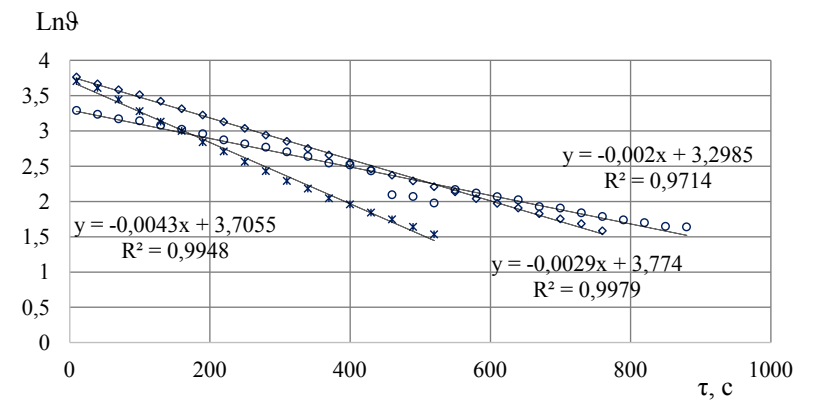


С. Й. Ткаченко, О. В. Власенко

БЮГАЗОВІ ТЕХНОЛОГІЇ. РЕГУЛЯРНИЙ ТЕПЛОВИЙ РЕЖИМ



Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

С. Й. Ткаченко, О. В. Власенко

**БІОГАЗОВІ ТЕХНОЛОГІЇ.
РЕГУЛЯРНИЙ ТЕПЛОВИЙ РЕЖИМ**

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2023

УДК 536.24:620.92

Т 48

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 13 від 25.05.2023 р.).

Рецензенти:

О. Ю. Черноусенко, доктор технічних наук, професор

А. П. Поляков, доктор технічних наук, професор

Ткаченко, С. Й.

Т 48 Біогазові технології. Регулярний тепловий режим : монографія / С. Й. Ткаченко, О. В. Власенко. – Вінниця : ВНТУ, 2023. – 132 с.

ISBN 978-966-641-943-2

В монографії розглянуто методи прогнозування інтенсивності теплообміну в багатофазних та багатокомпонентних середовищах з обмеженою інформацією по теплофізичним властивостям. Встановлено існування регулярного теплового режиму за умов охолодження (нагрівання) системи «рідина-тверде тіло» в тонкій металевій циліндричній оболонці. Вдосконалено обробку експериментальних результатів і їх узагальнення сумісним використанням теорії подібності і методів регулярного теплового режиму.

При прийнятті рішень по прогнозуванню інтенсивності теплообміну з рідинами з невідомими теплофізичними властивостями використовується теорія регулярного теплового режиму, теорія подібності та експериментальні результати досліджень на експериментальному стенді.

УДК 536.24:620.92

ISBN 978-966-641-943-2

© С. Ткаченко, О. Власенко, 2023

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ	5
ВСТУП.....	7
1 БАГАТОФАЗНІ ТА БАГАТОКОМПОНЕНТНІ СЕРЕДОВИЩА.....	10
1.1 Аналіз біогазових технологій	10
1.2 Використання експериментально-розрахункового методу	12
1.3 Огляд багатофазних середовищ	15
1.4 Проблеми визначення інтенсивності теплообміну в багатофазних середовищах	24
2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РОЗРАХУНКОВИЙ МЕТОД ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ІНТЕНСИВНОСТІ ТЕПЛООБМІНУ	28
2.1 Експериментальна установка	30
2.2 Методика проведення експериментів	32
2.3 Визначення похибок розрахунків	38
3 РЕГУЛЯРНИЙ ТЕПЛОВИЙ РЕЖИМ В ТВЕРДОМУ ТІЛІ.....	40
3.1 Нестационарна теплопровідність	40
3.2 Регулярний тепловий режим	43
4 РЕГУЛЯРНИЙ ТЕПЛОВИЙ РЕЖИМ В СИСТЕМІ «РІДИНА-ТВЕРДЕ ТІЛО».....	48
4.1 Регулярний тепловий режим за умов дослідження однофазного середовища. Вільна конвекція	48
4.2 Регулярний тепловий режим за умов дослідження однофазного середовища. Вимушена конвекція.....	57
4.3 Регулярний тепловий режим за умов дослідження двофазного середовища ..	60
4.4 Регулярний тепловий режим за умов дослідження багатофазного середовища	66
4.5 Регулярний тепловий режим за умов дослідження гетерогенного рідкого середовища	69
5 ІНТЕНСИВНІСТЬ ТЕПЛООБМІНУ МЕТОДОМ РЕГУЛЯРНОГО ТЕПЛОВОГО РЕЖИМУ	76
5.1 Коефіцієнт тепловіддачі рідинного середовища за умов вільної конвекції ...	76
5.2 Коефіцієнт тепловіддачі рідинного середовища за умов вимушеної конвекції	80
5.3 Дослідження теплообміну рідинного середовища	81
5.4 Визначення еквівалентної теплопровідності	84
5.5 Дослідження нестационарного теплообміну в біогазових сумішах	89
5.6 Переваги використання методу регулярного теплового режиму	95

6 ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ РЕГУЛЯРНОГО ТЕПЛОВОГО РЕЖИМУ В БЮГАЗОВОМУ ВИРОБНИЦТВІ.....	101
6.1 Коефіцієнт тепловіддачі середовища за умов обмеженої інформації по теплофізичним властивостям	101
6.2 Визначення коефіцієнту тепловіддачі в багатофазних неньютонівських середовищах	110
6.3 Умови використання методу регулярного теплового режиму	121
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	123

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ

БГУ	біогазова установка;
РТР	регулярний тепловий режим;
ТП	теорія подібності;
ТФВ	теплофізичні властивості;
ЕРМ	експериментально-розрахунковий метод;
КФВ	комплекс фізичних властивостей;
КФВ _б	базовий комплекс фізичних властивостей;
T, \bar{T} , $\bar{\bar{T}}$	температура, °С;
$\overline{\Delta T}$	середній температурний напір між стінкою і середовищем, °С;
θ	надлишкова температура, °С;
n	кількість фіксувань температур в одній серії
дослідів;	
	кількість обертів мішалки, об/хв;
w	швидкість руху середовища (рідини), м/с;
\bar{w}	умовна швидкість руху середовища (рідини),
м/с;	
H, h	висота теплообмінної поверхні, м;
2δ	різниця діаметрів внутрішньої посудини і мішалки, м;
K	коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м ² ·К);
W	вологість, %;
c	концентрація, %;
d, d _{екв}	діаметр, еквівалентний діаметр, відповідно, м;
M	маса, кг;
ρ	густина, кг/м ³ ;
ν	кінематична в'язкість, м ² /с;
μ	динамічна в'язкість, Па·с;
λ	коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К);
C _p	питома теплоємність рідини, кДж/(кг·К);
g	прискорення вільного падіння, м/с ² ;
β	коефіцієнт температурного розширення, 1/К;
m	темп охолодження (нагрівання) тіла, с ⁻¹ ;
ψ	коефіцієнт нерівномірності розподілу температур в тілі II;
$\bar{\alpha}_1$	коефіцієнт тепловіддачі між водою (навколишнім середовищем і тілом II, Вт/(м ² ·К);

$\overline{\alpha}_2$

коефіцієнт тепловіддачі між внутрішньою поверхнею тонкостінного металевго циліндра і досліджуваним рідинним середовищем, Вт/(м²·К).

Верхні і нижні індекси:

1	вода (навколишнє середовище);
2	досліджуване рідинне середовище;
р	рідина;
ст	стінка;
б	базовий.

ВСТУП

Розвиток біогазових технологій створює позитивний енергетичний, екологічний і соціальний ефекти. Розвиток ринку біогазу в Україні дозволить замістити 2,6...18 млрд м³ природного газу на рік, що сприятиме посиленню енергетичної безпеки країни, створенню нових робочих місць, економічному розвитку регіонів, дозволить покривати пікові навантаження в електромережі, утилізувати відходи рослинництва, а також деякі відходи харчової промисловості. Обов'язковим елементом тваринницьких, агропереробних, харчових підприємств можуть стати саме біогазові технології [1].

В біогазових технологіях одною із важливих і невирішених проблем є дотримання температурного режиму. Допустимі коливання температури у термофільному режимі складають до $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Для вирішення цієї проблеми необхідно розробити методи оцінки теплофізичних властивостей і інтенсивності теплообміну рідинних середовищ в біогазовій установці. Методів розрахунку теплообміну між складними сумішами і теплообмінною поверхнею недостатньо. Такі методи розвиваються, в яких експериментальні результати нестационарного теплообміну обробляються лише методами стаціонарного теплообміну, які апробовані та узагальненні [1, 2].

В даній роботі для обробки результатів експериментальних досліджень рекомендується залучити методи нестационарного теплообміну, методи регулярного теплового режиму, які розроблені лише для твердих тіл. Запропонований метод нестационарного теплообміну застосовується для тіл, які складаються з твердої і рідкої частини, в яких реалізується регулярний тепловий режим. На наш погляд є потреба детально дослідити процеси нестационарного теплообміну на експериментальній установці.

Сутність методу полягає в дослідженні теплообміну в «обмеженому об'ємі» при вільній, вимушеній конвекції і за допомогою теорії подібності перенесенні на процеси термостабілізації в біогазових установках. Методи регулярного теплового режиму дозволяють досліджувати речовини з обмеженою інформацією по теплофізичним властивостям.

Нам невідомі такі установки і експерименти на яких би досліджувався нестационарний теплообмін в «обмеженому об'ємі». В «обмеженому об'ємі» процеси нагрівання та охолодження рідини протікають поблизу один від одного і розділити їх неможливо, в цьому випадку тепловіддачу треба розглядати в цілому. Кількість результатів досліджень в «обмеженому об'ємі» для практичних запитів недостатня. В більшості дослідженнях результати неузагальнені і переважають емпіричні розрахунки.

Запропоновано використовувати експериментально-розрахунковий метод для математичного опису теплових процесів [3]. Це абсолютно новий підхід до використання теорії подібності. Існують біогазові установки з різноманітною конструкцією теплообмінних поверхонь, в обладнанні яких може застосовуватись велика кількість комбінацій сумішей. Тому для кожного конкретного випадку необхідно застосовувати свої підходи.

На сьогодні тема методів визначення інтенсивності теплообміну в багатофазових та багатокомпонентних середовищах є достатньо актуальною. Дані методи дозволяють створити сучасні системи переробки органічних відходів високо продуктивними, менш енерговитратними, менш матеріаломісткими, а також зменшити викиди в навколишнє середовище.

При вирішенні задач, часто невідомі теплофізичні властивості та хімічний склад сумішей, або вони змінюються під час переробки, тому для підвищення енергоефективності теплотехнологічного обладнання, необхідно вивчити та дослідити інтенсивність теплообміну в багатофазових та багатокомпонентних середовищах.

Біогаз – газ, який одержують водневим або метановим зброджуванням біомаси. Біогазові установки застосовуються для отримання біопалива першого покоління. Їх перевага – можливість корисної утилізації органічних відходів тваринництва, рослинництва, побутових відходів, стічних вод, тощо із позитивним енергетичним, екологічним, соціальним та економічним ефектом [2, 3]. Біогазові технології належним чином вписуються в доктрину ООН сталого розвитку суспільства. Згідно цієї доктрини відходи і побічні продукти одного виробництва (тваринництва, рослинництва тощо) є вхідними для біогазової установки (БГУ). А відходи БГУ використовуються як високоякісні добрива в сільському господарстві [2].

Згідно [2] наступні фактори відіграють вирішальну роль у виборі розміру та конструкції реактора: оптимальний об'єм різних типів біомаси при заповненні, ступінь ферментації субстрату як функція концентрації сухої речовини, простір для робочого завантаження біогазової установки, період часу ферментації та інтенсивність змішування, системи виробництва, рівні механізації та автоматизації. Температура вихідної сировини в реакторі повинна підтримуватися на рівні, оптимальному для функціонування відповідних анаеробних бактерій. Для безперебійної роботи БГУ необхідна автоматична система контролю, яка контролює всі параметри і підтримує задану температуру і режим роботи ферментатора, а також інтенсивність реакції. Робота системи керування базується на інформації, отриманій від кількох датчиків: датчика об'єму вхідної сировини, датчика температури сировини в реакторі, датчика рівня рідини сировини в реакторі та датчика виходу біогазу.

Таким чином, для вирішення проблеми на сучасному науковому рівні треба узгодити теплотехнологічні та біотехнологічні процеси. Для розв'язання цієї спряженої задачі на сьогодні явно недостатньо досліджень закономірностей тепло- і масообміну в складних рідинних середовищах [1, 5, 6, 7, 8].

Відомо, що експериментальні стенди для визначення коефіцієнтів тепловіддачі в натурних теплообмінниках реальних виробництв, як правило, громіздкі, складні в організації навіть стаціонарних процесів теплообміну [9, 10]. А в умовах складних рідинних середовищ, коли теплофізичні властивості (ТФВ) і їх реологічне поведження можуть змінюватись в процесі експерименту, труднощі зростають в рази [1, 11].

1 БАГАТОФАЗНІ ТА БАГАТОКОМПОНЕНТНІ СЕРЕДОВИЩА

1.1 Аналіз біогазових технологій

Аналіз перспектив розвитку систем теплопостачання показує, що покриття теплових навантажень забезпечуватиметься за рахунок спалювання органічного палива [1].

У сучасних розвинених країнах світу на вироблення електричної енергії та тепла низького та середнього потенціалу витрачається основна частина видобутих паливно-енергетичних ресурсів [1].

Перспективні звичайні енергетичні технології підвищили ефективність використання енергії, але не покращили стан навколишнього середовища – термічне, хімічне та радіоактивне забруднення навколишнього середовища з потенційно катастрофічними наслідками. Негативна тенденція розвитку традиційної енергетики в основному зумовлена існуванням двох факторів – швидкого виснаження природних ресурсів та забруднення навколишнього середовища. За даними ООН, очікується, що запаси вугілля будуть вичерпані між 2082-2500 роками. У зв'язку з цим, з одного боку, необхідно знайти можливості для раціонального використання традиційних енергоресурсів, а з іншого боку, необхідно розвивати науково-технічну роботу з використання нетрадиційної енергії та відновлюваної енергії [2].

Загострення екологічних проблем, виснаження запасів невідновлюваних енергоресурсів, зростання цін на них зумовили глобальний інтерес до розробки та використання технології біоконверсії органічних відходів для отримання енергії.

Відповідно до науково-технічних прогнозів на перспективу конверсія біомаси є найпоширенішим енергетичним ресурсом серед відновлюваних джерел енергії.

Інтенсивність процесу анаеробного зброджування значною мірою залежить від температурного режиму метантенку. Так, під час роботи метантенка в мезофільному режимі при температурі зброджування 37 °С допустиме коливання температур становить 2,8 °С, а при термофільному режимі (55 °С) - лише 0,3 °С [3]. Тому, щоб отримати

необхідну для протікання процесу температуру і підтримувати її на заданому рівні, необхідно підігріти субстрат, що подається на анаеробну обробку, до температури, близької до температури зброджування і забезпечити додатковий підігрів для компенсації тепловтрат.

В даний час використовуються різні методи забезпечення температурного режиму біогазових установках, які можна умовно розділити на 4 групи:

- підігрів вбудованими всередину метантенка теплообмінниками;
- підігрів через поверхню метантенка;
- контактний нагрів субстрату;
- підігрів у зовнішніх теплообмінниках.

У невеликих реакторах, забезпечених, як правило, пристроями, що перемішують, широко застосовуються теплообмінники, змонтовані всередині метантенка. Як нагрівальні елементи застосовуються труби, стрижні, нагрівальні циліндри, плоскі теплообмінники і т.п. за якими циркулює теплоносій.

Недоліком підігріву субстрату за допомогою внутрішніх теплообмінників та через поверхню метантенка є те, що для забезпечення необхідної теплопередачі температура теплоносія, що циркулює в нагрівальних елементах, не повинна перевищувати 50-60°C. Однак навіть у цьому випадку швидкість субстрату, що циркулює біля поверхні нагрівача, виявляється занадто малою, внаслідок чого відбуватиметься поступове прилипання твердих частинок субстрату на поверхні теплообміну, і, як наслідок, погіршення теплопередачі.

У більшості випадків для виконання операцій з ремонту та обслуговування теплообмінників доводиться спорожнювати метантенк та зупиняти процес на тривалий час [2].

До недоліків цієї системи слід віднести їхню порівняльну складність і пов'язану з цим високу вартість. Коефіцієнт корисної дії подібних систем нижче, тому що теплота передається тільки з одного боку стінки, а з іншого губиться в навколишнє середовище. Тому метантенк повинен мати теплоізоляцію з більшою товщиною, що також призводить до подорожчання установки.

Підігрів субстрату можна забезпечити за допомогою зовнішніх теплообмінників. У цьому способі застосовується примусова циркуляція субстрату через теплообмінники. Зазвичай застосовуються

пластинчасті теплообмінники або теплообмінники типу «труба в трубі». Як теплоносії використовується нагріта вода, як правило, у котлах [2].

Циркуляція субстрату через теплообмінник забезпечує також перемішування субстрату, що обробляється в метантенку. Для виключення небезпеки пригорання та прилипання твердих частинок субстрату до поверхонь теплообмінника швидкість субстрату при температурі 60-80°C повинна бути не менше 0,8-1,5 м/с [1-3].

1.2 Використання експериментально-розрахункового методу

Експериментально-розрахунковий метод (ЕРМ) – є методом для прогнозування інтенсивності теплообміну в рідинних середовищах з обмеженою інформацією по теплофізичним властивостям (ТФВ) [1].

ЕРМ складається з двох частин – експериментальної і розрахункової. Експериментальна частина включає базовий експеримент з рідинним середовищем в якому інформація по ТФВ обмежена. Розрахункова частина включає алгоритм розрахунку з використанням критеріальних рівнянь після їх структуризації. Структуризація критеріального рівняння потрібна для формування комплексу фізичних властивостей (КФВ) рідинного середовища і приведення рівняння до розмірного вигляду [4].

ЕРМ можна поділити на такі етапи: – проведення базового експерименту на портативному експериментальному стенді; – визначення базового коефіцієнта тепловіддачі до рідинного середовища $\alpha_{\text{експ}}^{\text{б}}$; – визначення базового КФВ_б; – перехід до шуканого КФВ_ш через $\alpha_{\text{експ}}^{\text{б}}$; – визначення шуканого коефіцієнта тепловіддачі до рідинного середовища $\alpha_{\text{експ}}^{\text{ш}}$. Розбіжність між експериментальними значеннями коефіцієнта тепловіддачі, й отриманими за ЕРМ знаходиться в межах $\pm 30\%$.

В запропонованому ЕРМ використовуються поняття «модельна», «частково-модельна», «віртуально-модельна», «тарувальна» рідина» [4].

В елементах експериментального стенду ЕРМ визначається інтенсивність теплообміну в складних середовищах реальних технологічних процесів. Проводиться тарування на рідинах з відомими ТФВ, таких як вода, цукровий розчин з різною концентрацією,

гліцерин, соняшникова олія, тощо, в подальшому по тексту «модельні рідини». Уточнюються критеріальні рівняння закономірностей теплообміну в елементах базового експериментального стенду з використанням «модельних рідин».

Накопичення бази експериментальних результатів є одним із вирішальним для створення експериментально-розрахункового методу:

I етап [5]:

– створено експериментальну установку для дослідження процесів теплообміну, що відповідають особливостям теплообміну в реакторі біогазової установки (БГУ). Розроблені елементи синтезу підсистем енергозабезпечення БГУ за допомогою методів математичного моделювання;

– в процесі аналізу результатів встановлено закономірності впливу теплообміну рідини з навколишнім середовищем через огорожувальні стінки на вільноковективну тепловіддачу від твердої теплообмінної поверхні до об'єму рідини;

– отримані результати дозволяють розраховувати теплогідродинамічні процеси в одно-, дво- і трифазних середовищах, і можуть бути застосовані під час розробки підсистем термостабілізації реакторів та енергозабезпечення БГУ, а також об'єктів харчової, переробної, хімічної та інших галузей.

II етап [6]:

– вперше було запропоновано та продемонстровано застосування експериментального–розрахункового методу (ЕРМ) як нового та оригінального аспекту для визначення інтенсивності теплообміну в складних органічних середовищах за допомогою теорії подібності, але з обмеженою інформацією про його теплофізичні властивості. Продемонстровано та оцінено дійсність гіпотези, що лежить в основі ЕРМ, яка дозволяє переносити властивості теплообміну з одного класу явищ конвективного теплообміну в інший без втрати цінних якостей теорії подібності;

– вперше із застосуванням ЕРМ розроблена методика перевірного і конструктивного розрахунків теплообмінника, де в якості теплоносія використовується органічна суміш з обмеженою інформацією про теплофізичні властивості.

Недоліки: розглянуто обмежену кількість режимів теплообміну; мало уваги приділено використанню модельних рідин в ЕРМ;

недостатньо обґрунтовано принцип вибору модельних рідин; оцінка застосування ЕРМ для складних реологічних сумішей не проводилась; не виокремлено межі застосування ЕРМ. Потребує удосконалення базовий експериментальний стенд і метод проведення базового експерименту в системі ЕРМ.

На даному етапі розвитку, ЕРМ можна застосувати до ньютонівських рідин.

III етап [7, 8]:

– удосконалена базова експериментальна установка в системі ЕРМ;

– розглянуто поняття «модельної рідини» в різних аспектах.

Введення понять «частково-модельної» та «модельної рідини» дозволило суттєво підвищити точність переходу із базового в натурні умови і визначати інтенсивність теплообміну в реонестабільних рідинах;

– розроблено методичні основи ЕРМ для визначення інтенсивності теплообміну в неньютонівських псевдопластичних рідинах зі ступеневою реологічною моделлю Оствальда;

– проведені теоретичні і експериментальні дослідження з рідинами різного класу та порівняння отриманих результатів із дослідженнями інших авторів дозволили в окремих випадках застосувати розроблені підходи ЕРМ для реонестабільної суміші;

– сформовано вимоги до вибору «модельної рідини» і методи застосування її ТФВ в ЕРМ для різного класу рідин;

– удосконалено експериментальний стенд ЕРМ: розроблений експериментальний стенд для дослідження інтенсивності теплообміну в умовах вимушеної конвекції; розроблена система одночасного зняття температури в десяти точках з виведенням результатів на електронну обчислювальну машину, невелика кількість досліджуваної суміші – 1 дм³. Це дозволило дослідити інтенсивність теплообміну в залежності від передісторії органічних відходів за багатоваріантним планом;

– виведено критеріальне рівняння, яким можна описати теплообмін за умов перемішування у внутрішній порожнині установки, що дає змогу багатоваріантного дослідження інтенсивності тепловіддачі в реонестабільних тиксотропних сумішах.

Експериментально підтверджено можливість застосування удосконаленого експериментально-розрахункового методу для дослідження інтенсивності теплообміну на прикладі рідкого гною та

субстратів великої рогатої худоби, свиней, які є характерними представниками реонестабільних рідин.

В ЕРМ реалізовано поєднання багатоваріантних експериментальних досліджень натурної рідини в портативних установках та спеціальних алгоритмів розрахунків [1, 9-11].

1.3 Огляд багатофазних середовищ

Експериментальне дослідження по визначенню реологічних характеристик субстратів з в'язкими властивостями, таких, як ефективна в'язкість і дотичне напруження, в широкому діапазоні вимірювання температур, швидкості або напруги зсуву є досить трудомістким і важким процесом [12].

Створення більш вдосконаленого та високопродуктивного біотехнологічного обладнання залежить від ряду факторів, в тому числі і від знання реологічних властивостей субстратів, які дозволяють проводити розрахунки і правильно вибирати обладнання. Інформація по реологічним характеристикам субстратів на сьогодні частково або повністю відсутня. Реологічні характеристики субстратів необхідні для визначення кінематичних, динамічних, геометричних, конструктивних та інших параметрів обладнання. Знання закономірностей зміни реологічних характеристик дозволяє впливати на структуру і якість субстрату, шляхом додавання води чи ко-ферментів. Субстрати являють собою складні багатокомпонентні багатофазні колоїдні системи, що володіють внутрішньою структурою і специфічними фізико-хімічними властивостями. Багато субстратів відноситься до структурованих дисперсних систем, в яких змінюються структурно-механічні властивості. Дані зміни можуть бути вагомими і давати помітний вплив, як на теплотехнологічні процеси, так і на роботу біотехнологічного обладнання [1, 12].

Практично усі субстрати відносяться до рідин зі неньютонівською поведінкою, маючи аномальну в'язкість, яку називають ефективною. Всі рідини з неньютонівською поведінкою можна поділити на наступні дві групи. Рідини першої групи – з реологічними властивостями, які не змінюються в часі. Рідини другої групи – з реологічними властивостями, які змінюються в часі [12].

До рідин з неньютонівською поведінкою першої групи належить багато харчових продуктів – суміші морозива, тваринні жири, маргарин з різним складом жиру, кисломолочні продукти – ряженка, йогурти, кефір, сметана різного вмісту жиру, кулінарні жири, майонези різного вмісту жиру, кетчупи, томатні пасти, повидло, соуси та інші продукти з реологічними властивостями, які не змінюються в часі.

Використання субстратів на біогазових установках супроводжується тепловими і механічними процесами: нагріванням, охолодженням, перемішуванням, транспортуванням по трубопроводам, перекачування насосами і іншими видами обробки.

Під час всіх перерахованих процесів відбувається менше чи більше руйнування дисперсної системи, в результаті чого структурно-механічні властивості значно змінюються. Ці зміни можуть суттєво вплинути на роботу біотехнологічного обладнання.

Проблеми інтенсифікації, автоматизації і оптимізації технологічних процесів біогазових технологій не можуть успішно вирішуватися без знань реологічних властивостей субстратів і закономірностей зміни цих властивостей.

В біогазових технологіях ефективним є створення інтенсифікації гідродинамічних і теплових процесів, в результаті чого зростає продуктивність технологічного обладнання, скорочується час перебування субстрату в біогазовому реакторі, зростає вихід біогазу та його якість.

Таким чином, в результаті інтенсифікації гідродинамічних і теплових процесів в ємкісному обладнанні з перемішуванням багатофазних грубодисперсних колоїдних середовищ на водній основі з'являється можливість створення ефективного біотехнологічного обладнання.

Використання приладів з перемішуванням в біотехнологічному обладнанні найбільш ефективно при різних видах теплової обробки субстратів, так як в результаті перемішування субстрату в ємності зменшується товщина пристінного шару, яка суттєво впливає на теплообмін [12].

Гідродинамічні процеси в ємностях обладнання можуть давати суттєвий вплив на продуктивність обладнання в умовах нагрівання і охолодження субстратів. Серед факторів, які обумовлюють значну тривалість теплових процесів в ємкісних обладнаннях, являється

товщина пристінного шару субстрату, значення якої залежить від в'язкості. За рахунок цього у випадку збільшення товщини пристінного шару суміші разом із збільшенням термічного опору протіканню теплових процесів створюються умови для значного перегрівання або переохолодження субстрату [12].

Системи переробки органічних відходів включають теплотехнічне обладнання, елементами якого є процеси тепломасообміну в умовах вільної та примусової конвекції. Сировиною в таких системах є суміші та рідини органічного походження з обмеженою інформацією про теплофізичні властивості. Вони бувають ньютонівськими і неньютонівськими рідинами. Одна і та ж рідина за певних умов може мати як неньютонівський, так і ньютонівський потік. Наприклад, безводний гліцерин виявляє неньютоновські властивості під час руху при низьких температурах ($<30^{\circ}\text{C}$), які характерні для псевдопластичних рідин [13]. Наявність різних домішок, таких як жири і солі, також може істотно змінити реологічні параметри рідини. Реологічні властивості природних рідин змінюються під час обробки залежно від контексту: умов і тривалості зберігання, температури, попередньої обробки (розведення, поділ фракцій, згущення), способу транспортування [13].

Для застосування розрахованих кореляцій коефіцієнтів тепловіддачі [14] необхідно відтворити умови, за яких ці кореляції отримують, що майже неможливо. Також недоцільно отримувати кореляції для розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі для кожної підкладки, суміші, кожного типу теплообмінної поверхні лише з експериментів. Тому традиційні методи дослідження та експериментальні установки не зможуть проводити багатоваріантні дослідження процесу теплообміну реологічно стійких сумішей. Інтенсивність тепловіддачі складних матриць і сумішей на основі відходів тваринництва досліджували за допомогою експериментальних обчислювальних методів (ERM) [15, 16], які також передбачали фізичні експерименти, але не враховували реологічну стійкість матриць. Звідси виникає проблема розробки методу дослідження інтенсивності тепловіддачі в складних сумішах без створення експериментальної установки [17].

Виробництво біогазу – перспективний для України напрямок відновлювальної енергетики. Його можна отримати на біогазових

станціях, розташованих поблизу водостічних станцій, звалищ органічних відходів і сільськогосподарських підприємств, а також транспортувати для потреб великих та енергоємних українських промислових підприємств, особливо металургійних. До того ж виробництво цього енергоресурсу стрімко зростає в країнах ЄС та має хороші передумови і перспективи і в Україні, в країні, для якої характерне необґрунтовано велике енергоспоживання в порівнянні зі світовими показниками; критична залежність від нестабільних поставок із зовнішніх ринків; високі та нестабільні ціни на природний газ, тенденції до їх збільшення для всіх категорій споживачів [18].

Загальний потенціал виробництва біогазу з відходів сільського господарства, харчової промисловості, звалищ, стічних вод комунального господарства та промислових підприємств України оцінюється в 3,2 млрд. м³ на рік в метан-еквіваленті [18]. Крім того, 3,3 млрд. м³ можна отримати вирощуванням різного роду енергетичних культур на порівняно невеликих площах. Однак, на сьогодні, в Україні немає прикладів виробництва біогазу для промисловості, хоча такі технології використовуються вже багато років в розвинутих державах світу.

Разом із цим проблема ефективності застосування біогазових технологій є актуальною та потребує вирішення шляхом оптимізації енергетичних та екологічних характеристик різного роду процесів при прямому його спалюванні для створення необхідного температурного режиму чи виробництва електроенергії на потреби промисловості. Вибір оптимального напрямку для конкретних умов підприємства є неоднозначним. В першу чергу необхідно прагнути використати енергію, що міститься в біогазі, настільки ефективно, наскільки це можливо, враховуючі особливості обладнання, режими роботи та якість газової суміші. Для перетворення на тепло з низькою температурою, застосовувати останню неефективно, оскільки таку енергію можна отримувати, наприклад, і від сонячного колектору або побічної теплоти роботи устаткування [18].

Отже, в Україні як ніколи актуально розвивати біогазові технології та організувати їх використання в промисловості. Даний напрямок є потенційним для створення нової програми ресурсо- та енергозбереження, без якої неможливий подальший розвиток держави в сучасних політичних та економічних умовах. Розширення об'єму

ефективного використання потенціалу органічних відходів на всіх стадіях виробництва продукції є важливим та необхідним етапом в розвитку біогазових технологій, які мають рано чи пізно стати передовими технологіями в українській промисловості та послабити енергетичну залежність України від традиційних викопних енергоресурсів. Головним фактором ефективного використання біогазу є його собівартість, що може змінюватись в широких межах, та питома вартість методів очищення, які, як правило, додають 20 - 100 % до початкової ціни [1, 18].

Вагомий внесок в розвиток науково-технічних засад виробництва енергії з біологічних видів палива зробили вітчизняні вчені Гелетуха Г. Г., Блюм Я. Б., Роїк М. В., Кухарець С. М., Рахметов Д. Б., Дубровін В. О., Забарний Г. М., Кучерук П. П., Карп І. М., Жовмір М. М., П'яних К. Є., Драгнєв С. В., Кудря С. О., Лакіда П. І., Калетник Г. М., Ткаченко С. Й., Губінський М. В., Мельничук М. Д., Голуб Г. А., Железна Т. А., Матвєєв Ю. Б., а також закордонні вчені Andre P. C. Faaij, Jens Bo Holm Nielsen, Ingwald Obernberger, Angelidaki I., Batstone D. J., Wolter Elbersen, Manolis Karampinis, Daniela Thrän, Amon T.

Для виробництва біогазу в якості сировини можуть бути використані як органічні побутові чи промислові та аграрні відходи, так і сировина рослинного походження – кукурудзяний, трав'яний та силос злакових культур. Найбільш прийнятними для виробництва біогазових сумішей видами відходів агропромислового сектору є: гній великої рогатої худоби та свиней, послід птиці; бадилля різноманітних овочевих культур; відходи з цукрових буряків, фруктів та овочів, кукурудзи; жом і меляса; спиртова барда; пивна дробина, солодові паростки, відстій білковий; відходи крохмальо-патокового виробництва; сироватка та ін.

Біогаз виникає в результаті анаеробного бродіння у відповідному температурному режимі майже будь-яких видів органічної сировини та біомаси. В складі біогазу міститься значна кількість метану (CH_4), що відносить його до класу горючих газів [19].

Крім метану, в сирому біогазі містяться також інші важливі компоненти, об'ємні концентрації яких наступні: вуглекислий газ (CO_2 : до 50 %), азот (N_2 : до 5 %), кисень (O_2 : до 2 %), водень (H_2 : до 2 %), сірководень (H_2S : до 1,5 %). Також в незначній кількості можуть

спостерігатись у складі водяна пара, вищігідрокарбонати, силоскани та хлор [20]. Склад сирого біогазу залежить також не тільки від виду сировини, але й технології його виробництва. Головними джерелами біогазового палива для потреб промисловості можуть стати полігони твердих побутових відходів й стічні води, а також біоконвертований гній й промислові органічні відходи [21].

На процеси анаеробного зброджування, як зазначалося вище, виключне значення має температурний режим. При зниженні її в реакторі, зменшується інтенсивність генерації біогазу, оскільки мікробіологічні процеси в органовмісній масі субстрату сповільнюються, а загальна енергоефективність роботи біореактору падає. Тому, якісна теплоізоляція реактора, задля можливості дотримання необхідного температурного режиму, одна з основних умов його ефективного функціонування [22, 23].

Виробництво біоенергії з відновлюваних сільськогосподарських відходів набуває все більшого значення, оскільки її можна використовувати як альтернативу нафтовому паливу [24]. Для отримання біометану чистої та зеленої енергії анаеробного зброджування (AD) є важливим варіантом утилізації сільськогосподарських відходів [25]. Взагалі важко перетворити сільськогосподарські відходи в біогаз анаеробним шляхом. В даний час вони подрібнюються на частинки перед надходженням у біореактор для практичного застосування. Це робить важливим виконання механічного перемішування [26].

Механічне перемішування використовується для покращення перемішування субстратів на основі сільськогосподарських відходів, особливо коли загальна тверда речовина суспензії відносно висока [27, 28]. Механічне перемішування є енергоємним агрегатом, і воно дає 51 % загальної електроенергії біогазової установки, приблизно 1,5 мільярда кВт-год на рік або 340 мільйонів євро для 9000 біогазових установок у всьому світі [29].

Реологічні властивості також впливають на продуктивність самого AD, що ускладнює підвищення ефективності механічного перемішування, зберігаючи продуктивність самого AD. Наприклад, підвищення температури зменшує енергоспоживання на механічне перемішування, тоді як сам процес AD має вимоги до робочої температури [30].

Було виявлено, що змішування субстратів з різним розміром частинок, тобто анаеробне спільне перетравлення, може ефективно зменшити використання енергії на механічне перемішування [31].

Крім того, реологічні властивості суспензії сільськогосподарських відходів є необхідною умовою для оцінки ефективності механічного перемішування та самого процесу анаеробного зброджування. Поки що більшість досліджень зосереджено на гною тварин, де вплив розмірів частинок є незначним [32, 33].

Завдяки складним реологічним властивостям шламів звичайні методи не можуть задовольнити вимоги проектування теплообмінників. В'язкість суспензії може бути в сотні разів вище, ніж в'язкість води, коли загальна тверда речовина (TS) суспензії перевищує 7 %, а реологічні властивості (наприклад, в'язкість) суспензії залежать від різних факторів, таких як тип, частинка розмір шламу (гною, соломи) і мулу, температура, TS і швидкість зсуву. Водночас, незважаючи на те, що реологія гною вивчена [34], більшість з них була зосереджена на силі перемішування при перемішуванні, а дослідження тепловіддачі ще не проводилися [35, 36].

В якості сировини для виробництва біогазу можуть використовуватися органічні сільськогосподарські, промислові або побутові відходи, а також рослинна сировина. Найкращими видами відходів агропромислового комплексу (АПК) для виробництва біогазу є: свинячий і коров'ячий гній, пташиний послід; бадилля овочевих культур; недоброякісні зернові та овочеві культури, урожай цукрових буряків; жом і патока; спиртова барда; борошно, зерно, гранули, зародки; пивне зерно, солод, яєчні білки; крохмальні відходи; рибні та боєнські відходи; трава; побутові відходи; молочні відходи - солоні і солодка сироватка; відходи виробництва біодизеля - з ріпаку промисловий гліцерин з виробництва біодизелю насіння; переробка картоплі, картопляні відходи виробництва чіпсів - шкірка, бульби, що гниють, м'якоть кави, водорості. Окрім відходів, біогаз також можна виробляти із спеціально вирощених енергетичних культур і силосної кукурудзи [1, 37, 38].

Для виробництва біогазу в межах однієї біогазової установки кількість субстратів, може варіюватися від одного до десяти тисяч і більше. Існують різні варіанти технологічних схем біогазових станцій, в залежності від типів і кількості видів застосовуваних субстратів. У

разі застосування декількох субстратів, які можуть відрізняються властивостями, таких як, рідкі і тверді відходи, їх накопичення, попередня підготовка (подрібнення, біоактивізація, підігрів, гомогенізація або інша фізико-хімічна обробка) повинні проводитися окремо, після чого вони перед подачею в біореактори змішуються або подаються роздільними потоками. Попередня підготовка субстрату у ряді випадків дозволяє досягти збільшення швидкості і ступеня розпаду сировини в біореакторах, а отже - загального виходу біогазу [1, 37, 38].

Відходи тваринництва, особливо гній великої рогатої худоби (ВРХ), є придатними і часто використовуваними субстратами для виробництва біогазу. Склад гною ВРХ має високу буферну здатність, що запобігає різким змінам рН в реакторі. У складі гною ВРХ містяться мікроорганізми, необхідні для процесу анаеробного бродіння, особливо метаногени. Крім того, цей субстрат містить достатню кількість мікроелементів і макроелементів, необхідних для метаболізму цих бактерій [39]. Властивості та енергетичні властивості гною залежать від виду тварин, умов вирощування, віку та статі, споживання технологічної води, кормів і, отже, виробництва біогазу. Вихід CH_4 зі свинячого гною становив $0,54 \text{ м}^3/\text{кг}$, з пташиного – $0,41 \text{ м}^3/\text{кг}$, з коров'ячого – $0,28 \text{ м}^3/\text{кг}$. Добова екскреція може становити: свині - 6-8 %, велика рогата худоба - 8-10 % живої маси [40, 41].

При виборі біомаси для отримання біогазу одним з важливих показників є процентний вміст твердої речовини (сухого залишку) в суміші. Для характеристики органічних відходів для виробництва біогазу використовуються такі параметри, як суха органічна речовина. Для переробки сировини вміст органічної сухої речовини повинен складати від 70 % до 95 % загального вмісту сухої речовини [42]. Кількість субстратів, які можна використовувати, може варіюватися в широких межах, і залежно від типу та кількості сировини існують різні варіанти виробництва біогазу. Якщо використовується кілька різних субстратів різного походження або вологості, їх збір, подрібнення, біоактивацію, нагрівання та гомогенізацію проводять окремо.

Така попередня роздільна підготовка може збільшити швидкість і ступінь розкладання сировини в біореакторі та позитивно вплинути на загальне виробництво біогазу [43]. Силосна кукурудза на сьогодні є найпопулярнішим видом культури, яка використовується на біогазових установках. Кукурудзу легко силосувати, і навіть при чистому

використанні вона не заважатиме роботі БГУ. Сьогодні вже є деякі спеціальні різновиди, доступні для біогазових установок. Ці сорти зазвичай забезпечують вищі врожаї біомаси. Кукурудзяний силос є одним із найпоширеніших у країнах ЄС та привабливою рослинною сировиною для виробництва біогазу. Передумовами для вирощування кукурудзи на біогаз в Україні є сприятливі природно-кліматичні умови та багаторічний досвід вирощування традиційних сортів кукурудзи [44].

Субстрати тваринного походження, такі як велика рогата худоба та свинина, оброблені на біогазових установках (БГУ), є неньютонівськими реологічно стабільними рідинами, які демонструють тиксотропні явища. Процеси та режими теплообміну в таких підкладках досліджені лише експериментально, на основі яких отримано розраховану аналітичну залежність коефіцієнтів тепловіддачі від підкладок. З цією метою були створені громіздкі, щільні та складні експериментальні установки. Ці пристрої повністю відтворюють тип поверхні теплообміну, характер руху, температурний стан проектованого обладнання. Проведення експериментів на таких пристроях вимагає створення особливих умов, спеціалізованих приміщень та обладнання, наявності великої кількості субстратів [45-48].

Для виробництва біогазу зазвичай вирощують спеціальні гібриди кукурудзи з урожайністю рослинної маси 9...30 т сухої речовини (СМ) з гектара [72]. Що стосується виходу CH_4 , то 1 га може отримати від 5300 до 9000 $\text{nm}^3 \text{CH}_4$ залежно від гібриду кукурудзи, агрокліматичних умов вирощування та стадії зрілості рослин на момент збирання [73]. Склад органічної речовини та здатність її до біологічного розпаду є ключовими факторами у визначенні потенціалу кукурудзяного силосу (СК) вивільняти метан [74]. Склад органічної речовини кукурудзи, у свою чергу, залежить від багатьох факторів від посадки до збору врожаю: місце посадки, кліматичні умови, гібриди кукурудзи, період передзбиральної вегетації, умови догляду в період вегетації, техніка збирання, збереження подрібненої кукурудзи [75].

За даними досліджень фізико-хімічного складу різних гібридів кукурудзи [76], вміст сухої речовини коливається від 25,1 % до 37,0 %, сухої органічної речовини – 95,0...96,5 % СР, летких жирних кислот (ЛЖК) – 2,0 ...4,7 г/кгсМ-1, співвідношення С:N - 28,8...33,2. Найбільшого виробництва метану слід очікувати, коли вся надземна

частина рослини ферментується. Дослідження [75] показали, що ферментація суміші зерен кукурудзи з качанами, тільки кукурудзою або тільки соломою призвела до зниження виходу метану на 43-70 % порівняно з ферментацією всієї надземної частини. За загальним вмістом твердих речовин у субстраті, що надається для бродіння, можна розрізнити вологі та сухі системи. Мокрі системи включають установки з вмістом твердих речовин 16 % і менше, тоді як напівсухі та сухі біореактори коливаються в межах 22-40 % [77, 78].

1.4 Проблеми визначення інтенсивності теплообміну в багатофазних середовищах

Сучасне виробництво має високі потреби в таких галузях виробництва – нафтовидобуток і нафтохімія, паперове, лакофарбове, харчове, фармацевтичне, виробництво і переробка синтетичних і природних матеріалів (велика увага приділяється будівельному виробництву), енергетика (висококонцентровані ракетні палива та паливні суміші, пасти і суспензії ядерного пального, високотемпературні теплоносії на основі полімерів і суспензій), це дає стимул для дослідження тепломасообміну реологічно складних середовищ. Проблема теплообміну і гідродинаміки дослідних рідин є актуальною, адже мало вивчена зі сторони гідродинаміки і теплофізики [6-11, 79].

На переробку таких матеріалів, також витрачається значна кількість різних видів енергії, зокрема теплової. Тому досить важливим є ефективне використання енергетичного обладнання, обґрунтований вибір систем переробки і транспортування реологічно складних текучих середовищ (особливо високов'язких). А отже підвищення ефективності енергетичного обладнання безпосередньо залежить від дослідження процесів гідродинаміки і теплообміну в даних рідинах [1, 6-11].

На сьогодні недостатньо досліджень процесів конвективного теплообміну в реологічних рідинах, де б був врахований температурний перепад в дослідних середовищах, який впливає на в'язкості неньютоновських середовищ. Отже, існує мала кількість достовірних і надійних критеріальних залежностей для тепло-гідравлічних розрахунків в дослідних рідинах. В даний час для високов'язких ньютонівських рідин не враховується залежність

фізичних властивостей їх від температури в режимі змішаної конвекції [6-11].

Щоб досягнути поставлену мету необхідно вирішити наступні наукові завдання: теоретично вивчити особливості гідродинамічних і теплових процесів в неньютоновських рідинах; дослідити вплив реологічних параметрів на теплообмін і тертя; теоретично дослідити вплив властивостей рідини на гідродинаміку і теплообмін при вільній і вимушеній конвекції; розробити методику інженерного розрахунку теплових процесів в неньютоновських рідинах з урахуванням змінної в'язкості; узагальнити отримані теоретичні рішення у вигляді критеріальних залежностей для розрахунку процесів теплообміну [6-11].

Закономірності руху і теплообміну багатофазних та багатокомпонентних середовищ представляють теоретичний інтерес, та мають велике практичне значення. Для раціонального використання нових високотемпературних теплоносіїв необхідно знати співвідношення і розрахункові формули для визначення теплообміну даних середовищ [6-11].

Системи виробництва енергоносіїв із органічних відходів включають до свого вмісту деякі проблеми в методах для визначення ТФВ [79]. Адже при обробці відходів різного виробництва, це нагрів, охолодження, термостабілізація, відбувається техногенне навантаження на навколишнє середовище, за рахунок немодернізованого тепло-технологічного устаткування. Досить важко вирішити дану задачу, тому що обмежено відомі чи невідомі ТФВ сумішей, рідин, субстратів, їхній хімічний склад, молекулярна будова, невідомо як вони змінюються під час термічної обробки, які фактори навколишнього середовища впливають на їх зміни. Сучасна наука займається вивченням усіх перелічених питань, так як від цього залежить послідовна конструкція біогазових установок (БГУ), габарити, площа яку займають, матеріаломісткість, енерговитрати та вартість обладнання систем виробництва енергоносіїв [80].

До робочого середовища систем переробки органічних відходів відносять: відходи харчової промисловості, птахівництва, свинарства, тваринництва, рослинні відходи, тверді побутові відходи, відходи виробництва біодизелю, рибної промисловості, м'ясокомбінату, промислові стоки, побутові стоки та інші [81-83].

Вище перелічені суміші відходів у різному співвідношенні є неоднорідні і являють собою багатофазні грубодисперсні колоїдні системи на водній основі. Інформація про їхні ТФВ обмежена або взагалі невідома [83]. При створенні технологічного обладнання БГУ виникають досить великі проблеми, а саме субстрати і частинки відходів на оребрених поверхнях теплообмінників, між каналами малого діаметра, в щілинах осідають, розшаровуються, прилипають, в результаті чого коефіцієнт корисної дії (ККД) зменшується. Потрібно враховувати і те, що перед завантаженням в БГУ, суміші уже починають змінювати свої ТФВ під час різних умов зберігання, попередньої обробки (розрідження, розділення фракцій, згущення), температурного режиму, способу транспортування, впливу навколишнього середовища [84]. Все це призводить до основних проблем проектування теплотехнологічного обладнання БГУ. В результаті відсутності залежностей, методів, методик розрахунку інтенсивності теплообміну в таких середовищах, вчені займаються створенням спеціалізованих баз даних по ТФВ різних суспензій відходів та їх сумішей.

Результати численних експериментів, виконаних для визначення коефіцієнта конвективної тепловіддачі за методом теорії подібності, оформлені у вигляді критеріальних рівнянь. Розглянуто найбільш часто використовувані в інженерних розрахунках критеріальні формули для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі в умовах природної і вимушеної конвекції.

Всі експериментальні дані отримують з похибкою, яка залежить від конструкції дослідної установки, вимірювальних приладів, культури проведення експерименту, досвіду експериментатора і т.д. Внаслідок цього результати досвідченого визначення коефіцієнта тепловіддачі у різних авторських колективів відрізняються в межах похибки, яку оцінюють в інтервалі $5 \div 20$ %.

Вивчаючи способи визначення коефіцієнта тепловіддачі можна відмітити деякі проблеми. У винаході [11] виникає питання про одночасне визначення температур стінки теплообмінної поверхні і різниці температур в базових та шуканих умовах, а у реальних режимах ці значення завжди різні.

У способі знаходження коефіцієнта тепловіддачі за умов конвективного теплообміну органічної суміші, який включає

вимірювання температури теплоносіїв, використовують теплофізичні властивості «модельної рідини» [85]. Основною проблемою є те, що даний спосіб не обраховує коефіцієнт теплопровідності λ і в'язкість ν .

В [86] запропоновано спосіб визначення коефіцієнта тепловіддачі за умов конвективного теплообміну органічної суміші. Винахід може бути використаний для оцінки теплофізичних властивостей та визначення коефіцієнтів тепловіддачі багатокомпонентних, багатофазних рідин та сумішей органічного походження. Даний спосіб полягає в тому, що вимірюють температури теплоносіїв впродовж всього експерименту, визначають експериментальний коефіцієнт тепловіддачі в базовому режимі теплообміну, а комплекс фізичних властивостей (КФВ) для базового режиму теплообміну визначають за залежністю, яка визначається з врахуванням напряму теплообміну, за структурованим критеріальним рівнянням визначають експериментально-розрахунковий шуканий коефіцієнт тепловіддачі.

Виконують оцінювання теплофізичних властивостей суміші з врахуванням експериментальної залежності $KФВ_6^{експ}(\bar{t})$ та залежностей густини і середньої теплоємності. Провівши ряд досліджень та розрахунків було отримано систему рівнянь для визначення теплофізичних властивостей сумішей.

За допомогою винаходу зменшується похибка визначення шуканого коефіцієнта тепловіддачі.

В [4] запропоновано спосіб визначення реостабільності сумішей з невизначеними теплофізичними властивостями. Отримані експериментальні залежності для умов, при яких суміш має поведінку ньютонівської рідини, а також в залежності від теплогідродинамічної ситуації змінює реологічні властивості. Даний спосіб підвищує точність визначення інтенсивності тепловіддачі.

З часом великого поширення досягають процеси технологічної обробки сировини. Для раціонального використання необхідно знати усі теплофізичні властивості, термін зберігання, доцільність та галузь їхнього використання. Але в наш час все частіше приходиться працювати з речовинами у яких обмежена інформація по теплофізичним властивостям, а саме теплопровідність та в'язкість.

2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РОЗРАХУНКОВИЙ МЕТОД ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ІНТЕНСИВНОСТІ ТЕПЛООБМІНУ

Для сталого розвитку економіки з мінімальним забрудненням навколишнього середовища доцільно вибудовувати ланцюг підприємств згідно вимог (рекомендацій) ООН [87]. Відходи першого підприємства є вхідною сировиною для другого, другого – для третього і т.д. Відомо, що організація технологічних процесів можлива лише за умов відповідної термостабілізації даних процесів. Робочим середовищем в реакторі біогазової установки (БГУ) в загальному випадку є рідкі неоднорідні суміші органічних відходів різних переробних виробництв, рослинництва та тваринництва, що в окремих випадках можуть являти собою багатофазні грубодисперсні колоїдні системи на водній основі, тобто складні рідинні суміші [87]. Раніше розроблені стенди для експериментальних досліджень теплообміну в технологічному обладнанні громіздкі, мають високу вартість, вимагають багато часу для проведення багатоваріантних досліджень [88, 89 та ін.]. Запропоновано новий метод прогнозування інтенсивності теплообміну, в яких активно використовуються поняття «модельна», «частково-модельна», «віртуально-модельна», «тарувальна» рідина і базовий експериментальний стенд [4, 90]. Нижче по тексту цей метод називається «експериментально-розрахунковий метод (ЕРМ)».

В елементах експериментального стенду ЕРМ визначається інтенсивність теплообміну в складних середовищах реальних технологічних процесів. Проводиться тарування на рідинах з відомими теплофізичними властивостями (ТФВ), таких як вода, цукровий розчин з різною концентрацією, гліцерин, соняшникова олія, тощо, в подальшому по тексту «модельні рідини». Уточнюються критеріальні рівняння закономірностей теплообміну в елементах базового експериментального стенду з використанням «модельних рідин» [4, 90]. Потрібне подальше вдосконалення методів аналізу результатів за умов застосування «модельних рідин» і зразків складних середовищ реальних технологічних процесів.

В дослідженнях нестационарного теплового режиму за умов спряженої задачі [91] встановлений і проаналізований регулярний

тепловий режим (РТР) в твердих тілах: металеве ядро, укладене в теплоізоляційну оболонку; суцільне ядро найпростішої форми, яке укладене в тонку оболонку постійної товщини; ядро із теплоізоляційного матеріалу, укладене в метал; куля, циліндр, диск із теплоізоляційного матеріалу, укладені в металеву оболонку; ядро з металу, укладене в теплоізоляційний матеріал; двоскладові пластини симетричної структури; двоскладові кулі симетричної структури; нескінченно довгий двоскладовий циліндр з металевою серцевиною і оболонкою із теплоізоляційного матеріалу; кульове металеве ядро укладене в теплоізоляційну оболонку; металеві пластинки з обкладинками із теплоізоляційного матеріалу, трискладове тіло із двох металів та із теплоізоляційного матеріалу між ними [87].

Визначені [91] основні зв'язки, які існують між темпом охолодження (нагрівання) твердого тіла m , з однієї сторони, і фізичними властивостями тіла, його формою, розмірами і умовами охолодження – з іншої. Це дозволило розробити методи наближеного розрахунку нестационарних температурних полів, методи моделювання нестационарних процесів в складних об'єктах, дати оцінку нерівномірності температурних полів при різних умовах. На основі теорії регулярного теплового режиму [91-94] запропоновано і отримано широке розповсюдження на практиці нових методів визначення теплофізичних властивостей: коефіцієнтів температуропровідності, теплопровідності, теплоємності, коефіцієнта тепловіддачі. Перевагою таких методів є простота техніки експериментів, висока точність отриманих результатів і мала витрата часу на проведення експерименту [85-87].

Попередні експериментальні результати [95, 96] частково показали можливість існування регулярного режиму в тілі II в системі «навколишнє середовище (НС) I – тіло II». Тіло II – складається з рідинного середовища і вертикальної тонкої металевої циліндричної оболонки. Порівняння об'єктів подальшого дослідження з літературними даними, результати якого наводяться нижче, представлено в табл. 2.1. Із якої існує чіткий висновок, що наші результати оригінальні і відносяться до області, яка на наш погляд практично недосліджена. Нам відомі лише наші дослідження регулярного теплового режиму в тілі II [96], який, на відзнаку від інших тіл, представляє собою комплекс «рідина-тверде тіло» [1, 87].

Таблиця 2.1 – Порівняння досліджень Г. М. Кондратьєва з власними дослідженнями [1]

Дослідження Г. М. Кондратьєва [5]	Власні дослідження
1. Регулярний тепловий режим	
1.1 Тіла, які досліджуються	
Тіло - тверде тіло, комплекс твердих тіл. Система: навколишнє середовище (НС) I – тіло	Тіло II - рідинне середовище в тонкій металевій циліндричній оболонці. Система: навколишнє середовище (НС) I – тіло II.
1.2 Спряжена задача (НС – тіло)	
Закон Ньютона-Ріхмана – закон Фур'є	Закон Ньютона-Ріхмана – закон Фур'є – закон Ньютона-Ріхмана

2.1 Експериментальна установка

Експериментальні результати одержані на стенді, який являється складовою ЕРМ [4]. На рис. 2.1 представлена система «навколишнє середовище (НС) I – тіло II». В зовнішню посудину I-3 заливається вода I-4 з температурою T_1 . У внутрішню циліндричну посудину II-3 – досліджуєма рідина II-2 з температурою T_2 . Фіксування температур в процесі експерименту відбувається в десяти точках з використанням термозондів 1 і 2 [1, 87].

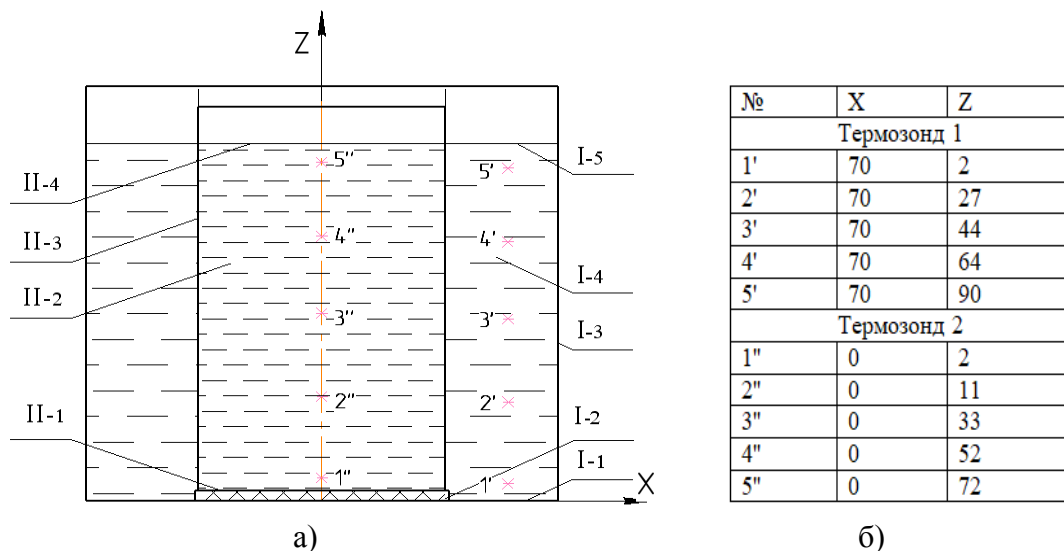


Рисунок 2.1 – Базова експериментальна установка: а) навколишнє середовище I (I-1, I-2, I-3, I-4, I-5); тіло II (II-1, II-2, II-3, II-4); б) розміщення термопар на зонді 1 (1'-5') і на зонді 2 (1''-5'') відносно осей X, Z, мм

На рис. 2.1 навколишнє середовище I: I₋₁ – металеве днище; I₋₂ – теплоізолююча підставка; I₋₃ – зовнішній циліндр з теплоізолюваною поверхнею; I₋₄ – вода; I₋₅ – вільна поверхня води. Тіло II: II₋₁ – металеве дно тіла II товщиною 0,5 мм; II₋₂ – досліджуване рідинне середовище; II₋₃ – тонкостінний металевий циліндр діаметром 100/99 мм; II₋₄ – вільна поверхня досліджуваного рідинного середовища.

Тіло II складається з тонкостінного циліндра II₋₃ діаметром 100/99 мм кінцевої висоти від металевого дна II₋₁ до вільної поверхні досліджуваної рідини II₋₄, металевого дна II₋₁ товщиною 0,5 мм, досліджуваного рідинного середовища II₋₂. Вільні поверхні досліджуваної рідини II₋₄ і води I₋₅ знаходяться на одному рівні в процесі проведення експерименту [87].

Вивчається теплообмін тіла II з водою I₋₄, тобто навколишнім середовищем, через бокову зовнішню поверхню II₋₃. Незначні перетоки теплоти між поверхнями II₋₄ і I₋₅, відтоки теплоти через металеве дно II₋₁ враховані в процесі визначення похибок [87].

Термопари через передавальний пристрій підключенні до електронно-обчислювальної машини (ЕОМ), їхні значення фіксуються поширеним протоколом в системах автоматизації Modbus Poll та значення яких записуються одразу в програму Microsoft Excel (рис. 2.2).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	Type log name here										
2	Poll definition: ID = 1, Function = 03, Address = 0, ScanRate = 1000										
3											
4	09/23/2008:48:04	795	811	820	829	288	191	190	194	215	833
5	09/23/2008:48:14	790	812	820	825	252	194	193	203	236	830
6	09/23/2008:48:25	773	804	817	821	223	196	201	212	277	825
7	09/23/2008:48:36	764	809	818	822	213	201	213	239	317	821
8	09/23/2008:48:47	752	802	818	820	225	201	213	245	335	816
9	09/23/2008:48:57	744	797	813	819	230	204	217	255	354	814
10	09/23/2008:49:07	742	795	810	817	229	207	221	268	374	812
11	09/23/2008:49:18	735	789	808	814	222	212	230	293	402	809

Рисунок 2.2 – Фрагмент запису даних температур в програму Microsoft Excel

Для подальшого проведення розрахунків потрібно побудувати залежності температури від часу $T = f(\tau)$, для цього визначаємо середньоарифметичну температуру для зовнішньої і внутрішньої рідини. В колонці A (рис. 2.2) показано дату і час замірів. Але для побудови залежності потрібно знати тривалість часу. Тому для спрощення побудови була створена програма розрахунку необхідної

тривалості часу з використанням програми Visual Basic for Application (VBA). На рис. 2.3 показано фрагменти програми [1].

```

tay0 = tay01 * 60 + tay02      MsgBox "Отримано таке значення: toy0=" & toy0, vbOKOnly, "Результат"
tay1 = tay11 * 60 + tay12      MsgBox "Отримано таке значення: toy1=" & toy1, vbOKOnly, "Результат"
tay2 = tay21 * 60 + tay22      MsgBox "Отримано таке значення: toy2=" & toy2, vbOKOnly, "Результат"
tay3 = tay31 * 60 + tay32      MsgBox "Отримано таке значення: toy3=" & toy3, vbOKOnly, "Результат"
tay4 = tay41 * 60 + tay42      MsgBox "Отримано таке значення: toy4=" & toy4, vbOKOnly, "Результат"
tay5 = tay51 * 60 + tay52      MsgBox "Отримано таке значення: toy5=" & toy5, vbOKOnly, "Результат"
tay6 = tay61 * 60 + tay62      MsgBox "Отримано таке значення: toy6=" & toy6, vbOKOnly, "Результат"
tay7 = tay71 * 60 + tay72      MsgBox "Отримано таке значення: toy7=" & toy7, vbOKOnly, "Результат"
tay8 = tay81 * 60 + tay82      MsgBox "Отримано таке значення: toy8=" & toy8, vbOKOnly, "Результат"
tay9 = tay91 * 60 + tay92      MsgBox "Отримано таке значення: toy9=" & toy9, vbOKOnly, "Результат"

```

Рисунок 2.3 – Фрагменти розрахунку тривалості експерименту в VBA

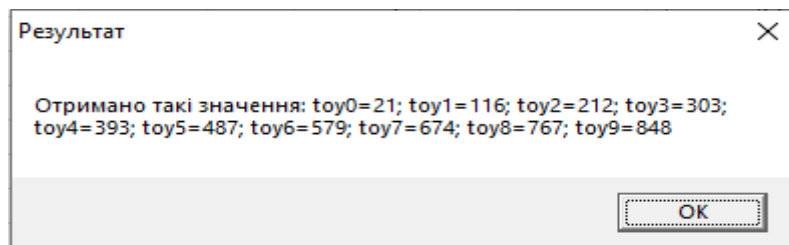


Рисунок 2.4 – Очікуваний результат

На рис. 2.4 бачимо результат отриманих значень, які потім використовується для побудови залежностей температур води і досліджуваного рідинного середовища від часу, а також залежності надлишкової температури від знайденого часу [1].

2.2 Методика проведення експериментів

З методичних міркувань обробки експериментальних результатів на рис. 2.5 і 2.6 приведені принципові криві зміни осереднених температур. Осередненні температури визначаються як середньо-арифметичні за результатами заміру температур термометрами на вертикальних термозондах 1 і 2 (рис. 2.1) в певний момент часу.

З використанням наших експериментальних даних розраховуються коефіцієнти тепловіддачі $\bar{\alpha}_1$ між водою I-4 і зовнішньою поверхнею тонкостінного металевого циліндра II-3 та коефіцієнти нерівномірності розподілу температур $\bar{\Psi}$ в тілі II згідно [91] за умов охолодження

(нагрівання) цукрового розчину $c = 50\%$, соняшникової олії. Для цього на рис. 2.5, 2.6 схематично показуються процеси охолодження, нагрівання досліджуваного рідинного середовища в діапазоні РТР. Цей діапазон – в часі $\tau_1 - \tau_n$ (τ_1 – початок РТР, τ_n – кінець експериментального досліджу в межах РТР). У вказаному діапазоні охолодження-нагрівання визначається середнє значення $\bar{\alpha}_1$ та $\bar{\psi}$, крім того визначається $\bar{\alpha}_1$ та $\bar{\psi}$ в обмежених діапазонах часу $\tau_{1i} - \tau_{1(n+i)}$ [1, 87].

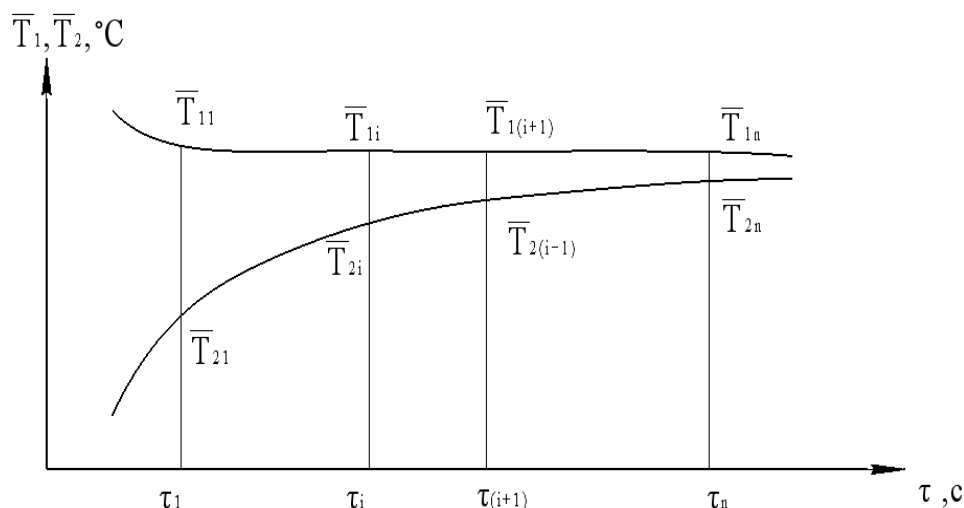


Рисунок 2.5 – До обробки експериментальних даних при нагріванні досліджуваної рідини (див. табл. 2.3)

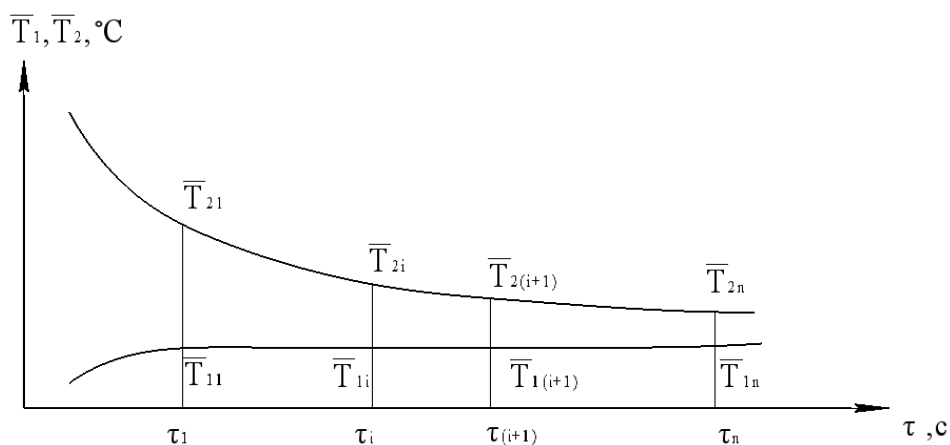
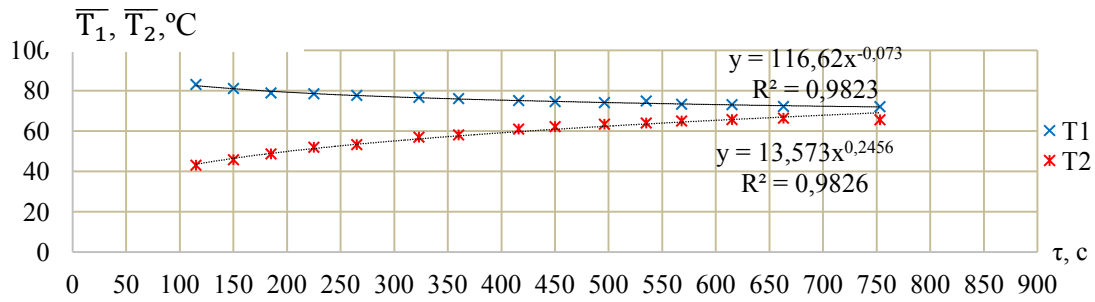
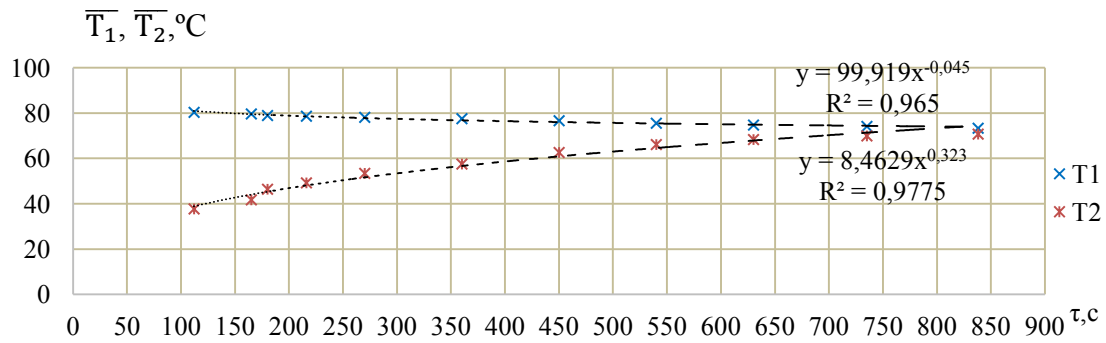


Рисунок 2.6 – До обробки експериментальних даних при охолодженні досліджуваної рідини (див. табл. 2.3)

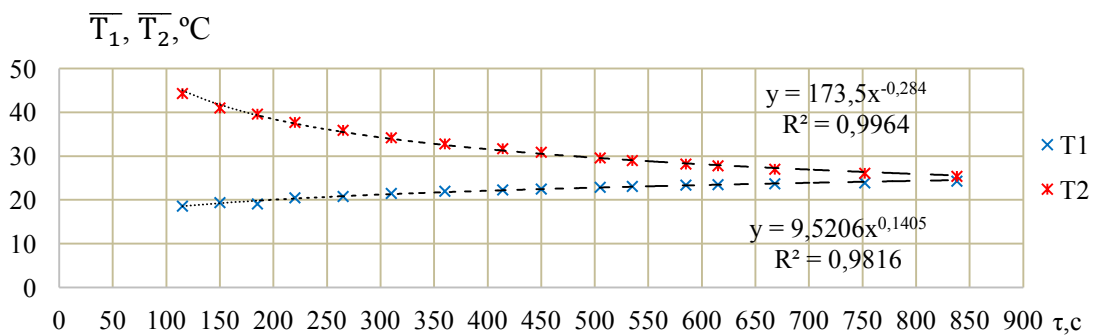
Експериментально досліджується охолодження і нагрівання цукрового розчину концентрацією $c = 50\%$ і рафінованої соняшникової олії. Результати первинної обробки експериментальних даних представлені на рис. 2.7.



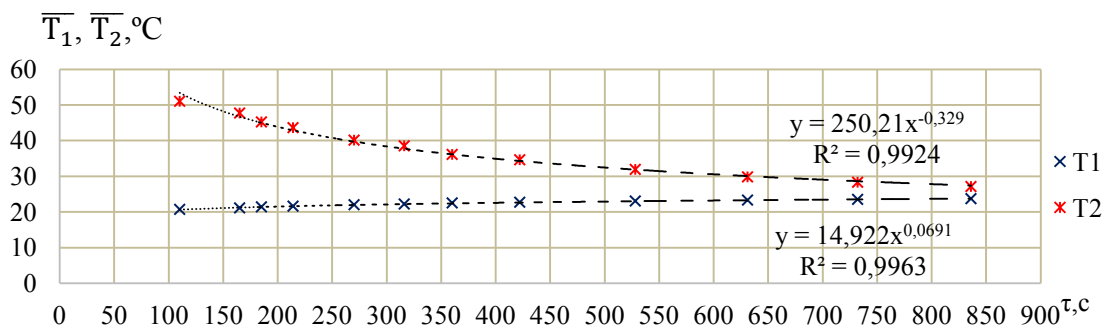
а)



б)



в)



г)

Рисунок 2.7 – Зміна температури навколишнього середовища і досліджуваного рідинного середовища в часі: \overline{T}_1 – середньооб'ємна температура навколишнього середовища (води); \overline{T}_2 – середньооб'ємна температура досліджуваного рідинного середовища; а) при нагріванні цукрового розчину $c = 50\%$; б) при нагріванні соняшникової олії; в) при охолодженні цукрового розчину $c = 50\%$; г) при охолодженні соняшникової олії

Реальний зафіксований діапазон зміни теплофізичних властивостей досліджуваних рідинних середовищ представляється в табл. 2.2 [1].

Таблиця 2.2 – Діапазон зміни теплофізичних властивостей досліджуваних рідинних середовищ

Досліджуване рідинне середовище	Процес	Діапазон зміни $\bar{T}_2, ^\circ\text{C}$	$\lambda_2, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	$\nu_2, \text{м}^2/\text{с}$	$\rho_2, \text{кг}/\text{м}^3$	$C_{p2}, \text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$
Цукровий розчин $c = 50\%$	Нагрівання	48-65	0,417-0,434	$(4,8-7,4) \cdot 10^{-6}$	990-982	4174-4175
	Охолодження	27-25	0,435-0,418	$(9,3-5,1) \cdot 10^{-6}$	995-999	4173-4174
Соняшникова олія	Нагрівання	46-70	0,165-0,163	$(2,82-1,37) \cdot 10^{-5}$	901-892	2304-2338
	Охолодження	41-30	0,166-0,167	$(3,46-6,13) \cdot 10^{-5}$	901-911	2351-2219

Темп охолодження (нагрівання) m тіла II визначається з рівняння, с^{-1} [1, 91]

$$m = \frac{\ln \vartheta_1 - \ln \vartheta_2}{\tau_1 - \tau_2}, \quad (2.1)$$

де ϑ_1, ϑ_2 – надлишкова середньооб'ємна температура досліджуемого рідинного середовища в циліндричній посудині зі сторони води, $^\circ\text{C}$:

$$\vartheta = |\bar{T}_1 - \bar{T}_2^{\text{II}}| \quad (2.2)$$

Надлишкова температура – це модуль різниці між середньооб'ємною температурою \bar{T}_1 води (I-4) в навколишньому середовищі I і середньооб'ємною температурою \bar{T}_2^{II} тіла II [87]:

$$\bar{T}_1 = (T_1' + T_1'' + T_1''' + T_1^{IV} + T_1^V)/5; \quad (2.3)$$

$$\bar{T}_2^{\text{II}} = \bar{T}_2 \pm (0,01 \div 0,03). \quad (2.4)$$

Величини $0,01 \div 0,03$ прийняті в результаті розрахункового визначення розбіжностей між середньооб'ємною температурою досліджуемого рідинного середовища в тілі II і середньооб'ємною температурою тіла II в цілому [87].

Середньооб'ємна температура досліджуваного рідинного середовища у циліндрі \overline{T}_2 :

$$\overline{T}_2 = (T_2' + T_2'' + T_2''' + T_2^{IV} + T_2^V)/5, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (2.5)$$

де $T_1' \dots T_1^V$ – локальні температури заміряні термопарами на термозонді 1 (1'-5') по висоті у зовнішньому циліндрі I-3 з водою I-4; $T_2' \dots T_2^V$ – локальні температури заміряні термопарами на термозонді 2 (1''-5'') у циліндрі II-3 із досліджуваним рідинним середовищем II-2 (рис. 2.1).

Таблиця 2.3 – Методи визначення середньоінтегральних значень температур $\overline{\overline{T}}_1, \overline{\overline{T}}_2$ в діапазоні часу $\tau_1 - \tau_n$

Досліджуване рідинне середовище	Процес	Залежність для визначення температур в навколишньому середовищі, $^\circ\text{C}$	Залежність для визначення температур в досліджуваному рідинному середовищі, $^\circ\text{C}$
Цукровий розчин $c = 50 \%$	Нагрівання	$\overline{\overline{T}}_1 = \frac{\int_{\tau_1}^{\tau_n} 116.62 \cdot x^{-0.073} d\tau}{\tau_1 - \tau_n}$	$\overline{\overline{T}}_2 = \frac{\int_{\tau_1}^{\tau_n} 13.573 \cdot x^{0.2456} d\tau}{\tau_1 - \tau_n}$
	Охолодження	$\overline{\overline{T}}_1 = \frac{\int_{\tau_1}^{\tau_n} 9.5206 \cdot x^{0.1405} d\tau}{\tau_1 - \tau_n}$	$\overline{\overline{T}}_2 = \frac{\int_{\tau_1}^{\tau_n} 173.5 \cdot x^{-0.284} d\tau}{\tau_1 - \tau_n}$
Соняшникова олія	Нагрівання	$\overline{\overline{T}}_1 = \frac{\int_{\tau_1}^{\tau_n} 99.919 \cdot x^{-0.045} d\tau}{\tau_1 - \tau_n}$	$\overline{\overline{T}}_2 = \frac{\int_{\tau_1}^{\tau_n} 8.4629 \cdot x^{0.323} d\tau}{\tau_1 - \tau_n}$
	Охолодження	$\overline{\overline{T}}_1 = \frac{\int_{\tau_1}^{\tau_n} 14.922 \cdot x^{0.0691} d\tau}{\tau_1 - \tau_n}$	$\overline{\overline{T}}_2 = \frac{\int_{\tau_1}^{\tau_n} 250.21 \cdot x^{-0.329} d\tau}{\tau_1 - \tau_n}$

Методи визначення середньоінтегральних значень температур $\overline{\overline{T}}_1, \overline{\overline{T}}_2$ в діапазоні часу $\tau_{1i} - \tau_{1(n+i)}$ знаходяться за допомогою залежностей наведених в табл. 2.3. Враховано, що діапазон часу приймає нове значення $\tau_{1i} - \tau_{1(n+i)}$.

Значення $\overline{\alpha}_1$ і $\overline{\psi}$ одержуються в процесі обробки експериментальних результатів наступним чином. Визначається питомий тепловий потік від води I-4 до тіла II: $q_1 = q_2 = \frac{M_2 \cdot C_{p2} \cdot \overline{\Delta T}_2}{F_{\text{то}} \cdot \Delta t}$, Вт/м^2 , де M_2 – маса тіла II, кг; C_{p2} – осереднена питома теплоємність тіла II, Дж/(кг·К); $F_{\text{то}}$ – площа зовнішньої поверхні тонкого металевого циліндра II-3, м^2 ; Δt – проміжок часу, в якому проводиться дослідження, с; різниця середньоінтегральних температур $\overline{\overline{\Delta T}}_2 = \overline{\overline{T}}_{21} - \overline{\overline{T}}_{2n}$ (див. табл. 2.3).

Коефіцієнт тепловіддачі $\bar{\alpha}_1 = \frac{\overline{Nu}_1 \cdot \lambda_1}{H}$, визначається за умов вільної конвекції ітераційним методом для проміжків часу $\tau_1 - \tau_n$ і $\tau_i - \tau_{(i+1)}$. Для визначення \overline{Nu}_1 використовується формула, яка рекомендована для вертикальних поверхонь (труби) за умов ламінарного режиму ($10^3 < Ra_h < 10^9$) в необмеженому просторі [1, 97]

$$\overline{Nu}_1 = 0,76 \cdot Ra^{0,25} \cdot \left(\frac{Pr_p}{Pr_{ст}} \right)^{0,25}, \quad (2.6)$$

де $Ra_h = Gr_1 \cdot Pr_{p1}$ – критерій Релея; $Gr_1 = (g \cdot \beta_1 \cdot \overline{\Delta T} \cdot H^3) / \nu_1^2$ – критерій Грасгофа; g – прискорення вільного падіння, m/c^2 ; H – визначальний лінійний розмір (відстань по вертикалі від поверхні металевого дна Π_1 до рівня досліджуваної рідини Π_4 в посудині), м; $\overline{\Delta T} = |\overline{T}_1 - \overline{T}_{ст}|$ – температурний напір; $\overline{T}_{ст}$ – зовнішня середня температура стінки тонкого металевого циліндра Π_3 , яка омивається водою, $^{\circ}C$; β_1 – коефіцієнт температурного розширення води, $^{\circ}C^{-1}$; ν_1 – кінематична в'язкість води, m^2/c ; Pr_{p1} – критерій Прандтля – за середньоінтегральною температурою води в межах $\tau_1 - \tau_n$; $Pr_{ст}$ – критерій Прандтля для води за температурою стінки $\overline{T}_{ст}$ в процесі ітерацій; λ_1 – коефіцієнт теплопровідності води, $Вт/(м \cdot K)$.

По середньоінтегральному значенню температури води \overline{T}_1 (табл. 2.3) в діапазоні часу $\tau_1 - \tau_n$ визначаються теплофізичні властивості (ТФВ) води, а саме коефіцієнт температурного розширення β_1 , кінематична в'язкість ν_1 , коефіцієнт теплопровідності λ_1 [87].

Проводиться перевірка заданої зовнішньої температури стінки Π_3 в діапазоні часу $\overline{T}_{ст} = \overline{T}_1 - \frac{q_2}{\alpha_1}$. Якщо отримана температура стінки відрізняється від попередньо прийнятої менше ніж на 3 %, перерахунок завершується і визначається $\overline{\Psi}$. Коефіцієнт нерівномірності розподілу температур в системі «НС I – тіло II» знаходиться із залежності $\overline{\Psi} = \vartheta_f / \vartheta_v$, де ϑ_v – надлишкова температура тіла II по відношенню до температури НС I, $\vartheta_v = |\overline{T}_1 - \overline{T}_2|$, $^{\circ}C$; ϑ_f – надлишкова температура стінки по відношенню до температури \overline{T}_1 , $\vartheta_f = |\overline{T}_1 - \overline{T}_{ст}|$ [1, 87].

2.3 Визначення похибок розрахунків

Температури води та досліджуваного рідинного середовища вимірюється термометром опору з аналого-цифровим перетворювачем із ціною поділки 1°C та $0,1^{\circ}\text{C}$, які були калібровані ртутним лабораторним термометром із ціною поділки $0,1^{\circ}\text{C}$. Температуру повітря в приміщенні вимірювали лабораторним ртутним термометром із ціною поділки $0,1^{\circ}\text{C}$. Внутрішній діаметр теплообмінної циліндричної поверхні $D = (100 \pm 0,5)$ мм, висота $H = (100 \pm 0,5)$ мм, товщина стінки $\delta = (0, \pm 0,001)$ мм. Відносна похибка вимірювання теплоємності $C_p = \pm 1,5 \%$. Густина вимірювалася ваговим методом, відносна похибка вимірювання складає $\rho = \pm 3,5 \%$ [1].

Систематична похибка вимірювання температури $\overline{\Delta t}$ (різниця між дійсною температурою рідини та показанням термометра), яка пов'язана інерційністю термометрів опору, визначалася з рівняння

$$\alpha \cdot F \cdot \overline{\Delta t} \cdot \tau = F \cdot \delta \cdot C_p \cdot \Delta t, \quad (2.7)$$

$$\overline{\Delta t} = \frac{\delta \cdot C_p \cdot \Delta t}{\alpha \cdot \tau}, \quad (2.8)$$

де α — коефіцієнт тепловіддачі від середовища до поверхні гільзи; F — площа поверхні циліндричної гільзи термометра; τ — час проведення серії дослідів (вимірювань); δ — товщина стінки латунної гільзи; $\Delta t = t_2 - t_1$, t_2 — кінцева температура рідини, t_1 — початкова температура рідини; C_p — питома теплоємність латуні. Систематична похибка вимірювання температур складає: вода $\overline{\Delta t} = 0,05 \dots 1 \%$; цукровий розчин $c = 50 \%$, 60% , 70% $\overline{\Delta t} = 2,5 \dots 4 \%$; соняшникова олія $\overline{\Delta t} = 6 \dots 8 \%$; гліцерин $\overline{\Delta t} = 3,5 \dots 8,2 \%$; курячого посліду $\overline{\Delta t} = 4,3 \dots 7,5 \%$; субстрату $\overline{\Delta t} = 3 \dots 7 \%$,

Для оцінювання похибки непрямих вимірювань на основі прямих вимірювань величин максимальна абсолютна похибка дорівнює

$$\Delta y = \pm \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot \Delta x_i, \quad (2.9)$$

де Δx_i — абсолютна гранична похибка прямого однократного вимірювання величини x_i . Максимальна відносна похибка результату непрямого вимірювання визначається наступним чином

$$\delta_y = \pm \frac{\Delta y}{y} \cdot 100 = \pm 100 \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial \ln f}{\partial x_i} \cdot \Delta x_i \right| \quad (2.10)$$

Для відносної похибки визначення коефіцієнта тепловіддачі маємо

$$\frac{\Delta \alpha_2}{\alpha_2} = \frac{\Delta k}{k} + \frac{\Delta \alpha_1}{\alpha_1} + \frac{\Delta \delta}{\delta} + \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \quad (2.11)$$

де $\Delta_{\text{Табл}}$ — відносна похибка табличних величин, в середньому складає 1,1...1,7 %. Відносна похибка визначення температурного напору складає 1...1,6 %, теплового потоку — 4,1...6,8 %, різниці температур $\Delta(\Delta t_{\text{сер}})$ — 2,2...5,3 %, коефіцієнта тепловіддачі — 8,5...12 %, коефіцієнта теплопередачі — 5,1...8,3 % [1].

3 РЕГУЛЯРНИЙ ТЕПЛОВИЙ РЕЖИМ В ТВЕРДОМУ ТІЛІ

3.1 Нестационарна теплопровідність

Якщо ж температурне поле змінюється у часі, тобто є функцією часу, то теплові процеси, що протікають в таких умовах, називаються нестационарними.

Нестационарність теплових процесів обумовлюється зміною ентальпії тіла і пов'язана з явищами його нагрівання чи охолодження [91].

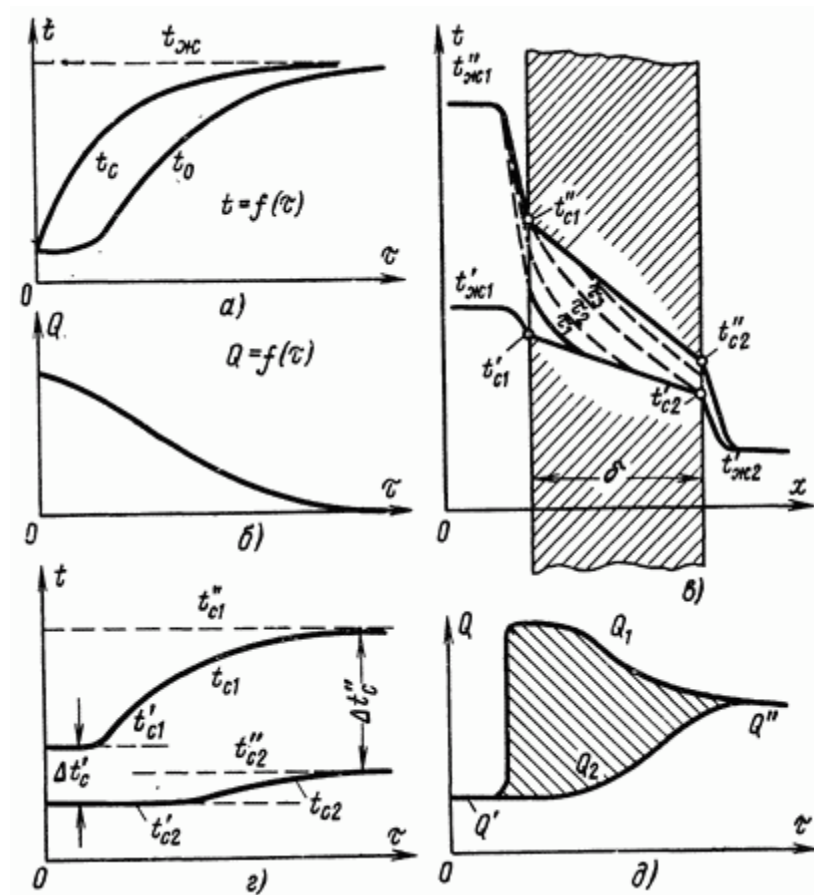


Рисунок 3.1 – Теплопровідність при нестационарному режимі: характер зміни температур та кількості переданої теплоти у часі.

Тіло внесено у середу з вищою температурою; відразу між середовищем і тілом виникає процес теплообміну, і тіло починає прогріватися. Спочатку нагріваються поверхневі шари, але поступово процес прогріву поширюється і в глиб тіла.

Про характер зміни температури тіла під час прогріву дають уявлення криві на рис. 3-1, д, де 1 – температура на поверхні та 2 – температура в центрі тіла. Після деякого часу (теоретично нескінченно великого) температура всіх частин тіла вирівнюється і стає рівною температурі навколишнього середовища, тобто настає теплова рівновага.

При нестационарному режимі інтенсивність підведення теплоти також є непостійною в часі [91].

Про характер зміни цієї величини дає уявлення крива на рис. 3-1, б. У міру прогріву тіла інтенсивність передачі теплоти поступово зменшується і в межі стає нульовою. Площа, укладена між осями та кривою, визначає повну кількість теплоти, передану за час. Ця теплота акумулюється тілом і йде підвищення його ентальпії. Аналогічним чином відбувається процес при охолодженні тіла; при цьому його ентальпія зменшується, а виділена теплота передається до навколишнього середовища [91].

Як другий приклад розглянемо процес теплопередачі через стінку. Нехай спочатку процес був стаціонарним (рис. 3-1, в). Якщо тепер змінити режим теплопередачі, наприклад, відразу різко підвищити температуру гарячого середовища, то деякий час процес стає нестационарним. Температурна крива змінюватиметься доти, доки знову не встановиться стаціонарний режим. Зміна у часі температури окремо представлена на рис. 3-1, м. Про характер зміни в часі кількості теплоти, що передається для аналізованого випадку дають уявлення криві на рис. 3-1, заштрихована частка є кількістю теплоти, витрачене зміну ентальпії стінки (акумульована теплота).

Таким чином, нестационарний тепловий процес завжди пов'язаний із зміною ентальпії тіла та ним обумовлюється. Оскільки швидкість зміни ентальпії прямо пропорційна здатності матеріалу проводити теплоту (тобто коефіцієнту теплопровідності) і обернено пропорційна його акумулюючій здатності (тобто об'ємній теплоємності), то в цілому швидкість теплового процесу при нестационарному режимі визначається значенням коефіцієнта температуропровідності, який тут має таке ж важливе значення, як коефіцієнт теплопровідності при стаціонарному режимі поширення теплоти.

Описаний характер зміни температури і кількості переданої теплоти справедливий лише для твердих тіл. При нагріванні рідких чи

газоподібних тіл у випадку неминуче виникає конвекція, що сприяє вирівнюванню температури. У цих випадках можна говорити про зміну часу лише середньої температури рідини [91].

Розв'язати задачу нестационарної теплопровідності – це означає знайти залежності зміни температури та кількості переданої теплоти у часі для будь-якої точки тіла. Такі залежності можна отримати шляхом вирішення диференціального рівняння теплопровідності. Аналітична теорія ставить собі за мету отримання загального рішення задачі. Такі рішення виходять досить складними навіть для тіл простої форми; пластини, циліндра та кулі.

При вирішенні конкретних технічних завдань практично прийнятним є метод кінцевих різниць Е. Шмідта чи метод елементарних балансів А. П. Ванічева. Ці методи засновані на допущенні можливості заміни безперервного процесу стрибкоподібним як у часі, так і в просторі.

Будь-який процес нагрівання або охолодження тіла можна умовно поділити на три режими. Перший охоплює початок процесу, коли характерною особливістю є поширення температурних збурень у просторі і захоплення нових і нових верств тіла. Швидкість зміни температури в окремих точках при цьому різна, і поле температур залежить від початкового стану, яке, взагалі кажучи, може бути різним. Тому перший режим характеризує початкову стадію розвитку. З часом вплив початкових нерівномірностей згладжується і відносна швидкість зміни температури у всіх точках тіла стає постійною. Це – режим упорядкованого процесу. Після довгого часу – аналітично після закінчення нескінченно великого часу – настає третій, стаціонарний режим, характерною особливістю якого є сталість розподілу температур у часі. Якщо при цьому в усіх точках тіла температура однакова і дорівнює температурі навколишнього середовища, це стан теплової рівноваги.

Аналітичне рішення виходить складним тому, що ставить собі за мету отримати загальну залежність відразу для всіх трьох режимів. Якщо ж відмовитися від цього, завдання значно спрощується. Саме цим шляхом пішли багато дослідників.

При вирішенні багатьох практичних завдань з охолодження та нагрівання тіл початковим або першим режимом процесу можна знехтувати. Тоді залишається лише другий, який підпорядковується

простому експоненційному закону. Г. М. Кондратьєв назвав цей режим регулярним; він створив теорію регулярного режиму та запропонував ряд способів використання цієї теорії для вирішення практичних завдань [91].

Разом з цим значні успіхи є у частині розробки експериментальних методів розв'язання. Їх можна застосувати для тіл будь-якої форми та за будь-якого завдання крайових умов (при аналітичному ж рішенні крайові умови повинні задаватися у вигляді аналітичних залежностей). Ці методи засновані на аналогії: між явищами поширення теплоти та ламінарного руху рідини – метод гідротеплової аналогії, між тепловими та електричними процесами – метод електротеплової аналогії [91].

В даний час багато складних завдань нестационарної теплопровідності успішно вирішуються також за допомогою електронно-обчислювальних машин.

Необхідність розрахунку теплообміну при нестационарному режимі визначається його значимістю в робочому процесі агрегату, що розраховується. Так, наприклад, у роботі парових котлів та більшості апаратів електростанцій нестационарний режим виникає лише при пуску в роботу, вимкнення та зміну режиму роботи. А в роботі нагрівальних печей нестационарний режим є основним; при розрахунку доводиться визначати час, необхідне нагрівання металу до заданої температури, або температуру, до якої метал нагріється протягом певного проміжку часу.

3.2 Регулярний тепловий режим

Розглянемо процес охолодження (або нагрівання) твердого тіла, коли умови охолодження, температура навколишнього середовища та коефіцієнт тепловіддачі α , у часі залишаються постійними та внутрішні джерела теплоти в тілі відсутні. Щодо початкового розподілу температур у тілі не будемо робити жодних обмежень, за винятком того, що приймемо умову: різниця між температурою в будь-якій точці та температурою навколишнього середовища в початковий момент має той самий знак. За цих умов нестационарний процес охолодження (нагрівання) тіла може бути поділений на дві стадії: початкову стадію та стадію регулярного режиму [91, 93].

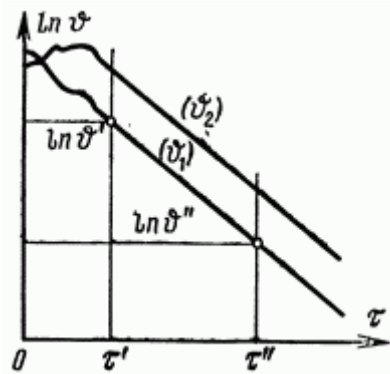


Рисунок 3.2 – Зміна температури у часі при охолодженні тіла

Перша стадія характеризується тим, що зміна температурного поля в часі суттєво залежить від особливостей початкового теплового стану тіла, і тому характер процесу не визначається однозначно умовами охолодження та властивостями тіла. Проте поступово вплив початкових умов дедалі більше втрачається; навпаки, вплив умов охолодження та фізичних властивостей тіла стає визначальним. Настає регулярний тепловий режим. При цьому закон зміни температурного поля в часі набуває простого і універсального вигляду: логарифм надмірної температури тіла в будь-якій його точці змінюється в часі за лінійним законом

$$\text{Ln}\vartheta = -m\tau + C \quad (3.1)$$

тобто ця температура зменшується в часі за експоненціальним законом

$$\vartheta = C e^{-m\tau} \quad (3.2)$$

Величина m , є позитивне число, яке залежить від координат і часу. Ця величина характеризує інтенсивність охолодження (нагрівання) тіла і називається темпом охолодження (нагрівання) [93].

Графічна інтерпретація аналізованого процесу показано на рис. 3.2; тут наведено криві зміни величин m для двох фіксованих точок тіла 1 та 2 у часі протягом усього процесу охолодження тіла.

Початок регулярного режиму характеризується тим, що відповідні криві переходять у прями лінії, що мають однаковий кутовий коефіцієнт на графіку, тобто вони виявляються паралельними між собою.

Застосуємо рівняння (3.1) до двох довільних моментів часу τ' і τ'' (рис. 3.2) і, виключивши постійну C , отримаємо:

$$m = \frac{\ln \vartheta' - \ln \vartheta''}{\tau'' - \tau'}. \quad (3.3)$$

Формула (3.3) дає спосіб визначення величини темпу охолодження (нагрівання) m . Для цього необхідно виміряні в якійсь точці тіла температури подати в напівлогарифмічних координатах, на прямолінійній ділянці отриманої залежності вибрати дві точки і відповідні їм величини τ' і τ'' підставити у формулу (3.3).

Основні закономірності регулярного теплового режиму були докладно досліджені Г. М. Кондратьєвим [91], який визначив основні зв'язки, що існують між темпом охолодження m , з одного боку, та фізичними властивостями тіла, його формою, розмірами та умовами охолодження – з іншого. Це дозволило розробити методи наближеного розрахунку нестационарних температурних полів, методи моделювання нестационарних процесів у складних об'єктах, дати оцінки нерівномірності температурних полів у різних умовах, термічних опорів, ступеня чорноти тіл, коефіцієнтів тепловіддачі. Перевагою таких методів є простота техніки експерименту, висока точність одержуваних результатів та мала витрата часу для проведення експерименту.

Для регулярного теплового режиму характерні такі основні положення:

1. Основне співвідношення, визначальне настання регулярного режиму, виконується як для однорідних простих тіл, але й у будь-яких складних системах з різнорідних тіл, тобто явище регуляризації температурного поля має загальний характер.

2. Темп охолодження однорідного тіла m при кінцевому значенні коефіцієнта тепловіддачі пропорційний коефіцієнту тепловіддачі α та зовнішньої поверхні тіла F і обернено пропорційний повній теплоємності C_v

$$m = \psi \frac{\alpha F}{C_v} \quad (3.4)$$

3. Величина m для однорідних тіл пропорційна коефіцієнту температуропровідності матеріалу

$$a = Km_{\infty} \quad (3.5)$$

Співвідношення (3.5) є виразом закону збереження енергії для умов регулярного режиму охолодження (нагрівання) тіл. Це відношення протягом усього періоду регулярного режиму залишається незмінним і називається коефіцієнтом нерівномірності розподілу температури в тілі ψ ; величина може змінюватися від 0 до 1 (останній випадок відповідає рівномірному полю температур в тілі).

Коефіцієнт K у співвідношенні (3.6) залежить лише від геометричних властивостей – форми та розміру – тіла. Його називають коефіцієнтом форми. Для тіл простої форми величини K були визначені аналітично

$$K = \left(\frac{R}{\pi}\right)^2, \quad (3.6)$$

для циліндра довжиною l

$$K = \frac{1}{\left(\frac{2,405}{R}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{l}\right)^2}, \quad (3.7)$$

для паралелепіпеда зі сторонами l

$$K = \frac{1}{\left(\frac{\pi}{l_1}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{l_2}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{l_3}\right)^2}, \quad (3.8)$$

При відомому значенні коефіцієнта форми K співвідношення (3.8) є основою для експериментального визначення коефіцієнта температуропровідності матеріалів. Для тіл складної форми на основі співвідношення (3.8) коефіцієнт форми K може бути визначений експериментальним шляхом.

Наближений аналітичний вираз ψ має вигляд

$$\psi = (1 + 1,44B + B^2)^{-1/2}, \quad (3.9)$$

Співвідношення (3.9) може бути використане для оцінки нерівномірності поля температур різних об'єктів; на їх основі

розроблено експериментальні методи визначення коефіцієнта теплопровідності, коефіцієнта тепловіддачі та ін.

4. Для системи, що складається з низки жорстко пов'язаних тіл з різними властивостями, темп охолодження m однозначно визначається сукупністю теплофізичних властивостей цих тіл, їх розмірами та формою, а також умовами охолодження.

Особливий інтерес представляє система, що складається з ядра довільної конфігурації та тонкої оболонки з іншого матеріалу. Для таких умов рівняння енергетичного балансу системи у період регулярного режиму має відносно простий вигляд [91]. На цій основі були запропоновані та набули поширення дуже ефективні методи визначення теплофізичних параметрів різних речовин.

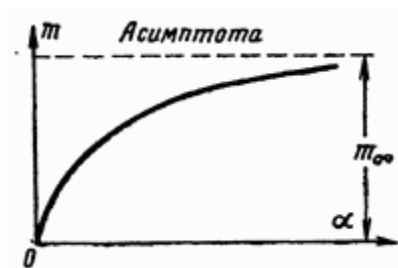


Рисунок 3.3 – Залежність m від α

5. Поняття регулярного режиму застосовується також до тіла з внутрішніми джерелами або стоками теплоти постійної інтенсивності. Відмінність лише тому, що з простому охолодженні закон формулюється для надмірної температури, а за наявності джерел теплоти – для різниці температур при стаціонарному і нестаціонарному режимах.

4 РЕГУЛЯРНИЙ ТЕПЛОВИЙ РЕЖИМ В СИСТЕМІ «РІДИНА-ТВЕРДЕ ТІЛО»

4.1 Регулярний тепловий режим за умов дослідження однофазного середовища. Вільня конвекція

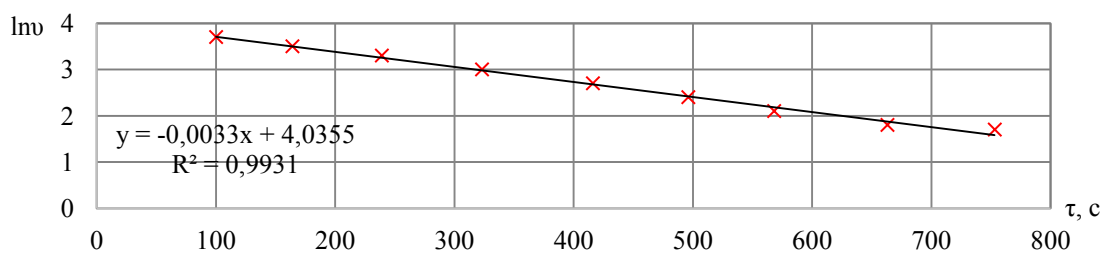
Проведені експериментальні дослідження нестационарного теплообміну в системі «навколишнє середовище I – тіло II», за умов вільної конвекції. Встановлено, що в тілі II, яке складається із рідини і тонкостінної металевої оболонки, мають місце ознаки регулярного теплового режиму, тобто, темп охолодження (нагрівання) тіла II – $m = \text{const}$; коефіцієнт тепловіддачі між водою (навколишнє середовище I) і тонкостінним металевим циліндром практично сталий $\alpha_1 \approx \text{const}$; коефіцієнт нерівномірності розподілу температур в тілі II $\psi \approx \text{const}$ [87].

Це нове уявлення про закономірності теплопереноса в тілі II планується застосовувати для подальшого розвитку експериментально-розрахункового методу в аспекті прогнозування інтенсивності теплообміну в досліджуваних рідинних середовищах з обмеженою інформацією по теплофізичним і реологічним властивостям [1, 87].

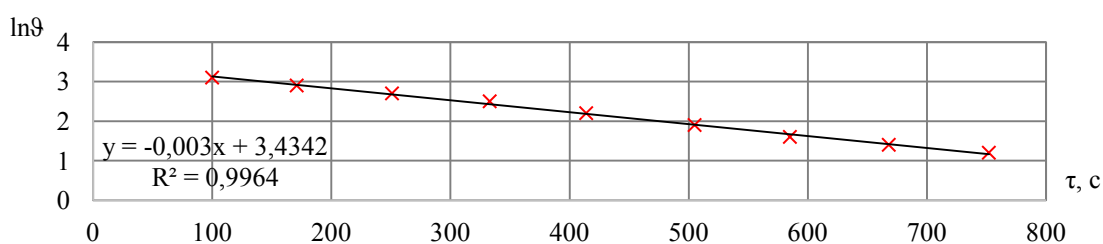
Згідно рис. 4.1 і таблиці 4.1 залежність $\ln(\vartheta) = f(\tau)$ має лінійний характер, що свідчить про наявність регулярного теплового режиму в тілі II в умовах вільної конвекції.

Аналітичне обґрунтування достовірності закономірності лінійної залежності для твердого тіла $\ln \vartheta = f(\tau)$ представлено в [94]. Вихідним в даному випадку є диференціальне рівняння теплопровідності в твердих тілах за умов відсутності внутрішніх джерел теплоти.

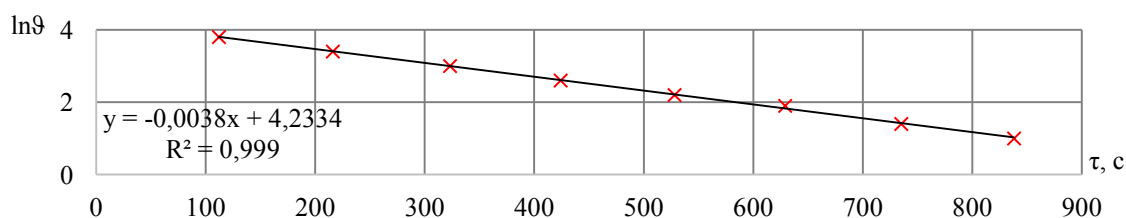
Одержані експериментально лінійні закономірності $\ln \vartheta = f(\tau)$ для рідинних середовищ обмежених тонкостінною циліндричною оболонкою також можна пояснити використовуючи диференціальні рівняння теплопровідності [94], якщо ввести поняття еквівалентного коефіцієнта теплопровідності $\lambda_{\text{екв}}$ і коефіцієнта конвекції $\epsilon_{\text{к}} = \lambda_{\text{екв}}/\lambda$, який характеризує вплив конвекції за умов передачі теплоти від тепловіддаючої до теплосприймаючої поверхні через товстину рідини. Згідно [97] складний процес конвективного теплообміну розглядається як елементарне явище теплопровідності.



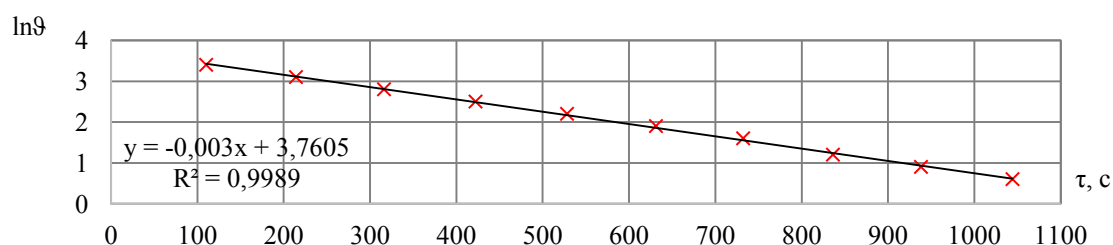
а)



б)



в)



г)

Рисунок 4.1 – Розподіл надлишкової температури в часі: а) цукровий розчин $c = 50\%$ при нагріванні; б) цукровий розчин $c = 50\%$ при охолодженні; в) соняшникова олія при нагріванні; г) соняшникова олія при охолодженні; за умов вільної конвекції

Таблиця 4.1 – Темп охолодження (нагрівання) досліджуємого рідинного середовища за умов вільної конвекції

Досліджуване рідинне середовище	Процес	Функція вигляду $\ln\theta = m \cdot \tau + C$	Коефіцієнт детермінації R^2
Цукровий розчин $c = 50\%$	Нагрівання	$\ln\theta = -0,0033 \cdot \tau + 4,0355$	0,9931
	Охолодження	$\ln\theta = -0,003 \cdot \tau + 3,4342$	0,9964
Соняшникова олія	Нагрівання	$\ln\theta = -0,0038 \cdot \tau + 4,2334$	0,9990
	Охолодження	$\ln\theta = -0,003 \cdot \tau + 3,7605$	0,9989

В нашому експерименті за умов охолодження існує лише теплосприймаюча циліндрична поверхня і тепловіддаюче циліндричне рідинне середовище, за умов нагрівання існує лише тепловіддаюча циліндрична поверхня і теплосприймаюче циліндричне рідинне середовище.

В попередніх публікаціях [98] викладенні і проаналізовані результати досліджень $\lambda_{\text{екв}}$ і $\epsilon_{\text{к}}$ в циліндричному рідинному середовищі огороженому тонкою металевою стінкою.

В твердих тілах за умов регулярного теплового режиму в реальних умовах в зв'язку з деякою зміною температури λ змінюється незначно. В наших дослідах $\lambda_{\text{екв}}$ і $\epsilon_{\text{к}}$ також змінюється незначно, в межах $\pm 6\%$ [1, 87].

На рис. 4.2 – 4.7 для порівняння наводяться експериментальні результати локальних в часі коефіцієнтів тепловіддачі $\bar{\alpha}_1$ та локальних в часі коефіцієнтів нерівномірності розподілу температур $\bar{\Psi}$ для цукрового розчину $c = 50\%$ і соняшникової олії. Обробка здійснюється методом стаціонарного теплообміну досліджуючи весь проміжок часу, беручи різні кроки Δ та змінюючи інтервал часу $\Delta\tau$: в I випадку $\Delta = 50\text{с}$ і $\Delta\tau = 100\text{с}$; в II випадку $\Delta = 90\text{с}$ і $\Delta\tau = 180\text{с}$. Дослідження експериментальних рідин проводяться в однаковому діапазоні температур [87].

Вводяться такі позначення локальних в часі коефіцієнтів тепловіддачі [87]:

$\bar{\alpha}_{1(100)}$ – локальний в часі коефіцієнт тепловіддачі між водою (I-4) і зовнішньою поверхнею тонкостінного металевого циліндра II-3 в діапазоні часу $[\tau_{i+1} - \tau_i] = 100\text{с}$, Вт/(м²·К).

$\bar{\alpha}_{1(180)}$ – локальний в часі коефіцієнт тепловіддачі між водою (I-4) і зовнішньою поверхнею тонкостінного металевого циліндра II-3 в діапазоні часу $[\tau_{i+1} - \tau_i] = 180\text{с}$, Вт/(м²·К).

Вводяться такі позначення локальних в часі коефіцієнтів нерівномірності розподілу температур в тілі II [87]:

$\bar{\Psi}_{(100)}$ – локальний в часі коефіцієнт нерівномірності розподілу температур в тілі II в діапазоні часу $[\tau_{i+1} - \tau_i] = 100\text{с}$.

$\bar{\Psi}_{(180)}$ – локальний в часі коефіцієнт нерівномірності розподілу температур в тілі II в діапазоні часу $[\tau_{i+1} - \tau_i] = 180\text{с}$.

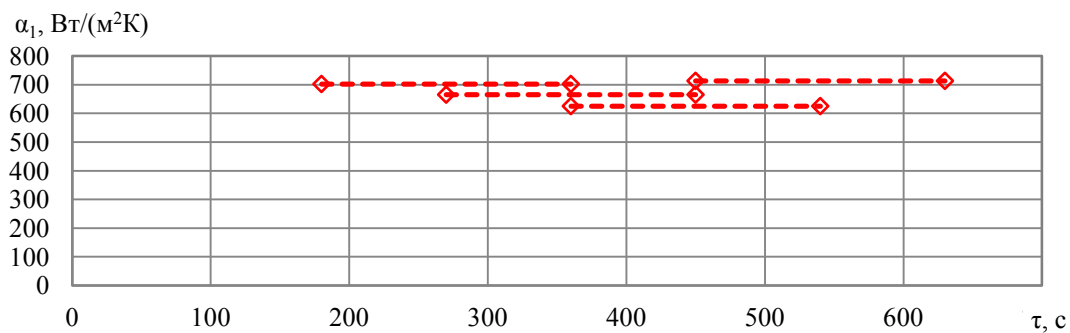


Рисунок 4.2 – Коефіцієнт тепловіддачі $\bar{\alpha}_{1(180)}$ між водою I-4 і зовнішньою поверхнею тонкостінного металевого циліндра II-3 в часі при нагріванні цукрового розчину $c = 50\%$ за умов вільної конвекції

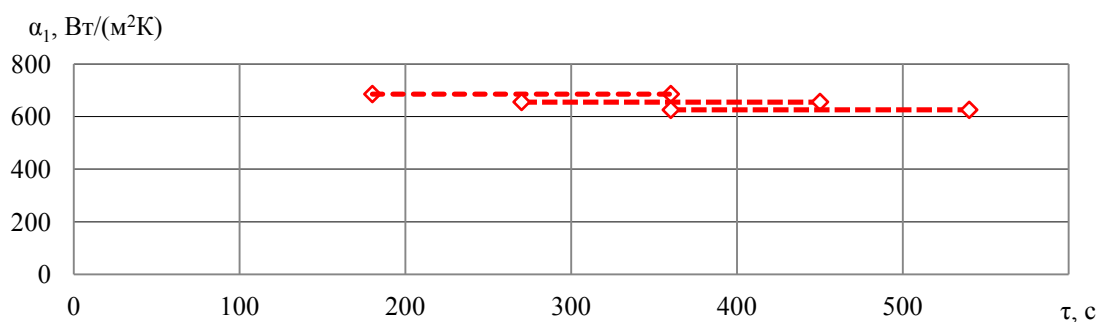


Рисунок 4.3 – Коефіцієнт тепловіддачі $\bar{\alpha}_{1(180)}$ між водою I-4 і зовнішньою поверхнею тонкостінного металевого циліндра II-3 в часі при нагріванні соняшникової олії за умов вільної конвекції

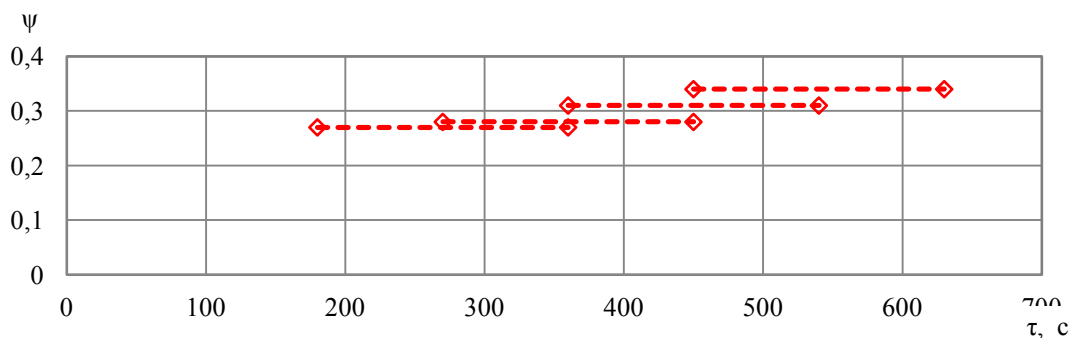


Рисунок 4.4 – Коефіцієнт нерівномірності $\bar{\psi}_{(180)}$ розподілу температур в тілі II в часі при нагріванні цукрового розчину $c = 50\%$ за умов вільної конвекції

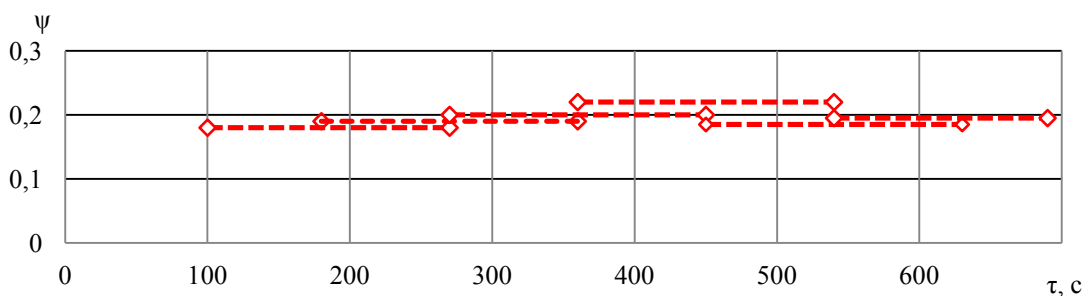
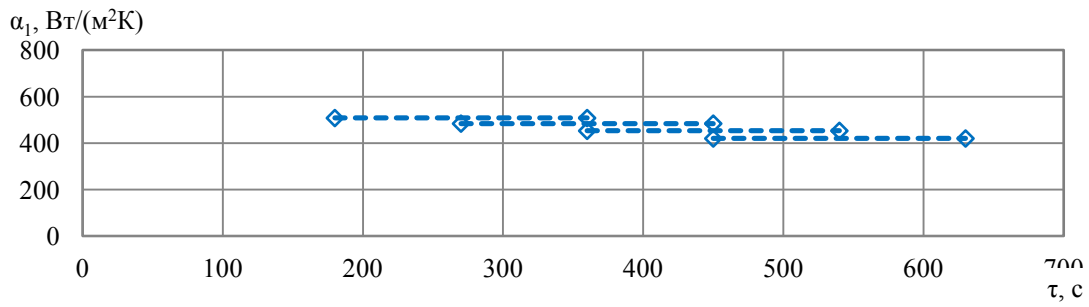
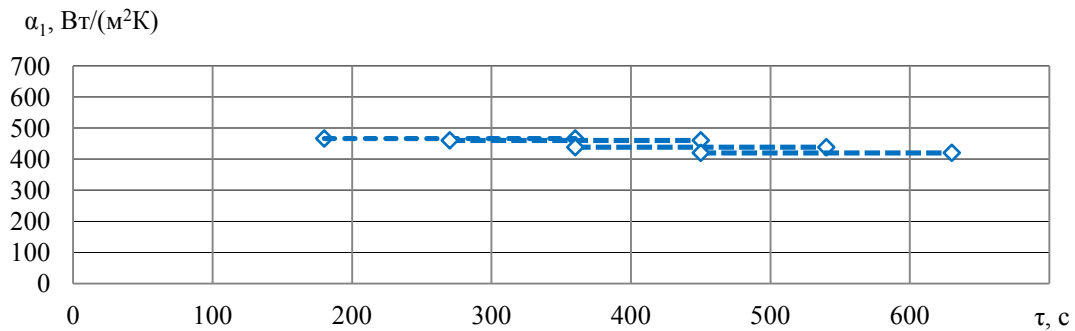


Рисунок 4.5 – Коефіцієнт нерівномірності $\bar{\psi}_{(180)}$ розподілу температур в тілі II в часі при нагріванні соняшникової олії за умов вільної конвекції

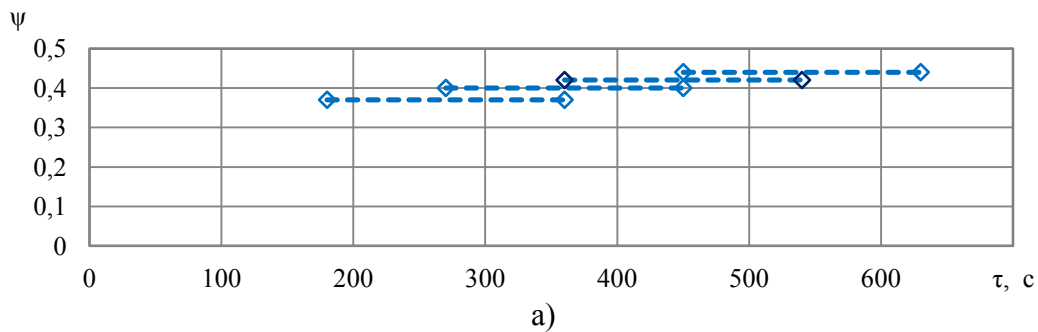


а)

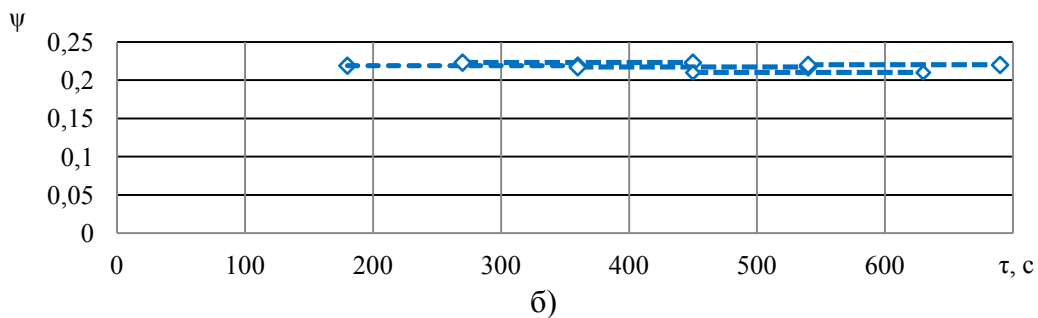


б)

Рисунок 4.6 – Коефіцієнт тепловіддачі $\bar{\alpha}_{1(180)}$ між водою І-4 і зовнішньою поверхнею тонкостінного металевого циліндра ІІ-3 в часі при охолодженні за умов вільної конвекції: а) цукрового розчину $c = 50 \%$; б) соняшникової олії.



а)



б)

Рисунок 4.7 – Коефіцієнт нерівномірності $\bar{\psi}_{(180)}$ розподілу температур в тілі ІІ в часі при охолодженні за умов вільної конвекції: а) цукрового розчину $c = 50 \%$; б) соняшникової олії

З метою аналізу результатів, розрахунки досліджуваного рідинного середовища показані в таблицях 4.2 – 4.7 [1, 87]. В таблицях $\bar{T}_{1дч}$ – середньоінтегральна температура води в діапазоні часу $[\tau_{i+1} - \tau_i] = 100с$ або $[\tau_{i+1} - \tau_i] = 180с$, °C; $\bar{T}_{2дч}$ – середньоінтегральна температура досліджуемого рідинного середовища в діапазоні часу $[\tau_{i+1} - \tau_i] = 100с$ або $[\tau_{i+1} - \tau_i] = 180с$, °C.

Таблиця 4.2 – Результати дослідження нагрівання цукрового розчину $c = 50 \%$, $[\tau_{i+1} - \tau_i] = 100 с$ за умов вільної конвекції

Проміжок часу $\Delta\tau$, с	$\bar{T}_{1дч}$, °C	$\bar{T}_{2дч}$, °C	$\bar{T}_{ст}$, °C	m , c^{-1}	q , кВт/м ²	$\bar{\Psi}_{(100)}$	$\bar{\alpha}_{1(100)}$, Вт/(м ² ·K)
200-300	78,2	52,1	67,4	0,0032	5,6	0,22	777
250-350	77	55	68		4,6	0,23	741
300-400	76,1	57,1	69,2		4,1	0,26	732
350-450	75,3	59,1	69,9		3,7	0,27	700
400-500	74,7	60,8	69,8		3,4	0,28	676
450-550	74,1	62,4	69,8		3,2	0,29	645
500-600	73,6	63,9	70		3,0	0,31	618

Таблиця 4.3 – Результати дослідження нагрівання цукрового розчину $c = 50 \%$, $[\tau_{i+1} - \tau_i] = 180 с$ за умов вільної конвекції

Проміжок часу $\Delta\tau$, с	$\bar{T}_{1дч}$, °C	$\bar{T}_{2дч}$, °C	$\bar{T}_{ст}$, °C	m , c^{-1}	q , кВт/м ²	$\bar{\Psi}_{(180)}$	$\bar{\alpha}_{1(180)}$, Вт/(м ² ·K)
100-270	76,1	53,2	69,2	0,0032	4,8	0,26	804
180-360	75,4	57	69,9		3,8	0,27	746
270-450	74,9	60	69,8		3,1	0,28	702
360-540	74,4	62,6	69,8		2,7	0,31	665
450-630	74,1	64,9	69,8		2,4	0,34	638

Таблиця 4.4 – Результати дослідження нагрівання соняшникової олії, $[\tau_{i+1} - \tau_i] = 100 с$ за умов вільної конвекції

Проміжок часу $\Delta\tau$, с	$\bar{T}_{1дч}$, °C	$\bar{T}_{2дч}$, °C	$\bar{T}_{ст}$, °C	m , c^{-1}	q , кВт/м ²	$\bar{\Psi}_{(100)}$	$\bar{\alpha}_{1(100)}$, Вт/(м ² ·K)
200-300	78,1	49,7	73,3	0,004	3,5	0,17	743
250-350	77,3	53,3	73,2		3,0	0,17	704
300-400	76,8	56,1	73,1		2,7	0,18	673
350-450	76,3	58,5	73		2,4	0,19	664
400-500	75,9	60,8	72,8		2,3	0,21	639
450-550	75,6	62,9	72,7		2,1	0,22	625
500-600	75,2	64,9	72,5		2,0	0,23	604
550-650	74,9	66,8	72,5		1,9	0,23	579

Таблиця 4.5 – Результати дослідження нагрівання соняшникової олії, $[\tau_{i+1} - \tau_i] = 180$ с за умов вільної конвекції

Проміжок часу $\Delta\tau$, с	$\bar{T}_{1дч}$, °C	$\bar{T}_{2дч}$, °C	$\bar{T}_{ст}$, °C	m , с ⁻¹	q , кВт/м ²	$\bar{\psi}_{(180)}$	$\bar{\alpha}_{1(180)}$, Вт/(м ² ·К)
100-270	77,4	51,6	73,7	0,004	2,7	0,18	730
180-360	76,6	56	73,6		2,2	0,18	678
270-450	76,1	59,5	73,6		1,8	0,20	663
360-540	75,6	62,5	73,4		1,6	0,22	625
450-630	75,3	65,1	73,4		1,4	0,19	545

Таблиця 4.6 – Результати дослідження охолодження цукрового розчину $c = 50$ %, $[\tau_{i+1} - \tau_i] = 180$ с за умов вільної конвекції

Проміжок часу $\Delta\tau$, с	$\bar{T}_{1дч}$, °C	$\bar{T}_{2дч}$, °C	$\bar{T}_{ст}$, °C	m , с ⁻¹	q , кВт/м ²	$\bar{\psi}_{(180)}$	$\bar{\alpha}_{1(180)}$, Вт/(м ² ·К)
100-270	20,2	38,2	27,6	0,0029	4,5	0,41	654
180-360	21,1	34,7	26,4		2,7	0,39	567
270-450	21,8	32,6	25,8		2,0	0,37	508
360-540	22,2	31,1	25,8		1,5	0,4	484
450-630	22,7	30	25,8		1,2	0,42	453
540-720	23	29,1	25,7		0,9	0,44	420

Таблиця 4.7 – Результати дослідження охолодження соняшникової олії, $[\tau_{i+1} - \tau_i] = 180$ с за умов вільної конвекції

Проміжок часу $\Delta\tau$, с	$\bar{T}_{1дч}$, °C	$\bar{T}_{2дч}$, °C	$\bar{T}_{ст}$, °C	m , с ⁻¹	q , кВт/м ²	$\bar{\psi}_{(180)}$	$\bar{\alpha}_{1(180)}$, Вт/(м ² ·К)
100-270	21,4	40,9	25,2	0,0032	2,5	0,19	507
180-360	22	37,2	25,2		1,5	0,21	486
270-450	22,3	35	25,1		1,0	0,22	466
360-540	22,6	33,4	25,3		0,8	0,22	460
450-630	22,8	32,2	24,9		0,6	0,22	438
540-720	23	31,2	24,8		0,5	0,22	420

Існування залежностей $\psi = \text{const}$ і $\alpha_1 = \text{const}$ для твердих тіл пояснюється, як наслідок реалізації лінійності залежності $\text{Ln}\vartheta = f(\tau)$, тобто $m = \text{const}$ [91, 97]. Таке ж обґрунтування $\psi = \text{const}$ і $\alpha_1 = \text{const}$ для досліджуваного рідинного середовища в тонкій металевій циліндричній оболонці можна зробити якщо прийняти до уваги, що складний процес теплообміну розглядається, як елементарне явище теплопровідності [97].

Експериментально встановлено, що в дослідній системі мають місце ознаки регулярного теплового режиму, тобто, темп охолодження (нагрівання) тіла $m = \text{const}$; коефіцієнт тепловіддачі між водою (I-4) і зовнішньою поверхнею тонкостінного металевого циліндра II-3 в процесі регулярного теплового режиму практично сталий $\bar{\alpha}_1 \approx \text{const}$; коефіцієнт нерівномірності розподілу температур в тілі II практично

сталий $\bar{\psi} \approx \text{const}$. Ознаки регулярного теплового режиму представлені в табл. 4.8 [87].

Таблиця 4.8 – Порівняння досліджень Г. М. Кондратьєва з власними дослідженнями

Дослідження Г.М. Кондратьєва [91]	Власні дослідження
1. Ознаки регулярного теплового режиму	
Тіло	Тіло II
1.1 Темп охолодження (нагрівання) тіла – m	
m = const	m = const
1.2 Коефіцієнт тепловіддачі α_1 на межі НС - тіло	
Залишається сталим $\alpha_1 = \text{const}$	Незначно змінюється $\alpha_1 \approx \text{const}$; $\frac{\alpha_1 - \alpha_{\text{ср.а}}}{\alpha_{\text{ср.а}}} \cdot 100 \% = \pm 13 \dots 16 \%$ – нагрівання; $\frac{\alpha_1 - \alpha_{\text{ср.а}}}{\alpha_{\text{ср.а}}} \cdot 100 \% = \pm 14 \dots 25 \%$ – охолодження
1.3 Коефіцієнт нерівномірності розподілу температури в тілі ψ	
Залишається сталим $\psi = \text{const}$	Незначно змінюється $\psi \approx \text{const}$; $\frac{\psi - \psi_{\text{ср.а}}}{\psi_{\text{ср.а}}} \cdot 100 \% = \pm 10 \dots 17 \%$ – нагрівання; $\frac{\psi - \psi_{\text{ср.а}}}{\psi_{\text{ср.а}}} \cdot 100 \% = \pm 10 \dots 18 \%$ – охолодження
2. Температура навколишнього середовища \bar{T}_1 в процесі охолодження (нагрівання)	
Залишається сталою $\bar{T}_1 = \text{const}$	Змінюється на $3 \dots 6^\circ\text{C}$, $\bar{T}_1 \neq \text{const}$

Отже, темп охолодження (нагрівання) тіла II m – характеризує весь процес охолодження (нагрівання) в твердому тілі і в системі рідинне середовище в тонкій металевій оболонці в діапазоні часу, коли реалізується регулярний тепловий режим. Коефіцієнти $\bar{\alpha}_1$ і $\bar{\psi}$ – не змінюються у всьому діапазоні регулярного теплового режиму на протязі охолодження – нагрівання. Коефіцієнти $\bar{\alpha}_1$ і $\bar{\psi}$ також можна розраховувати в локальних діапазонах часу на протязі регулярного теплового режиму $\bar{\alpha}_1 = f(\tau)$, $\bar{\psi} = f(\tau)$, $\bar{\alpha}_1 \approx \text{const}$, $\bar{\psi} \approx \text{const}$ [1].

Нам не відомі дослідження інших авторів з аналогічними дослідженнями m, α_1 , ψ . В тілі II, складовими частинами якого являються рідина і метал, за умов охолодження (нагрівання) реалізується регулярний тепловий режим, який характерний для твердих тіл, набору твердих тіл [1].

В наших дослідженнях вперше встановлено і вперше використовується поняття регулярного теплового режиму за умов охолодження (нагрівання) рідинного середовища в тонкій металевій циліндричній оболонці. В дослідженнях [98] в розрахунковій схемі із

теорії регулярного теплового режиму прийнято експоненціальний закон зміни перегріву мідного ядра відносно дослідної рідини, тобто згідно [91].

На основі експериментальних результатів, які наведені і проаналізовані вище для дослідного рідинного середовища в цілому всього діапазону регулярного теплового режиму охолодження (нагрівання) встановлено $F = \text{const}$, $\alpha_1 = \text{const}$, $m = \text{const}$ [87].

Для визначення коефіцієнта тепловіддачі $\overline{\alpha}_2$ між внутрішньою поверхнею тонкостінного металевго циліндра П-3 і досліджуваним рідинним середовищем П-2 методом РТР використовуємо залежність [1, 87]

$$\overline{\alpha}_2 = \left(\frac{F \cdot \Delta T}{Q} - \frac{F \cdot \overline{\psi}}{m \cdot C_1} \right)^{-1}, \quad (4.1)$$

де Q – тепловий потік, що сприймається досліджуваним рідинним середовищем локально в часі, Вт; $\overline{\Delta T}$ – середній загальний температурний напір, °С; F – площа тонкостінного металевго циліндра, м²; C_1 – питома теплоємність навколишнього середовища (води), Дж/(кг·К); $\frac{F \cdot \overline{\psi}}{m \cdot C_1}$ – термічний опір тепловіддачі між навколишнім середовищем (водою) і стінкою тонкостінного металевго циліндра [91], (м²·К)/Вт.

Коефіцієнт тепловіддачі $\overline{\alpha}_2$ за відомою залежністю

$$\overline{\alpha}_2 = [R_{\text{заг}} - R_1 - R_{\text{ст}}]^{-1} \quad (4.2)$$

де $R_{\text{заг}}$ – термічний опір теплопередачі між навколишнім середовищем (водою) і досліджуваним рідинним середовищем, (м²·К)/Вт; R_1 – термічний опір тепловіддачі між навколишнім середовищем (водою) і тонкою металевгою стінкою П₃, (м²·К)/Вт; $R_{\text{ст}} = \delta_{\text{ст}}/\lambda_{\text{ст}}$ – термічний опір теплопередачі через тонку металеву стінку складає від загального 1 % і в даному випадку не враховується, (м²·К)/Вт; $\delta_{\text{ст}}$ – товщина стінки тонкого металевго циліндра, м; $\lambda_{\text{ст}}$ – теплопровідність стінки тонкого металевго циліндра, Вт/(м·К).

Коефіцієнт тепловіддачі $\overline{\alpha}_2$ із застосуванням відомого критеріального рівняння для великого об'єму [92, 93].

Розбіжність $\overline{\alpha}_2$ і $\overline{\alpha}_2'$ складає до 10 %, розбіжність $\overline{\alpha}_2$ і $\overline{\alpha}_2''$ складає до 40 %. Отже, визначення $\overline{\alpha}_2$ із застосуванням залежностей для великого об'єму не підходить. Визначення $\overline{\alpha}_2$ із використанням параметрів РТР може бути застосоване для обробки експериментальних даних [87].

4.2 Регулярний тепловий режим за умов дослідження однофазного середовища. Вимушена конвекція

Дослідження теплообміну в умовах вимушеної конвекції проводяться на експериментальній установці, схема якої показана на рис.4.8: 1 – ізольована зовнішня посудина, 2 – навколишнє середовище (вода), 3 – ізольована металева кришка, 4 – пропелерна мішалка, 5 – внутрішня тонкостінна посудина, 6 – досліджуване рідинне середовище, 7 – запобіжник перетоку газового середовища над поверхнею води і поверхнею дослідної рідини. В якості досліджуваного рідинного середовища в експерименті використовується фугат при його охолодженні (нагріванні). Температури навколишнього середовища 2 і досліджуваного рідинного середовища 6 заміряються по висоті у 10-ти точках.

Лабораторний експериментальний стенд (рис. 4.8) [1].

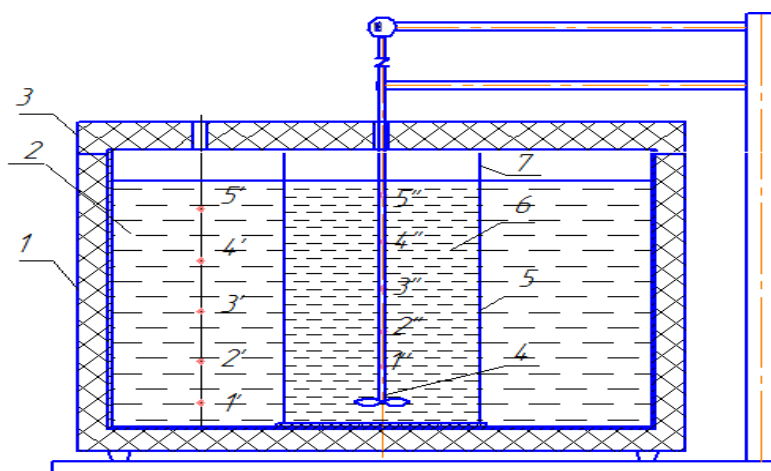


Рисунок 4.8 – Схема експериментальної установки за умов вимушеної конвекції

Частота обертання n мішалки змінюється в межах 32-120 об/хв; діаметр пропелерної мішалки – 0,08 м.

Дослідження проводяться на цукрових розчинах масової концентрації сухих речовин $c = 60, 70 \%$ при обертах пропелерної мішалки 26, 34, 54 об/хв, яким відповідають умовні характерні швидкості на крайній точці пропелера $w = 0,22, 0,28, 0,45$ м/с. На рис. 4.9, для прикладу, наводяться результати обробки експериментальних даних цукрового розчину $c = 70 \%$.

Умовна характерна швидкість руху рідини $\bar{w} = 0,5 \cdot w_{\max}$; $w_{\max} = (2 \cdot \pi \cdot n \cdot d_M) / 60$ – швидкість на крайній точці пропелера, м/с; n – кількість обертів пропелерної мішалки, об/хв; d_M – діаметр пропелерної мішалки, м. В розрахунках прийнято, що характерна швидкість руху рідини дорівнює половині лінійної швидкості руху крайньої точки пропелера мішалки w_{\max} [1, 4].

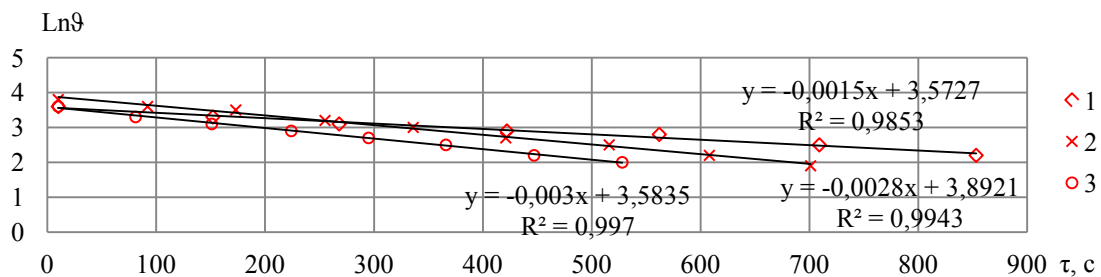


Рисунок 4.9 – Зміна надлишкової температури за часом в умовах нагрівання цукрового розчину $c = 70 \%$ при таких швидкостях: 1 – 0,22 м/с; 2 – 0,28 м/с; 3 – 0,45 м/с

Криві (рис.4.9) представляють результати апроксимації залежності логарифму надлишкової осередненої температури дослідної рідини у внутрішній посудині від часу $\text{Ln}\theta = m \cdot \tau + C$: m – темп охолодження (нагрівання), C – константа. В таблицях представлені результати обробки експериментальних даних на цукровому розчині масовою концентрацією $c = 60 \%$ (табл.4.11) і $c = 70 \%$ (табл.4.12).

Таблиця 4.11 – Результати обробки експериментальних даних на цукровому розчині масовою концентрацією $c = 60 \%$

Кількість обертів мішалки n , об/хв	Процес	Функція вигляду $\text{Ln}\theta = m \cdot \tau + C$	Коефіцієнт детермінації R^2
0,22	Нагрівання	$y = -0,0032x + 3,4244$	$R^2 = 0,9900$
0,28		$y = -0,0024x + 3,4959$	$R^2 = 0,9888$
0,45		$y = -0,0025x + 3,5823$	$R^2 = 0,9854$
0,22	Охолодження	$y = -0,002x + 3,5125$	$R^2 = 0,9969$
0,28		$y = -0,0039x + 3,2886$	$R^2 = 0,9960$

Таблиця 4.12– Результати обробки експериментальних даних на цукровому розчині масовою концентрацією $c = 70 \%$

Кількість обертів мішалки n , об/хв	Процес	Функція вигляду $\text{Ln}\theta = m \cdot \tau + C$	Коефіцієнт детермінації R^2
26	Нагрівання	$y = -0,0015x + 3,5727$	$R^2 = 0,9853$
34		$y = -0,0028x + 3,8921$	$R^2 = 0,9943$
54		$y = -0,003x + 3,5835$	$R^2 = 0,9970$
26	Охолодження	$y = -0,0013x + 3,39$	$R^2 = 0,9916$
34		$y = -0,0024x + 2,8491$	$R^2 = 0,9860$
54		$y = -0,0027x + 3,2828$	$R^2 = 0,9990$

Коефіцієнти тепловіддачі локальні в часі $\bar{\alpha}_1$ знаходяться [1, 87] і середні значення для всього діапазону часу дослідження $\bar{\alpha}'_1$. Відхилення між даними значеннями представлені в табл. 4.13 – 4.14. Для цукрового розчину $c = 60 \%$ в умовах охолодження (нагрівання) під час вимушеної конвекції при різних швидкостях руху дане відхилення складає до 30 %, для цукрового розчину $c = 70 \%$ – до 19 %.

Таблиця 4.13 – Коефіцієнти тепловіддачі $\bar{\alpha}_1$ цукрового розчину $c = 60 \%$

Кількість обертів мішалки n , об/хв	Процес	Середнє значення $\bar{\alpha}'_1$ для всього діапазону часу дослідження, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	Відхилення $\bar{\alpha}_1$ від $\bar{\alpha}'_1$, %
26	Нагрівання	783	5-25
34		837	8-26
54		826	3-29
26	Охолодження	806	5-30
34		794	5-35

Таблиця 4.14 – Коефіцієнти тепловіддачі $\bar{\alpha}_1$ цукрового розчину $c = 70 \%$

Кількість обертів мішалки n , об/хв	Процес	Середнє значення $\bar{\alpha}'_1$ для всього діапазону часу дослідження, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	Відхилення $\bar{\alpha}_1$ від $\bar{\alpha}'_1$, %
26	Нагрівання	623	5-12
34		741	5-14
54		989	15-25
26	Охолодження	663	1-17
34		589	5-19
54		676	1-22

Знаходиться значення $\bar{\psi}$ локально в часі [1, 87] і середні значення для всього діапазону часу дослідження $\bar{\psi}'$, відхилення між вказаними

значеннями представлені в табл. 4.15 – 4.16. Для дослідних рідин в умовах охолодження (нагрівання) під час вимушеної конвекції при різних швидкостях руху дане відхилення складає до 27 %

Таблиця 4.15 – Коефіцієнти нерівномірності цукрового розчину $c = 60 \%$

Кількість обертів мішалки n , об/хв	Процес	Середнє значення $\bar{\psi}'$ для всього діапазону часу дослідження, Вт/(м ² ·К)	Відхилення $\bar{\psi}$ від $\bar{\psi}'$, %
26	Нагрівання	0,39	1-11
34		0,27	1-6
54		0,26	3-29
26	Охолодження	0,24	5-30
34		0,35	11-27

Таблиця 4.16 – Коефіцієнти нерівномірності цукрового розчину $c = 70 \%$

Кількість обертів мішалки n , об/хв	Процес	Середнє значення $\bar{\psi}'$ для всього діапазону часу дослідження, Вт/(м ² ·К)	Відхилення $\bar{\psi}$ від $\bar{\psi}'$, %
26	Нагрівання	0,22	5-17
34		0,26	4-26
54		0,27	5-19
26	Охолодження	0,26	2-27
34		0,29	11-25
54		0,36	12-30

Виявлені ознаки підтверджують існування регулярного теплового режиму за умов теплообміну в цукровому розчині під час вимушеної конвекції.

4.3 Регулярний тепловий режим за умов дослідження двофазного середовища

Значна кількість галузей промисловості застосовує етиловий спирт. Економічність виробництва етилового спирту суттєво залежить від енергоефективності використовуваного устаткування, витратами різних видів енергії, застосуванням заходів з енергозбереження протягом усього процесу, а також розробкою енерготехнології. Утилізація

післяспиртової барди крім важливого економічного ефекту, має також велике екологічне значення [1, 87].

Рідка фаза барди (мікрофільтрат) – це розчин органічних речовин світло-коричневого кольору (фугат). Вона складається з: пептидів, амінокислот, неутілізованого цукру, органічних кислот і води. Загальний вміст органічних речовин оцінюватися за стандартними показниками хімічним споживанням кисню і біологічним споживанням кисню [88, 89, 96].

Свіжа зернова барда — це водна суспензія з невеликою кількістю розчинених і завислих сухих речовин: в ній міститься 6...8 % сухих речовин, з яких 3...4 % складають розчинені речовини, а решта – нерозчинна завись. Зазвичай застосовується технологія упарювання барди на випарних станціях. Однак вартість випарних станцій і відповідно всього обладнання для утилізації, досить висока. Процес випарування потребує значних енергетичних витрат, а також не повністю вирішує екологічні проблеми [4, 96].

Все частіше барду використовують для виробництва біогазу, основаному на анаеробному бродінні, коли барда подається у спеціальні ємності разом з анаеробними бактеріями, які переробляють поживні речовини барди на біогаз. Біогаз може спалюватися в котельнях, а утворений осад – як добриво в агропромисловості. Перевагою цього методу переробки є відносно низькі експлуатаційні витрати, недоліком – необхідність використання метантенків великих об'ємів, що потребує значних земельних ділянок, так як процес переробки барди анаеробними бактеріями дуже повільний [1].

В роботі пропонується встановити можливість існування регулярного теплового режиму в фугаті (двофазній рідині), яка розміщена в тонкостінному металевому циліндрі. Рідину розміщено у металевій циліндричній тонкостінному оболонці з термічним опором $1,1 \cdot 10^{-4}$ (м²·К)/Вт. Шуканими величинами є темп охолодження (нагрівання) m , коефіцієнти тепловіддачі між навколишнім середовищем (водою) і тонкою металевою циліндричною стінкою $\bar{\alpha}_1$.

На рис. 4.10 зображено характеристику зміни середньооб'ємної надлишкової температури $\ln \theta = f(\tau)$ для фугату [96] за умов вимушеної конвекції.

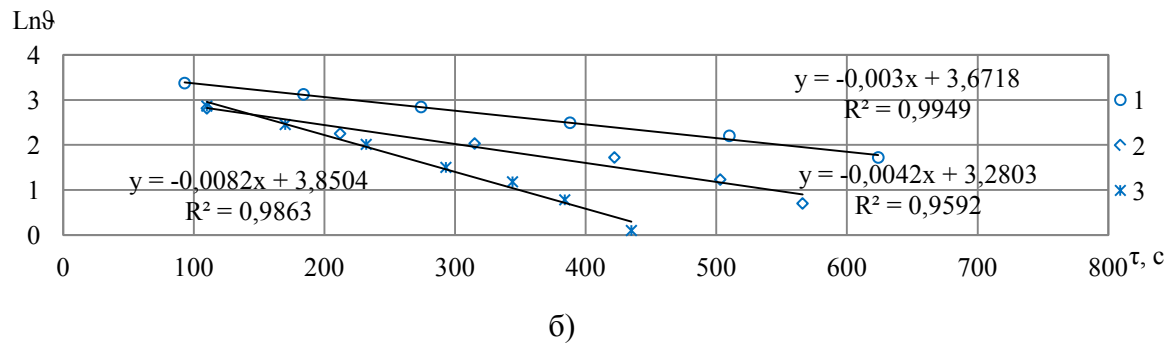
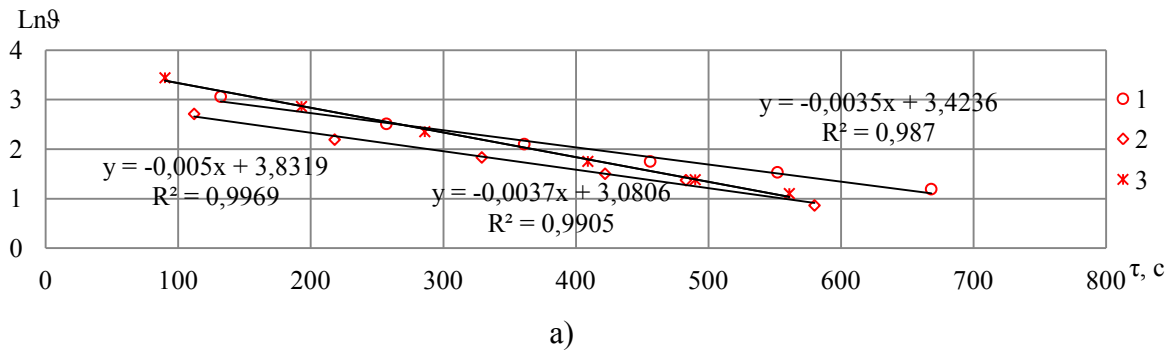


Рисунок 4.10 – Зміна надлишкової температури за часом при нагріванні (а) і охолодженні (б) фугату при таких обертах пропелерної мішалки: 1 – $n = 32$ об/хв; 2 – $n = 62$ об/хв; 3 – $n = 120$ об/хв

В табл. 4.9 – 4.10 наводяться експериментальні результати для фугату в умовах його охолодження і нагрівання в умовах вимушеної конвекції на експериментальному стенді [4]. Крива представляє апроксимацію дослідних даних надлишкової температури у вигляді функції

$$\text{Ln}\theta = m \cdot \tau + C, \quad (4.3)$$

де $\theta = |\bar{T}_1 - \bar{T}_2|$ – надлишкова середньооб'ємна температура фугату \bar{T}_2 в циліндричній посудині зі сторони навколишнього середовища \bar{T}_1 , °C; m – темп охолодження (нагрівання), C – стала рівняння. В табл. 4.9 наводяться дані темпу охолодження (нагрівання) фугату, в табл. 4.10 – густої маси фугату [96].

Таблиця 4.9 – Темп охолодження (нагрівання) фугату за умов вимушеної конвекції

Кількість обертів мішалки n , об/хв	Процес	Темп охолодження (нагрівання) m , c^{-1}	Стала рівняння C	Коефіцієнт детермінації R^2
32	Нагрівання	0,0036	3,5616	0,9722-0,9929
120		0,0051	3,882	
32	Охолодження	0,0031	3,6837	0,9744-0,9932
120		0,0077	3,6908	

Таблиця 4.10 – Темп охолодження (нагрівання) густої маси фугату за умов вимушеної конвекції

Кількість обертів мішалки n, об/хв	Процес	Темп охолодження (нагрівання) m, c ⁻¹	Стала рівняння C	Коефіцієнт детермінації R ²
40	Нагрівання	0,0031	3,1246	0,984-0,9937
54		0,0046	3,3139	
40	Охолодження	0,0011	3,0233	0,9823-0,992
54		0,003	3,0874	

Залежність $\text{Ln}\vartheta = -m \cdot \tau + C$ одержана аналітично і в результаті експерименту.

Тоді температурне поле буде описуватися

$$\vartheta = A_1 \cdot U_1 \cdot e^{-m\tau}. \quad (4.4)$$

Це відношення показує, що зміна надлишкової температури як у просторі, так і у часі залежить від початкового розподілу температури. Логарифмуючи останнє рівняння та опускаючи індекси, отримуємо:

$$\text{Ln}\vartheta = \text{Ln}(AU) - m \cdot \tau \quad (4.5)$$

або

$$\text{Ln}\vartheta = -m \cdot \tau + C(x, y, z). \quad (4.6)$$

З рівняння (4.6) слідує, що натуральний логарифм надлишкової температури всіх точок тіла змінюється у часі за лінійним законом [91, 92, 96].

Після диференціювання обох частин рівняння (4.5) у часі отримаємо

$$\frac{1}{\vartheta} \frac{d\vartheta}{d\tau} = -m = \text{const}. \quad (4.7)$$

Якщо експериментально визначити зміну надлишкової температури ϑ по часу τ і побудувати залежність в напівлогарифмічних координатах, то очевидно, що темп охолодження в стадії регулярного режиму знаходиться [1, 87]:

$$\frac{\text{Ln}\vartheta_1 - \text{Ln}\vartheta_2}{\tau_2 - \tau_1} = m = \text{const}. \quad (4.8)$$

Залежність (4.8) отримана аналітично і експериментально для твердих тіл [87, 88].

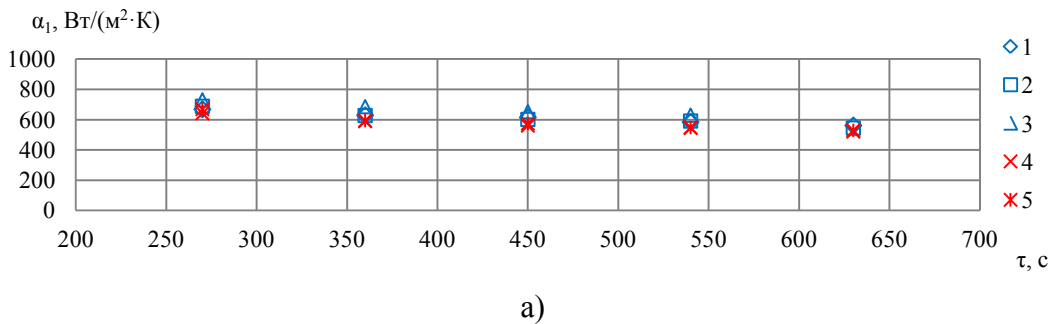
Видно, що $(\text{Ln}\vartheta_1 - \text{Ln}\vartheta_2)$ безрозмірна величина

$$\text{Ln}\vartheta_1 - \text{Ln}\vartheta_2 = \text{Ln} \frac{\vartheta_1}{\vartheta_2}. \quad (4.9)$$

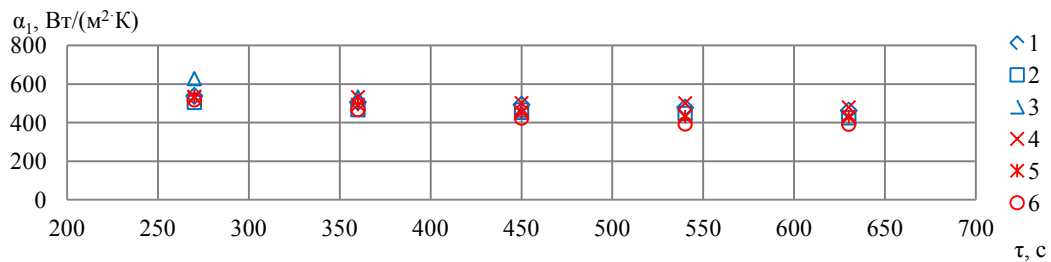
Характеризуючи дані в табл. 4.9 – 4.10 для фугату під час його охолодження і нагрівання середня стала рівняння С знаходиться в межах 3,6873-3,7218, для густої маси фугату – в межах 3,055-3,2193.

Встановлено, що на проміжку часу, в якому досліджується охолодження (нагрівання) фугату у тонкій металевій циліндричній оболонці за умов вимушеної конвекції, витримується лінійна залежність $\ln(\vartheta) = f(\tau)$, яка характерна для регулярного теплового режиму в твердому тілі [91].

Коефіцієнти тепловіддачі знаходяться локально в часі $\bar{\alpha}_1$ за умов вимушеної конвекції.



а)

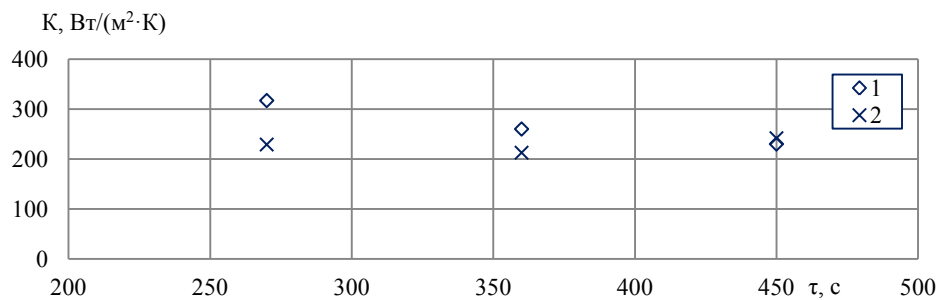


б)

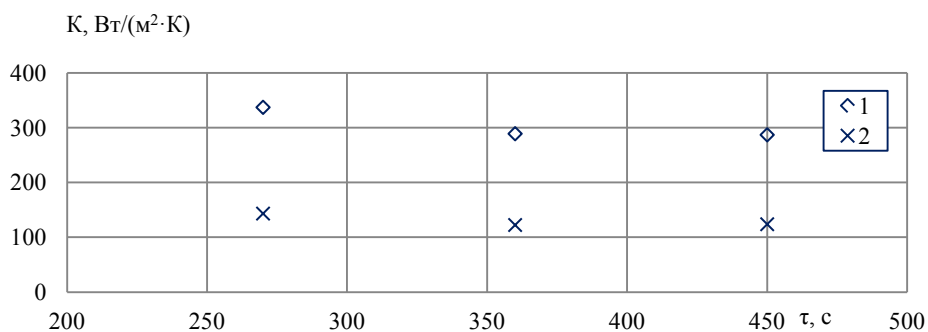
Рисунок 4.11 – Коефіцієнт тепловіддачі в часі при нагріванні (а) і охолодженні (б) фугату при таких обертах пропелерної мішалки: 1 – $n = 32$ об/хв; 2 – $n = 62$ об/хв; 3 – $n = 120$ об/хв; густої маси фугату 4 – $n = 40$ об/хв; 5 – $n = 54$ об/хв; 6 – $n = 104$ об/хв

З рис. 4.11 (а) коефіцієнт тепловіддачі $\bar{\alpha}_1$ фугату і густої маси фугату знаходиться в межах 600 Вт/(м²·К), при охолодженні – 450 Вт/(м²·К). Виявлені ознаки підтверджують існування регулярного теплового режиму при дослідженні фугату у тонкій металевій циліндричній оболонці під час його охолодження (нагрівання) в умовах вимушеної конвекції [1, 96].

В роботі проводиться порівняння експериментального коефіцієнту теплопередачі для води і фугату під час їхнього охолодження (нагрівання) в умовах вимушеної конвекції (рис. 4.12 – 4.13).

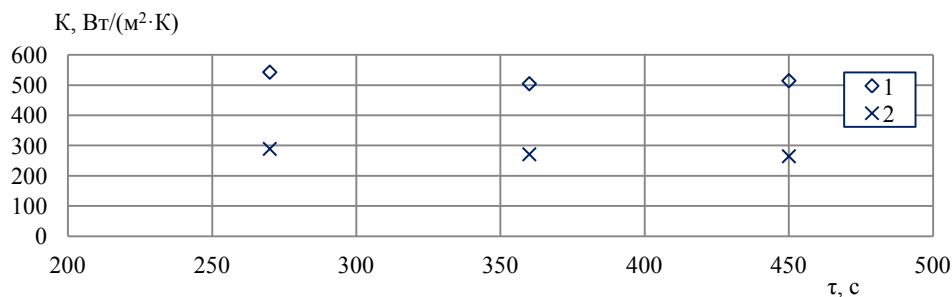


а)

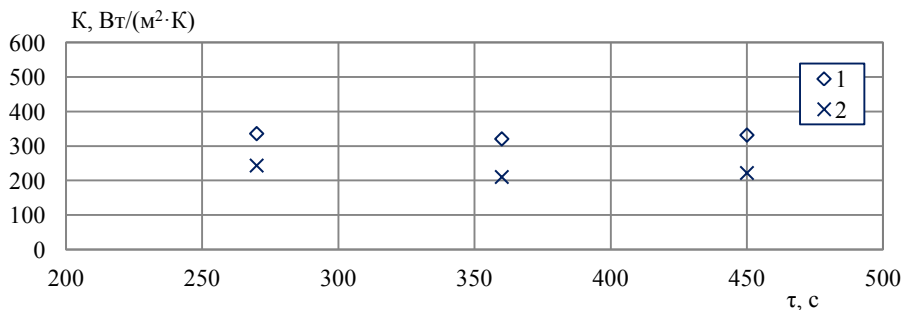


б)

Рисунок 4.12 – Коефіцієнт теплопередачі в часі в умовах нагрівання (а) і охолодження (б) при обертах пропелерної мішалки $n = 32$ об/хв: 1 – вода-вода, 2 – вода-фугат, за умов вимушеної конвекції



а)



б)

Рисунок 4.13 – Коефіцієнт теплопередачі в часі в умовах нагрівання (а) і охолодження (б) при обертах пропелерної мішалки $n = 62$ об/хв: 1 – вода-вода, 2 – вода-фугат, за умов вимушеної конвекції

Після проведення механічної сепарації на тверду і рідку складову розчинені залишки крохмалю, цукру і дріжджів залишаються в рідкій фракції – фугаті. Вони складають до 30 % від загального обсягу твердих речовин в барді. В основному це тверді частинки розміром менше 0,2 мм і розчинені речовини» На наш погляд викладене вище пояснює зниження інтенсивності тепловіддачі в системі «вода – фугат», в порівнянні з системою «вода – вода» [1, 96].

4.4 Регулярний тепловий режим за умов дослідження багатофазного середовища

Встановлений регулярний тепловий режим в системі «навколишнє середовище I – тіло II», де тіло II – модельні рідини в тонкій металевій циліндричній оболонці (див. розділ 4) [1, 87].

Робочим середовищем в реакторі біогазової установки в загальному випадку є рідкі неоднорідні суміші органічних відходів різних переробних виробництв, рослинництва та тваринництва [1].

Відходи тваринництва та птахівництва – гній та послід містять значний потенціал для виробництва біогазу. Відходи агропромислового комплексу – побічні продукти виробництва пива, крохмалю, цукру та алкоголю, часто використовуються в якості корму для тварин і мають застосування в БГУ. Біогаз з енергетичних культур знаходить все більшого застосування у біогазовому виробництві в Україні [1].

Дослідження проводяться з метою встановлення існування регулярного теплового режиму в системі «навколишнє середовище I – тіло II», де тіло II – багатофазне середовище в тонкій металевій циліндричній оболонці.

В роботі досліджуються такі багатофазні середовища: суміш, яка подається промисловий реальний біогазовий реактор (по тексту – субстрат); курячий послід вологістю $W = 90\%$ свіжий; курячий послід $W = 88\%$ свіжий; курячий послід $W = 90\%$ зброджений 5 діб; курячий послід $W = 90\%$ зброджений 13 діб за умов вимушеної конвекції.

Багатофазне середовище включає в себе тверду фазу – тверді частинки, рідку фазу – колоїдна рідина і газоподібну фазу – бульбашки газу (рис. 4.14) [1].

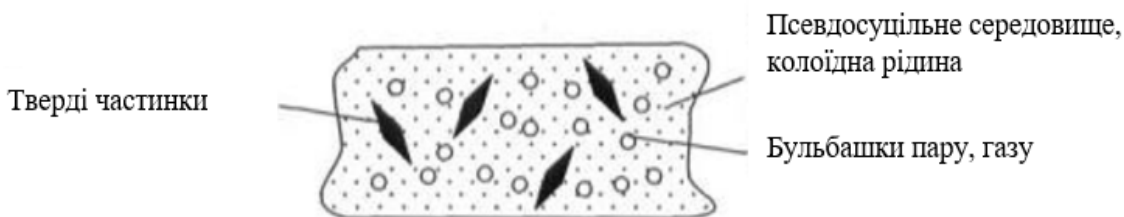


Рисунок 4.14 – Багатофазне середовище

Вперше встановлено існування регулярного теплового режиму за умов охолодження (нагрівання) «багатофазного середовища». Це підтверджується сталістю темпу охолодження (нагрівання) – $m = \text{const}$ (рис. 4.15) [1].

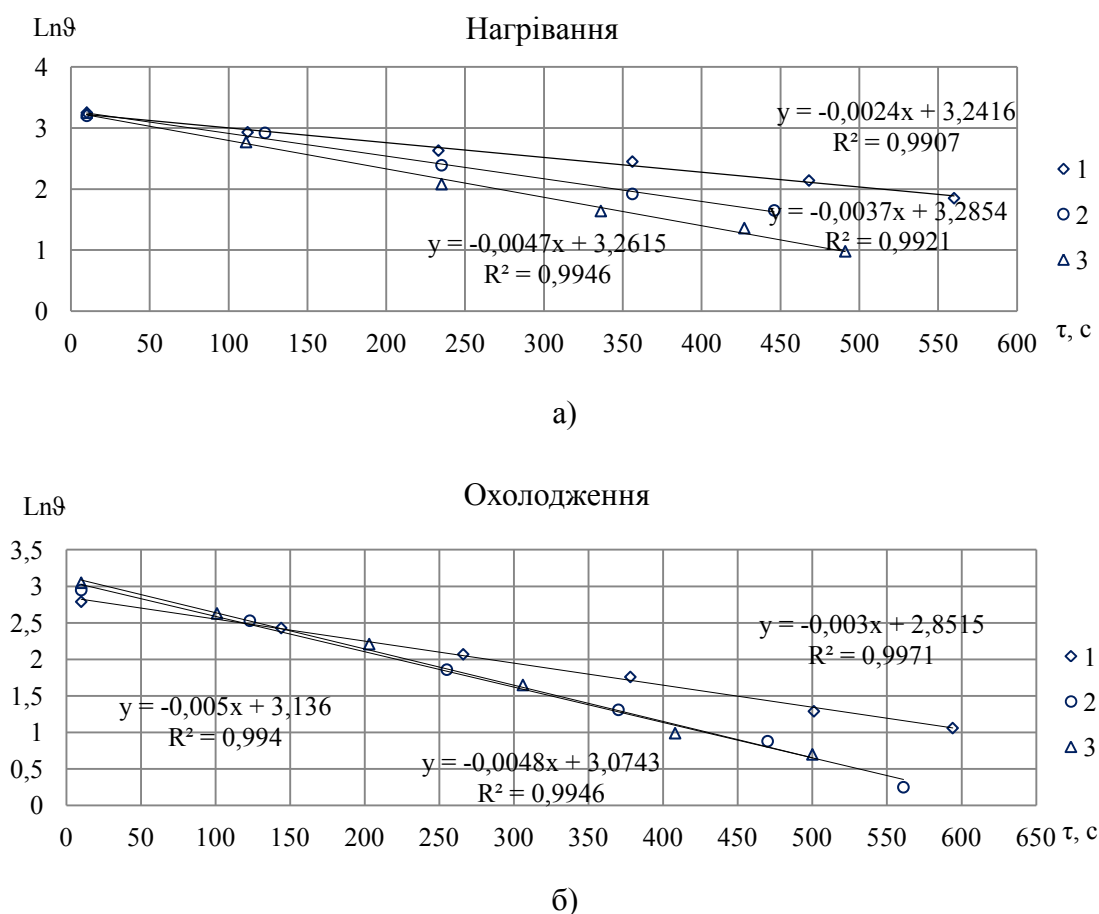


Рисунок 4.15 – Зміна надлишкової температури за часом в умовах нагрівання (а) і охолодження (б) субстрату за умов вимушеної конвекції при таких швидкостях \bar{w} : 1 – 0,28 м/с; 2 – 0,6 м/с; 3 – 0,82 м/с

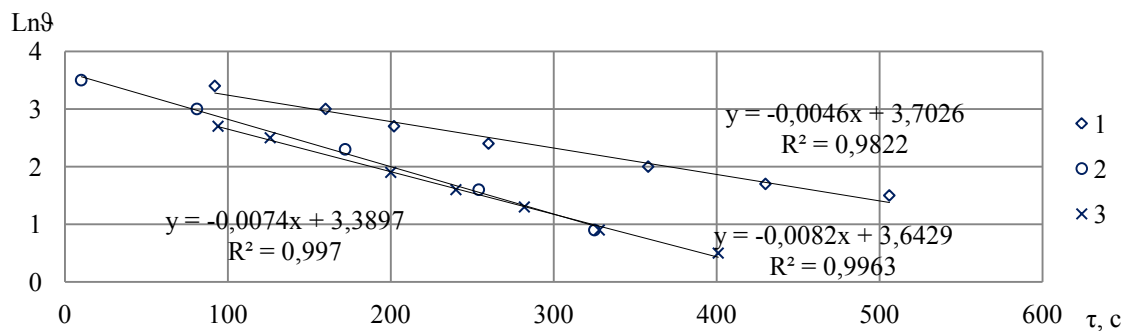
Умовна характерна швидкість руху рідини $\bar{w} = 0,5 \cdot w_{\text{max}}$ змінювалась від 0,28 до 0,82 м/с; $w_{\text{max}} = (2 \cdot \pi \cdot n \cdot d_M) / 60$ – швидкість на крайній точці пропелера, м/с; n – кількість обертів пропелерної мішалки, об/хв; d_M – діаметр пропелерної мішалки, м. В розрахунках

прийнято, що характерна швидкість руху рідини дорівнює половині лінійної швидкості руху крайньої точки пропелера мішалки w_{\max} [1, 4].

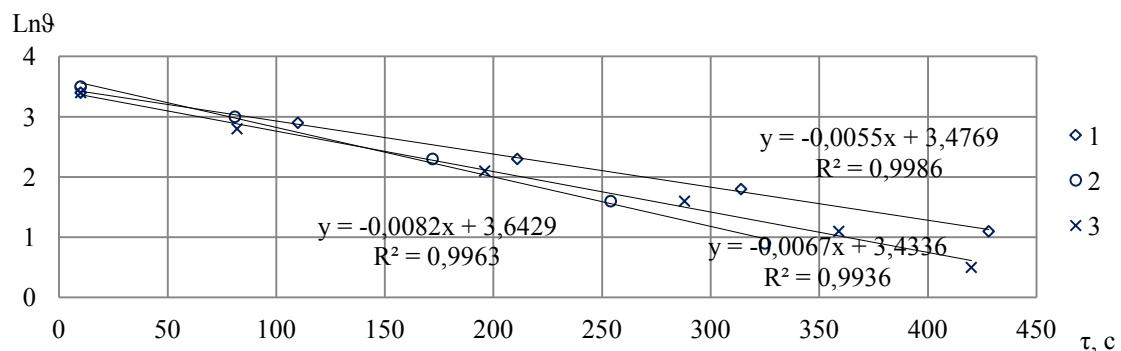
Таблиця 4.11 – Результати дослідження субстрату

Умовна характерна швидкість, м/с	Напрямок теплообміну	Функція вигляду $\text{Ln}\vartheta = m \cdot \tau + C$	Коефіцієнт детермінації R^2
0,39	Нагрівання	$\text{Ln}\vartheta = -0,0026 \cdot \tau + 3,2746$	0,989
0,55		$\text{Ln}\vartheta = -0,0037 \cdot \tau + 3,2854$	0,9921
0,63		$\text{Ln}\vartheta = -0,0047 \cdot \tau + 3,2615$	0,9946
0,39	Охолодження	$\text{Ln}\vartheta = -0,0031 \cdot \tau + 2,8782$	0,995
0,55		$\text{Ln}\vartheta = -0,0048 \cdot \tau + 3,0743$	0,9946
0,63		$\text{Ln}\vartheta = -0,0051 \cdot \tau + 3,1548$	0,9919

В таблиці 4.11 представляються результати апроксимації залежності логарифму надлишкової осередненої температури субстрату у тонкостінному металевому циліндрі від часу τ у вигляді функції $\text{Ln}\vartheta = m \cdot \tau + C$, де ϑ – надлишкова температура, m – темп охолодження (нагрівання), C – константа [1].



а)



б)

Рисунок 4.16 – Зміна надлишкової температури за часом в умовах нагрівання (а) і охолодження (б) за умов вимушеної конвекції курячого посліду $W = 88$ при таких швидкостях \bar{w} : 1 – 0,28 м/с; 2 – 0,6 м/с; 3 – 0,82 м/с

В наведених дослідженнях експериментально встановлене існування регулярного теплового режиму за умов охолодження

(нагрівання) у тонкостінному металевому циліндрі, заповненого багатофазним середовищем. Таким чином, встановлено: темп охолодження (нагрівання) тіла II (багатофазне середовище в тонкій металевій циліндричній оболонці $m = \text{const}$; коефіцієнт тепловіддачі між водою (I-4) і зовнішньою поверхнею тонкостінного металевого циліндра II-3 в процесі регулярного теплового режиму практично сталий $\bar{\alpha}_1 \approx \text{const}$; коефіцієнт нерівномірності розподілу температур в тілі II практично сталий $\bar{\psi} \approx \text{const}$ [1].

4.5 Регулярний тепловий режим за умов дослідження гетерогенного рідкого середовища

Якщо тверде тіло занурити в середовище з більш високою температурою, між ними одразу починається процес теплообміну і тіло починає прогріватися. Спочатку тіло нагрівається ззовні, а з часом прогріватися по всьому об'ємі. Даний процес буде тривати до того часу, як температура тіла не досягне температури середовища, в яке занурене, тоді настає тепла рівновага [12, 97].

Під час прогріву тіла, теплота йде на підвищення його ентальпії. При охолодженні тіла навпаки, його ентальпія зменшується, а виділена теплота передається в навколишнє середовище, відбувається нестационарний процес.

Під нестационарними процесами теплопровідності розуміються теплові процеси в яких температурне поле змінюється в часі і є функцією від часу. Дані процеси характеризуються постійною зміною ентальпії тіла, в результаті чого воно нагрівається або охолоджується. Відповідно, під стаціонарними процесами теплопровідності розуміються теплові процеси, в яких температурне поле не змінюється в часі [91-92].

Основною задачею нестационарної теплопровідності є знаходження залежності зміни температури та кількості переданої теплоти в часі для будь – якої точки тіла.

В роботі [91] були встановлені загальні закономірності процесу і вирішенні конкретні практичні завдання. В теорії теплопровідності для простих тіл існують точні рішення при різній початковій температурі.

В часі, процес охолодження (нагрівання) тіла можна розділити на такі етапи: етап неупорядкованого (ірегулярного) процесу і етап

регулярного режиму. Іррегулярний процес характеризується сильним впливом на температурне поле початкових умов теплового стану тіла. Потім вплив початкових особливостей температурного поля, а також його подальша зміна згладжується, процес із етапу неупорядкованого переходить на етап впорядкованого – "регулярного". У регулярному тепловому режимі закон зміни температурного поля в часі набуває просту експонентну форму. Ці висновки можна вивести з аналізу рішення рівняння теплопровідності для охолодження твердого ізотропного тіла в середовищі з постійною температурою [91].

Теорія регулярного теплового режиму (РТР) привертає до себе велику увагу за рахунок встановлення більш простої аналітичної залежності між температурним полем тіла і параметрами, які описують вплив навколишнього середовища на тіло. А також РТР можна застосовувати до тіл будь – якої форми і складу («систем») [91]. В свою чергу відомі теорії теплопровідності застосовують тільки для простих тіл або їх частин.

Існують різні методи по визначенню інтенсивності теплообміну в багатofазних та багатокomпонентних середовищах [4, 15, 88], але не всі методи можна використати для середовищ з обмеженою інформацією про теплофізичні властивості. На сьогоднішній день існує обмежена кількість праць по РТР в системі «рідина – тонка металева циліндрична поверхня з невеликим термічним опором – в'язка рідина (складна рідка суміш)». В [4] показана можливість застосування методу регулярного теплового режиму для дослідження інтенсивності тепловіддачі до в'язких рідин та органічних сумішей. Вивчався теплообмін в системі «циліндричний об'єм заповнений водою – металева стінка – суміш». Для більш глибокого вивчення теорії регулярного теплового режиму необхідне подальше накопичення експериментальних даних з різними рідинами і сумішами, у вказаній системі.

Проведення експерименту здійснюється таким чином [4]. В металеву ємність I, об'ємом 700 мл, наливається кисле молоко, що представляє собою густу масу без розділення на компоненти, з температурою 10°C; в експериментальну установку в кільцевий об'єм III – гаряча вода в кількості 2400 мл, з температурою 80°C. Ємність I поміщається в експериментальну установку, накривається ізольованою кришкою і знаходиться там до зрівнянь температур $\pm 5^\circ\text{C}$ в обох рідинах. Відповідно, в гарячу та холодну рідини поміщаються

термопари для фіксування температур кожні 10 секунд, які підключенні до комп'ютера та значення яких записуються одразу в програму Excel. В кінці експерименту отримуємо розділення кислого молока на сироватку і «сирну масу». Під час досліду відбувається природний нестационарний процес, вода охолоджується, а кисле молоко нагрівається. Тепло від води до кислого молока передається через тонку металеву циліндричну поверхню II. Кільцевий об'єм III утворений циліндричною стінкою II та ізолюваною зовні циліндричною стінкою IV.

На рисунку 4.17 відображено теплообмін в системі «вода в кільцевому об'ємі – тонка циліндрична металева стінка – складна рідка суміш в циліндричному об'ємі».

Під час експерименту проводиться вимірювання температур у зовнішній посудині в п'яти точках та у внутрішній посудині вздовж теплообмінної поверхні в чотирьох точках.

Було виявлено, що залежність $\ln(\theta) = f(\tau)$ для охолодження системи «вода в кільцевому об'ємі – циліндрична металева стінка – складна рідка суміш в циліндричному об'ємі» витримується для теорії регулярного теплового режиму, який спостерігається при розрахунку для осереднених показників термопар [91, 97].

Для визначення теплових потоків проводиться осереднення температур по висоті теплообмінної поверхні в момент часу [4].

Також було проведено аналогічне експериментальне дослідження для системи «вода в кільцевому об'ємі – циліндрична металева стінка – вода в циліндричному об'ємі».

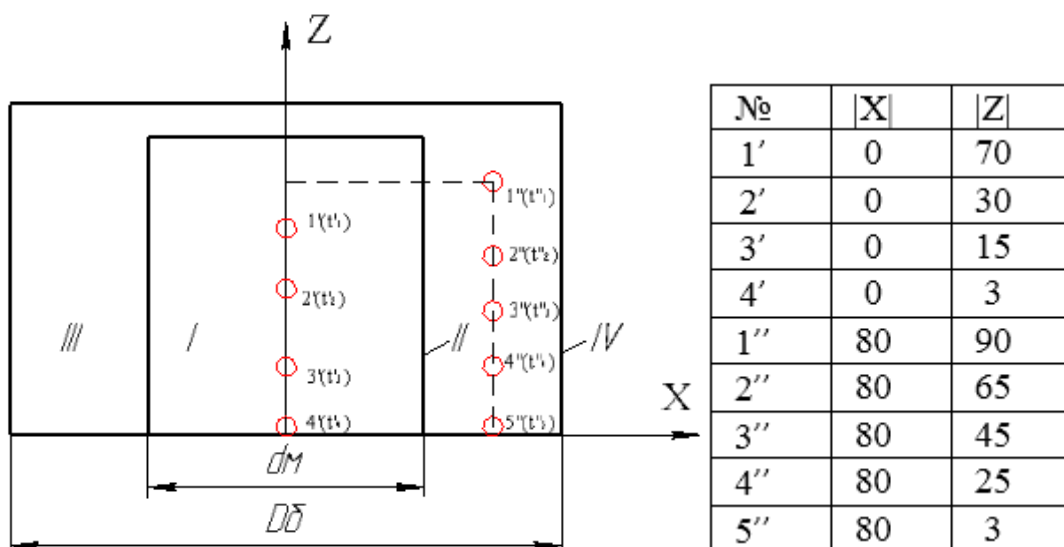


Рисунок 4.17 – Базовий елемент експериментальної установки

На рисунках 4.18 і 4.19 зображено зміну логарифму надлишкової температури води та кислого молока від часу, відповідно. З них бачимо, що зміна середньої температури відбувається за законом регулярного теплового режиму [91].

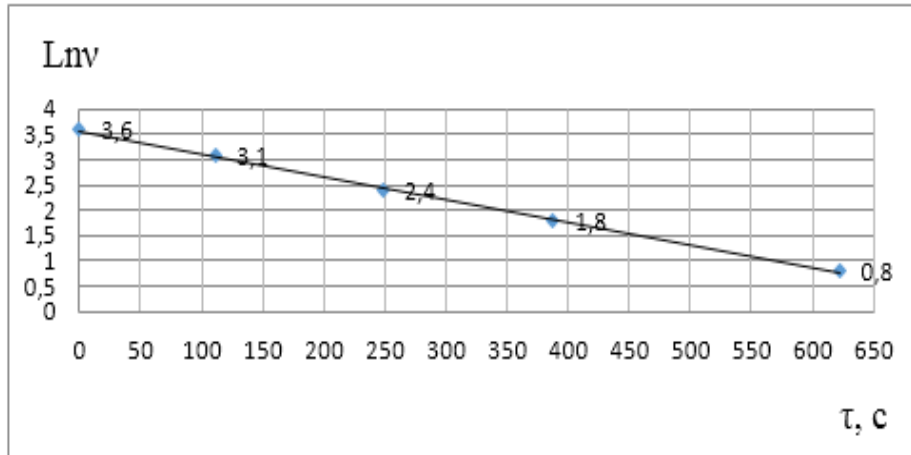


Рисунок 4.18 – Розподіл надлишкової температури за часом в воді

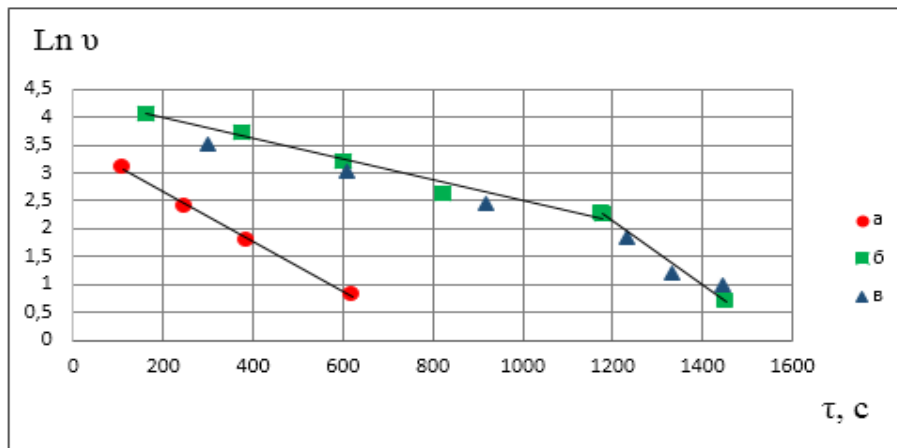


Рисунок 4.19 – Розподіл надлишкової температури за часом для: а – води; б – кислого молока I серії дослідів; в – кислого молока II серії дослідів.

Характеризуючи розподіл надлишкової температури в воді з рисунку 4.18, бачимо чіткий лінійний темп охолодження за часом. На рисунку 4.19 для I та II серії дослідів темп охолодження зменшується на ділянці 1100 – 1200 с, це відбувається процес розділення кислого молока на сироватку і «сирну масу».

Методика обробки дослідів (рис. 4.20). На експериментальній залежності зміни середньої температури грійного теплоносія $t_{\text{сер1}}(\tau)$ і натурної суміші (вода) $t_{\text{сер2}}(\tau)$ в часі вибирається проміжок часу. В

досліді вибирається три ділянки, де маємо час $\Delta\tau_1$, $\Delta\tau_2$, $\Delta\tau_3$. Для цих ділянок визначаються $\bar{\Delta t}$, \bar{t}_1 , \bar{t}_2 , $K_{\text{екс}}$. Досліджується весь проміжок часу, розраховуючи різні ділянки.

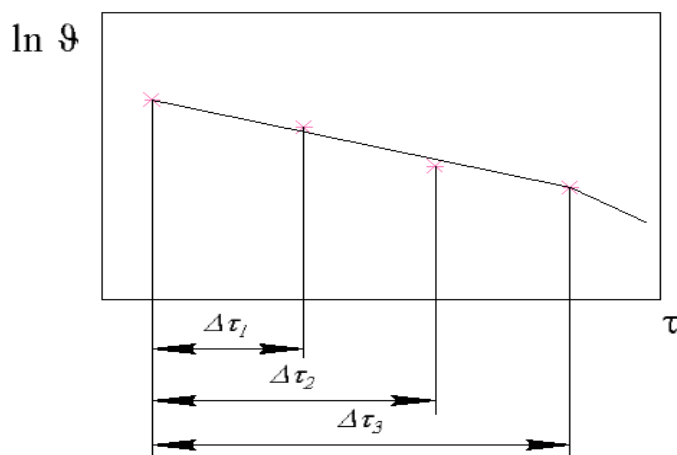


Рисунок 4.20 – Обробка результатів

В таблиці 4.12 представлені розрахункові значення експериментів для системи «вода в кільцевому об'ємі – циліндрична металева стінка – вода в циліндричному об'ємі». В процесі обробки експериментів прийнято: I ділянка з $\Delta\tau_1 = (0 - 111)$ с, II ділянка з $\Delta\tau_2 = (0 - 388)$ с, III ділянка з $\Delta\tau_3 = (0 - 622)$ с.

Таблиця 4.12 – Експериментальні значення для системи «вода в кільцевому об'ємі – циліндрична металева стінка – вода в циліндричному об'ємі»

№ досліду	q' , кВт/м ²	$K_{\text{експ}}$, Вт/(м ² ·К)	m , (с ⁻¹)
I ділянка	16,1	294	0,0045
II ділянка	8,2	273	0,0045
III ділянка	6,1	220	0,0045

В таблиці 4.13 представлені розрахункові значення експериментів для системи «вода в кільцевому об'ємі – тонка циліндрична металева стінка – складна рідка суміш в циліндричному об'ємі» для I серії

дослідів. В процесі обробки експериментів прийнято: I ділянка з $\Delta\tau_1 = (0 - 215)$ с, II ділянка з $\Delta\tau_2 = (0 - 441)$ с, III ділянка з $\Delta\tau_3 = (0 - 663)$ с.

Таблиця 4.13 – Експериментальні значення для системи «вода в кільцевому об’ємі – тонка циліндрична металева стінка – складна рідка суміш в циліндричному об’ємі»

№ досліду	q' , кВт/м ²	$K_{\text{експ}}$, Вт/(м ² ·К)	m , (с ⁻¹)
I ділянка	5,5	112	0,0021
II ділянка	5,6	134	0,0021
III ділянка	4,9	144	0,0021

Теплота, що сприймається холодним теплоносієм (кислим молоком – сумішшю «сироватка + сирна маса»), кДж

$$Q' = M' \cdot C_p' \cdot \Delta t'_{\text{сер}}, \quad (4.10)$$

де M' , C_p' — маса та питома теплоємність гарячого і холодного теплоносіїв, відповідно.

Різниця температур, осереднених по висоті теплообмінної поверхні у внутрішній посудині

$$\Delta t'_{\text{сер}} = t'_{\text{сер1}} - t'_{\text{сер2}}, \quad (4.11)$$

де $t'_{\text{сер1}}$, $t'_{\text{сер2}}$ – осереднена по висоті теплообмінної поверхні температура у внутрішній порожнині в початковий і кінцевий момент часу експерименту, відповідно.

Питомий тепловий потік, який сприймається холодним теплоносієм, кВт/м²

$$q' = \frac{Q'}{F_{\text{то}} \cdot \Delta\tau}. \quad (4.12)$$

де $F_{\text{то}}$ – площа теплообмінної поверхні, м²; $\Delta\tau$ – проміжок часу, який досліджується, с.

В таблицях 4.12 і 4.13, темп охолодження (нагрівання) рідини m розрахований за методикою Кондратьєва Г.М. [91].

Порівнюючи експериментальні дослідження темпу охолодження кислого молока та води, бачимо різницю в 33 – 47 %.

Аналізуючи рисунок 4.19 виявлено, що залежність $\ln(\vartheta) = f(\tau)$ для охолодження системи «вода в кільцевому об'ємі – тонка циліндрична металева стінка – складна рідка суміш в циліндричному об'ємі», характерна для регулярного теплового режиму, який спостерігається у твердих тілах різної форми [91].

На однаковому етапі $\tau = (1100 - 1200)$ с, для кривих I та II серії дослідів кислого молока, очевидне різке падіння темпу охолодження.

Відома доцільність використання методів регулярного теплового режиму за умов нестационарних теплових процесів в системах «навколишнє середовище – тверде тіло (набір твердих тіл)» для визначення теплофізичних параметрів твердих тіл та тепловіддачі.

Досліджена система «вода в кільцевому об'ємі – тонка циліндрична металева стінка – складна рідка суміш в циліндричному об'ємі» в умовах нестационарних теплових процесів на предмет можливості реалізації регулярного теплового режиму в названій системі, зі складною сумішшю.

За результатами досліджень встановлено, що регулярний тепловий режим має місце до тих пір, поки в складній суміші не починається суттєва перебудова її структури, тобто багатокomпонентної суміші (кислого молока) в двофазну систему (сироватка + сирна маса).

Отримані експериментальні дані встановлюють доцільність застосування теорії регулярного теплового режиму для визначення інтенсивності теплообміну до в'язких рідин.

5 ІНТЕНСИВНІСТЬ ТЕПЛООБМІНУ МЕТОДОМ РЕГУЛЯРНОГО ТЕПЛОВОГО РЕЖИМУ

5.1 Коефіцієнт тепловіддачі рідинного середовища за умов вільної конвекції

В роботі [87] встановлено ознаки регулярного теплового режиму в досліджуваній системі. За умов дослідження теплообміну в тілі II (рідина+тверде тіло) цікавість з декількох позицій становить інтенсивність теплообміну між стінкою і досліджуваним рідинним середовищем.

Ці дослідження нами заплановані з метою виявлення зв'язків між складовими тіла II та інтенсивністю теплообміну в рідинному середовищі, яке знаходиться в складі тіла II. Заплановані дослідження становлять цікавість з погляду регулярного теплового режиму, оскільки досліджень теплообміну в рідинах в обмеженому об'ємі недостатньо. Тобто заплановані дослідження цікаві в двох аспектах: інтенсивність теплообміну в рідинах в обмеженому об'ємі (в об'ємах близьких до обмежених) і зв'язок між інтенсивністю теплообміну та показниками регулярного теплового режиму [100].

Пропонується [100] перевірити можливість застосування методів регулярного теплового режиму нестационарної теплопровідності для прогнозування інтенсивності теплообміну між внутрішньою поверхнею тонкостінного металевого циліндра II-3 і досліджуваним рідинним середовищем II-2 з відомою інформацією про теплофізичні властивості в системі «навколишнє середовище I – тіло II» [1].

На рисунку 5.1 показано схему теплообміну в системі «навколишнє середовище I – тіло II», де навколишнє середовище (1') – вода I-4, навколишнє середовище (1) – тонкостінний металевий циліндр II-3, рідинне тіло (2) – досліджуване рідинне середовище.

Встановлено, що в системі «навколишнє середовище I – тіло II» виконуються ознаки регулярного теплового режиму. Про це свідчить сталість темпу охолодження (нагрівання) в досліджуваному рідинному середовищі [91].

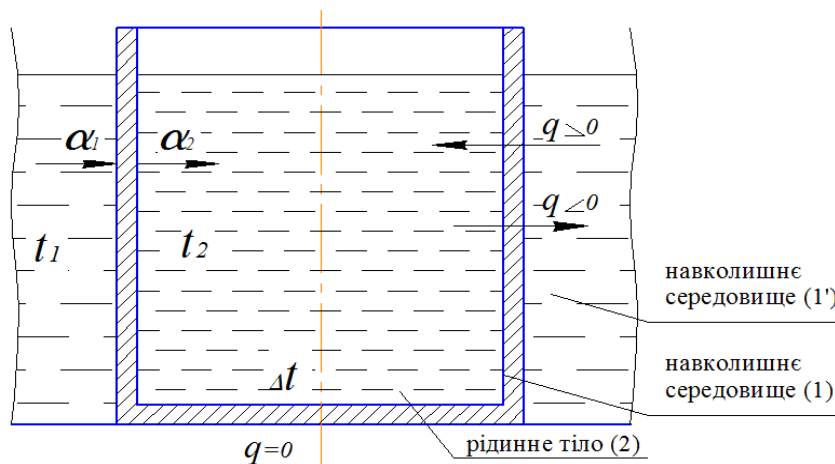


Рисунок 5.1 – Схема теплообміну досліджуваного рідинного середовища з навколишнім середовищем

З використанням отриманих експериментальних даних розраховуються коефіцієнти тепловіддачі $\bar{\alpha}_2^{\text{PTR}}$ методом регулярного теплового режиму за умов охолодження (нагрівання) в діапазоні регулярного теплового режиму. Цей діапазон в часі $\tau_1 - \tau_n$ (τ_1 – початок PTR, τ_n – кінець експериментального дослідження в межах PTR). У вказаному діапазоні охолодження – нагрівання визначається середнє значення коефіцієнтів тепловіддачі $\bar{\alpha}_1$ між водою (навколишнє середовище) і тілом II та коефіцієнтів нерівномірності розподілу температур в тілі II $\bar{\psi}$ для всього діапазону. Крім того, визначаються локальні коефіцієнти $\bar{\alpha}_1$ та $\bar{\psi}$ в обмежених діапазонах часу $\tau_{1i} - \tau_{1(n+i)}$ [1, 100].

Для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі $\bar{\alpha}_2^{\text{PTR}}$ необхідно визначити середні температури води \bar{T}_1 та досліджуваного рідинного середовища \bar{T}_2 . Температура \bar{T}_1 потрібна для визначення теплофізичних властивостей води для розрахунку інтенсивності тепловіддачі $\bar{\alpha}_1$; \bar{T}_2 – для визначення питомої теплоємності C_2 досліджуваного рідинного середовища [100].

За умови $F = \text{const}^*$, $\alpha_1 \approx \text{const}^*$, $C(T) \approx \text{const}^*$, $m = \text{const}$ для досліджуваного рідинного середовища і $K = \text{var}$ отримуємо залежність для визначення коефіцієнта тепловіддачі методом регулярного теплового режиму (PTR) [1, 100]

$$\bar{\alpha}_2^{\text{ptr}} = \frac{1}{\frac{1}{k_{\text{експ}}} - \frac{F \cdot \bar{\psi}}{m \cdot C_1}}, \quad (5.1)$$

де $K_{\text{експ}} = Q/(F \cdot \Delta T)$ – експериментальний коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м²·К); Q – тепловий потік, що сприймається досліджуваним

рідинним середовищем, Вт; $\overline{\Delta T}$ – середній температурний напір, °С; F – площа тонкостінного металевго циліндра, м²; C_1 – питома теплоємність навколишнього середовища (води), Дж/(кг·К).

Для розрахунку $\overline{\alpha}_2^{\text{РТР}}$ методом регулярного теплового режиму показники m , $\overline{\alpha}_1$ і $\overline{\psi}$ розраховуються для всього діапазону досліджень, коефіцієнт теплопередачі K – окремо для кожної дослідної ділянки [100].

Коефіцієнт тепловіддачі розрахунково-експериментальним методом (РЕМ) визначається таким чином

$$\overline{\alpha}_2^{\text{рем}} = \frac{1}{\frac{1}{k_{\text{експ}}} - \frac{1}{\alpha_1} - \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}}} \quad (5.2)$$

де $\delta_{\text{ст}}$ – товщина стінки тонкого металевго циліндра П₃, м; $\lambda_{\text{ст}}$ – теплопровідність стінки тонкого металевго циліндра П₃, Вт/(м·К).

Коефіцієнт тепловіддачі $\overline{\alpha}_2$ із застосуванням критеріального рівняння (КРТ) [92-94] визначається за формулою

$$\overline{\alpha}_2^{\text{крт}} = \frac{Nu_2 \cdot \lambda_2}{H}, \quad (5.3)$$

де Nu_2 – критерій Нуссельта; H – визначальний розмір, висота П₃, м; λ_2 – коефіцієнт теплопровідності досліджуваного рідинного середовища, Вт/(м·К).

Коефіцієнти тепловіддачі $\overline{\alpha}_2^{\text{крт}}$ визначаються за відомим критеріальним рівнянням стаціонарного режиму для «великого об'єму» [97] $\overline{Nu}_2 = 0,76 \cdot (Gr_2 \cdot Pr_2)_h^{0,25} \cdot \left(\frac{Pr_p}{Pr_{\text{ст}}}\right)^{0,25}$ в умовах ламінарного режиму $10^3 < (Gr \cdot Pr_p) < 10^8$. У критеріальному рівнянні: $Gr_2 = (g \cdot \beta_2 \cdot \overline{\Delta t} \cdot H^3) / \nu^2$ – критерій Грасгофа; g – прискорення вільного падіння, м/с²; β_2 – коефіцієнт температурного розширення досліджуваного рідинного середовища, °С⁻¹; $\overline{\Delta t} = |\overline{T}_2 - \overline{T}_{\text{ст}}|$ – температурний напір; \overline{T}_2 – середньооб'ємна температура досліджуваного рідинного середовища, °С; $\overline{T}_{\text{ст}}$ – середня температура стінки, °С; Pr_{p2} – критерій Прандтля для середньооб'ємної температури досліджуваного рідинного середовища в межах $\tau_1 - \tau_n$; $Pr_{\text{ст}}$ – критерій

Прандтля для досліджуваної рідини для температури стінки в процесі ітерацій; ν_2 – кінематична в'язкість досліджуваного рідинного середовища, $\text{м}^2/\text{с}$.

Використовуючи формули (5.1), (5.2), (5.3) проаналізовані залежності $\overline{\alpha}_2^{\text{ртр}}/\overline{\alpha}_2^{\text{рем}} = f(\tau)$ і $\overline{\alpha}_2^{\text{крт}}/\overline{\alpha}_2^{\text{рем}} = f(\tau)$ в межах часу регулярного теплового режиму. На рис.4.2 представленні залежності $\overline{\alpha}_2^{\text{ртр}}/\overline{\alpha}_2^{\text{рем}} = f(\tau)$ [1, 100].

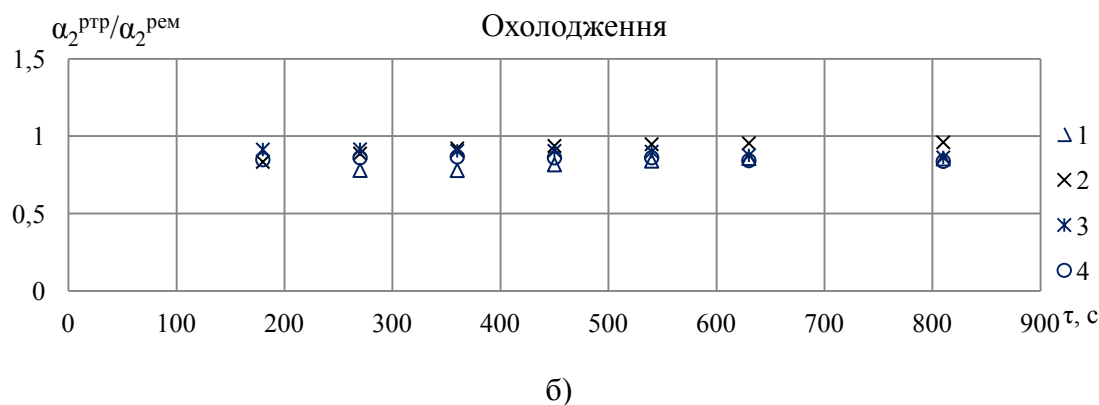
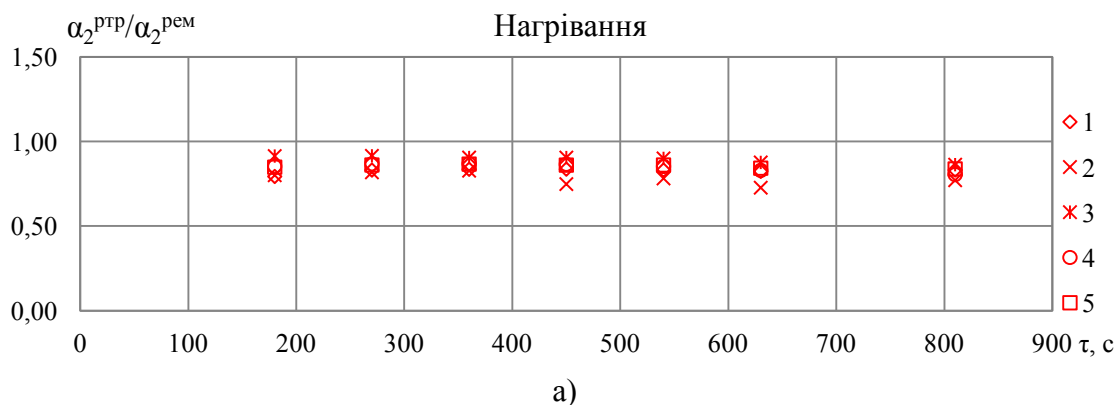


Рисунок 5.2 – Результати розрахунку $\overline{\alpha}_2^{\text{ртр}}/\overline{\alpha}_2^{\text{рем}}$ в часі τ за умов вільної конвекції: 1 – цукровий розчин $c = 50\%$; 2 – цукровий розчин $c = 60\%$; 3 – цукровий розчин $c = 70\%$; 4 – соняшникова олія; 5 – гліцерин дистильований

Проаналізовані відносні значення $\overline{\alpha}_2^{\text{ртр}}/\overline{\alpha}_2^{\text{рем}}$, $\overline{\alpha}_2^{\text{крт}}/\overline{\alpha}_2^{\text{рем}}$. В результаті аналізу і порівняння коефіцієнтів тепловіддачі, розрахованих із застосуванням критеріального рівняння $\overline{\alpha}_2^{\text{крт}}$ та знайдених методом регулярного теплового режиму $\overline{\alpha}_2^{\text{ртр}}$, встановлено, що між результатами є суттєва розбіжність, яка знаходиться в межах 40%. Коливання значень $\overline{\alpha}_2^{\text{ртр}}/\overline{\alpha}_2^{\text{рем}}$ в часі, в основному не перевищує $\pm 10\%$. Таким чином, метод регулярного теплового режиму дозволяє описати закономірності теплообміну між рідинним середовищем і металевою циліндричною стінкою [1, 100].

5.2 Коефіцієнт тепловіддчі рідинного середовища за умов вимушеної конвекції

На рис. 5.3 співставленні коефіцієнти тепловіддачі $\overline{\alpha}_2^{\text{ртр}}$ і $\overline{\alpha}_2^{\text{рем}}$ в умовах нагрівання (а) і охолодження (б) цукрового розчину $c = 60\%$ при умовній характерній швидкості на крайній точці пропелера \overline{w} , м/с [1, 4]: 1 – 0,22; 2 – 0,28; 3 – 0,45; цукрового розчину $c = 70\%$ при w , м/с: 4 – 0,22; 5 – 0,28; 6 – 0,45.

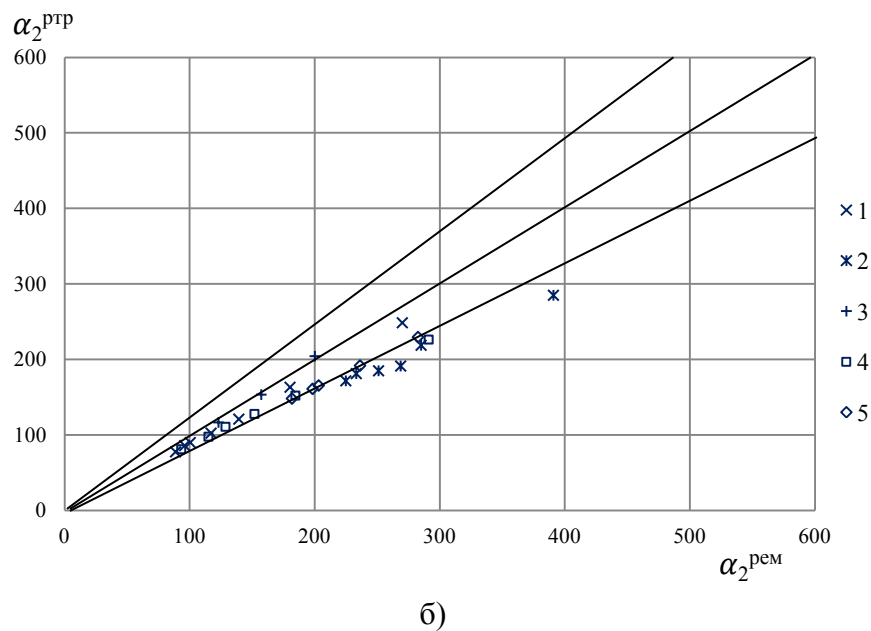
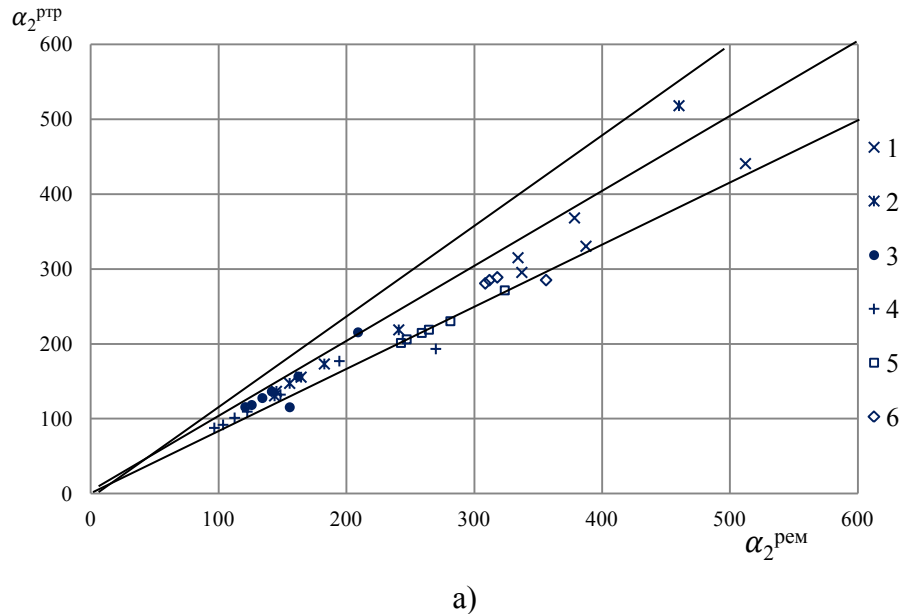


Рисунок 5.3 – Співставлення коефіцієнтів тепловіддачі $\overline{\alpha}_2^{\text{ртр}}$ і $\overline{\alpha}_2^{\text{рем}}$: а) нагрівання; б) охолодження

Розбіжність результатів співставлення коефіцієнтів тепловіддачі $\overline{\alpha}_2^{\text{пр}}$ і $\overline{\alpha}_2^{\text{рем}}$ (рис. 5.3) при нагріванні не перевищує 15 %, при охолодженні – 20 %.

Нестационарним методам притаманна більш проста організація проведення експерименту. Ці методи потребують меншої кількості вимірювальних засобів, дозволяють проводити більше число вимірювань різнорідних даних одночасно [1].

Таким чином, експериментально обґрунтовано застосування методів регулярного теплового режиму для прогнозування коефіцієнтів тепловіддачі між внутрішньою поверхнею тонкостінного металевого циліндра П-3 і досліджуваним рідинним середовищем за умов вимушеної конвекції.

5.3 Дослідження теплообміну рідинного середовища

Для усіх твердих тіл, у яких відсутня пориста структура, перенос теплоти відбувається лише шляхом теплопровідності. Але під час вирішенні задач теплопровідності необхідно для початку встановити процес переносу теплоти: стаціонарна чи нестационарна теплопровідність. У разі вирішення задач теплопровідності, необхідно встановити де відбувається теплообмін в «обмеженому об'ємі» чи в «необмеженому об'ємі» [101].

В «обмеженому об'ємі» процеси нагрівання та охолодження рідини протікають поблизу один від одного і розділити їх неможливо, в цьому випадку тепловіддачу треба розглядати в цілому. В «обмеженому об'ємі» за умов вільної конвекції товщина приграничного шару біля обмежувальних поверхонь стає однаковою з геометричними розмірами самого об'єму [1, 4].

Під «великим об'ємом» розуміється об'єм рідини в якому вільний рух, що виник біля інших тіл в даному об'ємі, не впливає на течію біля теплообмінної поверхні. Прийнято, що швидкість руху рідини на відстані від теплообмінної поверхні дорівнює нулю [101].

Нам невідомі такі установки і експерименти на яких би досліджувався нестационарний теплообмін в «обмеженому об'ємі», тому є необхідність перевірити використання стаціонарних методів розрахунку до нестационарної теплопровідності [1].

Аналізуючи результати досліджень [4] можна зробити висновок, що процес теплообміну в елементах базової експериментальної установки в системі експериментально-розрахункового методу (ЕРМ) відповідає теплообміну у «великому об'ємі» за умов вільної конвекції.

Коефіцієнти тепловіддачі між внутрішньою поверхнею тонкостінного металевго циліндра П-3 і досліджуваним рідинним середовищем визначені розрахунково-експериментальним методом $\bar{\alpha}_2^{\text{cem}}$ (5.2) та із застосуванням критеріального рівняння $\bar{\alpha}_2^{\text{crit}}$ [94].

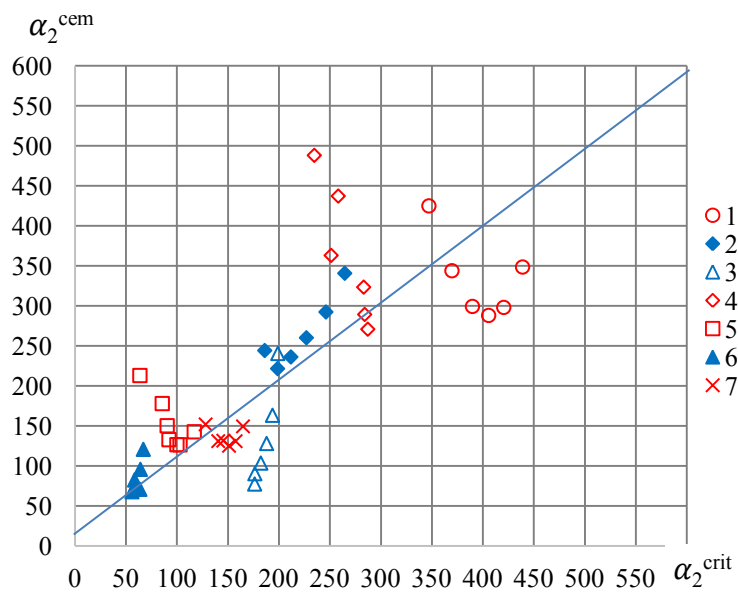


Рисунок 5.4 – Співставлення коефіцієнтів тепловіддачі $\bar{\alpha}_2^{\text{cem}}$ та $\bar{\alpha}_2^{\text{crit}}$ за умов вільної конвекції: 1 – цукровий розчин $c = 50\%$ при нагріванні; 2 – цукровий розчин $c = 50\%$ при охолодженні; 3 – цукровий розчин $c = 60\%$ при охолодженні; 4 – цукровий розчин $c = 60\%$ при нагріванні; 5 – соняшникова олія при нагріванні; 6 – соняшникова олія при охолодженні

Біля поверхні циліндричної металевгої стінки в процесі теплообміну утворюється тепловий приграничний шар, в межах якого змінюється температура теплоносія (рис.5.5, б, в). Характер розподілу температури залежить від режиму течії рідини, а характер формування теплового шару є схожим з характером розвитку динамічного шару. Товщина ламінарного приграничного шару залежить від теплофізичних властивостей досліджуваного рідинного середовища. Перенос теплоти у разі ламінарної течії відбувається за рахунок теплопровідності [1, 101].

На рис. 5.5 представлена картина руху рідини вздовж вертикальної циліндричної металевгої стінки в «обмеженому об'ємі» (тонкостінний

металевий циліндр) за різних напрямів теплообміну та у «великому об'ємі» під час вільної конвекції. За умови нагрівання досліджуваної рідини, (рис.5.5, б) тепловий потік передається від зовнішнього гарячого теплоносія (води) до циліндричної металевої стінки, від циліндричної металевої стінки до досліджуваної рідини і далі розповсюджується по об'єму рідини. Теплі маси рідини рухаються (швидкість не дорівнює нулю $u \neq 0$) до низу ємності заміщаючи холодні в приграничному тепловому шарі. За умови охолодження ($u \neq 0$) тепловий потік передається від досліджуваної рідини до циліндричної металевої стінки, від циліндричної металевої стінки до зовнішнього теплоносія (води) і далі розповсюджується по кільцевому об'єму зовнішньої посудини. У «великому об'ємі» (рис. 5.5, а) чим більший перепад температур, тим більше відрізняється в'язкість, теплопровідність та теплоємність теплоносія у різних точках приграничного шару, що суттєво впливає на інтенсивність тепловіддачі [1, 101].

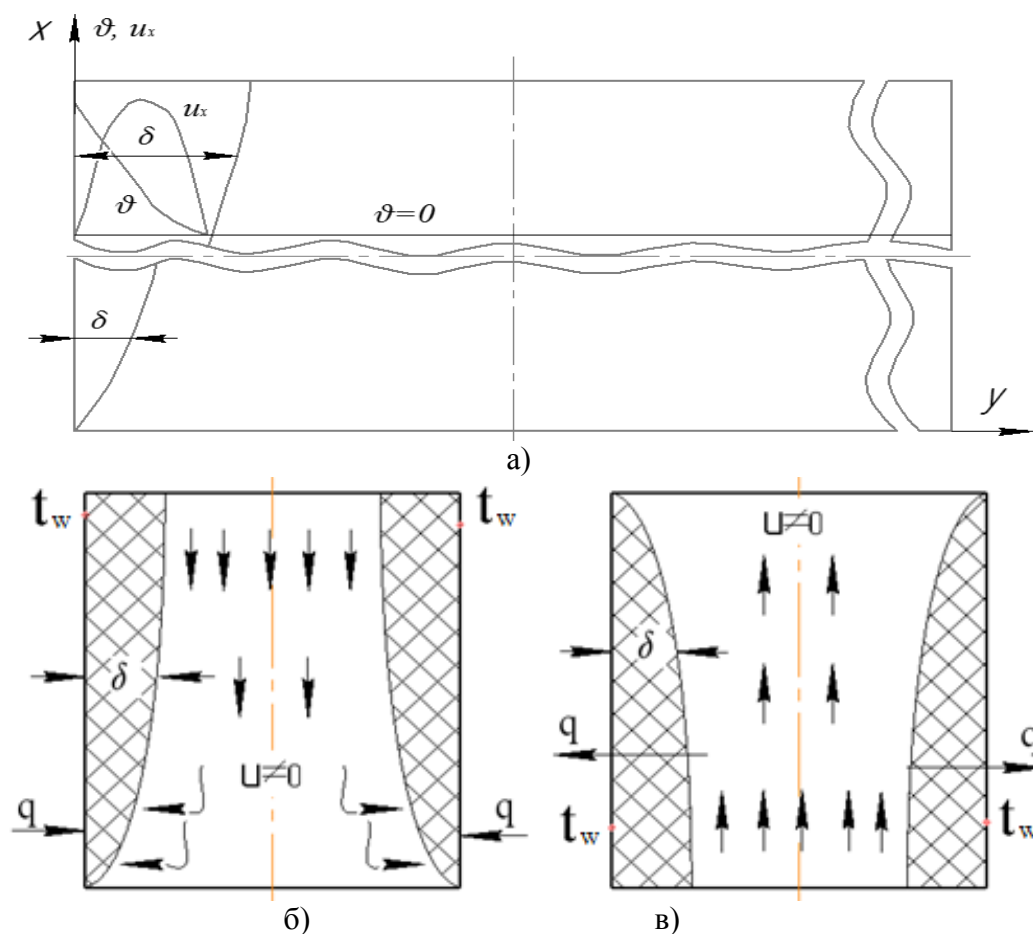


Рисунок 5.5 – Характер зміни температури в приграничному тепловому шарі: а) при нагріванні у великому об'ємі; б) при нагріванні в обмеженому об'ємі; в) при охолодженні в обмеженому об'ємі

Отримані експериментальні результати тепловіддачі між внутрішньою поверхнею тонкого металевого циліндра і досліджуваним рідинним середовищем в обмеженому просторі для системи «навколишнє середовище I – тіло II» дають уявлення про механізм теплообміну у досліджуваних рідинних середовищах в обмеженому об'ємі при різних напрямках теплообміну. Обґрунтовано, що біля поверхні циліндричної металевої стінки в процесі теплообміну утворюється тепловий приграничний шар, в межах якого змінюється температура теплоносія, а перенос теплоти в межах приграничного шару відбувається за рахунок теплопровідності [1, 101].

5.4 Визначення еквівалентної теплопровідності

Виробничі промислові процеси характеризуються значною кількістю задіяних в цих процесах рідин, складними технологічними перетвореннями продуктів, різноманітними тепловими режимами, часом обробки продуктів. Більшість кондитерських, алкогольних, нафтопереробних, фармацевтичних, молочних та інших напівпродуктів та продуктів є складними полікомпонентними, багатофазними середовищами, теплові процеси в яких неможливо досить точно описати класичними рівняннями [98].

Під час конвективного теплообміну у щілинних каналах відбувається складний теплообмінний процес, який характеризується взаємним впливом висхідного і низхідного потоків рідини. За умов незначної товщини каналу (δ) для руху рідини ці потоки можуть призвести до виникнення циркуляційних контурів. Зазвичай такий складний процес теплообміну прийнято розглядати як явище теплопровідності [97]. Для цього вводять поняття еквівалентного коефіцієнту теплопровідності

$$\lambda_e = Q \cdot \delta / (F \cdot \Delta t), \quad (5.4)$$

де Q – теплова потужність підведена до рідини, Вт; δ – товщина прошарку середовища в якому відбувається теплообмін, м; F – площа теплообмінної поверхні, m^2 ; Δt – різниця температур між гарячою та холодною поверхнею, $^{\circ}C$.

Пропонується використання безрозмірного параметру ϵ_k який отримують діленням еквівалентного коефіцієнту теплопровідності на

коефіцієнт теплопровідності середовища. Тоді процес теплообміну описується за залежністю $\epsilon_k = \lambda_e / \lambda = f(\text{Gr}, \text{Pr})$ [97].

Складність розрахунку коефіцієнту тепловіддачі від стінки до в'язкого рідинного середовища полягає у обмеженості інформації щодо теплофізичних властивостей дослідного середовища. Застосування методу регулярного теплового режиму дає змогу визначити еквівалентний коефіцієнт теплопровідності λ_e , що дасть змогу краще зрозуміти механізми теплообміну у в'язких рідинних середовищах та в майбутньому підвищити точність оцінки інтенсивності теплообміну та механізми передачі теплової енергії.

У роботі [102, 103] встановлено, що процес теплообміну у експериментальній установці перетікає у обмеженому об'ємі. Математичні моделі для опису тепло- та масообмінних процесів за умов турбулентного, перехідного та ламінарного режиму конвекції зазвичай базуються на ідеї про усереднення рівнянь Нав'є-Стокса, згідно з якою миттєві значення швидкості, тиску, густини та температури представляються сумами їх середніх та пульсаційних значень [104]. Якщо середовище є ньютонівським, то коефіцієнти тепловіддачі визначаються за допомогою відомих залежностей [97, 104]. Теплообмін в неньютонівському середовищі вивчений значно менше, особливо за умов вільної конвекції в обмеженому просторі, хоча і зустрічається в багатьох технологічних та біологічних об'єктах і має велике практичне значення. Серед досліджених є процес переносу енергії та маси через щілинні канали, заповнені рідиною або газом, утворені плоскими паралельними пластинами та кільцевими каналами (рис. 5.6). На рисунках 1 і 2 q – питомий тепловий потік; δ – товщина каналу для потоку теплоносія [98].

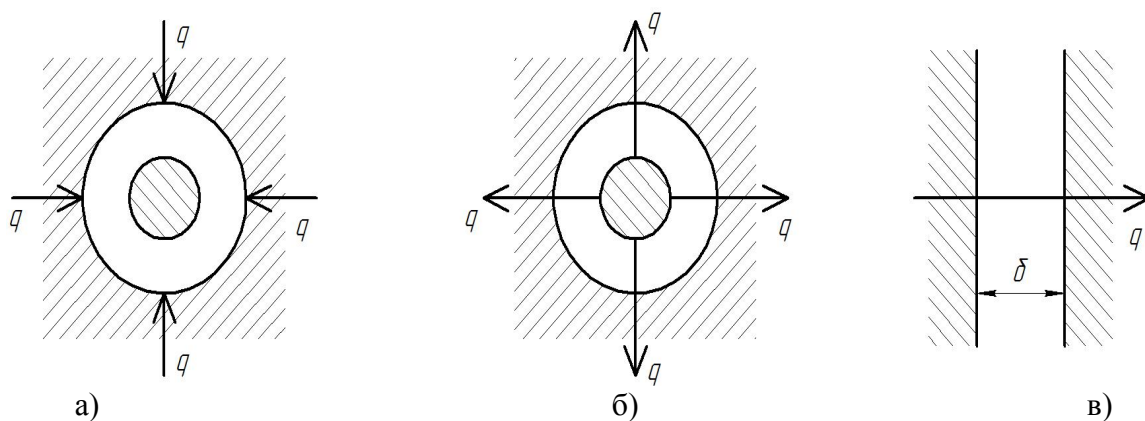


Рисунок 5.6 – Форма обмеженого простору. а, б, в – варіанти форми обмеженого об'єму

Згідно рисунка 5.6 теплова енергія передається від гарячої поверхні теплообміну через товщу рідини до холодної поверхні. Для такої системи авторами [97, 104] запропоновано рівняння виду $\epsilon_k = 0,4 \cdot Ra^{0,2}$ у діапазоні значень критерію Ралея $10^6 < Ra < 10^{10}$.

Залишається актуальним питання оцінки теплофізичних характеристик дослідного середовища та поглиблення знань про теплові процеси у в'язких рідинах. Для дослідження теплообмінних процесів розроблена дослідна установка [102-104] являє собою дві посудини більшого та меншого діаметру, які розміщені одна в одній і утворюють дві відокремлені області. Дослідна рідина розміщена у внутрішній циліндричній посудині, а гаряча вода у зовнішньому кільцевому каналі (рис. 5.7). У дослідній установці передача теплової енергії відбувається від нагрітої води у кільцевому каналі до тонкої металевій стінки, від металевій стінки до розчину і далі розповсюджується по об'єму розчину [98].

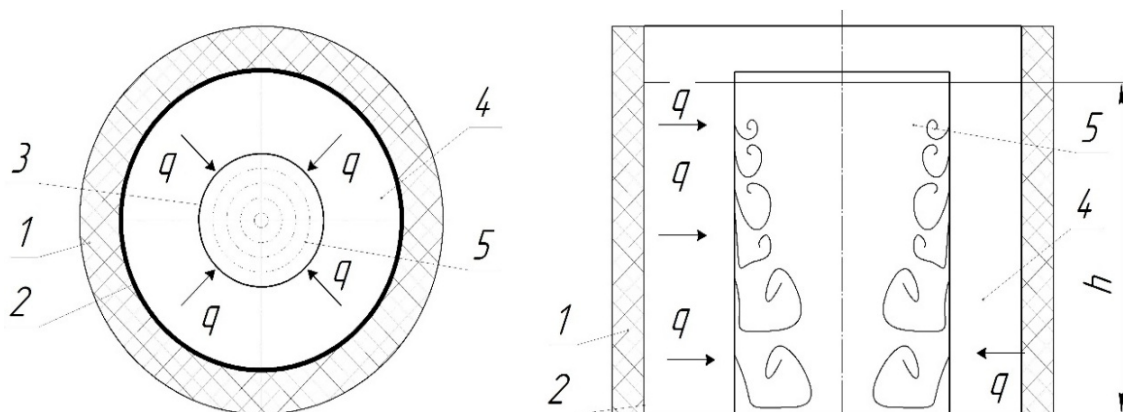


Рисунок 5.7 – Схема потоків теплоти та гіпотетичний розподіл циркуляційних контурів у експериментальній установці

На рисунку 5.7: 1 – ізоляційний шар; 2 – зовнішня посудина діаметром 200 мм; 3 – внутрішня тонкостінна посудина зовнішнім діаметром 97 мм, внутрішнім 96 мм; 4 – водяна рубашка; 5 – дослідна речовина – цукровий розчин масовою концентрацією 50 %, 60 %, 70 %; h – висота розчину у внутрішній посудині.

Для опису процесу тепломасообміну в установці використовуються наступні критеріальні рівняння: критерій Грасгофа – Gr , критерій Прандтля – Pr , критерій Ралея – Ra , критерій Біо. За характерний розмір приймалась висота розчину у внутрішній посудині – $l = h$.

У режимі ламінарної конвекції найбільш інтенсивний перенос теплоти відбувається в порожнині з $h/\delta \sim 1,5$ [4]. Рух в рідині при наявності вертикального градієнта густини та бокового підведення теплоти має комірковий характер. При цьому густина рідини з часом не вирівнюється між комірками, а в кожній комірці густина має визначене, відмінне від суміжних комірок значення [97].

Для розрахунку теплообмінних процесів за умов теплообмінних поверхонь зображених на рисунку 1, різними авторами запропоновано значну кількість методик, які детально наведені у [97]. Причому за різної форма обмеженого простору, напряму теплового потоку, теплофізичних характеристик та режими руху визначальними параметрами виступають: температури на границях шару; температури стінок; температура рідини на віддаленні від поверхні; температура пограничного шару; відстань між вертикальними поверхнями; висота поверхонь та ін.

Отримані після обробки експерименту дані для узагальнення і порівняння з відомими виразимо у формі еквівалентного коефіцієнта теплопровідності λ_e . Застосуємо величину $\epsilon_k = \lambda_e / \lambda$, яка характеризує вплив конвекції на перенесення енергії за умов різних значень Ra . В даному випадку: $Ra = Gr \cdot Pr_p$; $Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta t \cdot l^3}{\nu^2}$ – критерій Грасгофа для дослідної рідини; Pr_p – критерій Прандтля для рідини, визначений за температурою рідини, $Pr_p = \frac{\mu \cdot C_p}{\lambda}$; Δt – різниця температур між стінкою та рідиною, $\Delta t = t_c - t_p$, °C; β – коефіцієнт температурного розширення рідкого середовища, °C⁻¹; λ – теплопровідність рідкого середовища визначена за визначальною температурою, Вт / (м · К); ν – кінематична в'язкість рідкого середовища, м²/с; C_p – питома теплоємність рідкого середовища визначена за визначальною температурою, кДж/(кг·К); g – прискорення вільного падіння, м/с²; μ – коефіцієнт динамічної в'язкості середовища визначений за температурою рідини, Па·с.

Згідно з методикою обробки експериментальних даних для нестационарного режиму [91, 105] еквівалентний коефіцієнт теплопровідності зв'язаний з критерієм Біо наступним чином

$$\lambda_e = \frac{\alpha \cdot K \cdot F}{Bi \cdot V}, \quad (5.5)$$

де K – коефіцієнт форми; V – об’єм досліджуваного середовища, м^3 ; F – площа теплообміну, м^2 ; α – коефіцієнт тепловіддачі від навколишнього середовища (нагрітої води) до циліндричної поверхні, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Для циліндра коефіцієнт форми визначається

$$K = \frac{1}{\left(\frac{2,405}{R}\right)^2 \cdot \left(\frac{\pi}{1}\right)^2}, \quad (5.6)$$

де l – довжина циліндра, м ; R – радіус циліндра, м .

Критерій Біо та коефіцієнт нерівномірності розподілу температури можна виразити наступними залежностями [91]

$$\psi = (1 + 1.44 \cdot \text{Bi} + \text{Bi}^2)^{-1/2}, \quad (5.7)$$

$$\psi = \vartheta_f / \vartheta_v = \frac{m \cdot C_v}{\alpha \cdot F}, \quad (5.8)$$

де ϑ_f, ϑ_v – середні по поверхні та по об’єму тіла температури відповідно, $^{\circ}\text{C}$; $\vartheta_f = |t_p - t_{cr}|$ та $\vartheta_v = |t_p - t_o|$; t_p, t_{cr}, t_o – температури зовнішнього середовища (рідини), стінки та по центру розчину відповідно, $^{\circ}\text{C}$; C_v – повна теплоємність тіла, $\text{кДж}/\text{К}$; m – темп охолодження (нагрівання), $1/\text{с}$. Під час проведення досліджень необхідно звернути увагу на умови протікання процесу, що відрізняються від умов у роботах [97, 104]. На основі експериментальних даних з розчином за математичною моделлю (5.5-5.6) визначено коефіцієнт еквівалентної теплопровідності λ_e . Отримані результати досліджень представлені на рисунку 5.8.

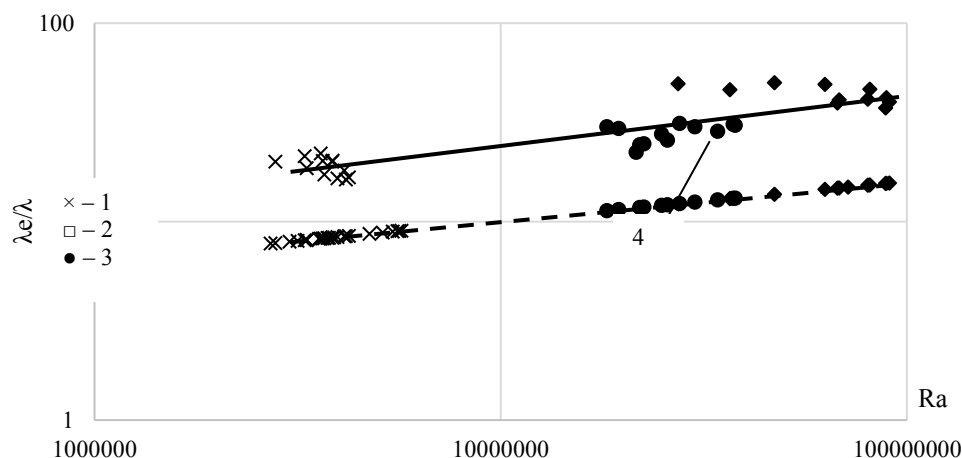


Рисунок 5.8 – Масові концентрації цукрового розчину: 1 – 70 %; 2 – 60 %; 3 – 50 %; 4 – значення ϵ_k розраховане за літературними даними [97, 104]

Отже, за даних умов теплообміну числове значення коефіцієнта конфекції ε_k на 55 % більше ніж при теплообміні в каналі згідно рис. 5.6 [98]. Це пояснюється різними геометричними умовами в яких протікає теплообмінний процес. Апроксимація отриманих результатів дає структуру рівняння в діапазоні $10^6 < Ra < 10^{10}$

$$\varepsilon_k = 0,4 \cdot Ra^{0,25}, \quad (5.9)$$

У авторів [4, 104] в тому ж проміжку визначального параметру Ra значення відносного еквівалентного коефіцієнту теплопровідності приймає вигляд $\varepsilon_k = 0,4 \cdot Ra^{0,2}$. Це підтверджує можливість використання регулярного теплового режиму для оцінки ε_k – відносного значення еквівалентного коефіцієнту теплопровідності в досліджуваних рідинах [98].

Отримані дані поглиблюють уявлення по механізму теплообміну у в'язких рідинних середовищах в обмеженому об'ємі.

Експериментальні коефіцієнти теплопровідності в циліндричному об'ємі мають вищі значення ніж розрахункові в щілинних каналах, що обумовлено різною геометрією об'ємів, в яких протікає процес теплообміну, а також механізмами передачі теплоти.

5.5 Дослідження нестационарного теплообміну в біогазових сумішах

Експериментально-розрахунковий метод, який застосовується для визначення інтенсивності теплообміну в складних сумішах [4, 10, 15] потребує подальшого вдосконалення оскільки коефіцієнти тепловіддачі визначені на базовому портативному експериментальному стенді, де режим теплообміну нестационарний, одержували в результаті застосування методу обробки експериментів для стаціонарних (квазістаціонарних) умов теплообміну. Крім того, експериментально визначені значення коефіцієнтів тепловіддачі в нестационарних умовах теплообміну використовуються для прогнозування інтенсивності теплообміну в реальних теплообмінниках, які працюють в квазістаціонарних умовах теплообміну.

Охолодження та нагрівання тіл – це нестационарні процеси, які поширені в природі і техніці та досліджуються в теорії теплопровідності (регулярний тепловий режим) і теплопередачі. Теорія

регулярного режиму для нестационарних процесів була розроблена в роботах Г. М. Кондратьєва, Г. Н. Дульнева та інших дослідників. Вона широко використовується в різних розрахунках і для проведення експериментальних досліджень.

Розрізняють регулярний режим першого, другого і третього роду. В залежності від чи $t_p = \text{const}$ або $t_p = \text{var}$ академік О. В. Ликов вводить загальну ознаку регуляризації кінетики нагрівання тіл для всіх трьох видів регулярних режимів. Цією ознакою є величина темпу охолодження, яка визначається за середньою об'ємною температурою тіла.

З цієї точки зору немає необхідності розрізняти регулярні режими першого, другого і третього роду.

Ця робота ставить за мету застосувати метод регулярного теплового режиму для прогнозування інтенсивності теплообміну між металевою стінкою і сумішшю з обмеженою інформацією про теплофізичні властивості в системі «циліндричний об'єм заповнений водою – металева циліндрична стінка – суміш в коаксіальному об'ємі».

Схеми дослідних установок показані в роботах [4, 10, 15]. Установки містять такі складові: циліндричну ємність з гарячим теплоносієм – водою висотою $h_m = 116$ мм, діаметром $d_m = 96$ мм і товщиною стінки $\delta_{cm} = 0,5$ мм та зовнішню ізольовану циліндричну ємність із холодним теплоносієм – сумішшю, яка утворює із внутрішньою ємністю кільцевий об'єм товщиною $\Delta = 52$ мм. Тонкостінна оболонка має незначний термічний опір $R_{cm} = 1,1 \cdot 10^5$ (м²·К)/Вт. Температури теплоносіїв вимірювались термопарами в трьох точках по висоті циліндричного об'єму і кільцевого каналу, а також лабораторним ртутним термометром (ціна поділки 0,1 °С) в центрі об'єму та каналу. Для виявлення характеру розподілу температур у воді і суміші під час проведення дослідів термопари переставляли по перерізу кільцевого каналу та циліндричного об'єму. На рис. 5.9. показані установка, схема розміщення термопар (а) та їх координати (б). Внутрішній циліндричний об'єм I заповнюється гарячою водою, кільцевий об'єм III – дослідною сумішшю. Інформація про теплофізичні властивості суміші обмежена. Відбувається природний нестационарний процес. Вода охолоджується, суміш нагрівається. Теплота від води до суміші передається через тонку металеву циліндричну поверхню II. Кільцевий

об'єм III утворений циліндричною стінкою II та ізолюваною зовні циліндричною стінкою IV.

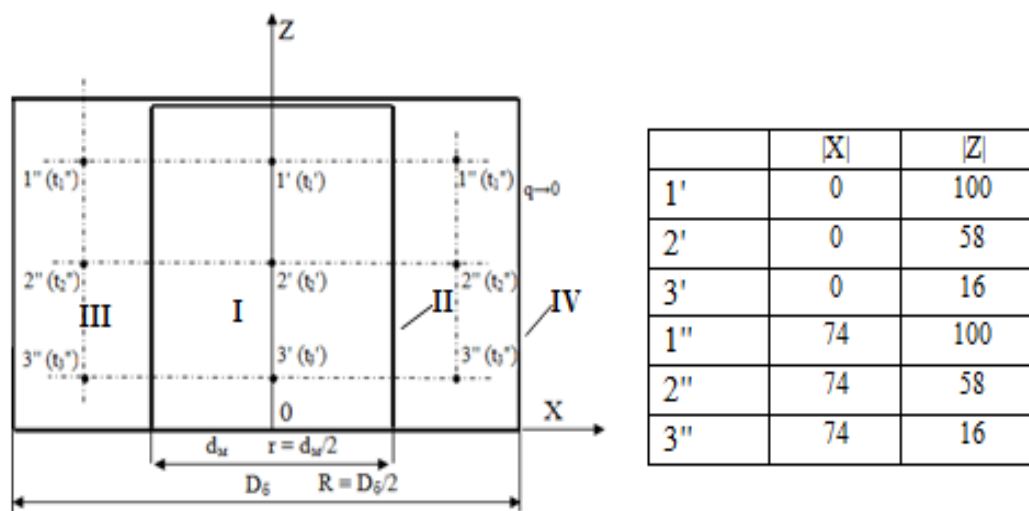


Рисунок 5.9 – Базовий елемент експериментальної установки

В кільцевий об'єм заливався холодний теплоносій – органічна суміш, в якій досліджувалась інтенсивність теплообміну. В якості дослідних сумішей використовувалися субстрати великої рогатої худоби (ВРХ) з відносною вологістю $W = 86\%, 90\%$ та 94% . Діапазон температур гарячого теплоносія $t_2' = 72...50\text{ }^\circ\text{C}$, холодного – $t_2'' = 20...40\text{ }^\circ\text{C}$. Температура навколишнього середовища за межами системи $t_{н.с} = 20...22\text{ }^\circ\text{C}$. Температури t_2' , t_2'' , температурний напір $\Delta t = t_2' - t_2''$ змінювалися за часом t_2' , t_2'' , $\Delta t = f(\tau)$. Також змінювався за часом тепловий потік від циліндричного об'єму до суміші $Q = f(\tau)$. За умов загального температурного напору менше $5\text{ }^\circ\text{C}$ досліди закінчували, оскільки обробка таких результатів недоцільна через велику похибку.

Коефіцієнти тепловіддачі від стінки до органічної суміші α_2 визначались двома методами: методом для стаціонарних процесів теплообміну та методом регулярного теплового режиму в системі «циліндричний об'єм заповнений водою – металева стінка – суміш», за умов розміщення суміші у зовнішньому кільцевому каналі.

До переваг регулярного теплового режиму відносять його універсальність. Він дозволяє робити експериментальні дослідження великої кількості різних фізичних параметрів: коефіцієнтів тепло- і теплопровідності, питомої теплоємності, теплового

опору, коефіцієнтів тепловіддачі, коефіцієнтів форми різних тіл. Всі методи регулярного режиму є такими, що самоконтролюються.

Методи регулярного режиму відзначаються простотою виміральної апаратури і проведенням дослідів. За умов їх використання основною виміральною величиною є темп охолодження. В досліді достатньо обмежитись закладанням однієї термопари в довільному місці досліджуємого тіла. До недоліків регулярного режиму слід віднести необхідність ретельної реалізації теоретичних передумов про сталість температури середовища і коефіцієнта тепловіддачі до зовнішнього середовища α впродовж досліді. За результатами експерименту побудовано графік розподілу надлишкових температур в дослідній системі у вигляді залежності $\ln(t_2' - t_2'') = f(\tau)$ для $W = \text{const}$ (рис. 5.10).

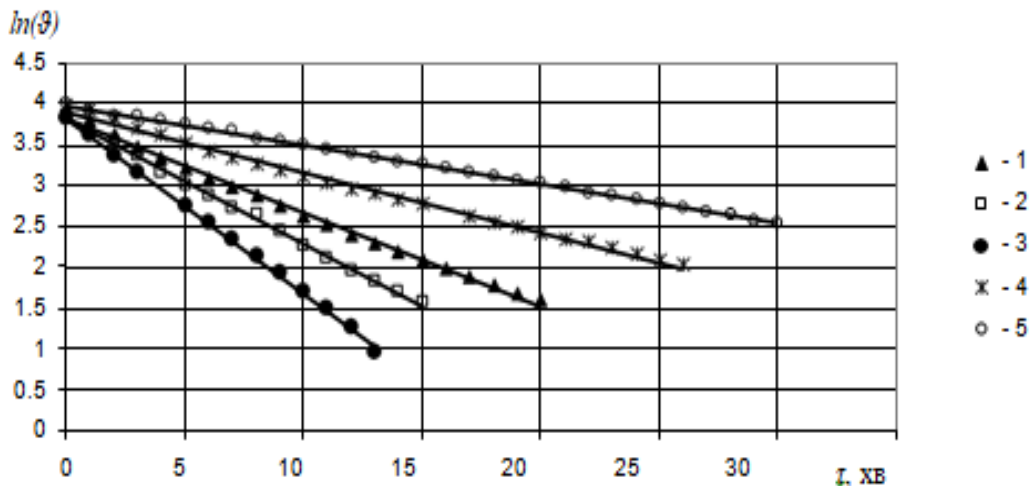


Рисунок 5.10 – Розподіл надлишкових температур за часом: субстрат свиней вологістю 1 – 86 %, 2 – 90 %, 3 – 94 %, субстрат ВРХ 4 – 94 %, 5 – 90 %

На підставі рис. 5.10 виявлено, що залежність $\ln(\theta) = f(\tau)$ для охолодження системи «циліндричний об'єм заповнений водою – металева стінка» має якісно однаковий характер зрегульованим тепловим режимом, який спостерігається у твердих тілах різної форми [91, 97].

За наведеними методиками здійснено дослідження та розрахунки інтенсивності тепловіддачі до субстратів свиней і ВРХ за умови вільної конвекції біля вертикальної циліндричної стінки. За результатами розрахунків побудовані залежності, які показані на рис. 5.11 та рис. 5.12, де індексом «m» і «k» позначені величини для різних методів визначення α_2 .

На рис. 5.11 показана залежність коефіцієнта тепловіддачі від темпу охолодження $\alpha_{2m} = f(m)$.

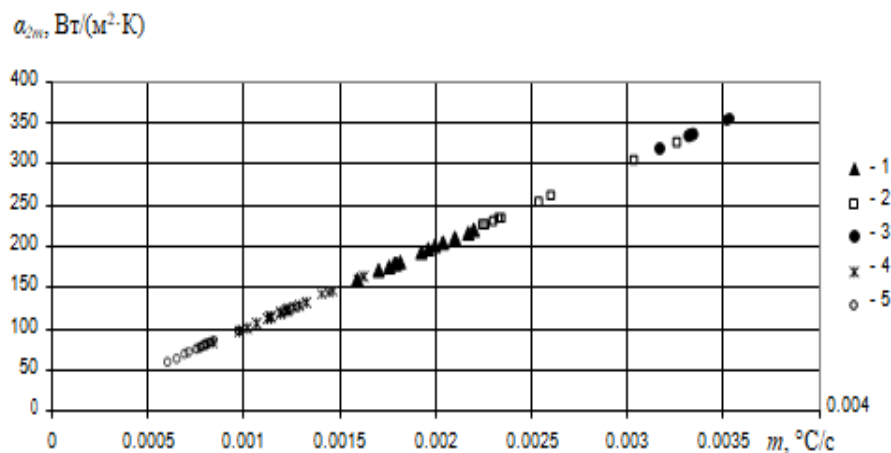


Рисунок 5.11 – Залежність коефіцієнта тепловіддачі до субстратів від темпу охолодження: субстрат свиней вологістю 1 – 86 %, 2 – 90 %, 3 – 94 %, субстрат ВРХ 4 – 94 %, 5 – 90 %

Отримані результати дають можливість побачити, що розташування експериментальних точок, відповідає якісній кривій, яка описана в [93, 97] для твердих тіл.

Нестаціонарні методи дозволяють уникнути вимірювань теплових потоків (в окремих випадках це складно) і обмежитись вимірюванням температур в двох або декількох точках. Вони дають змогу більш широкі можливості у відношенні вибору джерел теплоти, ніж стаціонарні, є, як правило швидкоплинними в часі, часто не потребують значного часу на попередню витримку зразків за визначеної температури.

Метод нестаціонарної теплопровідності дозволяє в ряді випадків проводити вимірювання за умов безперервної зміни температури до бажаного її значення. Це дозволяє отримати одразу відповідну безперервну криву зміни вимірювального теплового параметра в заданому інтервалі температур. В той же час у всіх стаціонарних методах такі криві будуються по декількох дослідних точках, які відповідають різним стаціонарним тепловим режимам, число яких звичайно обмежене. Останнє робить нестаціонарні методи такими, що мають перевагу за умов дослідження теплових процесів у складних сумішах [92, 93].

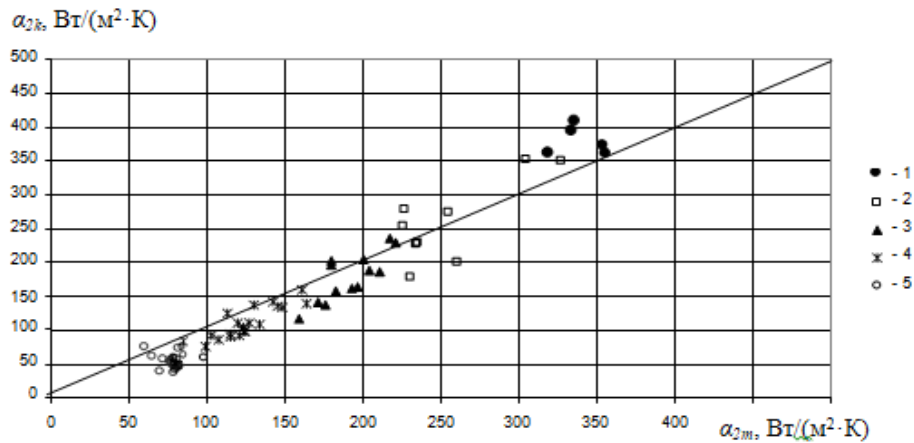


Рисунок 5.12 – Порівняння коефіцієнтів тепловіддачі до субстратів визначених через темп охолодження α_{2m} і через коефіцієнт теплопередачі α_{2k} : субстрат свиней вологістю 1 – 86 %, 2 – 90 %, 3 – 94 %, субстрат ВРХ 4 – 94 %, 5 – 90 %

Порівняння експериментальних результатів (рис. 5.12) дозволяє оцінити, що розбіжність коефіцієнтів тепловіддачі становить $\pm 20\%$. Це пояснюється тим що коефіцієнти тепловіддачі α_{2k} визначені за традиційною методикою, коли дослідження проводяться за усталеного режиму, а α_{2m} – за методикою, яка застосовується для нестационарних процесів.

Експерименти для виявлення регулярного теплового режиму проведені на установці схожій на установку (рис. 5.9), але геометричні розміри теплообмінної поверхні були іншими: висота $h_m = 88$ мм, діаметр $d_m = 72$ мм, товщина стінки $\delta_{cm} = 0,5$ мм, кільцевий канал товщиною $\Delta = 52$ мм; розміри зовнішньої ізолюваної циліндричної ємності $H_b = 120$ мм, $D_b = 200$ мм. При цьому виявлено, що в установці з такими геометричними параметрами також чітко проявляються ознаки регулярного теплового режиму.

Запропонована лабораторна установка та методика обробки дослідів дозволяють оперативно оцінювати коефіцієнти тепловіддачі до в'язких рідини та сумішей з обмеженою інформацією про їх теплофізичні властивості та запропонувати методи інтенсифікації процесів конвективного теплообміну.

За результатами досліджень встановлено, що на дослідному проміжку параметрів витримується співвідношення для надлишкової температури $\ln(\vartheta) = f(\tau)$ для охолодження системи «циліндричний об'єм заповнений водою – металева стінка», яке характерне для регулярного теплового режиму у твердих тілах різної форми.

Залежності темпу охолодження $m = f(\alpha_2)$, які отримані експериментально, описуються кривою яка схожа за структурою до описаної в літературі для твердого тіла.

Отримані експериментальні дані підтверджують можливість використання методу регулярного теплового режиму для дослідження інтенсивності тепловіддачі до в'язких рідин та органічних сумішей, які зброджуються в реакторі біогазової установки. Використання методів регулярного теплового режиму є перспективним напрямком дослідження процесів теплообміну у в'язких рідинах із відомими теплофізичними властивостями та органічними сумішами з обмеженою інформацією про теплофізичні властивості.

Розбіжність коефіцієнтів тепловіддачі визначених методом регулярного теплового режиму і визначених методами притаманними стаціонарному режиму не перевищує 20 %.

5.6 Переваги використання методу регулярного теплового режиму

Охолодження та нагрівання тіл широко розповсюдженні у природі та у техніці процеси. Дані процеси досить розрізняються за взаємним впливом температурних полів одне на одне, агрегатним станом тіл та іншими фізичними та геометричними характеристиками [91-92]. Проведення експериментальних досліджень для визначення теплофізичних параметрів виконують різними методами, які базуються на стаціонарних або нестаціонарних процесах.

Добре зарекомендував себе для дослідження теплофізичних характеристик твердих тіл нестаціонарний метод регулярного теплового режиму (РТР) [91-93, 97]. Для дослідження теплових параметрів твердого тіла методом нестаціонарного теплового режиму використовуються рішення диференціального рівняння Фур'є [93-94, 97]. Зазвичай дані рішення використовуються для тіл простої геометричної форми та для визначених граничних умов.

Згідно теорії регулярного теплового режиму [91-93, 97] процес охолодження (нагрівання) тіла можна розділити в часі на дві стадії: стадію невпорядкованого (ірегулярного) процесу і стадію регулярного режиму. Перша з них характеризується сильним впливом на температурне поле тіла його початкового теплового стану. З плином

часу вплив початкових особливостей температурного поля на його подальшу зміну згладжується, процес зі стадії невідпорядкованою переходить в стадію впорядковану – "регулярну".

Методи регулярного режиму в класичній формі розробляли та застосовували для системи «рідина-тверде тіло». Відомими у доступній літературі [91-94, 97 та ін.] прикладами застосування методик регулярного режиму є визначення: коефіцієнтів теплопровідності плоских тіл; коефіцієнтів тепловіддачі; коефіцієнтів теплопровідності металів; коефіцієнтів тепло- та теплопровідності ґрунтів, теплової ізоляції і т. ін. Також методи регулярного режиму використовувались для дослідження теплопровідності газів та рідин під високим тиском. Вони дають більш широкі можливості по вибору джерела тепла, є більш швидкоплинними і як наслідок – мають зменшені вимоги для теплового захисту дослідного зразка від теплообміну з навколишнім середовищем [92-93].

Нами встановлено, що аналіз експериментальних даних нестационарних процесів методами квазістационарних дає розкид точок до 40...45 % у визначенні коефіцієнта тепловіддачі до дослідного середовища. На нашу думку, можна досягти більшого узгодження експериментальних результатів та розрахунків, використавши методику обробки даних для нестационарних процесів, таку як регулярний тепловий режим. Використання РТР для дослідження коефіцієнтів тепловіддачі проведемо у розрізі експериментально-розрахункового методу дослідження інтенсивності теплообміну (ЕРМ) [4, 106]. Планується подальше вдосконалення ЕРМ на основі результатів експериментальних даних представлених у даній статті.

Експеримент відбувається за умов природної конвекції в об'ємі, який має форму тонкостінного циліндра (товщина стінки 0,5 мм) для дослідної рідини, зовнішнього коаксіального каналу для грійного середовища. Геометричні розміри поверхонь теплообміну: зовнішня кільцева порожнина зовнішнім діаметром 200 мм, внутрішнім – 97 мм, висота – 12 см; внутрішня циліндрична порожнина діаметром 96 мм; висота – 90 мм.

В якості дослідної рідини в експерименті використовувався цукровий розчин 3-х масових концентрацій: 50 %, 60 % та 70 % твердої частини. Теплофізичні властивості розчинів прийнято згідно [4, 106]. Маса грійного середовища $\approx 2,3$ кг, дослідної речовини – 0,6...0,8 кг; зміна

температур грійного середовища 78...42 °С, нагріваного – 20...65 °С. Температура навколишнього середовища за межами системи 22...30 °С. Попередньо приймаємо, що процес теплообміну у внутрішній ємності (рис. 2.1) відбувається у обмеженому об'ємі.

Для оцінки та обґрунтування можливості використання РТР та виявлення характеру розподілу температур вздовж теплобмінної поверхні, проведемо вимірювання температур по висоті дослідної установки (рис. 5.14).

На рис. 5.14 температури цукрового розчину збільшуються з ліва на право із часом експерименту (2), а температури грійної води зменшуються з права наліво (1). Меншу зміну температури грійної води можна пояснити тим, що її маса у три рази більша за масу дослідної рідини. На рис. 5.14 показані температури через кожні 60 секунд експерименту. Нахил першої кривої для цукрового розчину має дещо відмінний характер вигину, оскільки на початковому етапі експерименту температурний режим ще не встановився. В подальшому криві розподілу температур описуються профілем ідентичним для всіх кривих.

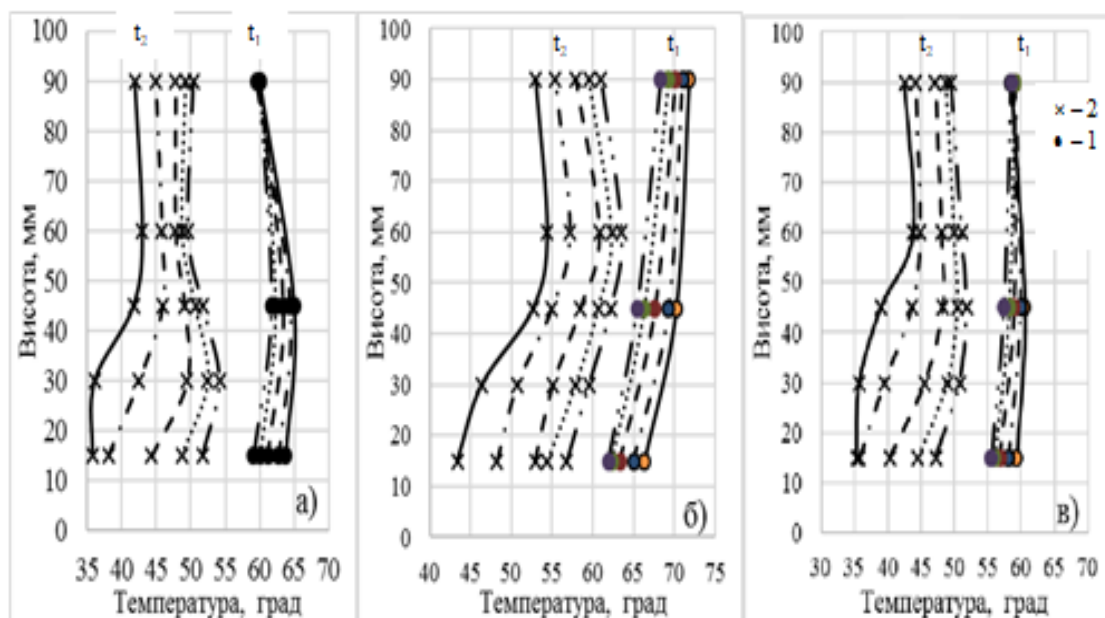


Рисунок 5.14 – Зміна розподілу локальних температур t^j по вертикалі згідно табл. 1; а), б), в) – масові концентрації цукрового розчину відповідно 50, 60 і 70 %; 1 і 2 – відповідно локальні температури води t_1 та цукрового розчину t_2

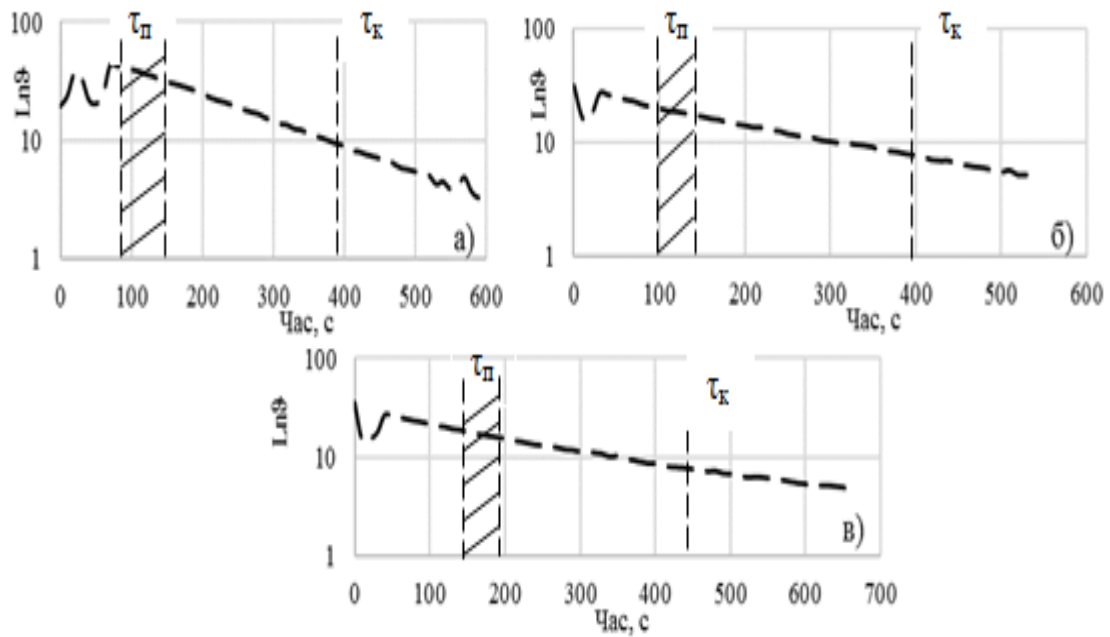


Рисунок 5.15 – Надлишкові температури цукрового розчину; масові концентрації розчину: а) 50 %; б) 60 %; в) 70 %

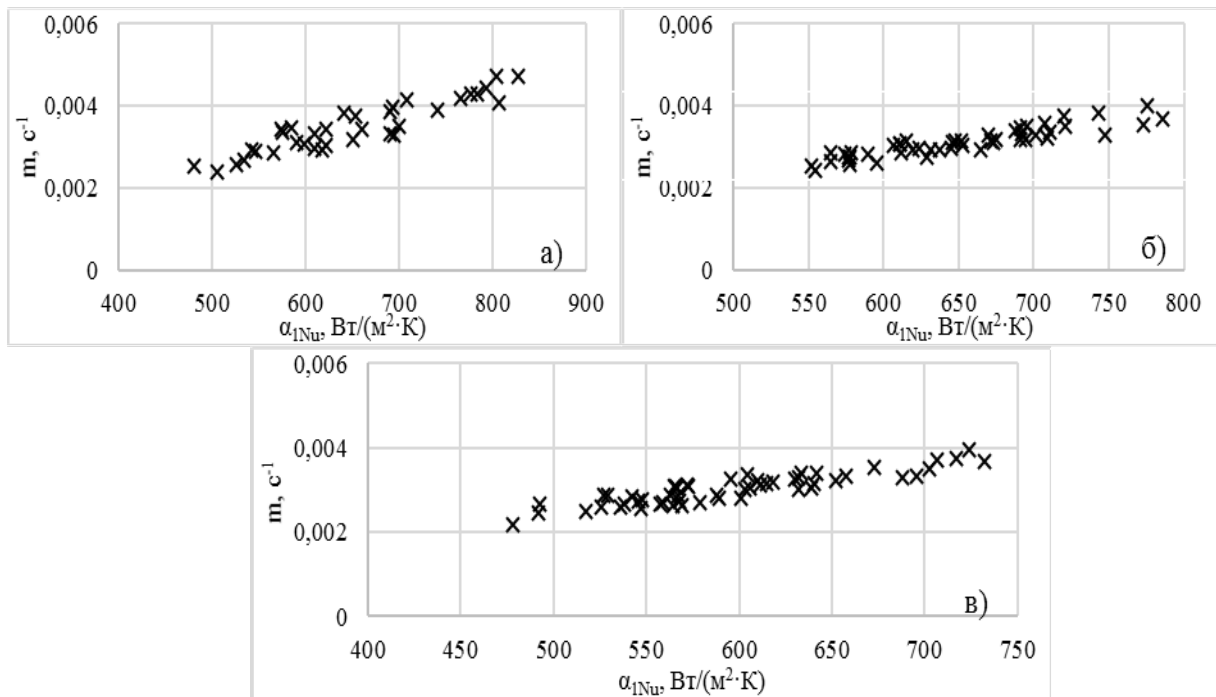


Рисунок 5.16 – Залежність темпу нагрівання від коефіцієнта тепловіддачі $\alpha_{1\text{Nu}}$. а), б), в) – масові концентрації розчинів відповідно 50, 60 і 70 %

На рисунках 5.17, 5.18 дані визначені для однакових періодів часу, але для візуального сприйняття зміщені вздовж осі абсцис.

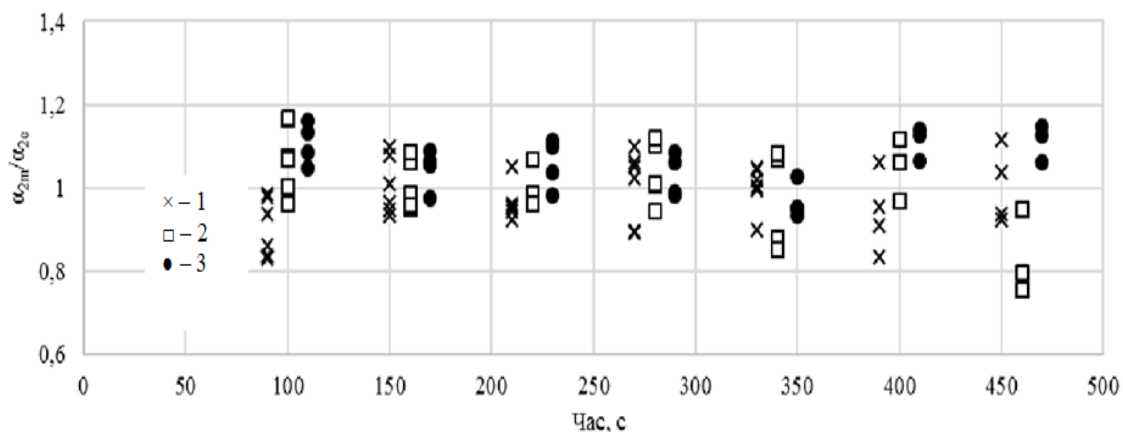


Рисунок 5.17 – Співвідношення α_{2m}/α_{2e} на протязі експерименту 1, 2, 3 – відповідно масові концентрації цукрового розчину 50, 60 і 70 %

Значення K_m визначено із рівняння теплопередачі, використавши для розрахунку значення α_{2m} . Результати співставлення наведені на рис. 5.18.

Отримані результати показують збіжність з експериментальними даними. Так значення розкиду точок коефіцієнта тепловіддачі α_{2m} до цукрового розчину масовою концентрацією 50 %, 60 % та 70 % складає: 11...20 %. Коефіцієнти теплопередачі (k_m) розраховані за методом регулярного режиму мають розбіжність у 8...20 % для вибраних концентрацій розчину. Спостерігається загальне збільшення точності визначення α_2 та k_m із збільшенням в'язкості розчину.

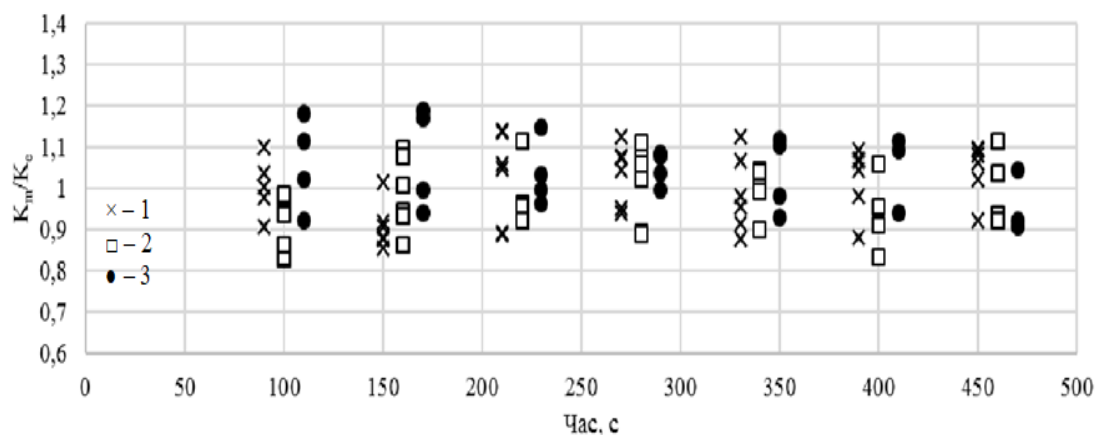


Рисунок 5.18 – Співвідношення K_m/K_e на протязі експерименту 1, 2, 3 – відповідно масові концентрації цукрового розчину 50, 60 і 70 %

Оцінка похибок визначення величин дала наступні результати [107]: відносна похибка визначення теплового потоку – 4,9...8,72 %; коефіцієнту тепловіддачі до цукрового розчину α_{2m} – 5,4...11,9 %; коефіцієнта теплопередачі – 7,0...9,1 %.

Оскільки, попередньо об'єм з цукровим розчином заявлений, як «обмежений об'єм» з позиції теплообміну, для остаточного переконання в правильності цього твердження проведено дослідження відносної товщини граничного теплового шару (δ/R) з врахуванням експериментальних умов. δ та R – відповідно товщина граничного теплового шару та радіус ємності з дослідною рідиною. Граничний тепловий шар визначено згідно [97].

Для концентрації цукрового розчину 70 % за умов проедення досліджень спостерігається зміна відносної товщини граничного теплового шару у межах 1,03 до 1,08; для 60 % – 0,55...0,87; для 50 % – 0,44...0,61. Тобто, для 70 % цукрового розчину процес протікає за умов коли δ/R близький до 1 – «обмежений об'єм»; для 50 та 60 % – на межі великий об'єм – обмежений об'єм.

Результати отримані за допомогою обробки даних методом регулярного теплового режиму (РТР) дають досить прийнятну з точки зору процесів теплообміну збіжність та можуть бути використані для опису теплообмінних процесів з достатньою точністю. Обробку експериментальних даних за даною методикою можна вважати перспективним продовженням Експериментально-розрахункового методу (ЕРМ) дослідження теплообміну.

Встановлено, що нестационарний процес теплообміну в обмеженому об'ємі, заповненою в'язкою рідиною, у вигляді циліндричної ємності з відносною довжиною ($l/d = 1$), і в якій відносна товщина теплового граничного шару близька до одиниці ($\delta/R \approx 1$), можна проаналізувати методом регулярного теплового режиму. Обробка методами РТР потребує меншої кількості вимірювань ніж квазістационарні методи, дозволяють визначити область даних, в яких очікується більш достовірний результат.

В даних умовах, визначені за допомогою РТР значення коефіцієнтів теплопередачі від грійної води до розчину дають відхилення від експериментальних до 20 %. В той же час аналіз експериментальних даних нестационарних процесів методами стационарних дає відхилення до 40...45 %. Відносна похибка визначення коефіцієнту теплопередачі – 7,0...9,1 %.

6 ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ РЕГУЛЯРНОГО ТЕПЛОВОГО РЕЖИМУ В БІОГАЗОВОМУ ВИРОБНИЦТВІ

6.1 Коефіцієнт тепловіддачі середовища за умов обмеженої інформації по теплофізичним властивостям

Система рівнянь кінетичних процесів $\Psi_j(X, Y(X), S_j, A) \leq 0$ адаптується до умов розглядаємої конкретної задачі. Проблема визначення інтенсивності теплообміну, у випадках наявності інформації по теплофізичним властивостям у рідинних середовищах, вирішується традиційно з використаннями теорії подібності. На експериментальних стендах отримують масиви інформації на основі яких виводять залежності у критеріальному вигляді. Для визначених умов теплообміну підбирають (або виводять) критеріальні рівняння, по температурі процесу визначають із довідників теплофізичні властивості для умов теплообміну і розраховують. Враховують реологічне поведження [1, 4].

У випадку, який розглядається, в якості вихідних даних фігурує лише зразок багатофазного рідинного середовища теплофізичні властивості і реологічне поведження якого не встановлені. В літературі можуть бути лише фрагменти інформації. Обов'язково повинно бути встановлено діапазон температур, в якому реалізується тепло-технологічний процес біотехнології, яка вивчається.

В роботі досліджується теплоперенос в субстраті з реальної діючої біогазової установки, який являє собою багатофазе та багатокомпонентне середовище.

Прогнозування коефіцієнта тепловіддачі $\bar{\alpha}_2$ проводиться на прикладі сучасної біогазової установки з однопрохідним біореактором з локальними фрагментами багатократної циркуляції [108].

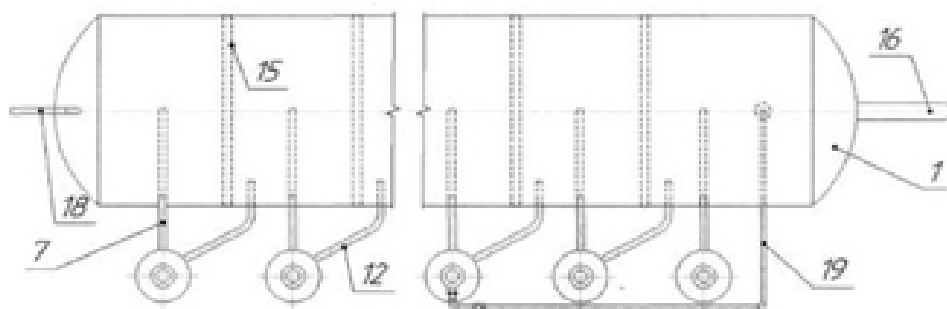


Рисунок 6.1 – Біогазова установка з однопрохідним біореактором з локальними фрагментами багатократної циркуляції

Біогазова установка з однопрохідним біореактором з локальними фрагментами багатократної циркуляції містить біореактор з газопроводом, встановлені вхідний та вихідний трубопроводи з патрубками, що приєднані до корпусу біореактора, в якому встановлено перегородки між секціями, відповідно стадіям зброджування субстрату, з п-виносними теплообмінниками з ерліфтним методом організації циркуляції субстрату, кожен з них з'єднаний з котлом, який з'єднаний з газопроводом, гідравлічним затвором, газгольдером і фільтром, і трубопроводом для підведення біогазу з компресором, а тяговою трубою – з ємністю-сепаратором, що з'єднаний з біореактором двома відвідними трубами для розподілення циркулюючого субстрату між двома сусідніми секціями, і трубою для відведення газу в газопровід, а підтрубний простір теплообмінників підвідним трубопроводом сполучений з біореактором. Додатково встановлено відвідний трубопровід, з останньої секції зброджування, для повернення частини субстрату у підтрубний простір (n-2) теплообмінника з ерліфтним методом організації циркуляції субстрату [1, 108].

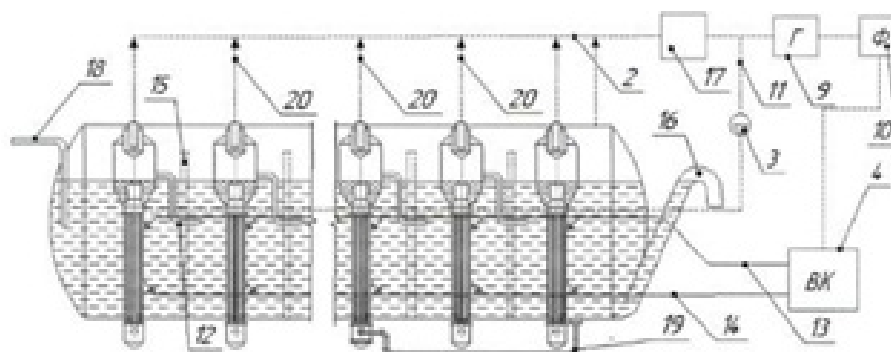


Рисунок 6.2 – Схема з'єднання елементів біогазової установки

Установка (рис. 6.1) складається з біореактора 1 з газопроводом 2 (рис. 6.2), компресора 3 і водогрійного котла (ВК) 4 з насосом (на кресленні не показаний) для здійснення циркуляції грійного теплоносія. Біореактор 1, який розділений на секції перегородками 15, сполучений підвідним трубопроводом 5 (рис. 6.3) з теплообмінником 6, підвідним трубопроводом 18, для завантаження свіжого субстрату, та трубопроводом з сифоном 6, для вивантаження відпрацьованого субстрату, трубопроводом 19 з (n-2)-им теплообмінником, а газопроводом 2 і першою відвідною трубою 7 для субстрату з ємністю-сепаратором 8. Водяний затвор 17 сполучений з газгольдером 9 та з фільтром 10, який газопроводом з'єднаний з водогрійним котлом 4 і споживачами. Теплообмінник 6 має тягову трубу, до якої в нижньому перерізі під'єднано трубопровід 11 для підведення біогазу після компресора 3. Тягова труба теплообмінника під'єднана до ємності-сепаратора 8, яка першою відвідною трубою 7 з'єднана з i-тою секцією та другою відвідною трубою 12 – з i+1-ою секцією біореактора 1, а трубою для відведення газу 20 – з газопроводом 2. Водогрійний котел сполучений трубопроводами прямої 13 і зворотної 14 води з теплообмінником 6 [20].

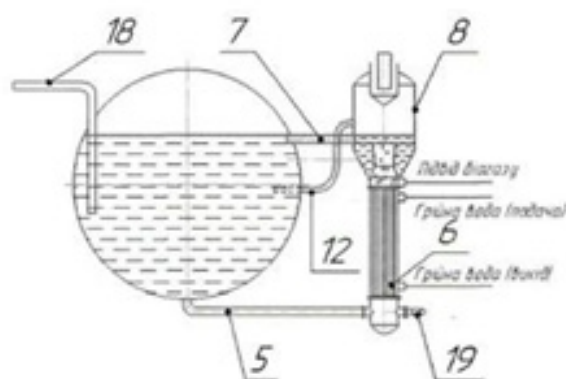


Рисунок 6.3 – Поперечний розріз біореактора з контуром циркуляції з теплообмінником

Для прогнозування коефіцієнту тепловіддачі в трубі біогазової установки з однопрохідним біореактором з локальним фрагментом багатократної циркуляції пропонується методика переходу від коефіцієнта тепловіддачі $\bar{\alpha}_2$ між внутрішньою поверхнею тонкостінного металевого циліндра П-3 і досліджуваним рідинним середовищем П-2 [100] до коефіцієнта тепловіддачі в круглій трубі $\bar{\alpha}_{2T}$.

Методика теплогідродинамічного розрахунку контура розроблена в [4, 15, 109].

Методичні основи синтезу включають математичну модель [110], яка, в свою чергу, містить функцію мети (функцію якості). Функція якості є невід'ємною частиною математичного моделювання, яка характеризує енергоефективність систем переробки органічних відходів (СПОВ) [1, 4].

Математичне формулювання задач проектування теплотехнологічних систем можна записати в такому вигляді [4, 23, 24]

$$\begin{aligned} &\text{знайти} && K(X, Y(X), S_j, A) \\ &\text{при} && B_{sj}(X, Y(X), S_j, A) \leq 0; \\ & && P_{sj}(X, Y(X), S_j, A) \leq 0; \\ & && X_{\min} \geq X \geq X_{\max}; Y_{\min} \geq Y \geq Y_{\max}; \\ & && S_j \in S_p; \quad S_p \subset S, \end{aligned} \quad (6.1)$$

де $K(X, Y(X), S_j, A)$ – функція мети; $B_{sj}(X, Y(X), S_j, A) \leq 0$ – система балансових рівнянь; $P_{sj}(X, Y(X), S_j, A) \leq 0$ – система рівнянь, що описують кінетичні процеси; $X_{\min} \geq X \geq X_{\max}; Y_{\min} \geq Y \geq Y_{\max}$ – система обмежень; X – сукупність незалежних змінних; Y – сукупність залежних змінних; S_j – j -та раціональна структура з кінцевої множини раціональних структур S_p , які є підмножиною можливої множини структур S ; A – зовнішні фактори [1, 4].

В роботі проводиться дослідження $P_{sj}(X, Y(X), S_j, A) \leq 0$.

Кінетичні процеси – це процеси гідродинаміки і теплообміну в теплообмінному обладнанні біогазової установки. Процеси гідродинаміки в системі рівнянь $P_{sj}(X, Y(X), S_j, A) \leq 0$ розглянуті і розраховані в [109].

Вся біотехнологія втрачає сенс, якщо відсутні закономірності теплопереноса в багатофазних рідинних середовищах, тобто в системі рівнянь (6.1). Це можливо лише після адаптації системи рівнянь [$P_{sj}(X, Y(X), S_j, A) \leq 0$] до рівня, в якому їх можна застосовувати для вирішення задачі інженерного визначення інтенсивності теплообміну в промислових теплообмінних пристроях для нагріву, охолодження багатофазних середовищ за умов обмеженої інформації по їх теплофізичним властивостям і реологічному поведженню.

Основна увага в даній роботі приділяється замиканню математичної моделі проектування теплотехнологічних систем. Автор

доповнює систему рівнянь $[P_{sj}(X, Y(X), S_j, A) \leq 0]$ рівняннями, які визначають теплоперенос.

Для математичного опису теплових процесів запропоновано використовувати експериментально-розрахунковий метод (ЕРМ) [111-114]. В обладнанні СПОВ, через використання різної комбінацій сумішей, для кожного конкретного випадку необхідно застосовувати окремі підходи: складати окремі математичні моделі, проводити окремий базовий експеримент [1, 4].

Нам не відомі узагальнені критеріальні рівняння, які б описували великий клас задач в математичному моделюванні теплообміну в багатофазних та багатокомпонентних середовищах.

Для створення математичної моделі [22] гідравлічного розрахунку контуру з теплообмінником та ерліфтною тяговою ділянкою використано методику [29], адаптовану до умов роботи цього циркуляційного контуру.

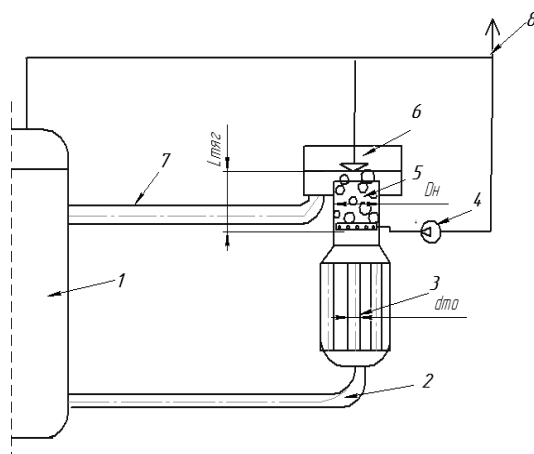


Рисунок 6.4 – схема циркуляційного контуру з теплообмінником і тяговою ділянкою: 1 – реактор, 2 – прямий трубопровід, 3 – теплообмінник, 4 – нагнітач біогазу, 5 – надставка з тяговою ділянкою, 6 – сепаратор, 7 – зворотний трубопровід, 8 – у газгольдер.

В [109] було проведено гідравлічний розрахунок циркуляційного контуру. Під час розрахунку гідродинамічних процесів у контурі виникли проблеми невизначеності теплофізичних властивостей (ТФВ) субстрату. Проблеми, що виникають під час математичного моделювання через складність визначення інтенсивності теплообміну в складних сумішах, вирішуються за допомогою експериментально-розрахункового методу (ЕРМ) [16, 109].

Для замикання математичної моделі по тепловому розрахунку в теплообміннику термостабілізації біогазового реактора наводиться

алгоритм для використання коефіцієнта тепловіддачі $\bar{\alpha}_2^{\text{пр}}$ для визначення коефіцієнта тепловіддачі в круглій трубі $\bar{\alpha}_{2\text{T}}$ [1].

В роботі в якості багатофазного середовища обрано субстрат з реальної діючої біогазової установки. Зразок субстрату відібрано в системі біогазової установки перед подачею в біогазовий реактор. Відібраний субстрат складається з жому цукрового заводу, бадилля цукрових буряків, жмиху яблук та відходів птахофабрики.

Як відомо субстрат – це багатофазне середовище, яка включає колоїдну систему на водній основі, тверді частинки і бульбашки газу. Закономірності теплообміну в багатофазних середовищах практично не вивчені [1].

При дослідженні в якості «модельних рідин» прийнято цукровий розчин масової концентрації сухих речовин $c = 50,60,70\%$ з відомими теплофізичними властивостями. В результаті проведення експерименту одержано масив експериментальних даних на «модельних рідинах». На основі регулярного теплового режиму та масиву експериментальних даних з використанням програми *Statistica 6* виводиться критеріальне рівняння, що описує теплообмін у тонкостінному металевому циліндрі

$$\overline{Nu}_2 = 0,0038 \cdot Re^{0,742} \cdot Pr_p^{0,456} \cdot Ra^{0,141}, \quad (6.2)$$

яке достовірне в межах $100 < Re < 14000$, $4 \cdot 10^5 < Ra < 3 \cdot 10^{15}$, $25 < Pr < 900$, де Nu_2 – критерій Нуссельта; Re – критерій Рейнольдса; Ra – критерій Ралея, $Ra = Gr_2 \cdot Pr_2$; $Gr_2 = (g \cdot \beta_2 \cdot \overline{\Delta T} \cdot H^3) / \nu^2$ – критерій Грасгофа; g – прискорення вільного падіння, m/s^2 ; β_2 – коефіцієнт температурного розширення досліджуваного рідинного середовища, $^{\circ}C^{-1}$; $\overline{\Delta T} = |\overline{T}_2 - \overline{T}_{\text{ст}}|$ – температурний напір; \overline{T}_2 – середньооб'ємна температура досліджуваного рідинного середовища, $^{\circ}C$; $\overline{T}_{\text{ст}}$ – середня температура стінки тонкостінного металевого циліндра, $^{\circ}C$; Pr_p – критерій Прандтля для середньооб'ємної температури досліджуваного рідинного середовища; ν – кінематична в'язкість досліджуваного рідинного середовища, m^2/s .

В наших експериментах поправка $\left(\frac{Pr_p}{Pr_{\text{ст}}}\right)^{0,25}$ оцінюється в межах 0,97-1,04 під час охолодження та нагрівання досліджуваного рідинного середовища. Тому при отриманні критеріального рівняння на основі наших експериментів поправка $\left(\frac{Pr_p}{Pr_{\text{ст}}}\right)^{0,25}$ не була використана для врахування напрямку теплообміну.

Після проведення реструктуризації критеріальне рівняння (6.2) приймає вигляд

$$\bar{\alpha}_2^{\text{PTP}} = 0,0038 \cdot \bar{\omega}^{0,742} \cdot l^{0,165} \cdot g^{0,141} \cdot \overline{\Delta T}^{0,141} \cdot \text{КФВ}_{(-v)} \cdot \nu^{-0,427}, \quad (6.3)$$

де $\bar{\omega}$ – умовна характерна швидкість на крайній точці пропелера, м/с; $l = 0,08$ м – діаметр мішалки; $\text{КФВ}_{(-v)}$ – комплекс фізичних властивостей без врахування кінематичної в'язкості ν_2 досліджуваного рідинного середовища, $\text{КФВ}_{(-v)} = \beta_2^{0,141} \cdot \rho_2^{0,597} \cdot \text{Cp}_2^{0,597} \cdot \lambda_2^{0,403}$, β_2 – коефіцієнт температурного розширення, 1/К; ρ_2 – густина, кг/м³; Cp_2 – питома теплоємність, Дж/(кг·К); λ_2 – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К).

На рис. 6.5 представлена залежність $\text{КФВ}_{(-v)}$ від \overline{T}_2

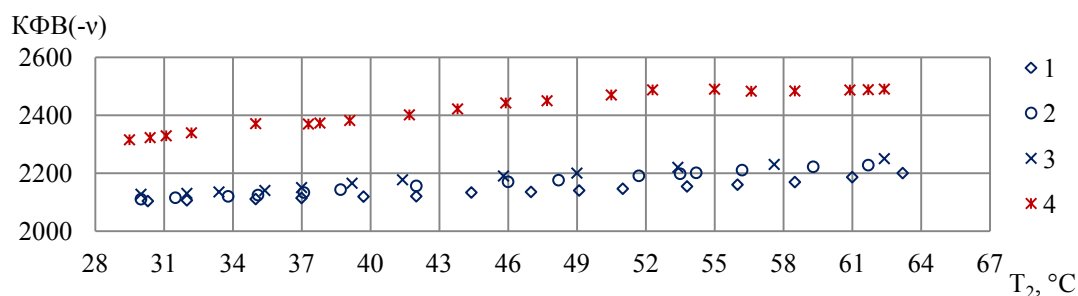


Рисунок 6.5 – $\text{КФВ}_{(-v)}$ для «модельних рідин» в залежності від температури в умовах вимушеної конвекції зі швидкістю руху $\bar{\omega} = 0,14$ м/с: 1 – цукровий розчин $c = 50\%$; 2 – цукровий розчин $c = 60\%$; 3 – цукровий розчин $c = 70\%$; 4 – вода

Провівши аналіз встановлено, що для «модельних рідин» $\text{КФВ}_{(-v)}$ змінюється на 4 % в діапазоні температур біотехнологічного процесу, а для субстрату – на 6 %. Отже, КФВ незначно залежить від β , ρ , λ і Cp .

Використовуючи реструктуризоване рівняння (6.3), вводимо поправку на в'язкість $\Pi(\nu) = \nu^{-0,427}$ [1]

$$\Pi(\nu) = \nu^{-0,427} = \frac{\bar{\alpha}_2^{\text{PTP}}}{0,0038 \cdot \omega^{0,742} \cdot l^{0,165} \cdot \overline{\Delta T}^{0,141} \cdot \text{КФВ}_{(-v)}}. \quad (6.4)$$

На рис.6.6 наводиться порівняння поправки $\Pi(\nu) = \nu^{-0,427}$ по відомій в'язкості із довідників $\Pi(\nu)_T$ і в'язкості знайденою за запропонованим алгоритмом $\Pi(\nu)_a$ для цукрового розчину $c = 50\%$ і $c = 60\%$ [1].

На рис. 6.6 наводиться співставлення поправки на в'язкість $\Pi(\nu)$ цукрового розчину $c = 50, 60\%$ із довідників $\Pi(\nu)_T$ [115] та розрахованої поправки на в'язкість $\Pi(\nu)_a$ з використанням експериментально – розрахункового методу.

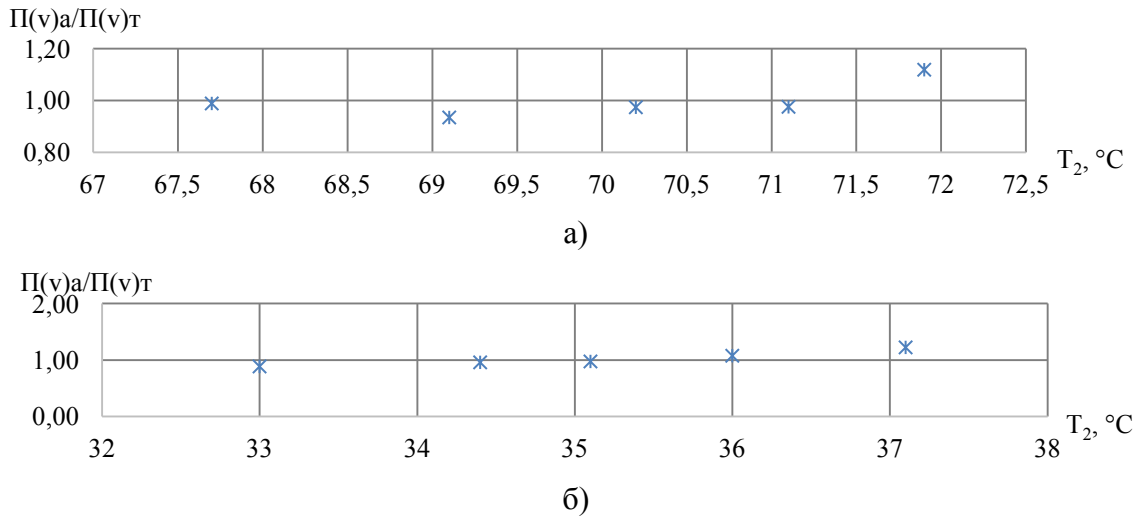


Рисунок 6.6 – Співставлення $\Pi(v)_a$ і $\Pi(v)_T$ в залежності від температури в умовах вимушеної конвекції зі швидкістю руху $\bar{w} = 0,14$ м/с: а) – цукровий розчин $c = 50$ %; б) – цукровий розчин $c = 60$ %

Цукровий розчин – однофазне середовище. При різному числі обертів, поправка на в'язкість повинна бути однакою $\Pi(v) = f(T_2)$. Якщо не має ломки структури в рідині, або не має впливу двофазності, тоді число обертів, не повинно впливати на значення $\Pi(v)$. Якщо є вплив двофазності при різних числах обертів – то можливо $\Pi(v)_1 \neq \Pi(v)_2 \neq \Pi(v)_3$ [1].

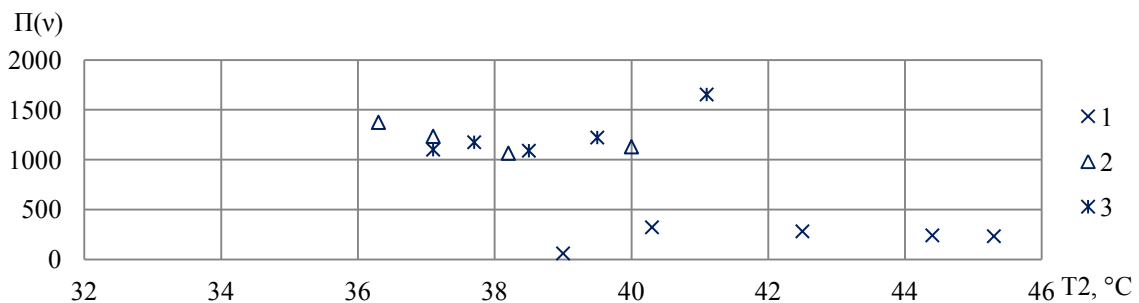


Рисунок 6.7 – Поправка $\Pi(v)$ для субстрату в залежності від температури зі швидкістю руху \bar{w} , м/с: 1 – 0,49; 2 – 0,69; 3 – 0,79

Досліджується теплообмін у субстраті в умовах вимушеної конвекції (рис. 6.7).

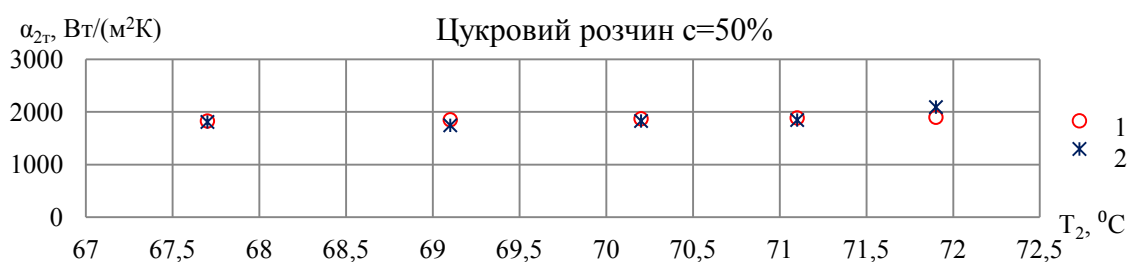
Якщо поправка на в'язкість $\Pi(v)$ субстрату, при різному числі обертів, буде мати розбіжність не більше ± 40 %, то дану поправку з наведеного алгоритму $\Pi(v)$ використовуємо для переходу до поправки на в'язкість $\Pi(v)'$ в круглій трубі [1].

Якщо ж поправка на в'язкість $\Pi(v)$ субстрату, при різному числі обертів, буде мати розбіжність більше 40 %, то дану поправку $\Pi(v)$

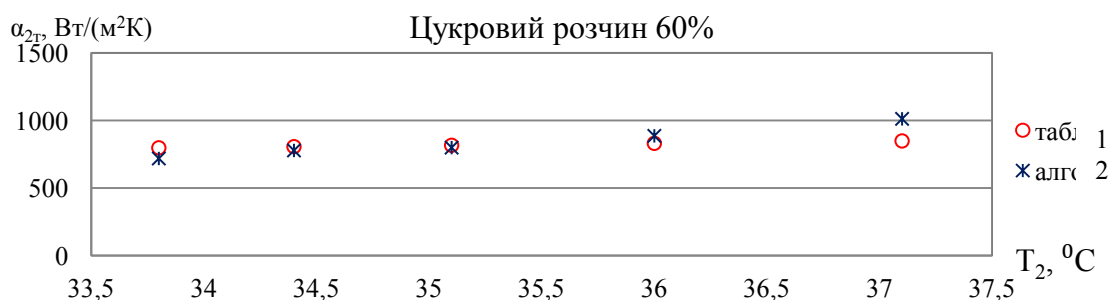
розглядаємо, як поправку на в'язкість ($v^{1/n1}$) разом з поправкою на двофазність $\Pi_{дф}$. Тоді будемо мати: $\Pi(v) = (v^{1/n1}) \cdot (\Pi_{дф})$.

ГІПОТЕЗА: наш метод переходу від коефіцієнта тепловіддачі між внутрішньою поверхнею тонкостінного металевого циліндра і досліджуваним рідинним середовищем $\bar{\alpha}_2^{ртр}$ до коефіцієнта тепловіддачі в круглій трубі $\bar{\alpha}_{2т}$ за умов руху цього ж середовища більш надійний, коли це середовище – однофазне (можна розглядати як гомогенне) [1].

Коефіцієнт тепловіддачі $\bar{\alpha}_{2т}$ в круглій трубі визначаємо з використанням $\Pi(v)_a$ і $\Pi(v)_t$ для цукрового розчину $c = 50 \%$, цукрового розчину $c = 60 \%$.



а)



б)

Рисунок 6.8 – Коефіцієнт тепловіддачі в круглій трубі при в'язкості з таблиці і в'язкості з алгоритму в залежності від температури зі швидкістю руху $\bar{w} = 1,1$ м/с

Аналізуючи наведені дані на рис.6.8, маємо розбіжність результатів коефіцієнтів тепловіддачі в круглій трубі $\pm 20 \%$.

Використовуємо поправку на в'язкість $\Pi v = v^{-0,427}$ для переходу від коефіцієнта тепловіддачі $\bar{\alpha}_2^{ртр}$ до коефіцієнта тепловіддачі в круглій трубі $\bar{\alpha}_{2т}$. Робимо перехід від поправки на в'язкість з наведеного алгоритму $\Pi(v) = (v^{1/n1})$ до поправки на в'язкість в круглій трубі $\Pi(v)' = (v^{1/nт})$. Після чого прогнозуємо коефіцієнт тепловіддачі $\bar{\alpha}_{2т}$ (рис. 6.9) [1].

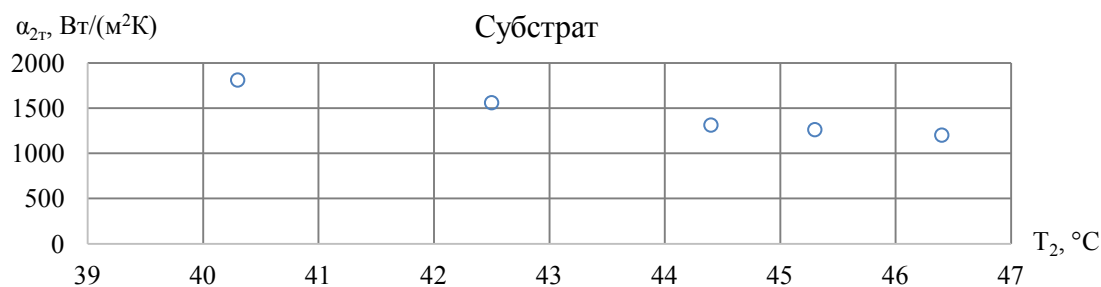


Рисунок 6.9 – Коефіцієнт тепловіддачі до субстрату в круглій трубі $\bar{\alpha}_{2T}$

Прогнозуємий коефіцієнт тепловіддачі в круглій трубі складає 1200-1800 Вт/(м²·К), для умов визначених з гідродинамічних розрахунків [104], а розбіжність складає $\pm 15\%$. Умова визначення коефіцієнта тепловіддачі в круглій трубі $\bar{\alpha}_{2T}$ – швидкість руху субстрату 0,5 м/с, щоб не порушувався біотехнологічний процес [1].

Застосовуючи методи регулярного теплового режиму і теорії подібності отримуємо оціночне значення коефіцієнтів тепловіддачі в натурній теплообмінній установці.

Для прикладу прогнозуємо інтенсивність теплообміну в теплообміннику термостабілізації реактора. В якому субстрат може бути як нагрівним так і грійним теплоносієм. В реакторі коливання середньої температури субстрату та температури внутрішньої стінки реактора повинно змінюватись в межах $\pm 1,5^\circ\text{C}$ [116, 117]. Далі виконується стандартний алгоритм розрахунку натурної теплообмінної установки.

У випадку, який розглядається, інформація по теплофізичних властивостям і реологічному поведженню субстрату обмежена. Вирішення цієї проблеми розрахунку проводимо із застосуванням експериментально-розрахункового методу [15], але вдосконаленого в процесі наших нових досліджень [87, 100].

6.2 Визначення коефіцієнту тепловіддачі в багатофазних неньютонівських середовищах

Ріст енергетичної ефективності біогазових установок гальмується на сам перед недоліками методів, конструкцій та технологій для термостабілізації суміші в біореакторі, проблемами сталості температур по об'єму реактора. Загальновідомо, що біогазові установки (БГУ) на заході виробляють у вигляді біогазу більше енергії

ніж потрібно для підтримання функціонування самої БГУ (попередній підігрів, транспортування, термостабілізація та ін.).

Наступною проблемою є сировини для БГУ, так як це можуть бути відходи тваринництва, рослинництва, харчові відходи та відходи промисловості, а зазвичай навіть суміші вищеперерахованого. Кількість варіантів складу сумішей прямує до нескінченності [3], тому дослідження окремо кожного варіанту не є доцільним. Підтвердженням цього є умови оголошені для наукових робіт на XVI Мінському міжнародному форумі з тепломасообміну, де чітко зазначено, що дослідження теплофізичних властивостей речовин не приймаються і не несуть наукової цінності [2].

Для якісного протікання процесу зброджування необхідне досить жорстке дотримання температурного режиму в БГУ. Так за умов допустимі коливання температури в психрофільному режимі становлять $\pm 2^{\circ}\text{C}$, а у термофільному точність підвищується до $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ [3]. Важливу роль відіграють непрямі параметри: розмір фракцій, вологість субстрату в різні періоди року, інтенсивність перемішування. Створення раціонального способу перемішування сприяє створенню оптимальних гідродинамічних і температурних умов існування метаноутворюючих бактерій, а також більш ефективному використанню об'єму метантенка [3]. Це спонукає до розробки засобів оцінки теплофізичних властивостей і інтенсивності теплообміну сировини в БГУ безпосередньо під час проведення технологічного процесу збродження.

Нам невідомі такі установки і експерименти які б покрили весь спектр описаних вище проблем. В практиці потрібні методи оцінки інтенсивності теплообміну за умов обмеженої інформації по теплофізичним властивостям складних сумішей для проведення як глибоких фундаментальних досліджень так і експрес аналізу на діючих БГУ. Такі методи з'явилися і розвиваються [5], спостерігається збіжність результатів, отриманих за цими методами, на достатньому рівні. Наразі є можливість подальшого удосконалення цих методик застосуванням методу регулярного теплового режиму.

В якості дослідної речовини обрано тверду фракцію гною свиней. Орієнтовна маса свині 85 кг, на відгодівлі. Згідно до НТП 17-99^x [118] за описаних умов вологість гною становить 75 %. Для проведення досліджень твердий гній розводили водою для отримання різних

вологостей. Процес змішування виконували в наступній послідовності: за балансовими залежностями розраховували необхідну масу води яку треба додати до певної маси твердої фракції, далі за допомогою лабораторних ваг зважували масу гною і води з наступним їх змішуванням у дослідній ємності, проводили ретельне перемішування отриманого розчину для досягнення однорідної концентрації. Наступні експерименти проводили вже з готовою сумішшю – субстратом.

Субстратом вважається неоднорідна суміш, дисперсійним середовищем якої є розчинні у воді солі і низькомолекулярні органічні з'єднання екскрементів тварин, а дисперсною фазою – тверді частинки, нерозчинні домішки мінерального і органічного походження.

Для досліджень підготовлено субстрат вологістю 82, 85, 90, 94 %, вік субстрату перед початком експерименту 5 та 20 днів. Продукт, яким годувались тварини – горох з висівками. Вміст сухих органічних речовин для даного гною не розраховувався.

Під час приготування субстратів спостерігалось випадіння осаду в розчині вологістю 82 % та погана гомогенність (однорідність) навіть під час постійного перемішування. У суміші 85 % певна неоднорідність зберігалась і осад спостерігався через 5 хвилин після зупинення перемішування. Для сумішей вологістю 90 і 94 % спостерігалась однорідність розподілу компонентів з утворенням мутної в'язкої суспензії та відсутність осаду близько 15 хвилин після припинення перемішування. Для проведення досліджень на експериментальному стенді обрано суміш з вологістю 85-94 %.

Дослідження проводили за допомогою експериментального стенду описаного в [5]. Дослідна установка складається з внутрішньої ємності яка має форму тонкостінного циліндра (товщина стінки 0,5 мм), в якому відбувається нагрів суміші. Нагрів відбувається за рахунок теплоти води розміщеної в зовнішньому коаксіальному каналі. Кільцева порожнина має зовнішній діаметр 200 мм, внутрішній – 97 мм, висота – 12 см; внутрішній циліндр має діаметр 96 мм; висоту – 90 мм.

Температури середовищ заміряли по висоті ємностей з водою та субстратом у 5-ти точках в геометричному центрі. Маса гарячої води 2,3 кг, маса дослідної рідини 700-800 г. Середня тривалість нагріву 20хв. Загальна кількість нагрівань для умов вільної конвекції – 20, для

умов вимушеної – 40. Схему експериментальної установки наведено на рисунку 6.10. Характеристику дослідних середовищ в таблиці 6.1.

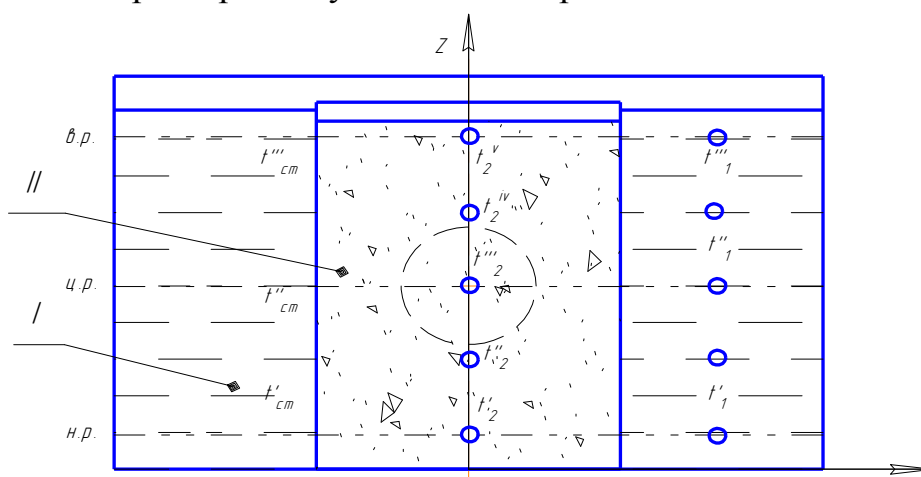


Рисунок 6.10. - Принципова схема вимірювань температур t_1 і t_2

Відповідно до рисунку 6.10: I – зовнішня порожнина із грійним середовищем (вода); II – внутрішня циліндрична ємність із дослідним середовищем; $t'_1 \dots t'_n$ – локальні температури у зовнішній ємності з водою; $t''_1 \dots t''_n$ – локальні температури у внутрішній ємності із дослідним середовищем; $t'_{ст} \dots t''_{ст}$ – отримана із розрахунку температура стінки.

Послідовність проведення серії дослідів наступна: внутрішню порожнину дослідної установки (рис. 6.10) заповнюємо дослідною рідиною (гній, цукровий розчин, олія, вода). Зовнішню порожнину заповнюємо гарячою водою. Під час експерименту вода зовнішньої ємності гріє рідину у внутрішній ємності.

Для проведення досліджень застосуємо експериментально-розрахунковий метод удосконалюючи його застосуванням теорії регулярного теплового режиму (РТР) [118]. Дана методика з використанням РТР зручна в даному випадку оскільки для її реалізації відсутня необхідність в термостабілізації установки, можливість вимірювання температур в 2-х чи декількох точках, швидкоплинність і як наслідок менші вимоги до теплової ізоляції, широкий вибір джерела теплоти. Шуканою величиною є: коефіцієнт тепловіддачі від води до стінки α_1 та від стінки до середовища α_2 , темп нагріву середовища m .

На прикладі покажемо розподіл надлишкової температури в часі для вологостей субстрату гною 92 і 95 % (рис. 6.10). Надлишкова температура це модуль різниці між середньооб'ємною температурою

рідкого середовища $\bar{t}_{p.c.}$ у внутрішній посудині (I) і середньоб'ємною температурою води в кільцевому каналі (II) \bar{t}_b :

$$\vartheta = |\bar{t}_{p.c.} - \bar{t}_b|. \quad (6.5)$$

де $\bar{t}_{p.c.} = (t'_1 + t''_1 + t'''_1 + t^{IV}_1 + t^V_1) / 5$, $\bar{t}_b = (t'_2 + t''_2 + t'''_2 + t^{IV}_2 + t^V_2) / 5$, °C.

Для визначення середньоб'ємних температур проводилось осереднення температур по висоті теплообмінної поверхні у фіксовані моменти часу.

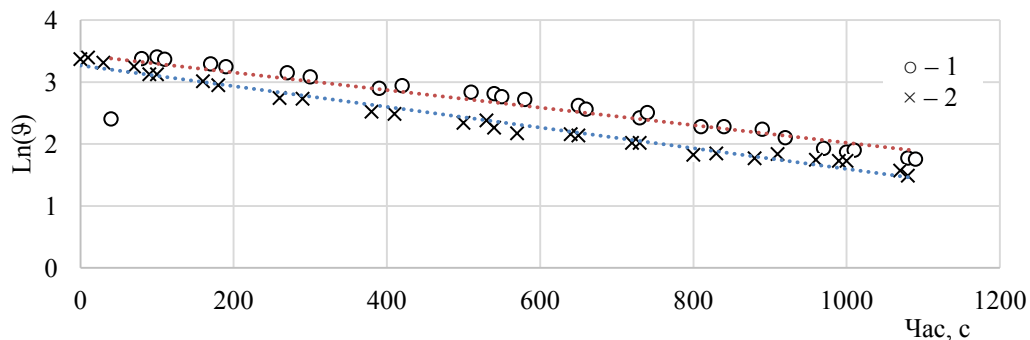


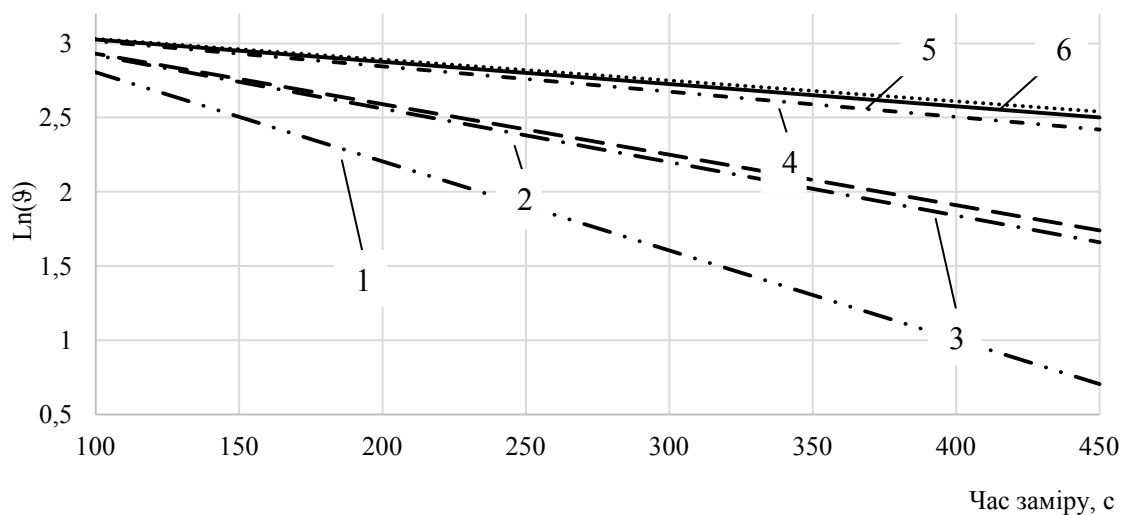
Рисунок 6.11 – Надлишкова температура 1 – свинячого гною вологістю 92 %; 2 – 94 %

Для пояснення отриманих даних скористаємось поняттям темпу нагріву або охолодження. У літературі [91] зазначено, що регулярний тепловий режим настає за умови, коли функція (6.6) набуває лінійного вигляду

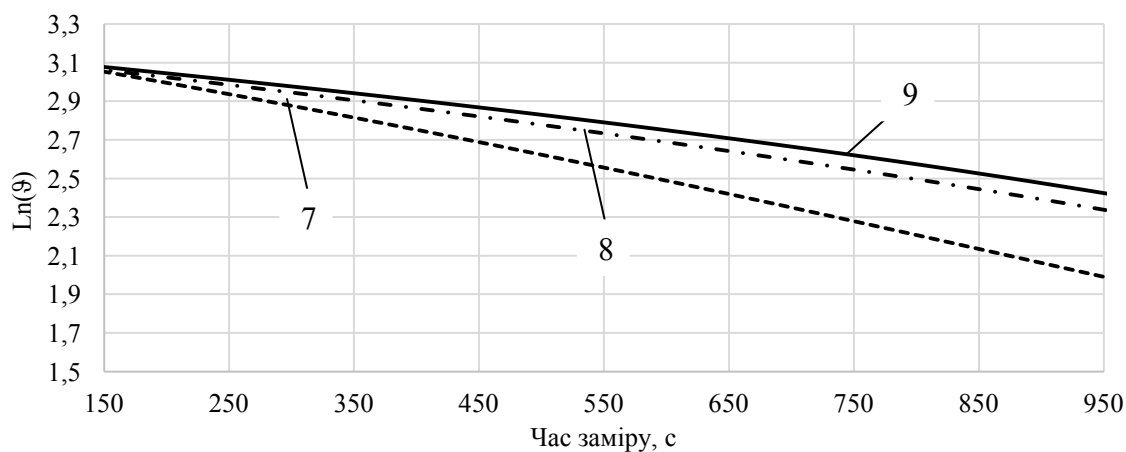
$$m = \frac{\ln \vartheta' - \ln \vartheta''}{\tau' - \tau''}, \quad (6.6)$$

де ϑ', ϑ'' – надлишкові локальні температури тіла в початковий τ' та кінцевий τ'' момент часу відповідно, $\vartheta = t'_1 - t_{ct}$, де t'_1, t_{ct} визначаються для двох моментів часу τ' і τ'' . На етапі регулярного теплового режиму субстрат з вологістю 94 % має $m = 0,0017$, тоді як для вологості 90 % – $m = 0,0015$. Результати отримані в результаті статистичної обробки експериментальних даних. Апроксимація даних для субстратів з різною вологістю дає коефіцієнт детермінації 97...98 %.

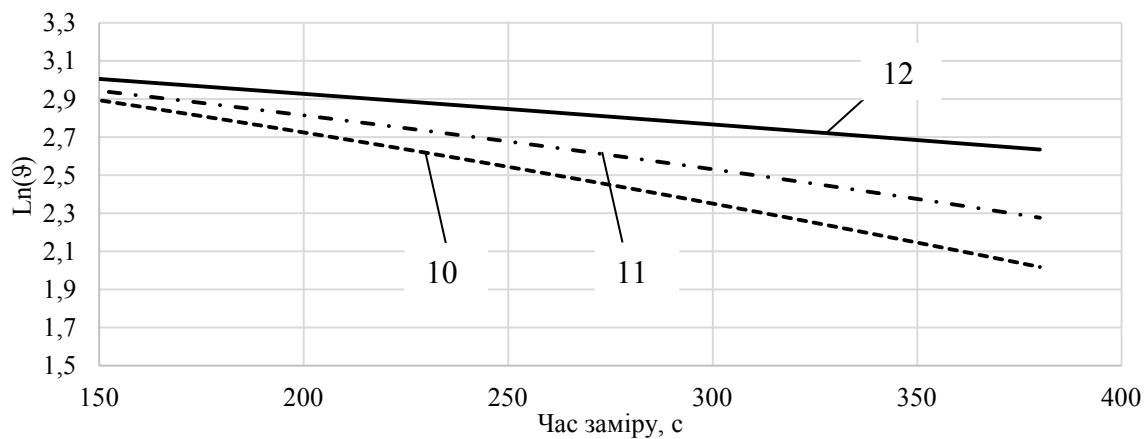
На рисунку 3 для порівняння наводяться експериментальні результати для води, цукрового розчину і соняшникової олії. Обробка проводилась аналогічно до попередньої. Дослідження проводились в однаковому діапазоні температур, на одному ж і тому самому експериментальному стенді. Результати заміру температур виводились на комп'ютер.



а)



б)



в)

Рисунок 6.12 – Логарифми надлишкових температур дослідних рідинних середовищ: а) – різномірні рідини; б) – субстрат гною свиней, $W = 90\%$; в) – субстрат гною свиней, $W = 94\%$. 1 – вода; 2 – олія рафінована; 3 – розчин цукру, масова концентрація 70% ; 4 – субстрат гною свиней, $W = 94\%$, вільна конвекція; 5 – субстрат гною свиней, $W = 90\%$, вільна конвекція; 6 – субстрат гною свиней, $W = 85\%$; 7, 8, 9 – субстрат гною свиней, $W = 90\%$, швидкість зсуву $1,07, 0,85, 0,53$ (1/с) відповідно; 4 – субстрат гною свиней, $W = 94\%$, швидкість зсуву $1,07, 0,85, 0,53$ 1/с (1/с) відповідно.

Представимо, для більшої повноти аналізу матеріалів досліджень, залежність темпу нагрівання суміші від її параметрів (вологість, концентрація) (табл. 6.1). В таблиці 6.1 наведено характеристики дослідних середовищ.

Таблиця 6. 1. – Характеристики дослідних середовищ

Номер лінії на рис. 3	Рідинне середовище	Тип конвекції *	Темп нагріву	Швидкість зсуву, 1/с	Діапазон зміни середньо-об'ємної температури води	Діапазон зміни середньо-об'ємної температури дослідного середовища	Теплофізичні властивості дослідного середовища
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Вода	В	0,0068	–	82...25	22...60	Відомі
2	Олія рафінована	Вим.	0,0017	0,53	82...25	22...60	Відомі
3	Розчин цукру, масова концентрація 70 %	Вим.	0,0016	0,53	75...30	30...58	Відомі
4	Субстрат гною свиней, W = 94 %	В	0,00064	–	75...30	25...60	Невідомі
5	Субстрат гною свиней, W = 90 %	В	0,00055	–	75...30	25...60	Невідомі
6	Субстрат гною свиней, W = 85 %	В	0,00051	–	75...30	25...60	Невідомі
7	Субстрат гною свиней, W = 90 %	Вим.	0,0013	1,07	75...30	25...60	Невідомі
8	Субстрат гною свиней, W = 90 %	Вим.	0,0011	0,85	75...30	25...60	Невідомі
9	Субстрат гною свиней, W = 90 %	Вим.	0,0008	0,53	75...30	25...60	Невідомі
10	Субстрат гною свиней, W = 94 %	Вим.	0,0036	1,07	75...30	25...60	Невідомі
11	Субстрат гною свиней, W = 94 %	Вим.	0,0027	0,85	75...30	25...60	Невідомі
12	Субстрат гною свиней, W = 94 %	Вим.	0,0016	0,53	75...30	25...60	Невідомі

*В – вільна конвекція, Вим. – вимушена конвекція

Таблиця 6.1 дає змогу проаналізувати інформацію наступним чином: субстрат вологістю до 90 % слабо піддається інтенсифікації теплообміну перемішуванням, $m = 0.0013$. Тоді як підвищення вологості на 2 % дає приріст по темпу нагрівання в 2-3 рази більший ніж перемішування. Тобто, збільшення сухих речовин в більшій мірі пригнічує теплообмін ніж організація конвекції.

Дані дають змогу експрес оцінки схильності різних сумішей до теплообміну, що є одним з етапів аналізу роботи діючих установок по пробці органічних відходів. За показником m – темпом нагрівання

можна визначити чи доцільно використовувати саме таку суміш і проводити її нагрів, а також попередньо проаналізувати та встановити, що доцільно додати до суміші щоб підвищити або знизити її здатність до нагріву.

Важливим питанням якості роботи БГУ залишається перемішування. Вибір оптимального діапазону швидкості можна оцінити з врахуванням реологічного поведіння рідини з обмеженою інформацією по теплофізичних властивостях. Для оцінки реологічної структури дослідних рідин використаємо експериментальні значення комплексу фізичних властивостей рідини $(EKФВ_6)^{(1/n)}$, які отриманих на базовому експериментальному стенді [4].

Для оцінки зростання інтенсивності теплообміну за умов руйнування структури субстрату використовували методику запропоновану в [10], через критеріальне рівняння, що описує інтенсивність теплообміну у внутрішній робочій порожнині. Рівняння (6.7) для вимушеного руху з врахуванням природної конвекції, отримане за допомогою нашого експериментального стенду описаного в [5]

$$Nu = 0,0549 \cdot Re^{*0,589} \cdot Pr_p^{0,33} \cdot (Gr_H \cdot Pr_p)^{0,1} \cdot \left(\frac{Pr_p}{Pr_{ct}} \right)^{0,25} \quad (6.7)$$

У рівнянні (6.7): $Re^* = \frac{\bar{w} \cdot 2\delta}{\nu}$ – критерій Рейнольдса для наших умов; Pr_p – критерій Прандтля для рідини, визначений за температурою рідини; $Gr_H = (g \cdot \beta \cdot \bar{\Delta t} \cdot H^3) / \nu^2$ – критерій Грасгофа; Pr_{ct} – критерій Прандтля для рідини, визначений за температурою стінки; $\bar{w} = \pi \cdot n \cdot d_M / 60$ – умовна характерна швидкість руху рідини, м / с; n – частота обертання мішалки, об/хв; d_M – визначальний лінійний розмір для вимушеної конвекції, діаметр мішалки м; ν – кінематична в'язкість рідкого середовища, м²/с; g – прискорення вільного падіння, м/с²; H – визначальний лінійний розмір в умовах природної конвекції, м; $\bar{\Delta t} = (\bar{t}_{ct} - \bar{t}_p)$ – температурний напір; \bar{t}_{ct} і \bar{t}_p – усереднена температура стінки і досліджуваного рідкого середовища, °С; β – коефіцієнт температурного розширення рідкого середовища, °С⁻¹; λ – теплопровідність рідкого середовища, Вт / (м·К); ρ – густина рідкого середовища, кг/м³; c_p – питома теплоємність рідкого середовища,

кДж/(кг·К). Поправка на напрямок теплообміну $(Pr_p / Pr_{cr})_6^{0,25}$ визначалася за спеціально розробленим методом за умов використанням рідин і сумішей, теплофізичні властивості яких невідомі [4].

Рівняння (6.7) може бути використано в межах $20 < Re_{26}^* < 3,7 \cdot 10^3$, $6 \cdot 10^6 < (Gr_H \cdot Pr_p) < 2 \cdot 10^8$, $3,2 < Pr_p < 1,7 \cdot 10^3$.

Із рівняння (3) визначаємо базовий комплекс фізичних властивостей в такому вигляді

$$K\Phi B_6 = \underbrace{C_p^{0,43} \cdot \rho^{0,43} \cdot \beta^{0,1} \cdot \lambda^{0,57}}_{P_1} \cdot \nu^{-0,359}; \quad (6.8)$$

$$P_1 = C_p^{0,43} \cdot \rho^{0,43} \cdot \beta^{0,1} \cdot \lambda^{0,57}. \quad (6.9)$$

Для оцінки зростання інтенсивності теплообміну при руйнуванні структури з масиву експериментальних даних отриманих під час обробки відокремлюємо результати за умовами: $\bar{t}_2 = \text{const}$, $\bar{\Delta t}_6 = \text{const}$ і представляємо у вигляді залежності (рис. 6.13). Еквівалент швидкості зсуву (далі по тексту – швидкість зсуву) для умов конкретної установки $\gamma = \bar{w} / [0,5(D_{\text{вн}} - d_M)]$ прийнято згідно [10], α_2 – коефіцієнт тепловіддачі від теплообмінної поверхні до досліджуваного рідкого середовища, Вт/(м²·К).

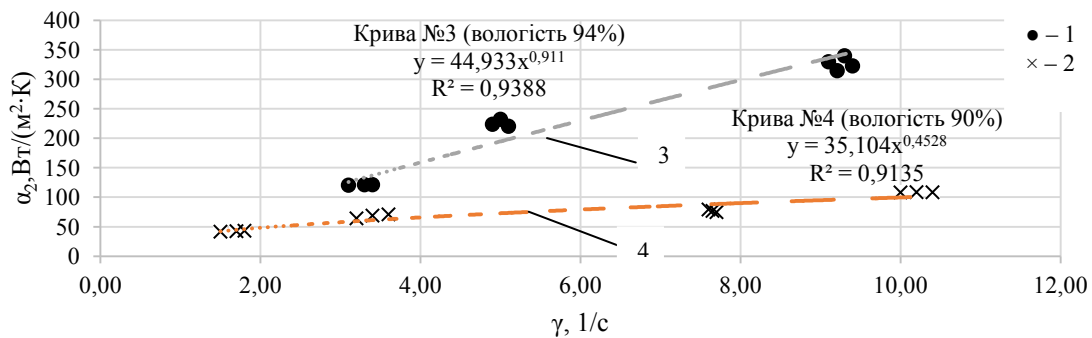


Рисунок 6.13 – Залежність коефіцієнту тепловіддачі до субстрату від швидкості зсуву: 1 – послід свиней вологістю 94 %; 2 – послід свиней вологістю 90 %; $\bar{t}_2 = 42$ °С; $\bar{\Delta t} = 11...13$ °С; 3, 4 – степенева апроксимація дослідних даних.

На рисунку 6.13 криві 3 і 4 представляють апроксимацію дослідних даних для вологостей 90 і 94 % у вигляді функції $\alpha_2 = C \cdot \gamma^b$, де b – показник степеню апроксимації, C – коефіцієнт рівняння. Отримані криві мають лінійний характер, оскільки для побудови обрано точки за умов $\bar{t}_2 \approx \text{const}$ і $\bar{\Delta t} \approx \text{const}$.

На рисунку 6.14 спостерігаємо, що за рахунок ломки структури отримуємо для посліду свиней 94 % інтенсивність теплообміну за умов $\gamma = 9,1 \text{ c}^{-1}$ в двічі більшу ніж за умов $\gamma = 3,5 \text{ c}^{-1}$. Що пояснюється зміною структури субстрату свиней.

Для посліду свиней з вологістю 90 % такий же аналіз показує збільшення коефіцієнту тепловіддачі в 1,7 рази, проте для субстрату вологістю 90 % вихідна залежність для α_2 не відповідає нашим експериментальним даним. Руйнування структури в даному випадку спостерігається, але руйнівний ефект за умов $W = 90\%$ обчислений з врахуванням залежності (6.9) не показує таку високу частку росту інтенсивності теплообміну за умови ломки структури, як при $W = 94\%$. Проведення аналізу даних з вибором інших $\bar{t}_2 = \text{const}$, $\bar{\Delta t}_6 = \text{const}$ показує аналогічні результати в межах очікуваної похибки 15...20 %.

Якщо експериментально визначити коефіцієнт тепловіддачі від стінки до досліджуваного рідкого середовища $\alpha_2^{\text{експ}}$, то експериментальне значення комплексу фізичних властивостей з рівнянь (6.8-6.10)

$$\text{ЕКФВ}_6 = \frac{\alpha_2^{\text{експ}}}{0,0549 \cdot \underbrace{\left[\frac{-0,59}{w} \cdot (g \cdot \bar{\Delta t}_6)^{0,1} \cdot \frac{H^{0,3}}{2\delta^{0,41}} \right]}_{\Pi_{62}} \cdot \left(\frac{\text{Pr}_p}{\text{Pr}_{\text{cr}}} \right)_6^{0,25}}. \quad (6.10)$$

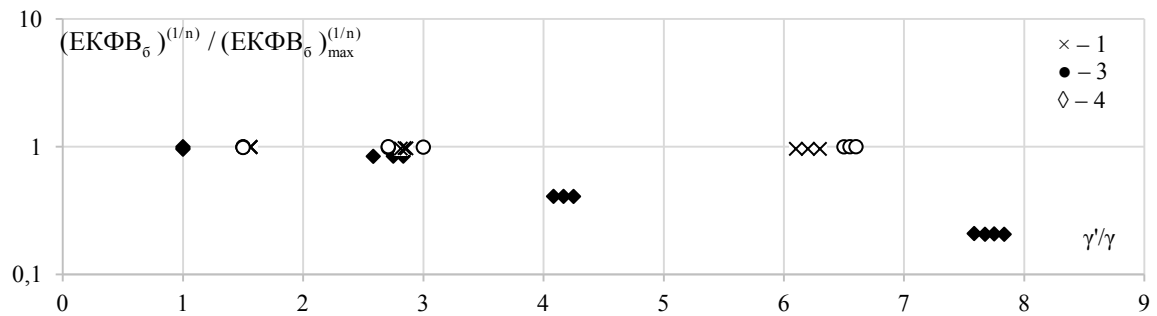
Аналіз чисельними методами залежностей (6.7) і (6.10) в досліджуваному діапазоні зміни температур та γ показав, що ступінь зміни комплексу параметрів P_1 істотно менше ступеня зміни $v^{-0,36}$, що узгоджується з [7]. Експериментальні дані представлені на графіку $(\text{ЕКФВ}_6)^{(1/n)} / (\text{ЕКФВ}_6)_{\text{max}}^{(1/n)} = f(\bar{\gamma})$ (рис. 6.14), $(\text{ЕКФВ}_6)^{(1/n)} / (\text{ЕКФВ}_6)_{\text{max}}^{(1/n)}$ – еквівалент ефективної в'язкості [10].

Оцінка впливу ломки структури та швидкості перемішування проводилась за допомогою залежності

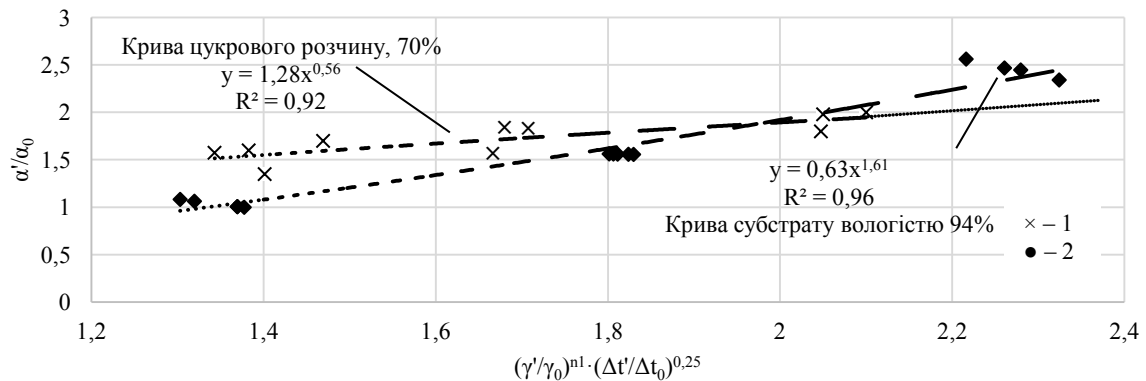
$$\alpha'/\alpha_0 = (\gamma'/\gamma_0)^{n1} \cdot (\Delta t/\Delta t_0)^{0,25}, \quad (6.11)$$

де α' і α_0 – поточне і мінімальне значення коефіцієнту тепловіддачі до субстрату, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; γ' і γ_0 – поточне і мінімальне значення еквіваленту швидкості зсуву; $\Delta t'$ і Δt_0 – поточне і мінімальне значення температурного напору; $\cdot (\Delta t/\Delta t_0)^{0,25} \approx (\text{Pr}_p/\text{Pr}_{\text{cr}})^{0,25}$ – вводимо для оцінки впливу напрямку теплообміну.

Залежність (6.11) витікає із залежності (6.7), якщо прийняти до уваги, що згадані вище залежності відносяться до експериментальних результатів одержаних на одній і тій же установці при одній і тій же визначальній температурі в межах незначних коливань температурного напору між грійною стінкою і рідким середовищем.



а) еквівалент ефективної в'язкості



б) Оцінка впливу ломки структури та швидкості перемішування на інтенсивність теплообміну

Рисунок 6.14 – Експериментальні результати еквіваленту ефективної в'язкості за умов різних значень умовної швидкості зсуву дослідної рідини: 1 – гною свиней із вологістю 94 % , температурний напір між гарячим і холодним теплоносієм в базовому експерименті $\bar{\Delta t}_\sigma = 7...18$ °C; 2 – гною свиней із вологістю 90 %, $\bar{\Delta t}_\sigma = 7...18$ °C; 3 – цукрового розчину масовою концентрацією 70 %, $\bar{\Delta t}_\sigma = 7...18$ °C; 4 – вода, $\bar{\Delta t}_\sigma = 5...20$ °C. Середня температура води, цукрового розчину і гною свиней \square 40 °C. \times

На рисунку 6.14 (а) витримується загальна тенденція зміни комплексу фізичних властивостей зі зменшенням швидкості зсуву гамма.

На різну поведінку субстрату з гною свиней в порівнянні з попередніми роботами, на нашу думку, вплинув різний температурний напір в експерименті, різний хімічний та гранулометричний склад, структуру, її стан, співвідношення рідкої, твердої і газоподібної фаз.

Провівши аналіз за залежністю $\alpha'/\alpha_0 = (\gamma'/\gamma_0)^{n1} \cdot (\Delta t/\Delta t_0)^{0,25}$ виявлено, що найбільш близькою рідиною за теплообмінними властивостями до даного субстрату є цукровий розчин 70 % масової концентрації. Як видно з рисунку, для даного цукрового розчину показник степеню в рівнянні складає 0,56, що відповідає показнику в рівнянні (6.11). Оскільки в субстраті вологістю 94 % наявна ломка структури то показник степеню біля γ'/γ_0 становить 1,61, що показує доцільність проведення інтенсифікації теплообміну даного субстрату шляхом перемішування.

Отримані дані представляють цінність під час розрахунку БГУ і вибору системи перемішування, теплогідродинамічних процесів в біотехнології.

Ріст соціально-економічної та енергетичної ефективності біогазових технологій гальмується недоліками методів, які забезпечують термостабілізацію субстрату, рівномірне розподілення температури в біореакторі.

Проведені дослідження теплообміну в структурованих і неструктурованих рідинних середовищах з обмеженою інформацією по фізичним властивостям, за умов нестационарного режиму теплообміну, з використанням методів обробки експериментальних результатів стаціонарних і нестационарних теплообмінних процесів (метод регулярного теплового режиму в системі «вода в коаксіальному об'ємі – досліджуєме рідинне середовище в тонкостінній посудині») дозволили встановити доцільність використання згаданих вище методів і умови, за якими відбувається руйнування структури рідинної суміші.

Встановлено, що субстрат гною вологістю 90 і 94 % є структурованою рідиною. Також експериментально встановлені умови, за якими відбувається руйнування структури, і, як результат, суттєве підвищення інтенсивності теплообміну [118].

6.3 Умови використання методу регулярного теплового режиму

1. Можливість визначення коефіцієнта тепловіддачі в елементах реального теплообмінного обладнання в промисловості.

2. Можливість оцінити ефективність відносно теплообміну поверхні різної конструкції в умовах теплообміну між твердої стінкою і субстратом (форму поверхні, конфігурацію).

3. Теплообмін при $Re < 10000$ – між твердою стінкою і субстратом – дозволяє оцінити коефіцієнт тепловіддачі і тим самим в реальному проекті зупинитися і більш обґрунтовано вибрати форму поверхні і її розташування.

4. Умови застосування нашого методу – застосовується для тих випадків теплообміну для яких існують методи розрахунку в рідинах з відомими теплофізичними властивостями.

5. Наш метод не підходить, коли не має критеріальної залежності для плануємої теплообмінної поверхні.

6. Для того, щоб користуватися нашими методами потрібно мати усталені критеріальні залежності для цих умов теплообміну (в геометричному плані). Для умов теплообміну, який добре вивчений з застосуванням теорії подібності і описані критеріальні залежності. Тому при вирішенні наших питань ми висуваємо гіпотези, які пов'язані і витікають із теорії подібності конвективного теплообміну.

7. Наш метод складається із відомих залежностей для рідин із відомими теплофізичними властивостями і логічних припущень, які витікають із теорії подібності.

8. Для того, щоб використовувати наш метод ми накопичуємо спостереження і експериментальні результати на нашому експериментальному стенді на рідинах із відомими теплофізичними властивостями. І при прийнятті рішень по прогнозуванню інтенсивності теплообміну з рідинами з невідомими теплофізичними властивостями, використовується теорія регулярного теплового режиму, теорія подібності та експериментальні результати власних досліджень на стенді.

9. Переваги нашого методу [1]:

- щоб вивчити теплообмін необхідно мати громіздкі і багатовартісні стенди, на яких складно провести експерименти в порівнянні з представленим портативним експериментальним стендом;

- на нашому експериментальному стенді є можливість на порядок більше провести досліджень, ніж на стендах з літератури для цих же умов.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

[1] О. В. Власенко, «Методи визначення інтенсивності теплообміну в багатофазних та багатокомпонентних середовищах» дис. док. філософ., КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, 2023.

[2] Г. Г. Гелетуша та ін. *Новітні технології біоенергоконверсії*. Київ, «Аграр Медіа Груп», 2010, 166 с.

[3] Г. Г. Гелетуша Науково-технічні засади виробництва енергії з біологічних видів палива : дис. докт. техн. наук : 05.14.08. Інститут технічної теплофізики НАН України. Київ, 2021. 329 с.

[4] С. Й. Ткаченко, Н. В. Пішеніна, *Нові методи визначення інтенсивності теплообміну в системах переробки органічних відходів*. Вінниця : ВНТУ, 2017, 148 с.

[5] Д. В. Степанов, Ресурсощадні теплогідродинамічні процеси термостабілізації систем біоконверсії : дис. канд. техн. наук : 05.14.06. Київ, 2001. 183 с.

[6] Н. В. Резидент, Тепломасообмінні та гідродинамічні процеси в елементах систем біоконверсії : автореф. дис. канд. тех. наук : 05.14.06. Нац. унів. харч. техн. Київ, 2009, 17 с.

[7] С. Й. Ткаченко, Н. В. Пішеніна, «Застосування поняття ‘модельна рідина’ в експериментально-розрахунковому методі», *Вісник ВПІ*. 2010. № 3. С. 103–110.

[8] Н. В. Пішеніна. Удосконалення методу визначення інтенсивності теплообміну в енергоефективних системах переробки органічних відходів : автореф. дис. канд. тех. наук : 05.14.06 . Київ, 2013, 27 с.

[9] С. Й. Ткаченко, Н. В. Пішеніна, «Математичне моделювання робочих процесів в біогазовій установці», *Вісник ВПІ*. 2011. № 3. С. 40 – 47.

[10] С. Й. Ткаченко, Н. В. Пішеніна, Н. В. Резидент, «Удосконалення експериментально-розрахункового методу», *Збірник технічна теплофізика та промислова теплоенергетика*. 2010. № 2. С. 171 – 183.

[11] Спосіб визначення коефіцієнта тепловіддачі за умов конвективного теплообміну органічної суміші. пат. 97021 Україна. №а201005661; заявл. 11.05.2010; опубл. 26.05.2011, Бюл. № 2. 5 с.

[12] С. Й. Ткаченко, Н. Д. Степанова, «Методичні вказівки до самостійної роботи студентів з дисципліни «Тепломасообмін і гідродинаміка багатокомпонентних середовищ» для студентів денної та заочної форм навчання спеціальності «Теплоенергетика». Вінниця : ВНТУ, 2018. 52 с.

[13] В. Елюхина, В. Хисамов, В. Бескачко, «Об интерпретации реологических свойств водных растворов глицерина в экспериментах с капиллярным вискозиметром», *Материалы V Всероссийской*

конференции молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям с участием иностранных ученых, 2004.

[14] О. Бердыев, Экспериментальное исследование теплообмена в установках по выработке биогаза : автореф. дис. канд. техн. наук. Ашхабад, НПО «Солнце», 1989. 24 с.

[15] С. Й. Ткаченко, Н. В. Резидент, *Тепломасообмінні та гідродинамічні процеси в елементах систем біоконверсії*. Вінниця : Універсум, 2011, 132 с.

[16] С. Й. Ткаченко, Н. В. Пішеніна, «Застосування поняття «модельна рідина» в експериментально-розрахунковому методі», *Вісник ВПІ*. 2012. № 3. С. 41-46.

[17] С. Й. Ткаченко, Н. В. Пішеніна, «Метод визначення інтенсивності теплообміну в реостабільних сумішах», *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2012. №13. С. 78–87.

[18] G. Geletukha, P. Kucheruk, Y. Matveev, «Prospects of biomethane production and use in Ukraine», *UABio Position Paper*. 2014. № 11.

[19] Ю. В. Куріс, І. Ф. Червоний, *Біогазові технології. Енергетичні та екологічні аспекти*. Запоріжжя: РВВ ЗДІА, 2010, 488 с.

[20] *Відновлювані джерела енергії*,/ Під заг.ред. Кудрі С. О. – К. Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2020, 393 с.

[21] Г. Гелетука, П. Кучерук, Ю. Матвєєв, *Перспективи виробництва та використання біогазу в Україні* : Аналітична записка. № 11. Київ, Біоенергетична асоціація України, 2014, 42 с.

[22] О. Скляр, Р. Скляр, «Аналіз методів визначення часу перебування та навантаження на метантенк», *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка*. 2014. Вип. 148. С. 405 – 412.

[23] О. Скляр, Р. Скляр, «Методи інтенсифікації процесів метанового зброджування», *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2014. №4. С. 3 – 9.

[24] D. Zema, A. Fòlino, G. Zappia, P. Calabrò, V. Tamburino, S. Zimbone. Anaerobic digestion of orange peel in a semi-continuous pilot plant: An environmentally sound way of citrus waste management in agroecosystems. *Science of The Total Environment*. 2018.

[25] B. Ecem Oner, C. Akyol, M. Bozan, O. Ince, S. Aydin, B. Ince. Bioaugmentation with *Clostridium thermocellum* to enhance the anaerobic biodegradation of lignocellulosic agricultural residues. *Bioresour Technol*. 2018.

[26] J. Lindmark, E. Thorin, R. Bel Fdhila, E. Dahlquist. Effects of mixing on the result of anaerobic digestion: Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014.

[27] L. Tian, D. Zou, H. Yuan, L. Wang, X. Zhang, X. Li. «Identifying proper agitation interval to prevent floating layers formation of corn stover

and improve biogas production in anaerobic digestion», *Bioresour Technol*, 2015. P. 1-7.

[28] D. Klingenberg, T. Root, S. Burlawar, C. Scott, K. Bourne, R. Gleisner, et al. «Rheometry of coarse biomass at high temperature and pressure», *Biomass and Bioenergy*, 2017. P. 69-78.

[29] P. Kress, H. Nagele, H. Oechsner, S. Ruile, «Effect of agitation time on nutrient distribution in full-scale CSTR biogas digesters», *Bioresour Technol*, 2018. P. 1-6.

[30] Chen J, Wu J, Ji X, Lu X, Wang C. Mechanism of waste-heat recovery from slurry by scraped-surface heat exchanger. *Applied Energy*. 2017. P. 146-155.

[31] Li Y, Xu F, Li Y, Lu J, Li S, Shah A, et al. Reactor performance and energy analysis of solid state anaerobic co-digestion of dairy manure with corn stover and tomato residues. *Waste Manag*. 2018.

[32] H. M. El-Mashad, W. K. van Loon, G. Zeeman, G. P. Bot, «Rheological properties of dairy cattle manure», *Bioresour Technol*, 2005.

[33] A. Achkari-Begdouri, «Rheological Properties of Moroccan Dairy Cattle Manure», *Bioresour Technol*, 1992.

[34] A. Achkari-Begdouri, P. Goodrich, «Rheological properties of Moroccan dairy cattle manure», *Bioresour Technol*, 1992. P. 149-156.

[35] L. Tian, F. Shen, H. Yuan, et al, «Reducing agitation energy-consumption by improving rheological properties of corn stover substrate in anaerobic digestion», *Bioresour Technol*, 2014. P. 86-91.

[36] S. Viamajala, J. D. Mcmillan, D. J. Schell, et al, «Rheology of corn stover slurries at high solids concentrations – Effects of saccharification and particle size», *Bioresour Technol*, 2009.

[37] Категорії субстратів для біогазового виробництва. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://agrobiogas.com.ua/categories-of-substrates-for-biogas-production/>

[38] Отримання біогазу та органічних добрив при анаеробній ферментації. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://sites.google.com/site/otrimannabiogazu/>

[39] Г. Гелетуша, П. Кучерук, Ю. Матвеев, «Развитие биогазовых технологий в Украине и Германии: нормативно-правовое поле, состояние и перспективы» [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.uabio.org>

[40] С. Уминський, С. Інютин, «Продуктування біогазу та органічних добрив з відходів агровиробництва», *Техніка і технології АПК*. 2013. № 11. С. 19-24.

[41] С. Уминський, «Технології одержання біогазу і органічних добрив в агровиробництві», *Аграрний вісник Причорномор'я. Технічні науки*, 2013. № 67, с. 167–176.

[42] C. Müller, «Anaerobic digestion of biodegradable solid waste in low- and middle-income countries», *Sandec report*, 2007, p. 7.

- [43] Biogas barometer. *Eurobserv'er*. November 2017.
- [44] S. Zareei, J. Khodaei, «Modeling and optimization of biogas production from cow manure and maize straw using an adaptive neuro-fuzzy inference system», *Renewable Energy*, 2017.
- [45] L. Tian, F. Shen, H. Yuan, et al, «Reducing agitation energy-consumption by improving rheological properties of corn stover substrate in anaerobic digestion», *Bioresource Technology*, 2014. P. 86-91.
- [46] S. Viamajala, J. Mcmillan, D. Schell, et al, «Rheology of corn stover slurries at high solids concentrations – Effects of saccharification and particle size», *Bioresource Technology*, 2009.
- [47] K. Dehkordi, M. Fazilati, A. Hajatzadeh, «Surface Scraped Heat Exchanger for cooling Newtonian fluids and enhancing its heat transfer characteristics, a review and a numerical approach», *Applied Thermal Engineering*, 2015, P. 56-65.
- [48] S. Yang, L. Zhang, H. Xu, «Experimental study on convective heat transfer and flow resistance characteristics of water flow in twisted elliptical tubes», *Applied Thermal Engineering*, 2011.
- [49] I. Angelidaki, L. Ellegaard, «Codigestion of manure and organic wastes in centralized biogas plants», *Appl. Biochem. Biotechnol*, 2003.
- [50] В. О. Дубровін, М. О. Корчемний, І. П. Масло та інші, *Біопалива (технології, машини і обладнання)*, Київ, ЦТІ «Енергетика і електрифікація», 2004, 256 с.
- [51] K. Stamatelatos, L. Syrou, C. Kravaris, G. Lyberatos, «An invariant manifold approach for CSTR model reduction in the presence of multi-step biochemical reaction schemes», *Application to anaerobic digestion*. Chem Eng. 2013.
- [52] Ю. І. Посудін, *Біофізика і методи аналізу навколишнього середовища*. Київ, 2011, 340 с.
- [53] H. L. Smith, *Bacterial growth*. Arizona State University. 2007.
- [54] S. Schnell, P. K. Maini, Century of Enzyme Kinetics: Reliability of the KM and Vmax Estimates. *Comments on Theoretical Biology*. 2003. P. 169-187.
- [55] J. A. Robinson, J. M. Tiedje, Nonlinear estimation of Monod growth kinetic parameters from a single substrate depletion curve. *Applied and Environmental Microbiology*. 1983. No 45(5). P. 1453-1458.
- [56] I. Angelidaki, L. Ellegaard, «Codigestion of manure and organic wastes in centralized biogas plants», *Appl. Biochem. Biotechnol*. 2003. No 109. P. 95–105.
- [57] H. B. Nielsen, Z. Mladenovska, P. Westermann, B. K. Ahring, «Comparison of two-stage thermophilic (68C/55C) anaerobic digestion with onestage thermophilic (55C) digestion of cattle manure», *Biotechnology and bioengineering*. 2004. No 86(3). P. 291-300.

[58] L. Hamelin, M. Wesnæs, H. Wenzel, B. M. Petersen, «Environmental consequences of future biogas technologies based on separated slurry», *Environmental science & technology*, 2011, No 45(13), P. 5869-5877.

[58] K. H. Hansen, I. Angelidaki, B. K. Ahring, «Anaerobic digestion of swine manure: Inhibition by ammonia», *Water Research*, 1998. No 32(1), P. 5-12.

[60] H. B. Nielsen, Z. Mladenovska, P. Westermann, B. K. Ahring, «Comparison of two-stage thermophilic (68 C/55 C) anaerobic digestion with onestage thermophilic (55 C) digestion of cattle manure», *Biotechnology and bioengineering*, 2004. No 86(3). P. 291-300.

[61] L. Hamelin, M. Wesnæs, H. Wenzel, B. M. Petersen, «Environmental consequences of future biogas technologies based on separated slurry», *Environmental science & technology*, 2011, No 45(13), P. 5869-5877.

[62] T. G. Poulsen, A. S. Nizami, R. Rafique, G. Kiely, J. D. Murphy, «How can we improve biomethane production per unit of feedstock in biogas plants», *Applied Energy*, 2011, No 88(6), P. 2013-2018.

[63] P. Weiland, «Production and energetic use of biogas from energy crops and wastes in Germany», *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2003. No 109(1-3), P. 263-274.

[64] ВНПТ-АПК-09.06. Системи видалення, обробки, підготовки та використання гною. «УкрНДІагропроект» Міністерства аграрної політики України, Київ, 2006, 100 с.

[65] И. В. Семенов, *Проектирование биогазовых установок*, Сумы: ПФ «МакДен», ИПП «Мрия-1» ЛТД, 1996, 347 с.

[66] Г. Г. Гелетука, Т. А. Железна, С. В. Драгнєв, А. І. Баштовий, «Перспективи використання біомаси від обрізки та видалення багаторічних сільськогосподарських насаджень для виробництва енергії в Україні», *Промислова теплотехніка*, 2018. Т. 40, № 1, С. 68-74.

[67] О. А. Караїм, *Техноекілогічні основи безвідходних виробництв*. Луцьк: Вежа-Друк, 2014, 88 с.

[68] L. H. Page, J. Q. Ni, A. J. Heber, N. S. Mosier, X. Liu, H. S. Joo, J. H. Harrison, «Characteristics of volatile fatty acids in stored dairy manure before and after anaerobic digestion», *Biosystems Engineering*, 2014, P. 16-28.

[69] Z. Zhang, J. Zhu, «Characteristics of solids, BOD 5 and VFAs in liquid swine manure treated by short-term low-intensity aeration for long-term storage», *Bioresource technology*, 2006, No. 97(1), P. 140-149.

[70] H. S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, K. Tanabe, «Good Practice Guidance and Uncertainty», *Management in National Greenhouse Gas Inventories. Agriculture. CH₄ emissions from manure waste*. 2006. P. 339-348.

[71] K. L. Conn, E. Topp, G. Lazarovits, «Factors influencing the concentration of volatile fatty acids, ammonia, and other nutrients in stored

liquid pig manure», *Journal of environmental quality*. 2007. No 36(2). P. 440-447.

[72] R. Braun, P. Weiland, A. Wellinger, «Biogas from energy crop digestion», *In IEA Bioenergy Task*, 2008, Vol. 37. P. 1-20.

73 T. Amon, V. Kryvoruchko, B. Amon, «Methane production from maize, grassland and animal manures through anaerobic digestion», *Sustainable Organic Waste Management for Environmental Protection and Food Safety II*. 2004. P. 175-182.

[74] J. Bartuševics, Z. Gaile, «Effect of silaging on chemical composition of maize substrate for biogas production», *In Annual 16th International Scientific Conference Proceedings, Research for rural development 2010*, Jelgava, Latvia, 19-21 May 2010. Vol. 1. P. 42-47.

[75] B. Kryvoruchko, W. Zollitsch, K. Mayer, L. Gruber, «Biogas production from maize and dairy cattle manure – Influence of biomass composition on the methane yield», *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2007. P. 173-182.

[76] M. Heiermann, M. Plöchl, B. Linke, H. Schelle, C. Herrmann, «Biogas Crops – Part I: Specifications and Suitability of Field Crops for Anaerobic Digestion». *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal. Manuscript 1087*. 2009. Vol. XI.

[77] Г. Ратушняк, К. Анохіна, *Обґрунтування технологічних параметрів біогазових установок*. Вінниця, ВНТУ, 2011, 24 с.

[78] A. Ward, P. Hobbs, «Holliman Optimization of the anaerobic digestion of agricultural resources», *Bioresource Technology*. 2008. No 99. P. 7928 – 7940.

[79] С. Й. Ткаченко, Д. В. Степанов, *Теплообмінні та гідродинамічні процеси в елементах енергозабезпечення біогазової установки*. Вінниця, Універсум, 2004, 132 с.

[80] Біогазова установка: пат. 51209А Україна. №2002010796; заявл. 31.01.02; опубл. 15.11.02, Бюл. № 11.

[81] Г. С. Ратушняк, О. Г. Лялюк, І. А. Кощєєв, *Біогазові установки з відновлюваними джерелами енергії термостабілізації процесу ферментації біомаси*. Вінниця, ВНТУ, 2017, 84 с

[82] Г. Гелетуха, П. Кучерук, Ю. Матвєєв, Т. Ходаковская, «Перспективы производства биогаза в Украине», *Возобновляемая энергетика*, 2011. № 3. С.73-77.

[83] Т. А. Железна, С. В. Драгнєв, А. І. Баштовий, «Можливості заготівлі агробіомаси та виробництва біопалив з неї комунальними підприємствами в Україні», *Теплофізика та теплоенергетика*, 2019, т. 41, № 2, с. 88-96. <https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2019.12>.

[84] Н. Михайлив, «Основные принципы технико-экономической и экологической оценки нетрадиционных и возобновляемых источников энергии», *Нові технології та інвестиції США в енергетичний сектор України: III міжнародна конференція «EnerCon - 97»*. Київ, 1997. С. 78.

[85] Спосіб визначення коефіцієнта тепловіддачі за умов конвективного теплообміну органічної суміші: пат. 105399 Україна. №а201204878; заявл. 25.10.2013; опубл. 12.05.2014, Бюл. № 9. 20 с.

[86] Спосіб визначення реостабільності сумішей з невизначеними теплофізичними властивостями в реальних теплогідродинамічних, біо-і хіміко-технологічних процесах: пат. 110718 Україна. № u201314369; заявл. 09.12.2013; опубл. 10.02.2016, Бюл. № 3. 12с.

[87] S.Tkachenko, O.Vlasenko, N.Resident, D.Stepanov, N.Stepanova, «Cooling and heating of the fluid in the cylindrical volume», *Acta Innovations*, 2021, No. 42, P. 15-26. doi: 10.32933/ActaInnovations.42.2.

[88] И. М. Федоткин, С. Й. Ткаченко, *Теплогидродинамические процессы в выпарных аппаратах*, Київ, Техніка, 1975, 212 с.

[89] Г. Б. Фройштетер, С. Ю. Данилевич, Н. В. Радионова, *Течение и теплообмен неньютоновских жидкостей в трубах*, Киев, Наукова думка, 1990, 216 с.

[90] С. Й. Ткаченко, Т. Ю. Румянцева, Н. В. Пішеніна, «Визначення параметрів «віртуальної модельної рідини» для оцінки інтенсивності теплообміну в реальних умовах тепло технології», *Енергетика: економіка, технології, екологія*, 2014. № 1(35), с. 27–35.

[91] М. А. Приходько М. А. Герасимчук, Г. Г. Герасимов, *Термодинаміка та теплопередача*, Рівне, НУВГП, 2008, 250 с.

[92] Р. В. Луцик, *Тепломасообмін*, Київ, КНУТД, 2004, 126 с.

[93] В. Й. Лабай, *Тепломасообмін*, Львів, Тріада Плюс, 1998, 260 с.

[94] А. И. Погорелов, *Тепломассообмен (основы теории и расчета)*, Одесса, Черноморье, 1999, 128 с.

[95] С. Й. Ткаченко, Д. І. Денесяк, «Перспективи використання методів регулярного режиму для визначення інтенсивності теплообміну в обмеженому об'ємі», *Сучасні технології матеріали і конструкції в будівництві*, 2017, Том 23 № 2, с. 106-112.

[96] О. В. Власенко, «Дослідження теплообміну в об'ємі двофазної рідини за умов вимушеної її конвекції», *Вісник ВПІ*, 2021, № 6, с. 14-20.

[97] А. І. Погорелов, *Тепломасообмін (основи теорії і розрахунку)*, Львів, «Новий світ - 2000», 2004, 144 с.

[98] С. Й. Ткаченко, Д. І. Денесяк, К. О. Іщенко, «Еквівалентна теплопровідність в циліндричному об'ємі з розчином», *Сучасні технології матеріали і конструкції в будівництві*, 2018. Том 24 № 1. С. 106-110.

[99] А. Федоров, та ін., «Експериментальні дослідження інтенсивності теплообміну у в'язких багатокомпонентних багатофазних середовищах», *Вісник Міжнародної академії холоду*, 2020, № 4 (77), С. 91-99.

[100] С. Й. Ткаченко, О. В. Власенко, Н. В. Резидент, «Теплообмін циліндричного рідинного тіла обмеженої висоти з навколишнім середовищем», *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*.

Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. 2021. № 2. С. 27–30. <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2021.02.05>.

[101] С. Й. Ткаченко, О. В. Власенко, Н. Д. Степанова, Є. О. Павлович, «Нестаціонарний теплообмін у вертикальному циліндричному об'ємі, заповненому рідиною», *Вісник ВПІ*, 2022, № 1. С. 16–20.

[102] Д. І. Денесяк, «Нестаціонарний теплообмін у системі «вода-стінка-в'язка рідина», *Техніка, енергетика, транспорт АПК*, 2018. № 7. С. 34–38.

[103] С. Й. Ткаченко, Д. І. Денесяк, «Перспективи використання методів регулярного режиму для визначення інтенсивності теплообміну в обмеженому об'ємі», *Сучасні технології матеріали і конструкції в будівництві*, Вінниця, 2017, № 2 (23), С. 106–112.

[104] Н. І. Никитенко, Ю. Ф. Снежкин, Н. Н. Сорокова, Ю. Н. Кольчик, «Метод численного моделирования тепло- и массообмена при трехмерном ламинарном, переходном и турбулентном режимах течения», *Наукові праці ОНАХТ*, 2013, Том 1, Вип. 43, С. 20–25.

[105] В. О. Календер'ян, *Методи дослідження процесів теплообміну. Експериментальні методи. Частина 2*, Одеса, ОДАХ, 2006, 75 с.

[106] С. Й. Ткаченко, Д. І. Денесяк Ефективний коефіцієнт теплопровідності за умов теплообміну в обмеженому просторі [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/16961/>

[107] М. Дорожовець, В. Мотало, Б. Стадник, В. Василюк, Р. Борек, А. Ковальчик, *Основи метрології та виміральної техніки*, Львів, Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2005, Т. 1. Основи метрології, 532 с.

[108] Біогазова установка з однопрохідним біореактором з локальним фрагментом багатократної циркуляції : пат. 147423 Україна. № u202007986; заявл. 14.12.2020; опубл. 05.05.2021, Бюл. № 18. 5 с.

[109] С. Ткаченко, О. Бочкова, Н. Степанова, «Біогазова установка із системою циркуляційних контурів», *Електронний журнал Наукові праці ВНТУ*, 2017, № 4.

[110] Д. В. Риндюк, В. А. Пешко, *Математичне моделювання теплових процесів в енергетиці та промисловості*. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021, 75 с.

[111] С. Й. Ткаченко, Н. В. Резидент, «Тепловіддача до багатогомпонентного середовища в умовах вимушеної і природної конвекції», *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*, 2006, № 1, С. 111–114.

[112] С. Й. Ткаченко, Н. В. Резидент, «Нові аспекти застосування теорії подібності в теплотехнічних розрахунках систем біоконверсії»,

Електронний журнал Наукові праці ВНТУ. Енергетика та електротехніка, 2009, № 2.

[113] Спосіб визначення коефіцієнта тепловіддачі за умов конвективного теплообміну органічної суміші: пат. 24616 Україна. № 200701190; заявл. 05.02.07; опубл. 10.07.07, Бюл. № 10.

[114] Н. В. Резидент, «Застосування експериментально-розрахункового методу при розробці теплообмінного обладнання біоконверсії», *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*, 2009, № 2, С. 233–237.

[115] В. А. Колтунов, Є. В. Белінська, *Технологія зберігання продовольчих товарів*, Київ, ЦУЛ, 2014, 138 с.

[116] И. В. Семененко, *Проектирование биогазовых установок*, Київ, Техника, 1992, 346 с.

[117] Г. А. Никитин, *Метановое брожение в биотехнологии*, Київ : Вища школа, 1990, 207 с.

[118] S. Tkachenko, K. Ischenko, N. Resident and other. *The intensity of heat exchange in complexes of organic waste disposal. Biomass as Raw Material for the Production of Biofuels and Chemicals*. November 1. 2021. 240 Pages.

Наукове видання

**Ткаченко Станіслав Йосипович
Власенко Ольга Володимирівна**

**БІОГАЗОВІ ТЕХНОЛОГІЇ.
РЕГУЛЯРНИЙ ТЕПЛОВИЙ РЕЖИМ**

Монографія

Видається в авторській редакції

Оригінал-макет підготовлено авторами

Оригінал-макет виготовлено в РВВ ВНТУ

Підписано до друку 03.08.2023 р.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman. Ум. др. арк. 7,98.
Наклад 15 пр. Зам № В2023-07.

Вінницький національний технічний університет,
Редакційно-видавничий відділ.
Хмельницьке шосе, 95, ВНТУ, ГНК, к. 114,
м. Вінниця, 21021
press.vntu.edu.ua; *email*: irvc.vntu@gmail.com.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано ФОП Барановська Т. П.
21021, м. Вінниця, вул. Порика, 7.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи серія
ДК № 4377 від 31.07.2012 р.