

С. Й. ТКАЧЕНКО, О. В. ВЛАСЕНКО

ПРОГНОЗУВАННЯ ІНТЕНСИВНОСТІ ТЕПЛООБМІНУ В БІОГАЗОВОМУ ВИРОБНИЦТВІ

Досліджено інтенсивність теплообміну між внутрішньою тонкостінною посудиною та дослідним рідинним середовищем. В якості дослідного рідинного середовища використовується: дистильований гліцерин, субстрат з діючої біогазової установки, курячий послід – вологістю $W = 90\%$ свіжий, $W = 90\%$ витриманий 5 дб, $W = 90\%$ витриманий 13 дб. Запропоновано експериментально-розрахунковий метод для визначення коефіцієнту тепловіддачі між внутрішньою тонкостінною посудиною та дослідним рідинним середовищем з використанням методу регулярного теплового режиму. Визначено основні проблеми методів визначення інтенсивності теплообміну в багатофазних та багатокомпонентних середовищах в харчовій промисловості та біогазовому виробництві. Методи прогнозування інтенсивності теплообміну в харчовій промисловості займає велике значення в теплоенергетичних розрахунках. Існуючі методи спростовують характеристики середовищ, що суттєво впливає на розрахунок їх теплофізичних властивостей. Харчові продукти в термічних процесах сублімації, випаровування, нагріву, кристалізації мають властивості твердих, рідких та газоподібних тіл, і переходять з одного агрегатного стану в інший, що вагомо впливає на зміну теплофізичних властивостей. Біогазові технології – багатотоннажне виробництво. В них застосовуються великі об'єми субстрату, теплофізичні властивості якого невідомі. На сучасному розвитку біогазових технологій виникають питання по термостабілізації процесу і прогнозуванню інтенсивності теплообміну. На виробництвах – велика увага приділяється питанню сталого температурного режиму в біореакторі. Під час експлуатації біогазової установки необхідно забезпечити стабільний температурний режим за умов різних температур навколишнього середовища. Основним в біореакторі – коливання температур не повинно виходити за визначені діапазони. При обробці відходів різного виробництва, це нагрівання, охолодження, термостабілізація, відбувається техногенне навантаження на навколишнє середовище, за рахунок немоделізованого теплотехнологічного устаткування. Досить важко вирішити дану задачу, тому що обмежено відомі чи невідомі теплофізичні властивості сумішей, рідин, субстратів, їхній хімічний склад, молекулярна будова, невідомо як вони змінюються під час термічної обробки, які фактори навколишнього середовища впливають на їх зміни. Визначені відносні похибки основних величин: коефіцієнту тепловіддачі, коефіцієнту теплопередачі, питомої теплоємності, площі теплообмінної поверхні, темпу охолодження (нагрівання), коефіцієнту нерівномірного розподілу температури, теплового потоку, температурного напору, різниці температур, маси дослідного рідинного середовища, тривалості експерименту, табличних величин.

Ключові слова: інтенсивність теплообміну, субстрат, біогазова установка, темп охолодження (нагрівання), коефіцієнт теплопередачі, відносна похибка.

S. TKACHENKO, O. VLASENKO

PREDICTING THE HEAT-EXCHANGE INTENSITY IN THE BIOGAS PRODUCTION

The intensity of the heat exchange between the internal thin-wall vessel and the experimental liquid medium has been studied. The mixture of the distilled glycerol, the substrate from the operating biogas plant, the fresh chicken manure with the moisture content of $W = 90\%$, chicken manure with the moisture content of $W = 90\%$ aged for 5 days and the chicken manure with the moisture content of $W = 90\%$ aged for 13 days was used as the experimental liquid medium. The experimental-calculative method was suggested to define the coefficient of the heat loss between the internal thin-wall vessel and the experimental liquid medium using the method of regular thermal mode. The main problems peculiar for the methods of the definition of the heat-exchange intensity in the multi-phase and multi-component media in the food industry and in the biogas production have been analyzed. The heat-exchange intensity prediction methods available for the food industry are of great importance for heat and power computations. These methods refute the characteristics of the media and it has a great effect on the computation of their thermal and physical properties. Food products subjected to the thermal processes of sublimation, evaporation, heating and crystallization have the properties of solid, liquid and gaseous bodies and transform from one aggregate state to another and it has a substantial effect on a change of their thermal and physical properties. Biogas technologies are used by the multi-tonnage production. These technologies use huge volumes of the substrate with unknown thermal and physical properties. Contemporary development of biogas technologies raises the problems relating to the thermal stabilization of the process and prediction of the heat-exchange intensity. The productions pay much attention to the problems of the stable temperature mode in the bioreactor. The operation of the biogas plant requires a stable temperature mode at different ambient temperatures. The main requirement to the bioreactor is that the temperature fluctuations should be within certain ranges. The waste treatment of different productions, in particular heating, cooling, thermal stabilization results in the anthropogenic load on the environment due to use of the outdated and not upgraded heat process equipment. It is rather difficult to solve this problem because the thermal and physical properties of the mixtures, liquids, substrates and their chemical compositions and molecular structure are limitedly known or unknown. It is also unknown how these are changed during the thermal treatment and how environmental factors affect their change. Relative errors of the main values, in particular the heat loss coefficient, heat transfer coefficient, specific heat capacity, heat exchange surface area, cooling (heating) rate, nonuniform temperature distribution factor, heat flow, temperature rush, temperature difference, mass of the experimental liquid media, experiment duration and table values have been determined.

Key words: heat exchange intensity, substrate, biogas plant, cooling (heating) rate, heat transfer coefficient and the relative error.

Вступ

Інтенсивність теплообміну визначається швидкістю руху робочого тіла та режимом його течії. Як відомо з гідромеханіки, при русі середовища з певною швидкістю щодо нерухомої стінки на ній формується пристінний підшарок, товщина якого визначається фізико-хімічними властивос-

тями середовища та режимом руху потоку. Тому інтенсивність конвективного теплообміну також визначається фізико-хімічними властивостями теплоносія, його агрегатним станом, режимом руху, при цьому наявність пристінного підшарку у твердоді поверхні створює додатковий термічний опір, а перенесення тепла через цей підшарок звичайно відбувається шляхом теплопровідності [1]–

[3].

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 обмежено відомі теплофізичні властивості, а саме теплопровідність та в'язкість.

До існуючих експериментальних методів слід віднести знаходження: коефіцієнта теплопровідності, коефіцієнта температуропровідності, визначення ентальпії та теплоємності. Важливе значення у їх визначенні відіграє правильна постановка експерименту та обробка досліджень [1].

Велику популярність набирають аналітичні методи визначення теплофізичних характеристик, а саме створення математичних моделей на основі теорії механізму переносу теплоти. Найбільш точно теплофізичні властивості описує термодинамічна теорія, яка базується на нескінченній швидкості розподілу теплоти [2].

Кожний метод вивчає різні сторони визначення теплофізичних характеристик, тому доцільно буде використання даних методів одночасно.

Тому ставиться задача дослідити проблеми визначення інтенсивності теплообміну в багатофазних та багатокомпонентних середовищах.

Мета роботи

Дослідити інтенсивність теплообміну між внутрішньою тонкостінною посудиною та дослідним рідинним середовищем, яке має місце у біогазовому виробництві. Запропонувати експериментально-розрахунковий метод для прогнозування коефіцієнту тепловіддачі з використанням методу регулярного теплового режиму. Визначити відносні похибки основних величин.

Основні результати

До теплофізичних властивостей (ТФВ) середовищ відносять три основних коефіцієнта – це коефіцієнт тепло-провідності, коефіцієнт температуропровідності та теплоємність.

Для точного розрахунку ТФВ необхідно знати склад речовини, взаємодію з навколишнім середовищем, вплив адсорбуючих добавок, які впливають на зміну структурно-механічних властивостей, особливо важливим є молекулярна і хімічна взаємодія вологи з матеріалом і умови переміщення її в матеріалі.

Визначення ТФВ харчових продуктів є важким, адже в реальних умовах разом з теплообміном відбувається масообмін та термовологопровідність.

Харчові продукти в термічних процесах сублімації, випаровування, нагріву, кристалізації мають властивості твердих, рідких та газоподібних тіл, і переходять з одного агрегатного стану в інший, що вагомо впливає на зміну ТФВ [4]–[6].

На сьогоднішній день залежність теплофізичних властивостей твердих та рідких харчових матеріалів від їх будови і характеру зв'язку мікрочастин не встановлена. Вивчення такої задачі є актуальною.

В [3] для теоретичного визначення теплоємності харчових продуктів запропонував визначати теплофізичні властивості важких по складу продуктів за рахунок значень теплоємності вхідних в них органічних з'єднань, мінеральних речовин і води [3].

По теоретичним формулам [4] (1)–(2) можна розраховувати коефіцієнт теплопровідності (λ) різних харчових продуктів і матеріалів в залежності від температури, розраховано для $\lambda = f(T)$ [4].

$$\lambda_T = \frac{B}{\alpha_T} \rho_T, \quad (1)$$

де λ_T – коефіцієнт теплопровідності рідких харчових продуктів, Вт/(м·К);

B – постійна, яка визначається видом рідини і складових в ній сухих речовин (або концентрацій);

α_T – коефіцієнт, який характеризує степінь концентрації;

ρ_T – густина, кг/м³.

$$B = A_T c_T \rho^{1/3} M^{-1/3}, \quad (2)$$

де A_T – інваріант, який визначається температурою рідини і не залежить від її виду. При умові $T = 303$ К інваріант $A_T = 0,428 \cdot 10^{-3}$;

c_T – питома теплоємність, Дж/(кг·К);

M – молекулярна маса.

Для харчових продуктів таких як, яблучний мус, томати, картопляне пюре, банани, сливи, суніці, ячний білок, риба, обезжирений сир, телятина, курятина та глюкоза, щоб знайти коефіцієнт температуропровідності, необхідно використовувати формулу Риделя (3), в залежності від вологи W і температури T .

$$\alpha \cdot 10^8 = 8,83 + 0,01 WK, \quad (3)$$

де K – коефіцієнт, який залежить від температури.

Важливо є створення таких методів, які б змогли визначити ТФВ в процесі обробки, а також створення аналогічних термічних умов для дослідження змін, адже під час теплообробки відбувається зміна структури, будови харчових продуктів, та відповідно їх ТФВ.

При дослідженні [5] було виявлено, що на ТФВ в області зони випаровування впливає явище фазового переходу, а на ТФВ процесу випікання впливає спосіб енергопідведення.

В заморожених соках та екстрактах коефіцієнт теплопровідності λ залежить від температури замороження та концентрації. За рахунок великого вмісту в соках солі, цукру, кислоти, температура кристалізації знижується, а підвищення концентрації сухих речовин впливає на зменшення коефіцієнту теплопровідності λ .

Явище переходів та швидкість процесів термічної обробки відіграє суттєву роль при зміні ТФВ речовин. Тому вибираючи метод визначення інтенсивності теплообміну харчових продуктів необхідно звертати увагу на хімічний склад, структуру і т.п., щоб при створенні експериментальних установок була відповідність для реального аналізу та розрахунку.

В області від'ємних температур для розрахунку коефіцієнта теплопровідності λ капілярно-пористих тіл органічного походження, необхідно враховувати відсоток в них незамерзаючої води, для овочів та фруктів він може бути досить високим. При охолодженні та сублімації харчових матеріалів рослинного походження важливо враховувати відсоток вмісту льоду і незамерзаючої води при низьких температурах.

В елементах випарних апаратів двофазні потоки можуть рухатися як в умовах підведення тепла – в кип'ятільних трубах, що обігриваються, так і без підведення тепла – у трубах скипання апаратів з винесеною зоною кипіння. Розрахунок двофазного потоку з підведенням тепла представляє складну термодинамічну задачу. В умовах теплообміну відбувається фазові перетворення, що призводять до зміни об'ємного та масового співвідношення фаз, структури потоку. Остання впливає на характеристики теплообміну. При низькому тиску і вакуумі у вертикальних парогенеруючих трубах має місце істотне відносне зміна тиску, яке безперервно змінює стан суміші і тим самим розподіл фаз та форм течії, тобто. в умовах низького тиску та вакууму розрахунок адіабатних (без підведення тепла) не набагато простіше розрахунку діабатних (з підведенням тепла) течій [7]–[9].

Вирішення проблем методів інтенсифікації теплообміну харчових продуктів стоїть на досить високому рівні, адже харчова промисловість є однією з найбільших галузей України.

Розглядаючи дослідження [10], системи виробництва енергоносіїв із органічних відходів включають до свого вмісту деякі проблеми в методах для визначення ТФВ. Адже при обробці відходів різного виробництва, це нагрів, охолодження, термостабілізація, відбувається техногенне навантаження на навколишнє середовище, за рахунок немодернізованого теплотехнологічного устаткування. Досить важко вирішити дану задачу, тому що обмежено відома чи невідома інформація по ТФВ сумішей, рідин, субстратів, їхній хімічний склад, молекулярна будова, невідомо як вони змі-

нюються під час термічної обробки, які фактори навколишнього середовища впливають на їх зміни. В Україні займаються 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 [11].

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 [12]–[13].

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 [14]. 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, розширюються, 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 [15]. Все це призводить до основних проблем проектування теплотехнологічного обладнання БГУ. В результаті відсутності залежностей, методів, методик розрахунку інтенсивності теплообміну в таких середовищах, питання створення спеціалізованих баз даних по ТФВ різних суспензій відходів та їх сумішей є актуальним.

Вивчаючи способи визначення коефіцієнта тепловіддачі можна відмітити деякі проблеми. У винаході [16] виникає питання про одночасну відповідність t_c і Δt в базових та шуканих умовах, а у реальних режимах ці значення завжди різні. Тому поправку $(Pr_p/Pr_c)^{0,25}$ в одночасних значеннях обох умов застосовувати некоректно [17].

У способі знаходження коефіцієнта тепловіддачі за умов конвективного теплообміну органічної суміші, який включає вимірювання температури теплоносіїв, використовують теплофізичні властивості модельної рідини. Основною проблемою є те, що даний спосіб не обраховує коефіцієнт теплопровідності λ і в'язкість ν [17].

Винахід [17] в якому представлений спосіб визначення коефіцієнта тепловіддачі за умов конвективного теплообміну органічної суміші, використовується для оцінки ТФВ та визначення коефіцієнта тепловіддачі багатоконпонентних, бага-

тофазних рідин та сумішей органічного походження. У формулах які додаються приймають $\lambda_1 = \lambda_2 = \bar{\lambda}_0 = \bar{\lambda}(t)$ обґрунтовуючи це тим, що теплопровідність рідин змінюється незначно. Але в реальних умовах значення даних коефіцієнтів теплопровідності, залежно від різких перепадів температур, може значно відрізнятись один від одного.

Біогазові технології – багатотоннажне виробництво. В них застосовуються великі об'єми субстрату, теплофізичні властивості якого невідомі. На сучасному розвитку біогазових технологій виникають питання по термостабілізації процесу і прогнозуванню інтенсивності теплообміну. На виробництвах – велика увага приділяється питанню сталого температурного режиму в біореакторі. Під час експлуатації біогазової установки необхідно забезпечити стабільний температурний режим за умов різних температур навколишнього середовища. Основним завданням в біореакторі – коливання температур не повинно виходити за визначені діапазони [18]–[21].

Процеси тепломасопереносу недостатньо досліджені в біогазових технологіях, адже субстрат різноманітний. Для ефективного виходу біогазу потрібно знати інтенсивність теплообміну до субстрату, який мінливий, і якого в реакторі тонни. Субстрат – є багатофазним та багатокомпонентним середовищем. Багатофазні середовища поділяються на дво- і трифазні. Двофазні середовища можуть представляти собою: суміш рідкої і твердої фази; суміш газоподібної і твердої фази; суміш рідкої і газоподібної фази. Поширені двофазні середовища із суміші рідкої і твердої фаз. Багатокомпонентними середовища називають ті, до складу яких входять два або більше компонента. Наприклад, пароводяний потік можна представити як однокомпонентне середовище, так як складається лише з води (H_2O), а суміш води та цукру є двокомпонентним. Компонент характеризується хімічною формулою [22]–[24].

В літературі розроблена методика розрахунку теплообмінників, коли відомі критеріальні рівняння з довідників та рідини з відомими ТФВ. Коли обмежена інформація по ТФВ пропонується використовувати експериментально-розрахунковий метод, розроблений на кафедрі теплоенергетики Вінницького національного технічного університету. Експериментально-розрахунковий метод (ЕРМ) – є методом для прогнозування інтенсивності теплообміну в рідинних середовищах з обмеженою інформацією по теплофізичним властивостям [25]–[28].

Експериментальні результати одержані на стенді, який являється складовою ЕРМ. Основними елементами експериментальної установки є дві робочі порожнини – зовнішня та внутрішня. На

прикладі нагрівання – проведення експерименту здійснювалось таким чином. У зовнішню посудину заливається гаряча вода. У внутрішню посудину – дослідна рідина. Після чого внутрішню посудину розміщаємо в зовнішній. Рівень рідин в робочих посудинах однаковий. Установка закривається кришкою. Далі проводиться вимірювання температур у зовнішньому та внутрішньому об'ємах через визначений проміжок часу. Дослід закінчується після зрівняння температур $3\text{ }^\circ\text{C}$ – $5\text{ }^\circ\text{C}$. Вимірювання температур теплоносіїв здійснюється термопарами. Фіксування температур відбувається одночасно в десяти точках та автоматично записується на портативному комп'ютері [25]–[28].

В даній роботі досліджується інтенсивність теплообміну до дослідного рідинного середовища в системі «навколишнє середовище (НС) I – тіло II» з використанням регулярного теплового режиму. Тіло II складається з дослідної рідини б та внутрішньої тонкостінної посудини 5 (рис. 1).

Дослідження проводяться на експериментальній установці [2] в умовах вимушеної конвекції. Оберти пропелерної мішалки складають 26, 34, 54, 114, 156 об/хв, яким відповідають умовні характерні швидкості на крайній точці пропелера $w = 0,14; 0,22; 0,28; 0,45; 0,65$ м/с. Умовна характерна швидкість, м/с

$$\bar{w} = \frac{\pi n d_m}{60}, \quad (4)$$

де n – частота обертання мішалки, об/хв;
 $d_m = 0,08$ м – діаметр мішалки.

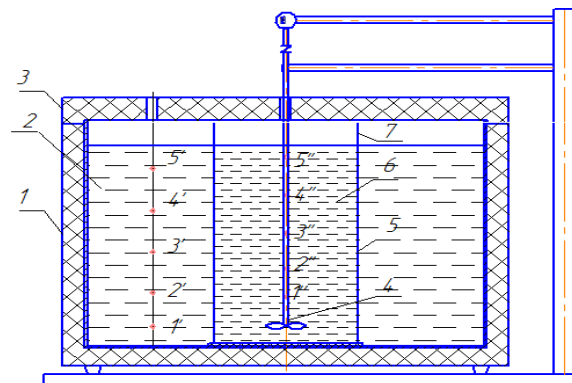


Рис. 1 – Схема експериментальної установки:
1 – ізольована зовнішня посудина; 2 – навколишнє середовище (вода); 3 – ізольована металева кришка; 4 – пропелерна мішалка; 5 – внутрішня тонкостінна посудина; 6 – дослідне рідинне середовище; 7 – запобіжника перетоків газоподібного середовища над поверхнею води і поверхнею дослідної рідини;
1'–5' та 1''–5'' – встановлені термопари на різних довжині

Експериментальна установка [2] більш детально показана на рис. 1. Зовнішня посудина *I* представляє собою металеву ємність висотою 120 мм і діаметром 200 мм, на яку нанесена ізоляція. Температури навколишнього середовища 2 і дослідної рідини 6 заміряються по висоті у 10-ти точках.

Маса навколишнього середовища 6 (води) – $M = 3$ кг, маса дослідної рідини 5 – $m = 1$ кг. Введено поняття «складне тіло», яке включає крім дослідної рідини 6 внутрішню тонкостінну посудину 5, пропелерну мішалку 4, яка в аспекті теплосприймання призводить до відхилення T_2 «складного тіла» в цілому від T_2 дослідного рідинного середовища в межах $0,015$ °C– $0,041$ °C.

В попередніх дослідженнях ЕРМ базується на теорії подібності та досліджували лише окремі компоненти, з яких складаються субстрати [25].

В якості дослідного рідинного середовища взято дистильований гліцерин, реальний субстрат з діючої біогазової установки, курячий послід вологістю $W = 90$ % свіжий, курячий послід вологістю $W = 90$ % витриманого 5 діб, курячий послід вологістю $W = 90$ % витриманого 13 діб.

Авторами удосконалено експериментально-розрахунковий метод, який базується на сумісному використанні теорії подібності та регулярного теплового режиму. Встановлено існування регулярного теплового режиму в системі «рідина-тверде тіло», який раніше встановлений лише в твердому тілі і системі з твердих тіл [26]–[30].

Поняття регулярного теплового режиму обґрунтовано для твердого тіла, систем твердих тіл. Для системи «НС *I* – тіло *II*» нам невідомі джерела інформації, в яких встановлено існування регулярного теплового режиму в процесі нестационарного теплообміну.

Криві (рис. 2–4) представляють результати апроксимації залежності логарифму надлишкової осередненої температури дослідної рідини у внутрішній посудині від часу

$$\text{Ln}\vartheta = m\tau + C, \quad (5)$$

де $\text{Ln}\vartheta$ – логарифму надлишкової температури дослідної рідини;

m – темп охолодження (нагрівання);

C – константа рівняння;

τ – тривалість дослід, с.

Темп охолодження (нагрівання) m тіла *II* визначається з рівняння, с^{-1} [26]

$$m = \frac{\text{Ln}\vartheta_1 - \text{Ln}\vartheta_2}{\tau_1 - \tau_2}, \quad (6)$$

де ϑ_1, ϑ_2 – надлишкова середньооб'ємна температура досліджуемого рідинного середовища в циліндричній посудині зі сторони води, °C;

τ_1, τ_2 – час початку і закінчення дослід, с.

$$\vartheta = \left| \bar{T}_1 - \bar{T}_2'' \right|, \quad (7)$$

Надлишкова температура – це модуль різниці між середньооб'ємною температурою \bar{T}_1 води (навколишнього середовища 2) і середньооб'ємною температурою \bar{T}_2'' тіла *II*.

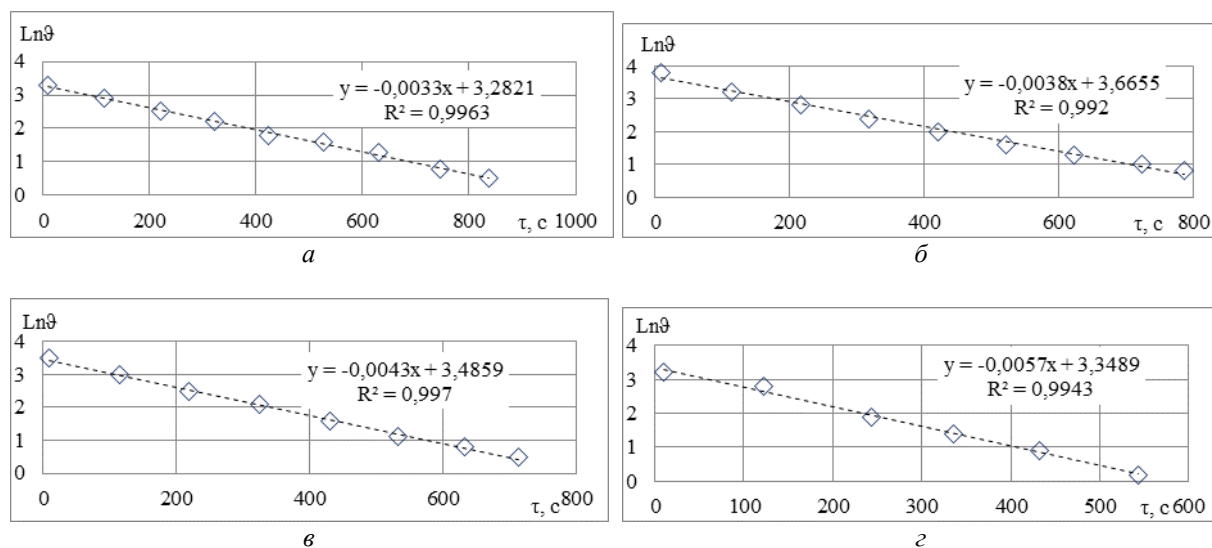
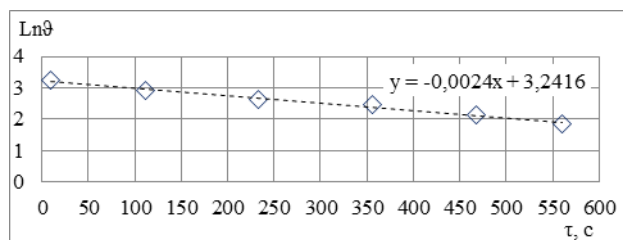
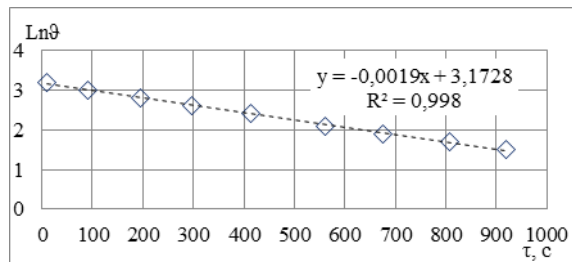


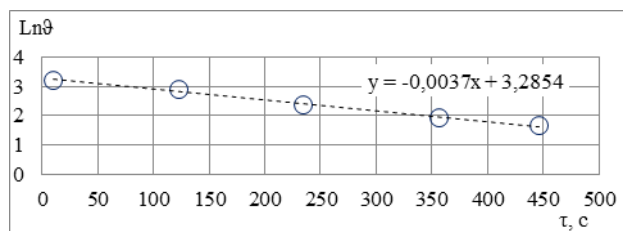
Рис. 2 – Залежність логарифму надлишкової температури від часу для дистильованого гліцерину під час нагрівання в умовах вимушеної конвекції: $a - n = 26$ об/хв; $б - n = 34$ об/хв; $в - n = 54$ об/хв; $з - n = 114$ об/хв



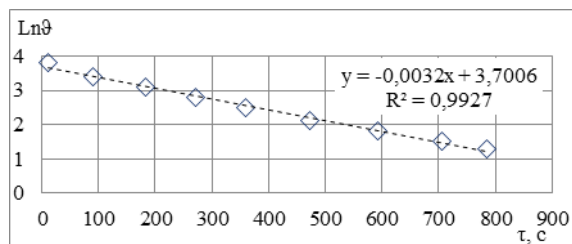
a



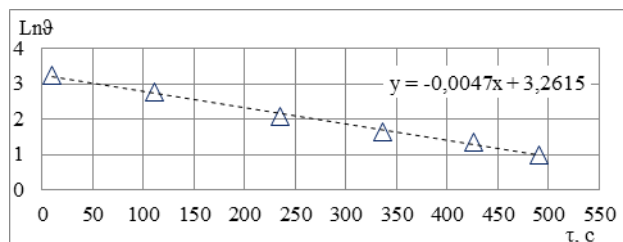
a



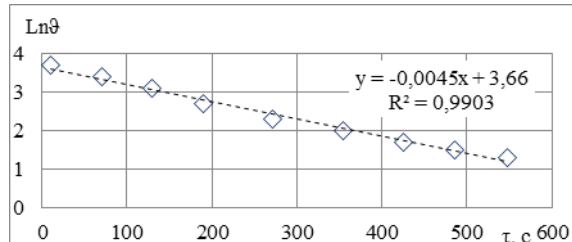
б



б



в



в

Рис. 3 – Залежність логарифму надлишкової температури від часу для субстрату під час нагрівання в умовах вимушеної конвекції: а – $n = 94$ об/хв; б – $n = 132$ об/хв; в – $n = 150$ об/хв

Рис. 4 – Залежність логарифму надлишкової температури від часу для курячого посліду $W = 90\%$ свіжого під час нагрівання в умовах вимушеної конвекції: а – $n = 33$ об/хв; б – $n = 114$ об/хв; в – $n = 156$ об/хв

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 між внутрішньою тонкостінною посудиною та дослідною рідиною методом регулярного теплового режиму (РТР) [28].

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

$$\bar{\alpha}_2^{\text{РТР}} = \frac{1}{\frac{1}{K_{\text{експ}}} - \frac{F\bar{\psi}}{mC_{p1}}}, \quad (8)$$

де $K_{\text{експ}} = \frac{Q}{F\Delta t}$ – експериментальний коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м²·К);

Q – тепловий потік, що сприймається досліджуваним рідинним середовищем, Вт;

$\bar{\Delta t}$ – середній температурний напір, °С;
 F – площа тонкостінного металевого циліндра, м²;
 C_{p1} – питома теплоємність навколишнього середовища (води), Дж/(кг·К);
 $\bar{\psi}$ – коефіцієнт нерівномірного розподілу температури.

В табл. 1–5 наведено результати визначення темпу охолодження (нагрівання) та коефіцієнт тепловіддачі $\alpha_2^{\text{РТР}}$ між внутрішньою тонкостінною посудиною та дослідною рідиною до дистильованого гліцерину, субстрату, курячого посліду $W = 90\%$ свіжого, курячого посліду $W = 90\%$ відстояного 5 діб, курячого посліду $W = 90\%$ відстояного 13 діб під час нагрівання та охолодження в умовах вимушеної конвекції. Очевидно, що зі збільшенням обертів пропелерної мішалки збільшується темп охолодження (нагрівання) дослідної рідини, а в результаті збільшується інтенсивність теплообміну.

Таблиця 1 – Темп охолодження (нагрівання) та коефіцієнт тепловіддачі α_2 дистильованого гліцерину

n , об/хв	Процес теплообміну	Темп охолодження (нагрівання), m, c^{-1}	Коефіцієнт тепловіддачі, $\alpha_2, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$
26	Нагрівання	0,0033	180–210
34		0,0038	300–340
54		0,0043	400–470
114		0,0057	500–600
26	Охолодження	0,0026	110–180
34		0,0038	180–300
54		0,0042	370–470
114		0,0065	380–510

Таблиця 2 – Темп охолодження (нагрівання) та коефіцієнт тепловіддачі α_2 до субстрату

n , об/хв	Процес теплообміну	Темп охолодження (нагрівання), m, c^{-1}	Коефіцієнт тепловіддачі, $\alpha_2, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$
94	Нагрівання	0,0024	50–100
132		0,0037	140–200
150		0,0047	250–300
94	Охолодження	0,0030	80–150
132		0,0048	200–300
150		0,0050	200–370

Таблиця 3 – Темп охолодження (нагрівання) та коефіцієнт тепловіддачі α_2 до курячого посліду $W = 90\%$ свіжого

n , об/хв	Процес теплообміну	Темп охолодження (нагрівання), m, c^{-1}	Коефіцієнт тепловіддачі, $\alpha_2, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$
33	Нагрівання	0,0020	65–150
114		0,0029	190–220
156		0,0043	195–320
33	Охолодження	0,0020	80–140
114		0,0041	190–220
156		0,0045	200–300

Таблиця 4 – Темп охолодження (нагрівання) та коефіцієнт тепловіддачі α_2 до курячого посліду $W = 90\%$ відстояного 5 діб

n , об/хв	Процес теплообміну	Темп охолодження (нагрівання), m, c^{-1}	Коефіцієнт тепловіддачі, $\alpha_2, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$
51	Нагрівання	0,0023	220–300
105		0,0044	210–270
144		0,0041	220–280
51	Охолодження	0,0019	180–300
105		0,0035	120–220
144		0,0044	140–235

Таблиця 5 – Темп охолодження (нагрівання) та коефіцієнт тепловіддачі α_2 до курячого посліду $W = 90\%$ відстояного 13 діб

n , об/хв	Процес теплообміну	Темп охолодження (нагрівання), m, c^{-1}	Коефіцієнт тепловіддачі, $\alpha_2, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$
35	Нагрівання	0,0025	50–80
105		0,0033	250–270
160		0,0051	280–360
35	Охолодження	0,0013	35–90
105		0,0038	170–260
160		0,0057	160–270

Таблиця 6 – Вплив похибки розрахунку темпу охолодження (нагрівання) на визначення коефіцієнту тепловіддачі α_2^{PTP} до дистильованого гліцерину

n, об/хв	Процес теплообміну	Зміна α_2^{PTP} при похибці визначення t		
		10 %	20 %	35 %
26	Нагрівання	1 % – 1,5 %	2 % – 5,3 %	3 % – 4,3 %
34		1 % – 2,3 %	4 % – 7,2 %	4 % – 7,1 %
54		1 % – 3,4 %	5 % – 7,3 %	6 % – 8,1 %
114		4 % – 9,3 %	6 % – 10 %	5 % – 9,2 %
26	Охолодження	1 % – 1,6 %	2 % – 4,5 %	2 % – 3,1 %
34		1 % – 2,3 %	2 % – 4,4 %	3 % – 5,3 %
54		1 % – 3,2%	3 % – 5,3 %	2 % – 5,4 %
114		2 % – 3,4 %	4 % – 8,1 %	5 % – 7,2 %

Таблиця 7 – Вплив похибки розрахунку темпу охолодження (нагрівання) на визначення коефіцієнту тепловіддачі α_2^{PTP} до субстрату

n, об/хв	Процес теплообміну	Зміна α_2^{PTP} при похибці визначення t		
		10 %	20 %	35 %
94	Нагрівання	1 % – 1,3 %	1 % – 1,4 %	1 % – 2,1 %
132		1 % – 2,2 %	1 % – 1,9 %	1 % – 3,4 %
150		1 % – 2,7 %	1 % – 3,3 %	2 % – 5,2 %
94	Охолодження	1 % – 1,5 %	1 % – 2,3 %	1 % – 2,2 %
132		1 % – 1,9 %	1 % – 2,7 %	1 % – 3,7 %
150		1 % – 3,2 %	1 % – 3,5 %	2 % – 6,5 %

Таблиця 8 – Вплив похибки розрахунку темпу охолодження (нагрівання) на визначення коефіцієнту тепловіддачі α_2^{PTP} до курячого посліду $W = 90$ % свіжого

n, об/хв	Процес теплообміну	Зміна α_2^{PTP} при похибці визначення t		
		10 %	20 %	35 %
33	Нагрівання	1 % – 1,5 %	1 % – 1,5 %	1 % – 2,1 %
114		1 % – 2,1 %	1 % – 1,5 %	1 % – 3,1 %
156		1 % – 2,1 %	1 % – 3,6 %	2 % – 5,5 %
33	Охолодження	1 % – 1,5 %	1 % – 1,5 %	1 % – 2,6 %
114		1 % – 1,5 %	1 % – 2,6 %	1 % – 3,2 %
156		1 % – 2,3 %	1 % – 3,2 %	2 % – 6,1 %

Таблиця 9 – Вплив похибки розрахунку темпу охолодження (нагрівання) на визначення коефіцієнту тепловіддачі α_2^{PTP} до курячого посліду $W = 90$ % відстояного 5 діб

n, об/хв	Процес теплообміну	Зміна α_2^{PTP} при похибці визначення t		
		10 %	20 %	35 %
51	Нагрівання	1 % – 1,6 %	1 % – 1,7 %	1 % – 1,9 %
105		1 % – 2,2 %	1 % – 1,4 %	1 % – 2,1 %
144		1 % – 2,5 %	1 % – 2,6 %	2 % – 3,5 %
35	Охолодження	1 % – 1,6 %	1 % – 1,5 %	1 % – 2,1 %
105		1 % – 1,6 %	1 % – 2,1 %	1 % – 2,2 %
144		1 % – 2,1 %	1 % – 3,1 %	2 % – 4,1 %

Таблиця 10 – Вплив похибки розрахунку темпу охолодження (нагрівання) на визначення коефіцієнту тепловіддачі α_2^{PTP} до курячого посліду $W = 90$ % відстояного 13 діб

n, об/хв	Процес теплообміну	Зміна α_2^{PTP} при похибці визначення t		
		10 %	20 %	35 %
35	Нагрівання	1 % – 1,7 %	1 % – 2,1 %	1 % – 2,3 %
105		1 % – 2,3 %	1 % – 2,1 %	1 % – 3,6 %
160		1 % – 2,6 %	1 % – 3,6 %	2 % – 4,5 %
35	Охолодження	1 % – 1,9 %	1 % – 2,1 %	1 % – 3,1 %
105		1 % – 2,4 %	1 % – 2,9 %	1 % – 4,1 %
160		1 % – 2,9 %	1 % – 3,7 %	2 % – 5,1 %

Таблиця 11 – Вплив похибки розрахунку коефіцієнта теплопередачі на визначення коефіцієнту тепловіддачі α_2^{PTP} до дистильованого гліцерину

n, об/хв	Процес теплообміну	Зміна α_2^{PTP} при похибці визначення $K_{експ}$		
		10 %	20 %	35 %
26	Нагрівання	10 % – 11 %	14 % – 19 %	31 % – 39 %
34		9 % – 12 %	17 % – 25 %	32 % – 41 %
54		9 % – 13 %	15 % – 23 %	29 % – 40 %
114		10 % – 12 %	18 % – 29 %	33 % – 41 %
26	Охолодження	11 % – 12 %	15 % – 27 %	30 % – 38 %
34		12 % – 13 %	17 % – 26 %	31 % – 39 %
54		11 % – 13 %	18 % – 25 %	32 % – 41 %
114		10 % – 13 %	21 % – 29 %	33 % – 43 %

Таблиця 12 – Вплив похибки розрахунку коефіцієнта теплопередачі на визначення коефіцієнту тепловіддачі α_2^{PTP} до субстрату

n, об/хв	Процес теплообміну	Зміна α_2^{PTP} при похибці визначення $K_{експ}$		
		10 %	20 %	35 %
94	Нагрівання	10 % – 12 %	15 % – 19 %	29 % – 35 %
132		9 % – 14 %	16 % – 21 %	30 % – 37 %
150		10 % – 15 %	16 % – 24 %	31 % – 38 %
94	Охолодження	10 % – 12 %	15 % – 23 %	30 % – 35 %
132		11 % – 13 %	18 % – 25 %	33 % – 36 %
150		11 % – 15 %	19 % – 28 %	32 % – 40 %

Таблиця 13 – Вплив похибки розрахунку коефіцієнта теплопередачі на визначення коефіцієнту тепловіддачі α_2^{PTP} до курячого посліду $W = 90$ %

n, об/хв	Процес теплообміну	Зміна α_2^{PTP} при похибці визначення $K_{експ}$		
		10 %	20 %	35 %
33	Нагрівання	9 % – 12 %	17 % – 19 %	28 % – 36 %
114		10 % – 13 %	17 % – 23 %	32 % – 38 %
156		10 % – 14 %	18 % – 26 %	32 % – 39 %
33	Охолодження	11 % – 12 %	17 % – 25 %	30 % – 34 %
114		12 % – 14 %	18 % – 27 %	33 % – 37 %
156		13 % – 15 %	21 % – 30 %	35 % – 43 %

Таблиця 14 – Вплив похибки розрахунку коефіцієнта теплопередачі на визначення коефіцієнту тепловіддачі α_2^{PTP} до курячого посліду $W = 90$ % відстояного 5 діб

n, об/хв	Процес теплообміну	Зміна α_2^{PTP} при похибці визначення $K_{експ}$		
		10 %	20 %	35 %
51	Нагрівання	11 % – 12 %	21 % – 26 %	28 % – 34 %
105		11 % – 14 %	21 % – 27 %	30 % – 36 %
144		12 % – 16 %	19 % – 29 %	31 % – 37 %
35	Охолодження	13 % – 15 %	20 % – 25 %	31 % – 37 %
105		12 % – 17 %	22 % – 29 %	33 % – 38 %
144		13 % – 17 %	25 % – 32 %	36 % – 41 %

Таблиця 15 – Вплив похибки розрахунку коефіцієнта теплопередачі на визначення коефіцієнту тепловіддачі α_2^{PTP} до курячого посліду $W = 90$ % відстояного 13 діб

n, об/хв	Процес теплообміну	Зміна α_2^{PTP} при похибці визначення $K_{експ}$		
		10 %	20 %	35 %
35	Нагрівання	10 % – 12 %	18 % – 26 %	29 % – 33 %
105		11 % – 14 %	18 % – 27 %	30 % – 35 %
160		12 % – 17 %	19 % – 28 %	32 % – 38 %
35	Охолодження	14 % – 15 %	21 % – 27 %	31 % – 39 %
105		13 % – 16 %	24 % – 29 %	34 % – 39 %
160		11 % – 16 %	25 % – 33 %	37 % – 44 %

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 теплофізичні властивості сумішей, рідин, субстратів, їхній хімічний склад, молекулярна будова, невідомо як вони змінюються під час термічної обробки, які фактори навколишнього середовища впливають на їх зміни.

В роботі проаналізовано вплив похибки розрахунку темпу охолодження (нагрівання) m дослідного рідинного середовища на визначення коефіцієнту тепловіддачі $\alpha_2^{\text{пр}}$ між внутрішньою тонкостінною посудиною та дослідною рідиною, при умові, що всі інші параметри знайдені з високою точністю (100 %).

Також в роботі проаналізовано вплив похибки розрахунку коефіцієнта теплопередачі $K_{\text{експ}}$ на визначення коефіцієнту тепловіддачі $\alpha_2^{\text{пр}}$ між внутрішньою тонкостінною посудиною та дослідною рідиною, при умові, що всі інші параметри знайдені з високою точністю (100 %).

Проведено оцінювання очікуваних похибок і невизначеностей [31]. Температури гарячого і холодного теплоносіїв вимірювались термометрами опору з аналогово-цифровими перетворювачами з ціною поділки 1 °C та 0,1 °C, які були таровані за ртутними лабораторними термометрами з ціною поділки 0,1 °C. Температура повітря в кімнаті вимірювалась лабораторним ртутним термометром з ціною поділки 0,1 °C. Внутрішній діаметр теплообмінної циліндричної поверхні $D = (100 \pm 0,5)$ мм, висота $H = (100 \pm 0,5)$ мм, товщина стінки $\delta = (0,2 \pm 0,001)$ мм. Маса дослідного рідинного середовища вимірювалась на електронних вагах А 500 ГОСТ 24104-88, клас точності – 4, допустима абсолютна похибка вимірювань $\pm 0,01$ г. Відносна похибка вимірювання густини ваговим методом $\rho = \pm 2,5$ %. Відносна похибка вимірювання теплоємності $C_p = \pm 1$ %.

Різниця між дійсною температурою рідини та показанням термометра (систематична похибка $\Delta \bar{\Delta t}$), яка пов'язана інерційністю термометрів опору, визначалася з рівняння

$$\alpha F \bar{\Delta t} \tau = F \delta C_p \Delta t, \quad (9)$$

$$\bar{\Delta t} = \frac{\delta C_p \Delta t}{\alpha \tau}, \quad (10)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі від середовища до поверхні гільзи;

τ – час проведення серії дослідів (вимірювань);

F – площа поверхні циліндричної гільзи термометра;

δ – товщина стінки латунної гільзи;

$$C_p - \text{питома теплоємність латуні};$$

$$\Delta t = t_2 - t_1, \quad (11)$$

t_1 – початкова температура рідини;

t_2 – кінцева температура рідини.

Систематична похибка вимірювання температури складає: дистильованого гліцерину $\Delta \bar{\Delta t} = 0,5$ %–1 %; субстрату $\Delta \bar{\Delta t} = 6$ %–9 %; курячого посліду $W = 90$ % $\Delta \bar{\Delta t} = 3,5$ %–5 %; курячого посліду $W = 90$ % відстояного 5 діб $\Delta \bar{\Delta t} = 4,7$ %–5,2 %, курячого посліду $W = 90$ % відстояного 13 діб $\Delta \bar{\Delta t} = 4,3$ %–5,1 %.

Для відносної похибки визначення коефіцієнта тепловіддачі маємо

$$\frac{\Delta \alpha_2}{\alpha_2} = \frac{\Delta k}{k} + \frac{\Delta C_{p1}}{C_{p1}} + \frac{\Delta F}{F} + \frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta \psi}{\psi}. \quad (12)$$

Але, крім того

$$\frac{\Delta k}{k} = \frac{\Delta Q_2}{Q_2} + \frac{\Delta F}{F} + \frac{\Delta \bar{\Delta t}}{\bar{\Delta t}}, \quad \frac{\Delta \bar{\Delta t}}{\bar{\Delta t}} = \frac{\Delta \bar{t}_1}{\bar{t}_1} + \frac{\Delta \bar{t}_2}{\bar{t}_2}, \quad (13)$$

$$\frac{\Delta(\Delta t_{\text{сер}})}{\Delta t_{\text{сер}}} = \frac{\Delta \bar{t}_1}{\bar{t}_1} + \frac{\Delta \bar{t}_2}{\bar{t}_2}, \quad (14)$$

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \frac{\Delta M}{M} + \frac{\Delta C_{p1}}{C_{p1}} + \frac{\Delta(\Delta t_{\text{сер}})}{\Delta t_{\text{сер}}} + \frac{\Delta \tau}{\tau}. \quad (15)$$

В табл. 16 представлені результати розрахунку відносних похибок визначення основних величин.

Таблиця 16 – Результати розрахунку відносних похибок визначення основних величин

Параметр	Величина
Коефіцієнт тепловіддачі, $\Delta \alpha_2 / \alpha_2$	10,2 %–14,6 %
Коефіцієнт теплопередачі, $\Delta k / k$	4,3 %–7,7 %
Питома теплоємність, $\Delta C_{p1} / C_{p1}$	0,8 %–1,7 %
Площа теплообмінної поверхні, $\Delta F / F$	0,8 %–1,9 %
Темп охолодження (нагрівання), $\Delta m / m$	0,3 %–1,1 %
Коефіцієнт нерівномірного розподілу температури, $\Delta \psi / \psi$	0,7 %–1,7 %
Тепловий потік, $\Delta Q_2 / Q_2$	3,2 %–7,1 %
Температурний напір, $\Delta \bar{\Delta t} / \bar{\Delta t}$	0,7 %–1,8 %
Різниця температур, $\Delta \bar{t}_1 / \bar{t}_1$	0,5 %–1,6 %
Різниця температур, $\Delta \bar{t}_2 / \bar{t}_2$	0,6 %–1,5 %
Різниця температур, $\Delta(\Delta t_{\text{сер}}) / \Delta t_{\text{сер}}$	0,5 %–1,7 %
Маса дослідного рідинного середовища, $\Delta M / M$	0,4 %–1,3 %
Тривалість експерименту, $\Delta \tau / \tau$	1,5 %–1,9 %
Табличні величини, $\Delta_{\text{Табл}}$	0,5 %–1,7 %

Висновки

Визначено основні проблеми методів визначення інтенсивності теплообміну в багатофазних та багатокомпонентних середовищах. Методи прогнозування інтенсивності теплообміну в харчовій промисловості та біогазовому виробництві займають велике значення в теплоенергетичних розрахунках. Існуючі методи спростовують характеристики рідинних середовищ, що суттєво впливає на розрахунок їх теплофізичних властивостей.

Запропоновано експериментально-розрахунковий метод для визначення коефіцієнту тепловіддачі α_2^{PP} між внутрішньою тонкостінною посудиною та дослідним рідинним середовищем з використанням методу регулярного теплового режиму.

Визначено темп охолодження (нагрівання) та коефіцієнт тепловіддачі α_2^{PP} до дистильованого гліцерину, субстрату, курячого посліду $W = 90\%$ свіжого, курячого посліду $W = 90\%$ відстояного 5 діб, курячого посліду $W = 90\%$ відстояного 13 діб під час нагрівання та охолодження в умовах вимушеної конвекції.

Проведено дослідження теплообміну на експериментальному стенді. Встановлено, що зі збільшенням обертів пропелерної мішалки збільшується темп охолодження (нагрівання) дослідної рідини та в результаті збільшується інтенсивність теплообміну.

Визначені відносні похибки основних величин: коефіцієнту тепловіддачі, коефіцієнту теплопередачі, питомої теплоємності, площі теплообмінної поверхні, темпу охолодження (нагрівання), коефіцієнту нерівномірного розподілу температури, теплового потоку, температурного напору, різниці температур, маси дослідного рідинного середовища, тривалості експерименту, табличних величин.

Список літератури

1. Погорелов А. І. Тепломасообмін (основи теорії і розрахунку) : навч. посіб. для вузів / А. І. Погорелов. – 2-ге видання. – Львів : Новий Світ-2000, 2004. – 144 с.
2. Варгафтик Н. Б. Теплопроводность жидкостей / Н. Б. Варгафтик // Известия ВТИ. – 1949. – № 8. – С. 6–11.
3. Великонська Н. М. Поверхневі явища та дисперсні системи : навч. посіб. / Н. М. Великонська, А. А. Надточій. – Дніпро : НМетАУ, 2018. – 78 с.
4. Теплофізичні властивості напівфабрикатів та харчових продуктів : довідник / М. М. Желінська, В. П. Василів. – Київ : Фірма «ІНКІС», 2021. – 206 с.
5. Теплоенергетичні установки і системи. Методичні вказівки до виконання курсового проекту (приклад розрахунку) для студентів 4 та 2 с.т. курсів інженерно-технологічного факультету напрямку підготовки 6.100101 «Енергетика та електротехнічні системи в АПК». – Суми : Сумський національний аграрний університет, 2018. – 44 с.
6. Стационарна теплопровідність : навч. посіб. / С. В. Юшко, О. Є. Борщ, М. А. Юшко. – Харків : НТУ «ХПБ», 2011. – 80 с.

7. Федоткін Ю. М. Тепло-гідродинамічні процеси у випарних апаратах / Ю. М. Федоткін, С. І. Ткаченко. – Київ : Техніка, 1975. – 21 с.
8. Ткаченко С. І. Деякі закономірності відносного руху фаз двофазного потоку у круглих трубах / С. Й. Ткаченко, Н. Ю. Тобілевич, І. І. Сагань // Теплоенергетика. – 1968. – № 3. – С. 46–50.
9. Пинчук Ю. К. Модернизация выпарного аппарата с целью усиления естественной циркуляции / Ю. К. Пинчук, И. И. Сагань, С. И. Ткаченко // Мясная индустрия СССР. – 1970. – № 3.
10. Ткаченко С. Й. Теплообмін в системах біоконверсії : моногр. / С. Й. Ткаченко, Н. В. Резидент. – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 124 с.
11. Ткаченко С. Й. Теплообмінні та гідродинамічні процеси в елементах енергозабезпечення біогазової установки : моногр. / С. Й. Ткаченко, Д. В. Степанов. – Вінниця : Універсум-Вінниця, 2004. – 132 с.
12. Angelidaki I. Codigestion of manure and organic wastes in centralized biogas plants: status and future trends / I. Angelidaki, L. Ellegaard // Appl. Biochem. Biotechnol. – 2003. – Vol. 109. – pp. 95–105. DOI: <https://doi.org/10.1385/abab:109:1-3:95>.
13. Schnell, S. A Century of Enzyme Kinetics: Reliability of the Km and Vmax Estimates / S. Schnell, P. K. Maini // Comments on Theoretical Biology. – 2003. – Vol. 8(2–3). – pp. 169–187. – DOI: <https://doi.org/10.1080/08948550390206768>.
14. Viamajala S. Rheology of corn stover slurries at high solids concentrations – Effects of saccharification and particle size / S. Viamajala, J. McMillan, D. J. Schell, R. T. Elander // Biore-source Technology. – 2009. – Vol. 100, Iss. 2. – pp. 925–934. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.06.070>.
15. Патент України на корисну модель № 24616, (51) МПК (2006.01) G01N25/18. Спосіб визначення коефіцієнта тепловіддачі за умов конвективного теплообміну органічної суміші / Ткаченко С. Й., Резидент Н. В. ; заявник і власник патенту Вінницький національний технічний університет. – № 200701190; заявл. 05.02.07; опубл. 10.07.2007, Бюл. № 10.
16. Патент України на винахід № 105399, (51) МПК (2006.01) G01N25/18. Спосіб визначення коефіцієнта тепловіддачі за умов конвективного теплообміну органічної суміші / Ткаченко С. Й., Пішеніна Н. В., Дишлок С. В. ; заявник і власник патенту Вінницький національний технічний університет. – № a201204878; заявл. 18.04.2012; опубл. 12.05.2014, Бюл. № 9.
17. Патент України на винахід № 97021, (51) МПК (2006.01) G01N25/18. Спосіб визначення коефіцієнта тепловіддачі за умов конвективного теплообміну органічної суміші / Ткаченко С. Й., Пішеніна Н. В., Резидент Н. В. ; заявник і власник патенту Вінницький національний технічний університет. – № a201005661; заявл. 11.05.2010; опубл. 26.05.2011, Бюл. № 2.
18. Kress P. Effect of agitation time on nutrient distribution in full-scale CSTR biogas digesters / P. Kress, H. Nagele, H. Oechsner, S. Ruile // Bioresour Technol. – 2018. – pp. 1–6. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.054>.
19. Chen J. Mechanism of waste-heat recovery from slurry by scraped-surface heat exchanger / J. Chen, J. Wu, X. Ji, X. Lu, C. Wang // Applied Energy. – 2017. – Vol. 207(C), pp. 146–155. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.111>.
20. Li Y. Reactor performance and energy analysis of solid state anaerobic co-digestion of dairy manure with corn stover and tomato residues / Y. Li, F. Xu, Y. Li, J. Lu, S. Li, A. Shah et al. // Waste Management. – 2018. – Vol. 73. – pp. 130–139. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.11.041>.
21. El-Mashad H. M. Rheological properties of dairy cattle manure / H. M. El-Mashad, W. K. P. van Loon, G. Zeeman, G. P. A. Bot // Bioresource Technology. – 2005. – Vol. 96, Iss. 5. – pp. 531–535. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.06.020>.

22. Гелетука Г. Перспективи виробництва біогазу в Україні / Г. Гелетука, П. Кучерук, Ю. Матвеев, Т. Ходаковская // *Возобновляемая энергетика*. – 2011. – № 3. – С. 73–77.
23. Müller, C. Anaerobic Digestion of Biodegradable Solid Waste in Low- and Middle Income Countries. Overview over existing technologies and relevant case studies. – 2007. – 63 p. – Назва з екрану. – URL: https://www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/Abteilungen/sandec/publikationen/SWM/Anaerobic_Digestion/Mueller_2007.pdf (дата звернення 25.11.2022).
24. Zareei S. Modeling and optimization of biogas production from cow manure and maize straw using an adaptive neuro-fuzzy inference system / S. Zareei, J. Khodaei // *Renewable Energy*. – 2017. – Vol. 114, Part B. – pp. 423–427. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.07.050>.
25. Ткаченко С. Й. Нові методи визначення інтенсивності теплообміну в системах переробки органічних відходів : моногр. / С. Й. Ткаченко, Н. В. Пішеніна. – Вінниця : ВНТУ, 2017.
26. Tkachenko S. Cooling and of the fluid in the cylindrical volume / S. Tkachenko, O. Vlasenko, N. Resident, D. Stepanov, N. Stepanova // *Acta Innovations*. – 2021. – No. 42. – pp. 15–26. – DOI: <https://doi.org/10.32933/ActaInnovations.42.2>.
27. Ткаченко С. Й. Нестационарний теплообмін у вертикальному циліндричному об'ємі, заповненому рідиною / С. Й. Ткаченко, О. В. Власенко, Н. Д. Степанова, Є. О. Павлович // *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. – 2022. – № 1(160). – С. 16–20. – DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-160-1-16-20>.
28. Ткаченко, С. Й. Теплообмін циліндричного рідинного тіла обмеженої висоти з навколишнім середовищем / С. Й. Ткаченко, О. В. Власенко, Н. В. Резидент // *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – 2021. – № 2(6). – С. 27–30. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2078-774X (print). – ISSN 2707-7543 (on-line). – <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2021.02.05>.
29. Ткаченко С. Й. Дослідження темпу нагрівання гетерогенного рідкого середовища / С. Й. Ткаченко, О. В. Власенко // *Сучасні технології матеріали і конструкції в будівництві*. – 2019. – Том. 26, № 1. – С. 127–133. – ISSN 2311-1429 (print). – ISSN 2311-1437 (on-line). – DOI: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2019-1-127-133>.
30. Ткаченко С. Й. Використання регулярного теплового режиму для прогнозування інтенсивності теплообміну у відходах птахівництва / С. Й. Ткаченко, О. В. Власенко, В. С. Качук // *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. – 2022. – № 5(164). – С. 45–51. – DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-164-5-45-51>.
31. Основи теорії похибок : метод. вказівки до практичної і самостійної роботи та виконання ДКР студентів напрямку підготовки 6.051301 – «Хімічна технологія» спеціальностей 7.05130110 та 8.05130110 «Хімічні технології переробки деревини та рослинної сировини» / Уклад.: Плосконос В. Г. – Київ : НТУУ «КПІ», 2012. – 51 с.

References (transliterated)

1. Pogorelov A. I. (2004), *Teplomassoobmin (osnovy teorii i rozrahunku)* [Heat and mass transfer (fundamentals of theory and calculation)], New World-2000, Lviv, 144 p.
2. Vargaftik N. B. (1949), "Teploprovodnost' zhidkostej [Thermal conductivity of fluids]", *Izvestiya VTI*, No. 8, pp. 6–11.
3. Velikonska N. M., Nadtochiy A. A. (2018), *Poverhnevi javyshha ta dyspersniy systemy* [Surface phenomena and dispersed systems], NMetAU, Dnipro, 78 p.
4. Zheplinska M. M., Vasylov V. P. (2021), *Teplofizychni vlastyivosti napivfabrykativ ta harchovyh produktiv* [Thermophysical properties of semi-finished products and food products], INKOS Company, Kiev, 206 p.
5. (2018), *Teploenergetychni ustanovky i systemy. Metodychni vkazivky do vykonannya kursovogo proektu (pryklad rozrahunku) dlja studentiv 4 ta 2 s.t. kursiv inzhenerno-technologichnogo fakul'tetu napriamtu pidgotovky 6.100101 "Energetyka ta elektrotehnični systemy v APK"* [Thermal power plants and systems. Methodical instructions for the implementation of the course project (calculation example) for students of the 4th and 2nd year of study. courses of the Faculty of Engineering and Technology in the field of training 6.100101 "Energy and electrical engineering systems in the agricultural sector"], Sumy National Agrarian University, Sumy, 44 p.
6. Yushko S. V., Borshch O. E., Yushko M. A. (2011), *Stacionarna teploprovodnist'* [Stationary thermal conductivity], NTU "KhPI", Kharkiv, 80 p.
7. Fedotkin Yu. M., Tkachenko S. I. (1975), *Teplohidrodinamichni procesy u vyparnykh aparatah* [Thermal and hydrodynamic processes in vaporizers], Technika, Kiev, 21 p.
8. Tkachenko S. I., Tobilevich N. Yu., Sagan I. I. (1968), "Dejaki zakonimosti vidnosnogo ruhu faz dvofaznogo potoku u kruglyh trubah [Some regularities of the relative movement of the phases of the two-phase flow in round pipes]", *Teploenergetyka* [Thermal power engineering], No. 3, pp. 46–50.
9. Pinchuk Y. K., Sagan I. I., Tkachenko S. I. (1970), "Modernizacija vyparnogo apparata s cel'ju usilenija estestvennoj cirkuljacii [Modernization of the evaporation apparatus with the goal of strengthening natural circulation]", *Myasnaya industriya SSSR*, No. 3.
10. Tkachenko S. Y., Resident N. V. (2011), *Teploobmin v systemah biokonversii'* [Heat exchange in bioconversion systems], VNTU, Vinnytsia, 124 p.
11. Tkachenko S. Y., Stepanov D. V. (2004), *Teploobminni ta gidrodinamichni procesy v elementah energozabezpechennja biogazovoi' ustanovky* [Heat exchange and hydrodynamic processes in the energy supply elements of a biogas plant], Univer-sum-Vinnytsia, Vinnytsia, 132 p.
12. Angelidaki I., Ellegaard L. (2003), "Codigestion of manure and organic wastes in centralized biogas plants: status and future trends", *Appl. Biochem. Biotechnol.*, Vol. 109, pp. 95–105, <https://doi.org/10.1385/abab:109:1-3:95>.
13. Schnell, S., Maini P. K. (2003), "A Century of Enzyme Kinetics: Reliability of the KM and Vmax Estimates", *Comments on Theoretical Biology*, Vol. 8(2–3), pp. 169–187, <https://doi.org/10.1080/08948550390206768>.
14. Viamajala S., McMillan J., Schell D. J., Elander R. T. (2009), "Rheology of corn stover slurries at high solids concentrations – Effects of saccharification and particle size", *Bioresource Technology*, Vol. 100, Iss. 2, pp. 925–934, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.06.070>.
15. Patent of Ukraine for a utility model No. 24616, (51) IPC (2006.01) G01N25/18. *Sposib vyznachennja koeficijenta teploviddachi za unov konvektyvnogo teploobminu organichnoi' sumishi* [The method of determining the heat transfer coefficient under the conditions of convective heat exchange of an organic mixture] / Tkachenko S. Y., Resident N. V.; the applicant and owner of the patent Vinnytsia National Technical University. – No. 200701190; statement 05.02.07; published 10.07.2007, Bull. No. 10.
16. Patent of Ukraine for an invention No. 105399, (51) IPC (2006.01) G01N25/18. *Sposib vyznachennja koeficijenta teploviddachi za unov konvektyvnogo teploobminu organichnoi' sumishi* [The method of determining the heat transfer coefficient under the conditions of convective heat exchange of an organic mixture] / Tkachenko S. Y., Pishenina N. V., Dyshlyuk S. V.; the applicant and owner of the patent Vinnytsia National Technical University. – No. a201204878; statement 04/18/2012; published 12.05.2014, Bull. No. 9.
17. Patent of Ukraine for an invention No. 97021, (51) IPC (2006.01) G01N25/18. *Sposib vyznachennja koeficijenta teploviddachi za unov konvektyvnogo teploobminu organichnoi' sumishi* [The method of determining the heat transfer coefficient under the conditions of convective heat exchange of an organic mixture] / Tkachenko S. Y., Pishenina N. V., Resident N. V.; the applicant and owner of the patent Vinnytsia National Technical University. – No. a201005661; statement 11.05.2010; published 05/26/2011, Bull. No. 2.
18. Kress P., Nagele H., Oechsner H., Ruile S. (2018), "Effect of

- agitation time on nutrient distribution in full-scale CSTR biogas digesters”, *Bioresour Technol*, pp. 1–6, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.054>.
19. Chen J., Wu J., Ji X., Lu X., Wang C. (2017), “Mechanism of waste-heat recovery from slurry by scraped-surface heat exchanger”, *Applied Energy*, Vol. 207(C), pp. 146–155, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.111>.
 20. Li Y., Xu F., Li Y., Lu J., Li S., Shah A. et al. (2018), “Reactor performance and energy analysis of solid state anaerobic co-digestion of dairy manure with corn stover and tomato residues”, *Waste Management*, Vol. 73, pp. 130–139, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.11.041>.
 21. El-Mashad H. M., van Loon W. K. P., Zeeman G., Bot G. P. A. (2005), “Rheological properties of dairy cattle manure”, *Biore-source Technology*, Vol. 96, Iss. 5, pp. 531–535, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.06.020>.
 22. Geletukha G., Kucheruk P., Matveev Yu., Khodakovskaya T. (2011), “Perspektivy proizvodstva biogaza v Ukraine [Prospects of biogas production in Ukraine]”, *Vozobnovljajama jenergetika [Renewable energy]*, No. 3, pp. 73–77.
 23. Müller, C. (2007), *Anaerobic Digestion of Biodegradable Solid Waste in Low- and Middle Income Countries. Overview over existing technologies and relevant case studies*, 63 p, Access mode: https://www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/Abteilungen/sandec/publikationen/SWM/Anaerobic_Digestion/Mueller_2007.pdf (accessed 25 November 2022).
 24. Zareei S., Khodaei J. (2017), “Modeling and optimization of biogas production from cow manure and maize straw using an adaptive neuro-fuzzy inference system”, *Renewable Energy*, Vol. 114, Part B, pp. 423–427, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.07.050>.
 25. Tkachenko S. Y., Pishenina N. V. (2017), *Novi metody vyznachenja intensyvnosti teploobminu v systemah pererobky organichnyh vidhodiv [New methods for determining the intensity of heat exchange in organic waste processing systems]*, VNTU, Vinnytsia.
 26. Tkachenko S., Vlasenko O., Resident N., Stepanov D., Stepanova N. (2021), “Cooling and of the fluid in the cylindrical volume”, *Acta Innovations*, No. 42, pp. 15–26, <https://doi.org/10.32933/ActaInnovations.42.2>.
 27. Tkachenko S. Yo., Vlasenko O. V., Stepanova N. D., Pavlovych Ye. O. (2022), “Non-stationary Heat Exchange in a Vertical Cylindrical Volume Filled with Liquid”, *Visnyk of Vinnytsia Polytechnical Institute*, No. 1, pp. 16–20.
 28. Tkachenko S., Vlasenko O., Rezydent N. (2021), “Heat Exchange of the Cylindrical Liquid Body of a Limited Height with the Environment”, *Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 2(6), pp. 27–30, ISSN 2078-774X (print), ISSN 2707-7543 (on-line), <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2021.02.05>.
 29. Tkachenko, S. Y., Vlasenko O. V. (2019), “Doslidzhennja tempu nagrivanja geterogennogo ridkogo seredovyshha [Studying the Temple of Heating of Heterogeneous Related Environment]”, *Modern Technologies, Materials and Design in Construction*, Vol. 26, No. 1, pp. 127–133, ISSN 2311-1429 (print), ISSN 2311-1437 (on-line), <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2019-1-127-133>.
 30. Tkachenko S. Yo., Vlasenko O. V., and Tkachuk V. S. (2022), “Using the Regular Thermal Regime for Predicting the Intensity of Heat Exchange in Poultry Waste”, *Visnyk of Vinnytsia Polytechnical Institute*, Vol. 5, pp. 45–51, <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-164-5-45-51>.
 31. Ploskonos V. G. (2012), *Osnovy teorii' pohybok : metod. vkazivky do praktychnoi' i samostijnoi' roboty ta vykonannja DKR studentiv naprjamu pidgotovky 6.051301 – “Himichna tehnologija” special'nostej 7.05130110 ta 8.05130110 “Himichni tehnologii' pererobky derevyny ta roslynnoi' syrovyny” [Basics of error theory : method. instructions for practical and independent work and implementation of the DKR of students of the training direction 6.051301 – “Chemical technology” specialties 7.05130110 and 8.05130110 “Chemical technologies of processing wood and plant raw materials”]*, NTUU “KPI”, Kiev, 51 p.

Надійшло (received) 02.11.2022

Відомості про авторів / About the Authors

Ткаченко Станіслав Йосипович (Tkachenko Stanislav) – доктор технічних наук, професор кафедри теплоенергетики, Вінницький національний технічний університет; м. Вінниця, Україна; e-mail: stahit6937@gmail.com.

Власенко Ольга Володимирівна (Vlasenko Olha) – науковий співробітник кафедри теплоенергетики, Вінницький національний технічний університет; м. Вінниця, Україна; e-mail: olgakytsak7@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8975-0873>.