків. Загальний обсяг роботи — 149 сторінок основного тексту, містить 55 рисунків, 14 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність роботи, сформульовані мета, наукова новизна та практична цінність отриманих результатів, наведені відомості про апробацію отриманих результатів.

У першому розділі проведено аналіз конструкцій і схемних рішень існуючих на даний час дієздатних СПОВ на прикладі біогазової установки (БГУ), огляд робочих процесів, що відбуваються в елементах СПОВ. Виконано класифікацію рідин та сумішей, що підлягають переробці в СПОВ, огляд і аналіз існуючих методів та способів аналітичного та експериментального дослідження теплофізичних властивостей рідин і обладнання для їх реалізації. Також визначено проблеми математичного моделювання теплообмінних процесів у елементах СПОВ.

Створення систем переробки органічних відходів і отримання з них енергоносіїв для України є актуальним. Існуючі науково-методичні основи недостатні для створення сучасних біогазових установок третього покоління.

Низька продуктивність, значна матеріаломісткість обладнання, експлуатаційні витрати енергії, вартість установок обмежує впровадження СПОВ в Україні. Продуктивність СПОВ визначається якістю роботи теплообмінного обладнання, так як стабільність біохімічних і теплообмінних процесів пов'язані між собою.

Такі особливості вимагають удосконалення методів проектування основного обладнання СПОВ, розробку функцій якості, за якими можна було б оцінювати як екологічну так і енергетичну ефективність системи.

Виконуючи синтез СПОВ (БГУ) доцільно використати досвід в створенні теплоенергетичних систем, установок (Попирін Л. С., Рижкін В. Я.), теплотехнологічних і хіміко-технологічних систем в харчовій та хімічній промисловості (Кафаров В. В., Тобілевич Н. Ю., Попов В. Д., Прядко М. О., Василенко С. М.), в розробках технології біоенергоконверсії (Дубровін В. О., Гелетуха Г. Г., Панцхава Є. С., Забарний Г. М., Калетнік Г. М., Мельничук М. Д., Мироненко В. Г., Таргоня В. С., Баадер Б., Доне Є., Семененко І. В., Ратушняк Г. С. та ін.).

Органічні суміші, субстрати тваринного походження, суміші субстратів, що переробляються в БГУ є полікомпонентними, багатофазними колоїднодисперсними, структурно-в'язкими середовищами, які в окремих випадках можна віднести до неньютонівських реонестабільних тиксотропних рідин з псевдопластичною текучістю. Ідентифікація реальних сумішей в біогазових установках складна, їх фізичні властивості можуть змінюватись на протязі технологічного процесу. На практиці утворюється безліч варіантів сумішей відходів, а отже, традиційна побудова баз даних по теплофізичним властивостям (ТФВ) робочих сумішей біогазової установки не вирішує проблему визначення інтенсивності теплообміну в них.

На даний час відсутній надійний математичний опис теплообмінних процесів в складних неоднорідних реонестабільних сумішах. Відомі методи розрахунку теплообміну в реологічних складних середовищах (Кутателадзе С. С., Шульман З. П., Chen Y. R. та ін.) в основному вимагають додаткових досліджень реології речовини, не враховують реонестабільність, невизначеність теплофізичних властивостей теплоносія.

Кількість експериментальних досліджень теплообміну в реонестабільних, багатофазних середовищах, наприклад, у рідких середовищах БГУ, відходах тваринництва, вкрай обмежена (Байрамов Р. Б., Бердієв О., Богданов П. В., Chen Y.R., Ткаченко С. Й., Степанов Д. В., Резидент Н. В. та ін.). Проведення таких експериментів вимагає створення особливих умов, спеціалізованих приміщень, обладнання, великої кількості натурної суміші. Отже, традиційні методи дослідження і експериментальні установки не забезпечать багатоваріантні дослідження процесів теплообміну в складних сумішах в залежності від їх передісторії.

Раніше запропонований оригінальний експериментально-розрахунковий метод (ЕРМ) для розрахунку теплообміну в складних сумішах дозволяє визначити коефіцієнти тепловіддачі до сумішей з невизначеними ТФВ шляхом нетрадиційного застосування теорії подібності та завдяки проведенню базового експерименту зі зразком натурної суміші на портативному експериментальному стенді.

Однак, існуючий ЕРМ для оцінювання інтенсивності теплообміну в складних сумішах не враховує з достатньою для практики точністю реонестабільність неньютонівських сумішей, напрям передачі теплоти.

В кінці розділу сформульовано мету і завдання досліджень.

У другому розділі викладено методичні основи синтезу систем виробництва енергоносіїв із органічних відходів. Запропоновано за функцію якості СПОВ приймати техногенне навантаження або зменшення техногенного навантаження (ТН) на навколишнє середовище протягом життєвого циклу LC, яке визначає ступінь впливу техногенних факторів на довкілля (шкідливі викиди, скиди тощо)

$$T_H(K_1 \cup K_2 \cup K_3); \quad \Delta T_H(\Delta K_1 \cup \Delta K_2 \cup \Delta K_3),$$

де K_1 — вплив на людське здоров'я; K_2 — вплив на якість екосистеми; K_3 — вичерпання запасів мінералів і викопних палив. Життєвий цикл (ЖЦ), етапи: I — видобуток копалин; II — виготовлення елементів та монтаж СПОВ; III — експлуатація і ремонт СПОВ; IV — утилізація обладнання.

За показники якості БГУ в дослідженнях приймалися також: відносна частка біогазу на власні потреби ψ^* ; q^* — питомий вихід біогазу на одиницю маси металу реактора БГУ, $\text{м}^3/(\text{добу кг})$; q — питомий вихід біогазу з одиниці об'єму реактора БГУ за добу, $\text{м}^3/(\text{добу} \cdot \text{м}^3)$.

За результатами синтезу СПОВ формуються початкові дані для роботи програми оцінювання ТН ЖЦ, яка реалізується в програмному продукті SimaPro 7.2. Вплив життєвого циклу виробу за методом Еі-99 визначається в безрозмірних величинах Eco-indicator point (Pt).

Математичне формулювання задач проектування теплотехнологічної системи СПОВ включає: функцію мети, систему балансових рівнянь, систему рівнянь, що описують кінетичні процеси, систему обмежень. Рівняння матеріальних, теплових балансів і рівняння тисків враховують особливості режимів роботи БГУ.

Система обмежень представлена у вигляді рівностей і нерівностей по термодинамічним, витратним, конструктивним параметрам. Показник q , що характеризує біотехнологічні процеси, приймаємо в заданому діапазоні $0,8 \leq q \leq 2$, швидкість руху суміші — $w \leq 0,6$ м/с згідно вимог біотехнології.

На основі всіх типів рівнянь утворюються розрахункові модулі БГУ, за допомогою яких можна описати всі можливі типи елементів БГУ в рамках заданої системи обмежень. В якості об'єкт-гіпотези для дослідження прийнята прогресивна схема БГУ третього покоління, окремі підсистеми, окремі елементи.

Побудована математична модель дозволяє розв'язувати наступні задачі: визначати зовнішні і внутрішні матеріальні і теплові потоки, тепловтрати, площу поверхні теплообміну, теплову потужність теплообмінника, якщо задана площа поверхні теплообміну, споживання енергії (біогазу) на власні потреби, вихід товарного біогазу та інше.

Для математичного опису теплообмінних процесів запропоновано використати ЕРМ але після його суттєвого вдосконалення. Оскільки, дослідження показали, що результуюча похибка існуючого ЕРМ становить $\pm 36\%$ — тобто підтвердилась точність, яка гарантується її авторами, в той же час, для деяких складних рідин похибка визначення коефіцієнта тепловіддачі може виходити за ці межі.

В реалізації ЕРМ виділяємо три основних групи (джерела) виникнення похибок і невизначеностей: недосконалості конструкції експериментальної установки; похибки вимірювання; невизначеність реологічних характеристик натурної рідини. Аналіз існуючої ЕРМ показав необхідність створення структурної схеми досліджень по вдосконаленню ЕРМ (рис. 1), яка включає: удосконалення проведення базового експерименту, обробки експериментальних даних, модернізацію базового експериментального стенду (етап 1); розробку методу врахування поправки впливу напряму теплообміну $(Pr_p/Pr_{ст})^{0,25}$ на інтенсивність теплообміну у випадку, коли невідомі теплофізичні властивості речовини (етап 2); удосконалення методу визначення поправки $\Pi_{б-н}$ (етап 3); мінімізацію похибки вибору критеріального рівняння, яке описує умови теплообміну в НТОУ (етап 4). Для

реалізації етапу 3 розроблено метод оцінки ТФВ натурної рідини в конкретному діапазоні температур та методи вибору ТФВ «модельної рідини», які використовуються для визначення $\Pi_{б-н}$.

Використання відомої інформації про властивості реонестабільних рідин, характер їх поведінки після руйнування їх структури дозволило сформулювати гіпотезу оцінки інтенсивності теплообміну в реонестабільних неньютонівських рідинах. Суть її в тому, що умови стану реонестабільної рідини (відходів ВРХ, свиней, тощо) в елементах натурних об'єктів відповідають таким умовам, за яких реонестабільна рідина поводить себе як стабільна ньютонівська рідина. Це дозволяє визначати інтенсивність теплообміну в реонестабільних рідинах в натурних об'єктах.

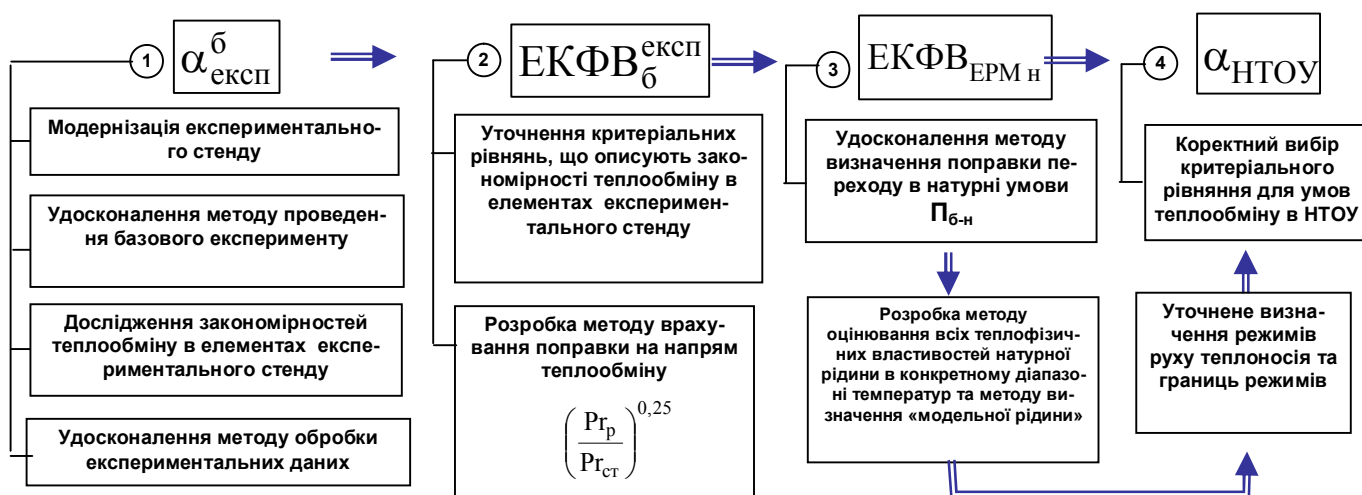


Рисунок 1 — Структурна схема досліджень щодо удосконалення ЕРМ

Отже, за певних умов, в основу опису теплообмінних процесів у неньютонівських реонестабільних рідинах можна покласти критеріальні рівняння для ньютонівських рідин і використати традиційні безрозмірні критерії без введення реологічних параметрів n і k , тобто в такому вигляді, як вони використовуються для ньютонівських рідин.

В теплотехнологічному обладнанні БГУ, де відбуваються процеси нагрівання і охолодження сумішей з тиксотропними властивостями, в залежності від виду обладнання, наявності та періодичності перемішування, передісторії субстрату можемо мати різного ступеня зруйновану структуру. Відповідно до цього, суміш може набувати різної ефективної в'язкості $\mu_{\text{еф}}$ — ньютонівської та неньютонівської, що суттєво буде впливати на інтенсивність теплообміну, а отже — і на якість протікання біохімічних процесів. Зменшення в'язкості спостерігається також внаслідок процесів бродіння.

Таким чином, для коректного розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі в процесі проектування теплотехнологічного обладнання СПОВ, необхідно дослідити інтенсивність теплообміну субстрату з різним ступенем зруйнованості структури та з різною біохімічною передісторією (свіжа суміш, в стадії активного анаеробного бродіння, зброджена).

Жорсткі обмеження біотехнології потребують коректного визначення коефіцієнтів тепловіддачі для кожного типу обладнання. Забезпечення наведених вимог можливе тільки у випадку багатоваріантного дослідження суміші з різною

передісторією із застосуванням розробленого комплексу базових експериментальних установок в ЕРМ визначення інтенсивності теплообміну в реонестабільних рідинах.

У третьому розділі запропоновано удосконалений ЕРМ для неньютонівських реонестабільних тиксотропних сумішей, представлено результати експериментальних досліджень по визначенню впливу стану реоструктури на інтенсивність теплообміну в тиксотропних сумішах. А також представлено результати всіх виконаних аналітичних та експериментальних досліджень в цьому напрямку, опис експериментальних установок, методів проведення дослідів та обробки експериментальних даних, оцінку достовірності удосконаленого ЕРМ.

Установка дослідження теплообміну за умов вільної конвекції (рис. 2) складається із зовнішньої металевої посудини 1 з циліндричними стінками, зовнішня поверхня якої ізольована ($R_{i3} \approx 0,8 \text{ м}^2\text{К/Вт}$), внутрішньої металевої циліндричної посудини 2 та ізольованої ззовні металевої кришки 4. Посудина 2 коаксіально розміщується в посудині 1 за допомогою фіксуючої теплоізоляційної тришарової підставки 3, утворюючи циліндричну теплообмінну поверхню. Основними елементами установки є дві робочі порожнини – зовнішня, ємністю V_1 , та внутрішня, ємністю V_2 , $V_1/V_2=3,7$. Висота циліндричної теплообмінної поверхні $H_1=0,108 \text{ м}$.

Проведення експерименту здійснювалось таким чином. У робочу порожнину посудини 1 заливається гарячий теплоносій (вода, початкова температура змінювалась в межах $45...92 \text{ }^\circ\text{C}$). У порожнину посудини 2 заливається холодний теплоносій (досліджувана натурна рідина, суміш). Після чого посудина 2 з холодним теплоносієм розміщується в посудині 1. Рівень рідин у робочих порожнинах однаковий. Установка закривається кришкою 4. Далі проводиться вимірювання температур у зовнішньому об'ємі V_1 та в об'ємі V_2 внутрішньої порожнини через визначений проміжок часу. Дослід закінчується, коли середній температурний

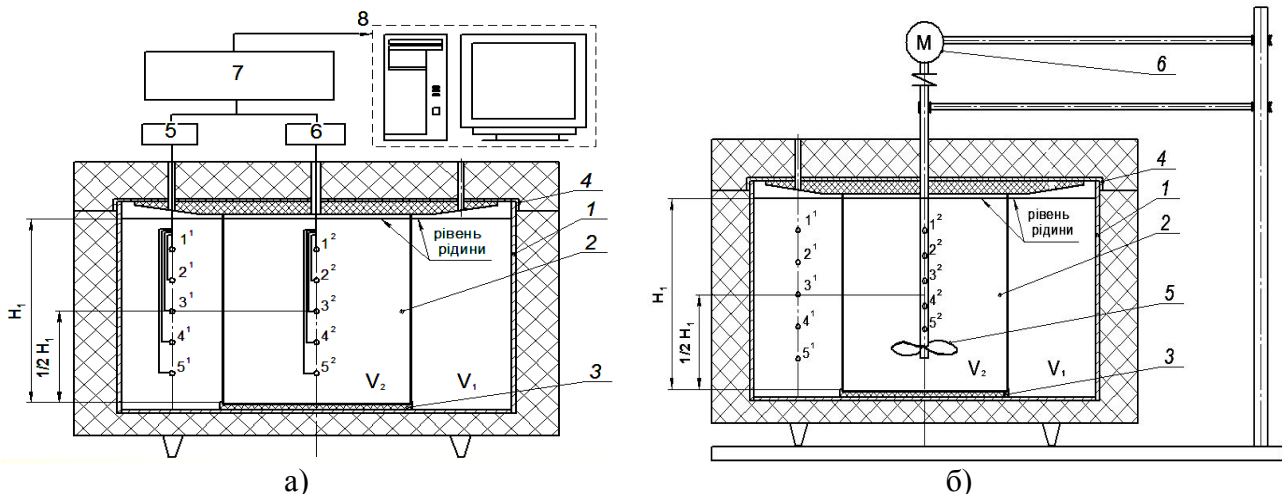


Рисунок 2 — Установки базового експериментального стенду в системі ЕРМ: 1 — зовнішня посудина; 2 — внутрішня посудина; 3 — теплоізоляційна підставка; 4 — кришка;

а) вільна конвекція: 5, 6 — пристрій збору і попередньої обробки одиничних аналогових сигналів, що поступають від датчиків вимірювання температури гріючого теплоносія 5 і натурної рідини 6; 7 — пристрій одночасного фіксування показів (WEBкамера, фотокамера); 8 — виведення результатів на ЕОМ;

б) вимушена конвекція: 5 — пропелерна мішалка; 6 — електродвигун.

напір дорівнює $\overline{\Delta t} = 3 \dots 5^\circ\text{C}$. Вимірювання температур теплоносіїв здійснювалось в п'яти точках $1^1 \dots 5^1$ в об'ємі V_1 , та в п'яти точках $1^2 \dots 5^2$ в об'ємі V_2 , рівномірно розподілених вздовж теплообмінної поверхні (рис. 2) термометрами опору з аналогово-цифровими перетворювачами. Фіксування температур відбувалось одночасно в десяти точках, шляхом фотографування індикаторів термометрів.

Для дослідження теплообміну за умов вимушеної конвекції в системі ЕРМ базова експериментальна установка обладнана пропелерною мішалкою 5 (рис. 2 б), діаметром $d_M = 0,058$ м, з трьома лопатями, кут нахилу кожної 60° . Співвідношення діаметрів мішалки та внутрішньої робочої порожнини базової установки $d_M/D_B = 0,6$. Мішалка встановлена співосно зі внутрішньою посудиною 2 базової установки біля нижнього днища на відстані 17 мм, приводиться в дію електродвигуном 6, спричиняє висхідний рух рідини. Діапазон регулювання частоти обертання мішалки 4...98 об/хв.

Методика проведення серії досліджень за умов вимушеної конвекції має відмінність — після розміщення посудини 2 з холодним теплоносієм в посудині 1 з гарячим теплоносієм, встановлюється та приводиться в дію перемішувальний пристрій. В межах серії дослідів кількість обертів мішалки стала. Вимірюються температури в п'яти точках $1^1 \dots 5^1$ в об'ємі V_1 , та в п'яти точках $1^2 \dots 5^2$ в об'ємі V_2 через визначений проміжок часу. Дослід закінчується з досягненням середнього температурного напору $\overline{\Delta t} = 1,5 \dots 3^\circ\text{C}$. Враховуючи тиксотропні особливості натурних рідин, базовий експеримент з однією і тією ж сумішшю проводиться декілька разів при різних швидкостях руху. Перед проведенням кожної серії дослідів натурна рідина інтенсивно переміщується для руйнування просторової структури.

Модернізація базових експериментальних установок для дослідження теплообміну (рис. 2) дозволила мінімізувати динамічну похибку вимірювання температурного поля, встановити і дослідити нестационарність умов теплообміну та визначити ступінь нерівномірності розподілу температур по висоті в натурних сумішах протягом базового експерименту. Результати базового експерименту з тарувальними рідинами вода, гліцерин, соняшникова олія, цукровий розчин з концентрацією 40, 50% показали, що процес теплообміну в елементах портативної установки відповідає умовам теплообміну у «великому об'ємі» за умов вільної конвекції, а також дозволили встановити спосіб вибору визначальних температур та температурного напору. В результаті тарування установки (рис. 2 а) отримані критеріальні рівняння виду

$$\overline{Nu} = C \cdot Ra^{n_1} \cdot (Pr_p / Pr_c)^{n_2},$$

де $n_1 = 0,25$; $n_2 = 0,25$; для зовнішньої порожнини $C_1 = 0,757$; для внутрішньої порожнини $C_2 = 1,3$. Середній температурний напір визначається за $\overline{\Delta t} = \overline{t_1} - \overline{t_2}$, де $\overline{t_1}$ — середня температура грійного теплоносія, $\overline{t_2}$ — середня температура досліджуваної суміші, визначальний лінійний розмір H_1 . Обробка експериментальних даних і знаходження констант C_1 та C_2 виконано із застосуванням спеціалізованого програмного пакету STATISTICA, коефіцієнт детермінації при цьому дорівнює $R^2 = 0,98$. Це дозволяє зберегти структуру критеріального рівняння, по-

дійною до рівняння для розрахунку теплообміну у «великому об'ємі» ($q_c = \text{const}$) в методиці обробки результатів експерименту отриманих на базовій експериментальній установці.

За результатами експериментальних тарувальних досліджень отримано критеріальне рівняння, яким можна описати теплообмін у внутрішній порожнині установки з перемішуванням пропелерною мішалкою для нестационарних теплогидродинамічних умов, що створюються в базовому експериментальному стенді (рис. 2 б). В розрахунках прийнято, що характерна швидкість руху рідини дорівнює половині лінійної швидкості руху крайньої точки пропелера мішалки w_{\max} . Тоді, по аналогії розподілу профілю швидкостей по перерізу в круглій трубі при вимушеній течії рідини, критерій Рейнольдса для умов базового експерименту знаходимо за наступною формулою

$$Re^* = \frac{\bar{w} \cdot 2\delta}{\nu}$$

де $2\delta = D_B - d_M$, $D_B = 0,097$ м, ν — кінематична в'язкість рідини за t_2 , м²/с. Критерії Re^* для тарувальних рідин змінюються в межах $Re^* = 20 \dots 14000$. Характерна швидкість руху рідини $\bar{w} = 0,5 \cdot w_{\max}$ змінюється від 0,01 до 0,3 м/с, $w_{\max} = (2 \cdot \pi \cdot n \cdot d_M) / 60$, а середній температурний перепад між гарячим теплоносієм і рідиною, що нагрівається, дорівнює $\Delta t_6 = 1,5 \dots 30^\circ \text{C}$, $\Delta t_6 = (t_1 - t_2)$, де t_1 — середня температура грійного теплоносія, t_2 — середня температура досліджуваної суміші. Процес теплообміну в базовому експериментальному стенді відбувається в нестационарних умовах — на початку експерименту Δt максимальне, а потім Δt зменшується протягом експерименту.

У внутрішній порожнині пропелерна мішалка утворює циркуляційний рух рідини, який руйнує тепловий граничний шар вільної конвекції. Внаслідок цього відбувається інтенсифікація тепловіддачі по висоті теплообмінної поверхні.

Відповідно до прийнятої моделі процесу теплообміну, у якій враховується одночасно вплив вимушеної і природної конвекції, отримана наступна залежність для опису теплообміну при вимушеному русі в базовій експериментальній установці:

$$\text{при } 20 < Re_{2\delta} < 3,7 \cdot 10^3, \quad 6 \cdot 10^6 < (Gr_H \cdot Pr_p) < 2 \cdot 10^8, \quad 3,2 < Pr_p < 1,7 \cdot 10^3$$

$$Nu = 0,0549 \cdot Re_{2\delta}^{0,589} \cdot Pr_p^{0,33} \cdot (Gr_H \cdot Pr_p)^{0,1} \cdot \left(\frac{Pr_p}{Pr_{ст}} \right)^{0,25}, \quad Nu = \frac{\alpha_{експ}^6 \cdot 2\delta}{\lambda},$$

де визначальними прийнято два лінійних розміри: для вільної конвекції визначальною є висота вертикальної теплообмінної поверхні H , для вимушеної — 2δ , коефіцієнт детермінації при цьому дорівнює $R^2 = 0,86$. Дослідження теплообміну проводились для субстратів великої рогатої худоби (ВРХ) вологістю 92 %, 94 %, та свиней — вологістю 90 %, 94 % (рис. 4). В середньому діапазон динамічної в'язкості натурних сумішей та субстратів тваринного походження дорівнює 0,01...2,3 Па·с. Зважаючи на це, прийнято, що у разі вільної конвекції рух суміші вздовж вертикальної стінки ламінарний.

Відносна похибка визначення коефіцієнта тепловіддачі за умов вимушеного руху натурних сумішей в базовій експериментальній установці знаходиться в

межах 9,5...16,5 %.

У гної свиней наявні тверді волокнисті включення довжиною до 8 мм у вигляді неперетравленої соломи, гній ВРХ більш однорідний, тверді включення довжиною не більше 1,5...2 мм. Базовий експеримент за умов вільної конвекції проводився тільки для свіжого гною, а за умов вимушеної конвекції — як для свіжого так і для гною в стадії бродіння. Перед кожною серією дослідів, натурну суміш інтенсивно перемішували.

Тривалість базового експерименту з вільною конвекцією в середньому 35...40 хвилин. За цей час спостерігалось значне розшарування (осадження твердих частинок) гною свиней вологістю 90 %, незначне осадження — для гною свиней вологістю 94% та ВРХ вологістю 92 %. Середній температурний напір між грійною водою і натурною сумішшю для гною ВРХ змінювався в межах $\Delta t = 3...35^{\circ}\text{C}$; для гною свиней — $\Delta t = 3...30^{\circ}\text{C}$.

За результатами базового експерименту визначається коефіцієнт тепловіддачі

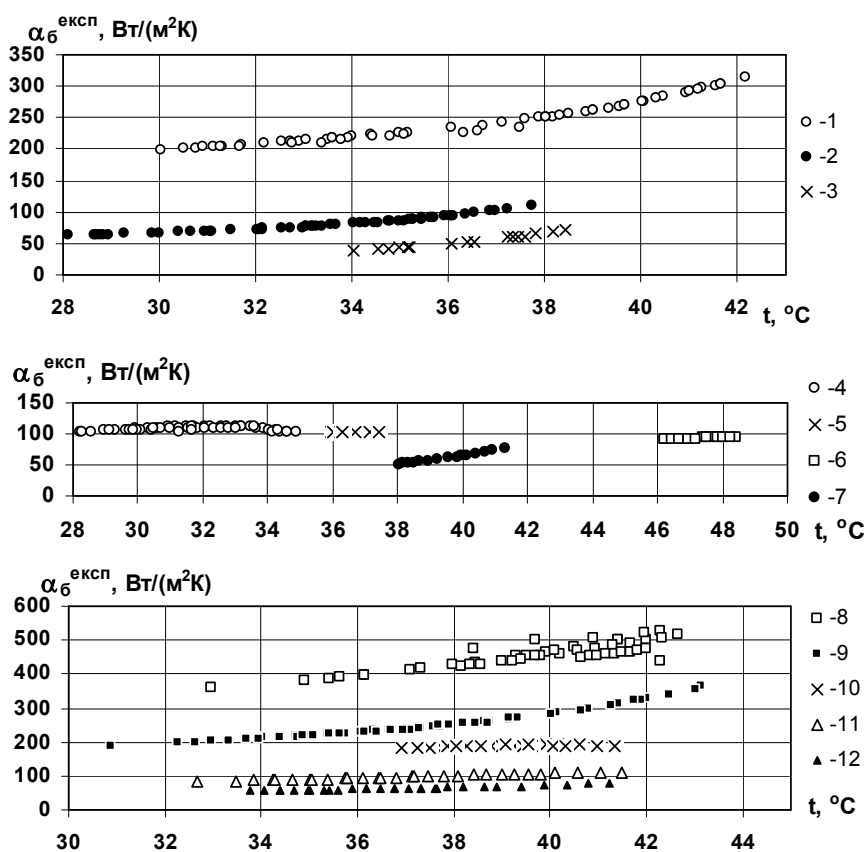


Рисунок 4 — Зміна $\alpha_{\text{експ}}^{\text{б}}$ за умови вимушеної конвекції гною

ВРХ вологістю 92 %, 94 % і свиней вологістю 90 %, 94 % з різною передісторією, в залежності від температури, характерна швидкість руху $\bar{w} = 0,2$ м/с: 1 — ВРХ, 92 %, зброджений, однократне нагрівання (ОН); 2 — ВРХ, 92 %, свіжий розведений, ОН; 3 — ВРХ, 92 %, зброджений, багатократне нагрівання (БН); 4 — ВРХ, 94 %, свіжий, ОН; 5, 6 — ВРХ, 94 %, свіжий, повторне нагрівання (ПН); 7 — ВРХ, 94 %, свіжий, БН; 8 — свині, 94 %, зброджений, ОН; 9 — свиней, 94 %, свіжий, ОН; 10 — свиней, 94%, зброджений, БН; 11 — свиней, 90% зброджений, ОН; 12 — свиней, 90%, зброджений, ПН.

до натурної суміші в базових умовах теплообміну $\alpha_{\text{експ}}^{\text{б}}$. За умов вільної конвекції визначено базові коефіцієнти тепловіддачі до натурної суміші: до гною свиней вологістю 94 % вищі в 2...2,4 рази ніж до гною свиней 90 %; до гною ВРХ вологістю 92 % і 94% приблизно мають однакові значення (свіжий гній).

Досліджено, що інтенсивність тепловіддачі в одній і тій же суміші залежить від її передісторії. Визначено коефіцієнти тепловіддачі за умови вимушеної конвекції до рідкого гною ВРХ вологістю 92 % з різною передісторією на базовому експериментальному стенді ЕРМ: коефіцієнти тепловіддачі до суміші для субстрату в стадії бродіння в 1,8...2,5 рази вищі ніж до свіжого після однок-

ратного нагрівання (рис.4). Також після багатократних нагрівань і охолоджень однієї і тієї ж суміші – коефіцієнти тепловіддачі зменшуються в 2...4 рази (рис. 4). Якісно аналогічні результати отримані і для гною ВРХ вологістю 94%, свиней, вологістю 90 %, 94 % (рис. 4). Тривалість проведення однієї серії дослідів базового експерименту, за умов вимушеної конвекції, 20...35 хвилин для свіжого розведеного гною, осадження твердих включень незначне; для забродженого тривалість серії дослідів до 15...20 хвилин, осадження не спостерігалось. Середній температурний напір між твердою стінкою і субстратом $\bar{\Delta t} = 3...23^\circ\text{C}$. Це пояснюється тим, що в процесі нагрівань і охолоджень змінюються структура суміші і в'язкість. Також в'язкість зменшується з виникненням процесів бродіння в суміші.

Отримавши експериментально значення $\alpha_{\text{експ}}^{\bar{\delta}}$ можна визначити коефіцієнти тепловіддачі $\alpha_{\text{НТОУ}}$ для заданих умов теплообміну в натурних теплообмінних установках (НТОУ) для різних умов теплообміну:

природна конвекція: біля вертикальної стінки, навколо круглої труби;

вимушена конвекція: рух в круглій трубі, в кільцевому каналі, вздовж плоскої поверхні, поперечне обтікання труби;

змішана конвекція: теплообмін при перемішуванні в посудині, в резервуарі.

Наприклад, для вимушеного руху в каналі, $\alpha_{\text{НТОУ}}$ можна визначити

$$\alpha_{\text{НТОУ}} = C \cdot g^{n_1} \cdot \underbrace{(\Pi_{\bar{\delta}-\text{н}} \cdot \text{ЕКФВ}_{\bar{\delta}}^{\text{експ}})}_{\text{ЕКФВ}_{\text{ЕРМн}}} \cdot w^{n_2} \cdot l^{n_3} \cdot \bar{\Delta t}^{n_4} (\Pi_{\text{нт}})^m,$$

де $\Pi_{\text{нт}} = (Pr_p/Pr_{\text{ст}})_\text{н}^{0,25}$ — поправка на напрям теплообміну, $n_1...n_4, m$ — показники степеня в залежності від режиму течії в теплопередавальному елементі; C — константа критеріального рівняння;

$$\alpha_{\text{НТОУ}} = C \cdot \underbrace{\left[\Pi_{\bar{\delta}-\text{н}} \cdot \frac{\alpha_{\bar{\delta}}^{\text{експ}}}{C_{\bar{\delta}} \cdot \underbrace{\Pi_{\text{нт.б}}}_{\text{ЕКФВ}_{\bar{\delta}}^{\text{експ}}}} \right]}_{\text{ЕКФВ}_{\text{ЕРМн}}} \cdot g^{n_1} \cdot w^{n_2} \cdot l^{n_3} \cdot \bar{\Delta t}^{n_4} \cdot \Pi_{\text{нт.н}} \left| \begin{array}{l} \rightarrow \left(\frac{Pr_p}{Pr_{\text{ст}}} \right)^{m_1} \\ \rightarrow \left(\frac{\mu_p}{\mu_{\text{ст}}} \right)^{m_2} \end{array} \right.,$$

де $\text{ЕКФВ}_{\text{ЕРМн}} = \text{ЕКФВ}_{\bar{\delta}}^{\text{експ}} \cdot \Pi_{\bar{\delta}-\text{н}} = f(\bar{t})$ — еквівалент комплексу фізичних властивостей в натурних умовах теплообміну;

$\alpha_{\text{експ}}^{\bar{\delta}}$ — коефіцієнт тепловіддачі в базових умовах теплообміну від твердої стінки до натурної суміші, яка нагрівається (охолоджується) в НТОУ;

$\text{ЕКФВ}_{\bar{\delta}}^{\text{експ}}$ — базовий еквівалент комплексу фізичних властивостей для реальної речовини (спеціалізований комплекс для конкретної натурної суміші), визначається за експериментальними значеннями $\alpha_{\text{експ}}^{\bar{\delta}}$ методом послідовних наближень

$$\text{ЕКФВ}_\delta^{\text{експ}} = \frac{\alpha_\delta^{\text{експ}}}{C \cdot \Pi_\delta \cdot (\text{Pr}_p / \text{Pr}_{\text{ст}})_\delta^{0,25}},$$

Π_δ — множник, який враховує визначальний геометричний параметр базової експериментальної установки та температурний напір; C_δ — константа базового критеріального рівняння ($C = 0,0549$ для базового експерименту при вимушеній конвекції; $C = 1,3$ — при вільній конвекції);

$\Pi_{\text{нт.}\delta}$ — поправка врахування впливу напряму теплообміну на базові коефіцієнти тепловіддачі, визначається методом послідовних наближень з введенням поняття «частково-модельної рідини» при отриманні характеристики $\text{ЕКФВ}_\delta^{\text{експ}} = f(\bar{t})$ на етапі обробки базового експерименту;

$\Pi_{\delta-\text{н}}$ — поправка переходу із базових в натурні умови теплообміну $\Pi_{\delta-\text{н}} = \text{КФВ}_{\text{ЕРМн}} / \text{КФВ}_\delta$;

$$\text{КФВ}_\delta = C_p^{k_1} \cdot \rho^{k_2} \cdot \beta^{k_3} \cdot \lambda^{k_4} \cdot \nu^{k_5} \quad (1)$$

виведено із структурованого критеріального рівняння для базових умов теплообміну в модельній рідині, $k_1 \dots k_5$ — показники степеня;

$$\text{КФВ}_{\text{ЕРМн}} = C_p^{a_1} \cdot \rho^{a_2} \cdot \beta^{a_3} \cdot \lambda^{a_4} \cdot \nu^{a_5} \quad (2)$$

виведено із структурованого критеріального рівняння для натурних умов теплообміну в модельній рідині, $a_1 \dots a_5$ — показники степеня; β — коефіцієнт температурного розширення, ν — кінематична в'язкість, ρ — густина, C_p — теплоємність, λ — теплопровідність рідини;

$\Pi_{\text{нт.н}}$ — поправка врахування впливу напряму теплопередачі на $\alpha_{\text{НТОУ}}$ в натурних умовах теплообміну, $\Pi_{\delta-\text{н}}$ та $\Pi_{\text{нт.н}}$ визначається із застосуванням ТФВ «модельної рідини».

Експериментальна характеристика $\text{ЕКФВ}_\delta^{\text{експ}} = f(\bar{t})$ відбиває вплив не тільки окремих теплофізичних параметрів суміші в НТОУ, але їх сукупності на інтенсивність теплообміну, що дозволяє більш обґрунтовано визначати фізичні зв'язки в досліджуваному процесі.

Необхідною умовою достовірності ЕРМ є $\text{ЕКФВ}_\delta^{\text{експ}} \approx \text{КФВ}_\delta$, де вираз КФВ_δ визначається згідно (1). Ця умова витримувалась під час уточнення критеріальних рівнянь за результатами тарувальних експериментів на базовому стенді.

В ЕРМ прийнято, що властивості складних реонестабільних натурних сумішей при певному теплообмінному процесі можна охарактеризувати за допомогою однорідної ньютонівської рідини, яка за своїми фізичними властивостями, за впливом на інтенсивність теплообміну еквівалентна конкретній складній суміші в конкретних умовах. Для цього в ЕРМ введено поняття «частково-модельна рідина» та «модельна рідина», які вибираються із переліку рідин і розчинів на водній основі, теплофізичні властивості яких достатньо вивчені.

Зміну ТФВ досліджуваної натурної суміші в динаміці зміни температур в теплообмінному процесі характеризує «частково-модельна рідина». Вона застосовується для визначення $(\text{Pr}_p / \text{Pr}_{\text{ст}})_\delta^{0,25}$ і отримання базових експериментальних характеристик $\text{ЕКФВ}_\delta^{\text{експ}} = f(\bar{t})$ і підбирається відповідно до умови:

$$\Phi_M = \frac{\partial [K\Phi B_6^{розр}]_M}{\partial t} - \frac{\partial [EK\Phi B_6^{експ}]_c}{\partial \bar{t}} \rightarrow \min,$$

при наявності розрахункової залежності для модельних рідин $[K\Phi B_6^{розр}]_M$ від температури t і концентрації b , $[K\Phi B_6^{розр}]_M = f(b, t)$.

За певної фіксованої температури еквівалентом реонестабільної суміші виступає «модельна рідина», яка застосовується для визначення поправки переходу із базових в натурні умови теплообміну ($\Pi_{б-н}$) та поправки на напрям теплообміну в натурних умовах $\Pi_{нт.н} = (Pr_p/Pr_{ст})^{0,25}$. Умови вибору «модельної рідини»

$$\Phi_c = [EK\Phi B_6^{експ}]_c - [K\Phi B_6^{розр}]_M \rightarrow \min, \quad \text{якщо } \bar{t}_c = t_M,$$

де $[EK\Phi B_6^{експ}]_c$ має значення, яке відповідає стану суміші зі зруйнованою структурою в такій мірі, що еквівалентом для неї може бути ньютонівська рідина. Для модельних рідин комплекс $[K\Phi B_6^{розр}]_M$ розраховується за рівнянням (1).

Визначити перехід тиксотропної натурної суміші до стану ньютонівської рідини можна дослідивши її характеристику $EK\Phi B_6^{експ} = f(n)$ при різних температурах (рис. 5). Для забродженого гною свиней вологістю 94 %, та ВРХ вологістю 92 % визначальний $EK\Phi B_6^{експ}$, який приймаємо для розрахунку натурних умов теплообміну, отримуємо якщо значення \bar{w} дорівнюють від 0,38 м/с і вище (рис. 5).

На величину та закономірність зміни характеристики $EK\Phi B_6^{експ} = f(\bar{t})$ впливає передісторія суміші (рис. 6), умови проведення експерименту, зокрема швидкість руху. Так, найвищі $EK\Phi B_6^{експ}$ мають місце для субстрату в стані бродіння після однократного нагрівання та охолодження (рис. 6). По мірі збільшення кількості нагрівань та охолоджень значення $EK\Phi B_6^{експ}$ зменшуються. Для свіжого субстрату $EK\Phi B_6^{експ}$ менші за $EK\Phi B_6^{експ}$ в стані бродіння (рис. 6). Це пояснюється тим, що в процесі бродіння в'язкість субстрату зменшується.

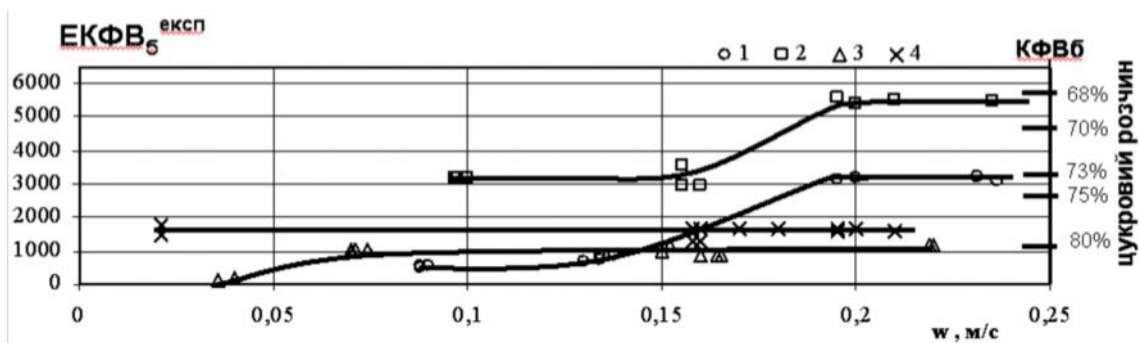


Рисунок 5 — До вибору «модельної рідини», $t = 35^\circ\text{C}$: 1 — гній ВРХ 92 %; 2 — гній свиней 94 %; 3 — гній свиней 90 %; 4 — гній ВРХ 94%

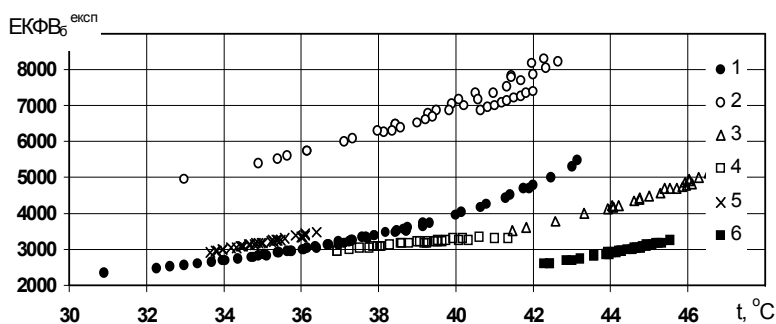


Рисунок 6 — Залежність $EKФВ_6^{експ}$ за умов вимушеного руху від температури для субстрату свиней вологістю 94 % з різною передісторією: 1, 2 — характерна швидкість руху суміші $\bar{w} = 0,19...0,22$ м/с; 3, 4 — $\bar{w} = 0,13...0,15$ м/с; 5, 6 — $\bar{w} = 0,09...0,1$ м/с; 1 — свіжий розведений ОН; 2 — зброджений ОН; 3, 4, 5 — зброджений ПН; 5, 6 — зброджений; БН; ОН, ПН, БН — див. рис. 4

ней в кільцевому каналі з еквівалентним діаметром $d_e = 0,05$ м, в'язкісно-гравітаційна течія, діапазон середніх швидкостей руху суміші $0,2...0,6$ м/с (рис. 7, 8). Температура суміші змінювалась в межах $\bar{t} = 30...42^\circ\text{C}$, середній температурний напір між твердою стінкою і сумішшю $\Delta t = 6...15^\circ\text{C}$.

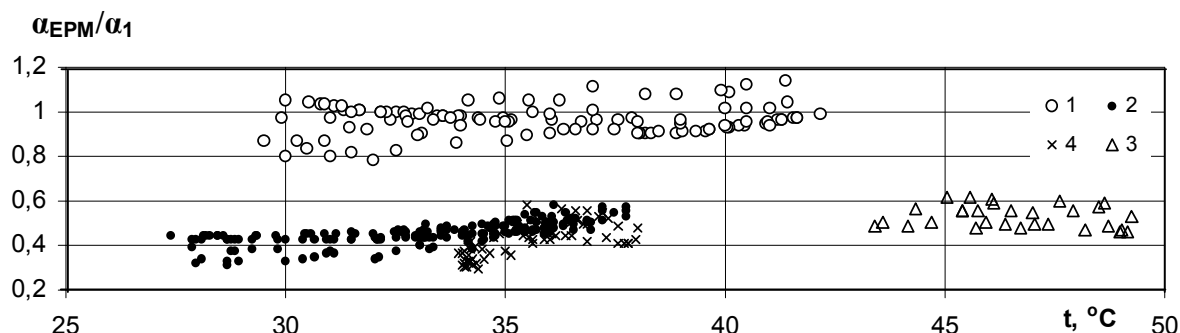


Рисунок 7 — Порівняння $\alpha_{НТОУ}$ ($\alpha_{ЕРМ}$) для відходів ВРХ вологістю 92 %: 1 — зброджений гній, $\bar{w} = 0,2$ м/с; 2 — свіжий розведений гній, $\bar{w} = 0,2$ м/с; 3 — зброджений гній після декількох нагрівань та охолоджень, $\bar{w} = 0,134$ м/с; 4 — зброджений гній після багатократних нагрівань та охолоджень, $\bar{w} = 0,08$ м/с; α_1 — визначений за експериментальною залежністю

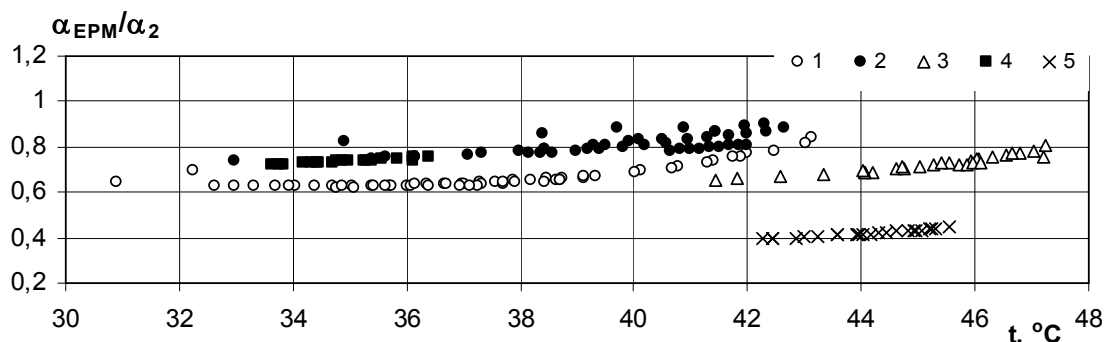


Рисунок 8 — Порівняння $\alpha_{НТОУ}$ ($\alpha_{ЕРМ}$) для відходів свиней вологістю 94 %: 1 — свіжий розведений гній, $\bar{w} = 0,2$ м/с; 2 — зброджений гній, $\bar{w} = 0,2$ м/с; 3 — зброджений гній після однократного нагрівання, $\bar{w} = 0,16$ м/с; 4 — зброджений гній після декількох нагрівань та охолоджень, $\bar{w} = 0,1$ м/с; 5 — зброджений після багатократних нагрівань та охолоджень, $\bar{w} = 0,1$ м/с; α_2 — визначений з використанням досліджених теплофізичних властивостей гною свиней

Проведені експерименти показали, що, досліджуючи інтенсивність тепловіддачі в реонестабільних рідинах, до яких відносяться субстрати, базовий експеримент потрібно проводити з моделюванням передісторії субстрату в певному діапазоні зміни характерної швидкості руху суміші.

З використанням удосконаленого ЕРМ, визначено $\alpha_{НТОУ}$ в натурних умовах теплообміну — при вимушеному русі гною ВРХ та свиней

На рис. 7 розрахункові значення α_1 отримані за емпіричною залежністю на основі експериментальних досліджень конвективної тепловіддачі за умов вимушеного руху рідкого гною ВРХ в кільцевому каналі (науково-виробниче об'єднання «Солнце» АН Туркменістану).

На рис. 8 розрахункові значення α_2 отримані за критеріальним рівнянням, що описує рух в кільцевому каналі з використанням результатів досліджень теплофізичних властивостей рідкого субстрату свиней (Естонський науково-дослідний інститут тваринництва та ветеринарії ім. А. Мельдера).

Для гною ВРХ вологістю 92 %, витриманого в анаеробних умовах протягом шести діб після однократного нагрівання, розбіжність визначених за ЕРМ $\alpha_{\text{НТОУ}}$ із визначеними експериментально іншими авторами α_1 (науково-виробниче об'єднання «Солнце» АН Туркменістану) становить – до 20 % (рис. 7, позиція 1), середньоквадратичне відхилення співвідношення $\alpha_{\text{ЕРМ}}/\alpha_1$ від одиниці дорівнює 7,5...11 %. Для гною свиней (Естонський науково-дослідний інститут тваринництва та ветеринарії ім. А. Мельдера) (рис. 8, позиція 2) ця розбіжність – до 30 %, середньоквадратичне відхилення $\alpha_{\text{ЕРМ}}/\alpha_2$ від одиниці дорівнює 16...18 %.

Для визначення $\alpha_{\text{НТОУ}}$ (рис. 7, позиція 1; рис. 8, позиція 2), до уваги бралися характеристики $\text{ЕКФВ}_6^{\text{експ}} = f(\bar{t})$, для яких характерна швидкість натурної суміші в базових експериментах дорівнює $\bar{w} = 0,2$ м/с, коли тиксотропна суміш виявляє ньютонівський характер руху (рис. 5).

Зіставлення експериментальних значень (числовий експеримент) коефіцієнта тепловіддачі $\alpha_{\text{експ}}$, та отриманих за удосконаленням ЕРМ $\alpha_{\text{ЕРМ}}$ при ламінарній течії, в'язісно-гравітаційному режимі, в кільцевому каналі $d_{\text{екв}} = 50$ мм субстрату курячого посліду $t = 30...50^\circ\text{C}$, з концентрацією $b = 6...14$ % показало, що відхилення $\alpha_{\text{експ}}$ і $\alpha_{\text{ЕРМ}}$ знаходиться в межах $\pm 8...10$ % [1].

Таким чином, проведено за умов вимушеної конвекції експериментальне дослідження процесу теплообміну в тиксотропних сумішах на базовому експериментальному стенді з циліндричною теплообмінною поверхнею діаметром 0,097 м, висотою 0,108 м для свіжого рідкого гною і забродженого гною (субстрату) свиней, вологістю 94%, та великої рогатої худоби, вологістю 92 %. Визначено тенденцію зміни коефіцієнта тепловіддачі до рідкого гною тваринного походження від передісторії — для рідкого забродженого гною коефіцієнти тепловіддачі в 1,5...2,8 рази вищі, ніж для свіжого.

Виконано перевірку достовірності удосконаленого ЕРМ. Для цього прийнято гліцерин дистиллят, ТФВ якого відомі, як рідину з обмеженою інформацією по ТФВ. Коефіцієнт тепловіддачі визначено (для таких умов теплообміну – вільна конвекція у «великому» об'ємі біля горизонтальної труби $d = 50$ мм, турбулентний рух гліцерину дистилляту $c = 100\%$; $t = 20...80^\circ\text{C}$) двома методами: з використанням ЕРМ — $\alpha_{\text{ЕРМ}}$, та традиційним, із застосуванням критеріальних рівнянь, як для рідини з відомими ТФВ — $\alpha_{\text{розр}}$. При визначенні $\alpha_{\text{ЕРМ}}$ $v_0(t_0)$ прийнято за таблицями ТФВ гліцерину. Розбіжність результатів співставлення коефіцієнтів $\alpha_{\text{розр}}$ і $\alpha_{\text{ЕРМ}}$ не перевищує ± 15 % [10].

Отже, на вдосконалених базових установках в системі ЕРМ є можливість багатоваріантного дослідження реонестабільних тиксотропних сумішей. Удосконале-

ний ЕРМ дозволяє оцінювати величину коефіцієнтів тепловіддачі до реонестабільних тиксотропних сумішей в різних їх станах, для умов теплообміну, які мають місце в теплообмінному обладнанні різного призначення в системі БГУ.

В четвертому розділі наведено практичне застосування удосконаленого ЕРМ. Метод ЕРМ застосовується для тих умов теплообміну та режимів руху теплоносіїв, які надійно описані в критеріальній формі для ньютонівських рідин.

Схема застосування ЕРМ в проектних і перевірних розрахунках теплообмінного обладнання БГУ (рис. 9) здійснюється наступним чином [3, 9, 10]. Формуються початкові дані для теплового розрахунку натурних теплообмінних установок (НТОУ) в залежності від виду розрахунку – проектний чи перевірний; умови однозначності (геометричні, витратні параметри, характерні температури, тиски). В залежності від виду конвекції в НТОУ вибираються базові експериментальні установки в ЕРМ: якщо природна конвекція — У1, вимушена — У2 (рис. 9). Проводиться багатоваріантне дослідження теплообміну зі зразком натурної суміші на базовому експериментальній стенді [6, 14, 17]. На основі одержаних базових коефіцієнтів тепловіддачі та з використанням бази даних по ТФВ «модельних рідин» ТФВ_м і баз даних по критеріальним рівнянням КрР (рис. 9) формуємо уявлення про умови теплообміну в НТОУ.



Рисунок 9 – Схема застосування експериментально-розрахункового методу в проектних і перевірних розрахунках теплообмінних елементів СПОВ

Застосовуючи методи теорії подібності і бази даних по теплофізичним властивостям потенційно «модельних рідин» отримуємо оцінювальне значення коефіцієнтів тепловіддачі в НТОУ $\alpha_{\text{НТОУ}}$. Далі виконується стандартний алгоритм розрахунку НТОУ.

Аналізуючи експерименти, одержані на базовому експериментальному стенді можна виявити зміни реологічних властивостей в суміші в залежності від теплогідродинамічної ситуації в ній, виявити руйнування структури, області, в яких неньютонівська рідина поводить себе як ньютонівська.

Схема СПОВ включає теплообмінники для попереднього підігрівання суміші перед подачею у реактор, для термостабілізації реактора, для утилізації теплоти відпрацьованого субстрату. В них як нагрівним так і грійним теплоносієм можуть бути вода, відходи тваринництва, суміш із компонентів різного походження, субстрат. Для кожного із теплообмінників існують обмеження по термічним параметрам. В теплообміннику попереднього підігріву суміш необхідно нагріти до номінальної температури в реакторі, але при цьому температура стінки теплообмінника не повинна перевищувати 60°C

$$(T_p - 1,5)^{\circ}\text{C} \leq T_1 \leq (T_p + 1,5)^{\circ}\text{C}; \quad t_{\text{ст}}^{\text{ТО}} < 60^{\circ}\text{C}.$$

Біотехнологічна стабільність в реакторі забезпечується, якщо відхилення середньої температури в реакторі ΔT , температури внутрішньої стінки реактора $t_{\text{ст}}^{\text{ВН}}$ та температура стінки теплообмінника $t_{\text{ст}}^{\text{ТО}}$ буде змінюватись в межах $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$ [4]. Тобто необхідне одночасне дотримання таких умов

$$\Delta T = \pm 1,5^{\circ}\text{C}; \quad \Delta t_{\text{ст}}^{\text{ВН}} = \pm 1,5^{\circ}\text{C}, \quad \Delta t_{\text{ст}}^{\text{ТО}} = \pm 1,5^{\circ}\text{C}.$$

Для утилізації теплоти ефективним буде робота теплообмінника, якщо $\Delta t_{\text{нед}} \rightarrow \min$, $\Delta t_{\text{нед}} = T'_2 - t''_в$, де T'_2 — температура субстрату на вході в теплоутилізатор, $t''_в$ — температура води на виході із теплоутилізатора.

В таблиці 1 наведені результати досліджень теплотехнологічних підсистем і елементів систем переробки органічних відходів, практична реалізація результатів досліджень.

З використанням ЕРМ визначено обмін матеріальними і тепловими потоками між системою БГУ і зовнішніми системами, внутрішні потоки суміші і проаналізовано функцію ψ^* , яка характеризує частку біогазу на власні потреби. Виявлено суттєвий вплив степені утилізації теплоти відпрацьованого субстрату на вихід товарного біогазу. Утилізація теплоти субстрату і біогазу призводить до зменшення техногенного навантаження системи в 1,8...2,5 рази, а економія коштів при цьому складає 500...1000 тис. грн.

Виконано теплові розрахунки пластинчастого теплообмінника для підігріву реакційної суміші і термостабілізації реактора переетерифікації, визначено параметри елементів теплообміну, теплоізоляції за умови, що ТФВ суміші невідомі.

Запропонований спосіб переробки відходів спиртового виробництва сприяє розв'язку екологічної проблеми спиртових підприємств за рахунок повної утилізації розчинних і нерозчинних компонентів, що містяться в післяспиртовій барді. У випадку анаеробної переробки післяспиртової барди, на відміну від традиційних методів, є можливість отримання додаткового прибутку від збуту добрих

(84...520 т/добу), частину природного газу (1000...6600 м³/добу) замінити біогазом або біопаливом.

Таблиця 1

Підрозділ, пункт	Практичне застосування одержаних результатів. Розв'язання практичної задачі
Методика розрахунку елементів СПОВ. Математичні моделі теплообмінних процесів в елементах СПОВ	
4.2.1 Теплообмінник, теплоізоляція, джерела теплової енергії для термостабілізації біореактора біогазової установки	Отримано технологічні основи роботи реактора БГУ. Запропоновано методику раціоналізації параметрів системи термостабілізації реактора БГУ — результати числових досліджень, проведених за даною методикою можуть бути вихідними даними для проектування БГУ і для розробки принципів забезпечення стабільності роботи реакторів БГУ [1, 4, 6, 10, 14].
4.2.2 Теплообмінник, теплоізоляція, джерела теплової енергії для теплотехнологічної системи вироблення біопалива	Застосовано удосконалений ЕРМ для розрахунку теплообмінного обладнання. Використовуючи ЕРМ, ТФВ «модельних рідин» виконано тепловий розрахунок теплообмінника [9, 12].
Апробація запропонованої функції якості СПОВ ТН життєвого циклу системи	
4.2.3 Утилізація теплоти в системі біогазової установки, техногенне навантаження	Виконано розрахунок теплових і матеріальних потоків теплової схеми БГУ. Проаналізовано можливість зменшення металомісткості та матеріаломісткості реактора БГУ. Виконано дослідження ефективності утилізації теплоти відпрацьованого субстрату та доцільності утилізації теплоти отриманого біогазу. Визначено величину ТН ЖЦ із різним ступенем утилізації теплоти відпрацьованого субстрату [2, 3, 7, 8].
Методичні основи синтезу енерго- еколого- ефективних СПОВ	
4.2.4 Диверсифікація енергоносіїв в енерготехнологічній системі спиртового заводу	Виконано аналіз можливих варіантів диверсифікації енергоносіїв в енерготехнологічній системі спиртового заводу [11]

Вищезазначені фрагменти (табл. 1) у їх поєднанні створюють загальну систему синтезу СПОВ і дозволяють розробити початкові дані оцінювання функцій якості, техніко-економічних, ексергетичних показників, виконати термодинамічний аналіз.

ВИСНОВКИ

1. В результаті аналізу інформації встановлено, що економічна, енергетична і екологічна ефективність біогазових установок визначається біотехнологічними процесами, ефективність яких у великій мірі залежить від теплогідродинамічних процесів, які здійснюються на різних етапах переробки органічних відходів.

2. Набула подальшого розвитку методика математичного моделювання системи виробництва енергоносіїв із органічних відходів завдяки застосуванню удосконаленого експериментально-розрахункового метода і введенню техногенного навантаження в перелік функцій якості, що дозволило врахувати економічну, енергетичну та екологічну складові.

3. Сформовано гіпотезу оцінки інтенсивності теплообміну в реонестабільних ньютонівських рідинах, яка дозволяє за певних умов теплообмінні процеси в ньютонівських реонестабільних тиксотропних сумішах описати критеріальними рівняннями для ньютонівських рідин і використати традиційні безрозмірні критерії, без введення реологічних параметрів n і k та без поправки на реологію за Кутателадзе; будуючи алгоритм функціонування ЕРМ використати той факт,

що складна тиксотропна суміш може мати декілька «модельних рідин» в залежності від ступеня зруйнованості структури; трактувати, що «модельна рідина», «частково-модельна рідина» – це однорідна ньютонівська рідина, яка за своїми фізичними властивостями та впливом на інтенсивність теплообміну еквівалентна складній суміші. Гіпотезу підтверджено експериментально та теоретично, і доведено розробки на основі цієї гіпотези до рівня інженерних розрахунків.

5. Удосконалено базовий експериментальний стенд ЕРМ: додатково розроблена експериментальна установка для дослідження інтенсивності теплообміну в умовах вимушеного руху; розроблена та реалізована система одночасної фіксації температури в десяти точках із виводом результатів на ЕОМ. Це дозволило мінімізувати динамічну похибку вимірювання температурного поля, встановити, що процес теплообміну в елементах портативної установки для проведення базового експерименту відповідає умовам теплообміну у «великому об'ємі» за умови вільної конвекції, незважаючи на відносно невеликі геометричні розміри установок.

6. Проведення тарувальних досліджень на розроблених портативних установках експериментального стенду в умовах теплогідродинамічної нестабільності дозволило уточнити критеріальні рівняння для опису закономірностей теплообміну в елементах установок з вільною конвекцією, структура яких відповідає відомим критеріальним залежностям розрахунку теплообміну у «великому об'ємі» ($q_c = \text{const}$). Отримано критеріальне рівняння, яким можна описати теплообмін при перемішуванні рідини у внутрішній порожнині установки, з урахуванням вимушеної і вільної конвекції.

Це дає можливість: багатоваріантного дослідження інтенсивності теплообміну в реонестабільних тиксотропних сумішах в залежності від передісторії; оцінювати наявність реонестабільності в суміші та умови руйнування реологічної структури суміші; умови існування реонестабільної суміші, коли їй притаманні фізичні властивості ньютонівської рідини. Останнє реалізується за допомогою характеристики $EKFV_6^{\text{експ}} = f(\bar{t}, n)$, яка відображає теплофізичні властивості тиксотропної суміші за різних теплогідродинамічних умов.

7. Вперше проведено експерименти, які дозволили встановити залежність інтенсивності теплообміну від передісторії суміші. В результаті чого визначено, що коефіцієнти тепловіддачі при вимушеній конвекції $\alpha_{\text{експ}}^b$ до рідкого гною великої рогатої худоби в стані бродіння вологістю 92 %, 94 % та свиней вологістю 90 %, 94 % вищі в 1,5...2,8 рази, ніж до свіжого після однократного нагрівання; після багатократних нагрівань і охолоджень одного і того ж гною — коефіцієнти тепловіддачі зменшуються в 2...4 рази.

Вперше запропоновано і науково обґрунтовано методи вибору «модельної» та «частково-модельної рідини», що дозволяє, використовуючи відомі критеріальні залежності для ньютонівських рідин, визначати коефіцієнти теплообміну в натурних об'єктах БГУ. Експериментально підтверджено можливість застосування цього методу на прикладі характерних представників тиксотропних реонестабільних рідин — рідкого гною великої рогатої худоби, свиней.

Достовірність ЕРМ підтверджується зіставленням коефіцієнтів тепловіддачі в натурній теплообмінній установці, визначених з використанням експериментів на

портативному стенді за удосконаленим експериментально-розрахунковим методом, з експериментальними результатами, отриманими на традиційних експериментальних стендах (науково-виробниче об'єднання «Солнце» АН Туркменістану, 1989 р.; та Естонський науково-дослідний інститут тваринництва та ветеринарії ім. А. Мельдера, 1990 р.), при цьому розбіжність становить до 20...30 %, що дозволяє застосовувати ЕРМ в математичних моделях натурних об'єктів.

8. Удосконалено методичні основи математичного моделювання СПОВ БГУ за рахунок: визначення функції якості БГУ; складання коректних балансових рівнянь для елементів БГУ; створення комплексного методу визначення інтенсивності теплообміну. Це дозволило отримати такі результати і зробити висновки:

– із застосуванням теплоутилізації відпрацьованого субстрату в БГУ частка біогазу на власні потреби зменшується з 50 % до 10 % – в залежності від температури навколишнього середовища;

– зі збільшенням ступеня теплоутилізації відпрацьованої суміші і біогазу відбувається зменшення техногенного навантаження в 1,8...2,5 рази, а економія коштів складає 500...1000 тис. грн. (в залежності від періоду року), порівняно з варіантом без теплоутилізації;

– виконано теплові розрахунки пластинчастого теплообмінника для нагрівання і термостабілізації реакційної суміші в реакторі переетерифікації для вироблення біопалива. Встановлено, що теплова потужність пластинчастого теплообмінника змінюється в 4,25 рази за час нагрівання, ця інформація необхідна для обґрунтованого вибору джерел тепlopостачання.

Результати роботи впроваджено на підприємствах: ПП «Немирівський спиртовий завод», м. Немирів, ТЗОВ «Завод газового обладнання «Альфа-Газпромкомплект», м. Тернопіль, в навчальний процес на кафедрі теплоенергетики Вінницького національного технічного університету.

ПУБЛІКАЦІ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Ткаченко С. Й. Удосконалення експериментально-розрахункового методу / Ткаченко С. Й., Пішеніна Н. В., Резидент Н. В. // Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика : наук. зб. — 2010. — № 2. — С. 171—183. — ISSN 2077-1134.
2. Ткаченко С. Й. Аналіз факторів зниження матеріаломісткості та підвищення енергоефективності біогазової установки / С. Й. Ткаченко, Н. В. Пішеніна, Т. Ю. Румянцева // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2010. — № 6. — С. 36—42. — ISSN 1997-9266.
3. Ткаченко С. Й. Наземні біогазові установки / С. Й. Ткаченко, Н. В. Пішеніна, Т. Ю. Румянцева // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. Науково-технічний збірник. — Вінниця : Універсум-Вінниця, 2010. — № 2. — С. 147—152.
4. Ткаченко С. Й. Термічна і біотехнологічна нестабільність в реакторі анаеробної переробки відходів / С. Й. Ткаченко, В. І. Риндюк, Н. В. Пішеніна, С. В. Риндюк, С. В. Дишлюк // Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. — 2011. — № 7. — С. 131—137.
5. Ткаченко С. Й. Синтез природо- і енергозбережних систем вироблення енергоносіїв із органічних відходів / С. Й. Ткаченко, Д. В. Степанов, Н. В. Пішені-

- на, А. О. Юзюк, С. В. Дишлюк // Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. — 2011. — № 7. — С. 123—130.
6. Пішеніна Н. В. Теплообмін в складних сумішах в умовах природної конвекції / Н. В. Пішеніна // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. Науково-технічний збірник. — Вінниця : Універсум–Вінниця, 2011. — № 2. — С. 124—131.
 7. Степанов Д. В. Утилізація теплоти в схемі системи переробки органічних відходів / Д. В. Степанов, Л. А. Боднар, Н. В. Пішеніна // Енергетика та електрифікація. — 2011. — № 4. — С. 68—71. — ISSN: 0424-9879.
 8. Ткаченко С. Й. Математичне моделювання робочих процесів в біогазовій установці / С. Й. Ткаченко, Н. В. Пішеніна // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2011. — № 3. — С. 41—47. — ISSN 1997-9266.
 9. Пішеніна Н. В. Проблеми тепломасообміну в процесі виробництва відновлювального пального / Н. В. Пішеніна, С. В. Дишлюк., С. В. Пелішенко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2011. — № 4. — С. 90—93. — ISSN 1997-9266.
 10. Ткаченко С. Й. Застосування поняття «модельна рідина» в експериментально-розрахунковому методі // С. Й. Ткаченко, Н. В. Пішеніна // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2012. — № 3. — С. 103—110. — ISSN 1997-9266.
 11. Пішеніна Н. В. Диверсифікація енергоносіїв в енерготехнологічній схемі спиртового заводу / Н. В. Пішеніна // Еколого-енергетичні проблеми сучасності. 21 — 22 квітня, 2011 р. : зб. тез доп. XI Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих учених та студентів. — Одеса, 2011. — С. 141—143.
 12. Пішеніна Н. В. Енергозабезпечення теплотехнологічної системи вироблення біопалива / Н. В. Пішеніна, С. В. Дишлюк. С. В. Пелішенко // Сучасні екологічно безпечні та енергозберігаючі технології в природокористуванні : Міжнар. наук.-практ. конфер. молодих вчених і студентів. 26 — 28 квітня 2011 р. : збір. тез доп. — Київ, 2011. — Ч. 1. — С. 121—124.
 13. Патент України на корисну модель № 15905, (51) МПК (2006.01) C02F11/04. Установа для отримання біогазу / Ткаченко С. Й., Резидент Н. В., Пішеніна Н. В., Гуменюк М. С; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет. — № 200601131; заявл. 06.02.2006; опубл. 17.07.2006, Бюл. № 7.
 14. Ткаченко С. Й. Метод визначення інтенсивності теплообміну в реонестабільних сумішах / С. Й. Ткаченко, Н. В. Пішеніна // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. Науково-технічний збірник. — Вінниця : Універсум–Вінниця, 2012. — № 2. — С. 78—87.
 15. Патент України на корисну модель № 41855, (51) МПК (2009) C02F 11/00, C02F 11/04 (2006.01). Установа для отримання біогазу / Ткаченко С. Й., Резидент Н. В., Пішеніна Н. В.; заявник та патентовласник Вінницький нац. техн. університет. — № u200900482; заявл. 23.01.2009; Опубл. 10.06.2009, Бюл. № 11.
 16. Патент України на корисну модель № 46807, (51) МПК (2009) C02F11/04. Установа для отримання біогазу / Ткаченко С. Й., Резидент Н. В., Степанова Н. Д., Пішеніна Н. В.; заявник та патентовласник Вінницький нац. техн. університет. — № u200906401; заявл. 19.06.2009; Опубл. 11.01.2010, Бюл. № 1.

17. Патент України на винахід № 97021, (51) МПК (2006.01) G01N 25/18. Спосіб визначення коефіцієнта тепловіддачі за умов конвективного теплообміну органічної суміші / Ткаченко С. Й., Пішеніна Н. В., Резидент Н. В.; заявник і власник патенту Вінницький національний технічний університет. — № а201005661; заявл. 11.05.2010; опубл. 26.05.2011, Бюл. № 2.

АНОТАЦІЯ

Пішеніна Н. В. Удосконалення методу визначення інтенсивності теплообміну в енергоефективних системах переробки органічних відходів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика – Національний університет харчових технологій, Київ, 2013.

Удосконалено методику математичного моделювання системи виробництва енергоносіїв із органічних відходів завдяки застосуванню експериментально-розрахункового методу і введенню техногенного навантаження в перелік функцій якості, що дозволило врахувати економічну, енергетичну і екологічну складові.

Запропоновано, експериментально і теоретично обґрунтовано експериментально-розрахунковий метод (ЕРМ) оцінки інтенсивності теплообміну в реонестабільних сумішах. Удосконалено експериментальну базу ЕРМ і математичну модель визначення інтенсивності теплообміну в базовій експериментальній установці з урахуванням особливостей поведінки неньютонівських рідин в різних теплогідродинамічних умовах. Проведено експериментальне дослідження інтенсивності теплообміну неньютонівських сумішей в посудині з розмірами, (згідно з існуючими уявленнями про теплообмін) на межі «великий об'єм»—«обмежений об'єм» в умовах теплогідродинамічної нестабільності.

Запропоновано, досліджено і рекомендовано метод визначення інтенсивності теплообміну в натурних умовах в СПОВ для випадку, коли теплофізичні властивості суміші невідомі і змінюються в залежності від її передісторії.

Виконано дослідження конкретних теплотехнологічних систем виробництва енергоносіїв із органічних відходів. Обґрунтовано можливості зменшення техногенного навантаження на навколишнє середовище системами переробки органічних відходів (СПОВ), заміщення природного газу виробленим біогазом, отримання високоякісних добрив.

Ключові слова: математична модель, теплообмін, органічні відходи, біогазова установка, неньютонівська суміш, реонестабільна суміш, експериментально-розрахунковий метод, модельна рідина, органічні відходи, субстрат.

АННОТАЦИЯ

Пишенина Н. В. Усовершенствование метода определения интенсивности теплообмена в энергоэффективных системах переработки органических отходов. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.14.06 – Техническая теплофизика и промышленная теплоэнергетика – Национальный университет пищевых технологий, Киев, 2013.

Усовершенствована методика математического моделирования системы выработки энергоносителей из органических отходов благодаря применению экспериментально-расчетного метода и введению техногенной нагрузки в перечень функций качества, что позволило учесть экономическую, энергетическую и экологическую составляющие.

Предложена гипотеза оценки интенсивности теплообмена в реонестабильных неньютоновских жидкостях. Суть гипотезы:

- при определенных условиях теплообменные процессы в неньютоновских реонестабильных тиксотропных смесях можно описать критериальными уравнениями для ньютоновских жидкостей и использовать традиционные безразмерные критерии, без введения реологических параметров n и k и без поправки на реологию;

- сложная тиксотропная смесь может иметь несколько «модельных жидкостей» в зависимости от степени разрушения структуры;

- принято, что «модельная жидкость» – это однородная ньютоновская жидкость, которая по своим физическим свойствам, по влиянию на интенсивность теплообмена эквивалентна сложной смеси. Гипотеза подтверждена экспериментально и теоретически и обосновано, что разработки на основе этой гипотезы готовы к использованию в инженерных расчетах.

На основе гипотезы предложен, экспериментально и теоретически обоснован экспериментально-расчетный метод (ЭРМ) оценки интенсивности теплообмена в реонестабильных смесях. Усовершенствована экспериментальная база ЭРМ и математическая модель определения интенсивности теплообмена в базовой экспериментальной установке с учетом особенностей поведения неньютоновских жидкостей в различных теплогидродинамических условиях. Проведено экспериментальное исследование интенсивности теплообмена неньютоновских смесей в сосуде с объемом и соотношениями между его геометрическими размерами, (согласно существующим представлениям о теплообмене), на границе «большой объем»—«ограниченный объем» в условиях теплогидродинамической неустойчивости.

Предложен, исследован и рекомендован метод определения интенсивности теплообмена в натуральных условиях в СПОВ для случая, когда теплофизические свойства смеси неизвестны и меняются в зависимости от ее предистории.

Экспериментально подтверждена возможность применения данного метода для исследования интенсивности теплообмена на примере характерных представителей тиксотропных реонестабильных жидкостей – жидкого навоза крупного рогатого скота, свиней. Проведены эксперименты, позволившие установить зависимость интенсивности теплообмена от предистории смеси.

Выполнены исследования конкретных элементов и подсистем теплотехнологических систем выработки энергоносителей и высококачественных удобрений из органических отходов. Обоснованы возможности уменьшения техногенной нагрузки на окружающую среду систем переработки органических отходов (СПОВ) и замещение природного газа полученным биогазом.

Ключевые слова: математическая модель, теплообмен, органические отходы, биогазовая установка, неньютоновская смесь, реонестабильная смесь,

експериментально-расчетный метод, модельная жидкость, органические отходы, субстрат.

ABSTRACT

Pishenina N.V. Improvement of the method of determining the intensity of heat exchange in energy-efficient systems for recycling organic waste. - Manuscript.

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.14.06 - Technical thermal physics and industrial combined heat and power – National University of Food Technologies, Kyiv, 2013.

A possibility of reducing the anthropogenic impact on the recycling by systems for organic waste (RSOW), substitution of natural gas to biogas, producing high quality fertilizer. Improved mathematical model RSOW, for example, of a biogas plant, concepts like technogenic load and reduction of anthropogenic impact on the environment were put into quality criteria.

The experimental calculated method (ECM) assessment of the intensity of heat transfer in rheologically unstable mixtures has been proposed and experimentally and theoretically substantiated. The experimental base ECM and mathematical model for determining the heat transfer in the basic experimental installation has been improved taking into account the behavior of non-Newtonian fluids in various thermal and hydraulic conditions.

The experimental study of the heat transfer of non-Newtonian mixture has been made in a container with the dimensions (according to existing ideas of heat exchange) on the edge of "large volume" - "limited volume" in the conditions of thermal instability. The method of determining the heat exchange under natural conditions in RSOW has been proposed, researched and recommended for the case when the thermophysical properties of the mixture are unknown and changing depending on its past history.

The researches have been done of specific heat and technological systems of production energy carriers from organic waste.

Keywords: mathematical model, heat, organic waste, biogas plant, non-Newtonian mixture, experimental calculated method, the system of organic waste, rheologically unstable mixtures.

Підписано до друку 10.04.2013 р. Формат 29,7×42 ¼

Наклад 120 прим. Зам. №2013-082

Віддруковано в комп'ютерному інформаційно – видавничому центрі

Вінницького національного технічного університету
м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95 Тел.: 59-81-59