

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ БУДІВЕЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА

УДК 536.24:631.371

**МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ІНТЕНСИВНОСТІ ТЕПЛООБМІНУ
В РЕОНЕСТАБІЛЬНИХ СУМІШАХ**

С. Й. Ткаченко, Н. В. Пішеніна

Запропоновано експериментально-розрахунковий метод визначення коефіцієнтів тепловіддачі від твердої стінки до трифазних грубодисперсних колоїдних сумішей, що відносяться до неньютонівських реонестабільних рідин на прикладі субстратів тваринного походження. Проведено дослідження інтенсивності теплообміну в реонестабільних сумішах при вимушеній конвекції в базовому експериментальному стенді з врахуванням їх передісторії.

Предложен экспериментально-расчетный метод определения коэффициентов теплоотдачи от твердой стенки к трехфазным грубодисперсным коллоидным смесям, которые относятся к неньютоновским реонестабильным жидкостям, на примере субстратов животного происхождения. Проведено исследование интенсивности теплообмена в реонестабильных смесях при вынужденной конвекции в базовом экспериментальном стенде с учетом их предистории

A variant of the experimental calculation method for determining the coefficients of heat transfer from the solid wall of a three-phase coarse colloidal mixture which are non-Newtonian rheological volatile liquids, an example of substrates of animal origin. The study of the heat transfer in the reo unstable mixtures under forced convection in the underlying experimental stand with their prehistory.

Вступ. Актуальність проблеми

Системи переробки органічних відходів (СПОВ) включають теплотехнологічне обладнання, в елементах якого відбуваються процеси тепло- і масоперенесення в умовах вільної та вимушеної конвекції. Сировиною в таких системах є суміші та рідини органічного походження з обмеженою інформацією по теплофізичних властивостях. Вони відносяться як до ньютонівських так і неньютонівських рідин. Одна і та ж сама рідина може мати і неньютонівський і ньютонівський характер плинності при певних умовах. Так, наприклад, безводний гліцерин при низьких температурах (<30°C) під час руху виявляє неньютонівські властивості, які характерні для псевдопластичної рідини [1]. Наявність різних домішок жирів, солей тощо також значно змінюють реологічні показники рідин. Реологічні властивості натурних рідин можуть змінюватися під час процесу переробки та в залежності від передісторії: умов і тривалості зберігання, температурного режиму, попередньої обробки (розбавлення, розділення фракцій, згущення), способу транспортування тощо. Наприклад, рідкий гній свиней виявляє неньютонівський характер плинності [2]. Його в'язкість зменшується в результаті тривалих деформацій. Цей процес залежить від температури та практично повністю оборотний, тобто субстрат набуває початкової в'язкості після періоду спокою.

Безпідстилковий гній великої рогатої худоби (ВРХ) можна розглядати як пластичний матеріал з псевдопластичним характером плинності та тиксотропними властивостями [3]. Такий субстрат твердіє в стані спокою та розріджується під час руху. Межа текучості гною ВРХ, що видаляється самопливом, дорівнює 50...100 Н/м². Установлено, що в'язкість гною ВРХ значно зменшується зі збільшенням швидкості руху по каналу. Така залежність дійсна тільки в діапазоні верхньої та нижньої границі межі текучості. Зі збільшенням вологості в гної ВРХ, свиней значно зменшується граничне напруження зсуву та зростає інтенсивність розшарування [3, 4]. При вологості гнойових стоків більше 98 % через дві години випадає в осад до 90 % всіх зважених частинок. Подальше відстоювання призводить до втрати текучості осаду. Через 7...8 днів в осаді починається бродіння, газоутворення і текучість його відновлюється. При теплих погодних умовах в'язкість рідкої фази гною зменшується і процес розшарування прискорюється [3, 4].

Наведені приклади зміни стану натурних рідин характерні для багатьох рідин, сумішей і субстратів (табл. 1), які потрібно нагрівати або охолоджувати відповідно до технології обробки. Для багатьох з них теплофізичні властивості невідомі, або недостатньо досліджені, що є основною проблемою при проектуванні теплотехнологічного обладнання.

Приклади ньютонівських та неньютонівських рідин [1-6, 9-11]

Тип (характеристика) рідин		Приклад рідин		
Ньютонівські рідини		Всі низькомолекулярні речовини в рідкому стані, їх суміші та дійсні розчини в них низькомолекулярних речовин: вода; гліцерин; етанол; керосин; розчини солей; органічні рідини; розплави металів, скла, органічних солей; молоко; рослинна олія		
Неньютонівські	Рео-нестабільні	Тиксотропні	–деякі розчини та розплави високо полімерів; –фарби; –безпідстилковий гній ВРХ, свиней; – субстрати, косубстрати;	–харчові продукти; –йогурт; –цукеркові маси; –терте какао; –м'ясний фарш;
		Реопектичні	–суспензії бентонітової глини	–зависі гіпсу –гіпсове тісто
	Реостабільні	Псевдо-пластичні	–розчини високомолекулярних полімерів; –типографські фарби; –гліцерин-сирець; –гліцерінова вода; –соапстоки; –чистий гліцерин при $t < 30^{\circ}\text{C}$; –концентрати фруктових соків; –кетчуп, томатні концентрати;	–цукрові розчини; –розчини каучуку; –клейові речовини; –розчини та розплави полімерів; –жири; –фарби; –дисперсні фармацевтичні середовища; –біологічні рідини;
			Дилатантні	–крохмаль; –силікат натрію; –розчини кукурудзяного крохмалю та цукру;
		З межею текучості	–розплави пластмас –буровий шлам нафтових свердловин, шлами –миючі суспензії	–зубна паста –паперова маса –маргарин та інші види кулінарних жирів, пасти
	В'язко -пружні		–мильні луги –силіконова замазка –бітуми –концентровані супи –тісто з борошна	–загуслий яєчний білок –різні сорти згущеного молока –желатин у воді –шампуні.

Субстрати тваринного походження великої рогатої худоби, свиней, що переробляються в біогазових установках (БГУ) відносяться до неньютонівських реонестабільних рідин, у яких проявляється явище тиксотропії. Процеси і закономірності теплообміну в таких субстратах досліджувались лише експериментально [5, 6], на основі чого отримувались аналітичні залежності розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі до субстратів. Для цього створювались громіздкі, матеріаломісткі, конструктивно складні експериментальні установки. Ці установки повинні були повністю відтворити тип теплообмінної поверхні обладнання, яке проектується, режими руху, температурні режими. Проведення експериментів на таких установках потребує створення особливих умов, спеціалізованих приміщень та обладнання, наявності великої кількості субстрату.

Отримані результати [5, 6] справедливі для тих умов та тих субстратів, на яких проводились фізичні експерименти, оскільки фізико-хімічні властивості субстрату залежать від виду, віку тварин, раціону харчування, способу утримання. На практиці утворюється велике різноманіття сумішей субстратів, а нестабільність в часі їх теплофізичних характеристик обумовлює необхідність врахування того, як передісторія субстратів впливає на процеси (інтенсивність) теплообміну. Для застосування розрахункових залежностей для коефіцієнтів тепловіддачі [5, 6] необхідно відтворити ті умови, при яких були отримані ці залежності, що є

практично неможливим. Недоцільним є і експериментальне отримання залежностей для розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі для кожного субстрату, суміші, кожного типу теплообмінної поверхні окремо. Таким чином, традиційні методи дослідження і експериментальні установки не забезпечать багатоваріантні дослідження процесів теплообміну для реонестабільних сумішей.

Дослідження інтенсивності теплообміну в складних субстратах і сумішах на основі відходів тваринництва проводилось із використанням експериментально-розрахункового методу (ЕРМ) [7, 8], який передбачає також проведення фізичного експерименту, але без врахування реонестабільності субстратів. Отже, проблема розробки методу дослідження інтенсивності теплообміну в складних сумішах без створення експериментальної установки, яка б конструктивно копіювала тип теплообмінної поверхні та інші умови в теплотехнологічному обладнанні БГУ, що проектується, є актуальною.

Мета роботи – ресурсозбереження, енергозбереження, економія коштів на прогнозування теплообміну в реонестабільних сумішах, шляхом розробки експериментально-розрахункового методу (ЕРМ) для визначення інтенсивності теплообміну в цих сумішах. Створення експериментального стенда в рамках ЕРМ для багатоваріантного дослідження процесів теплообміну в реонестабільних сумішах.

Постановка задачі

У реонестабільних неньютонівських рідин реологічні характеристики залежать від часу. Уявна в'язкість для таких рідин визначається не тільки швидкістю зсуву, але і тривалістю прикладання деформацій. В залежності від того, збільшується чи зменшується в'язкість протягом тривалої дії напруження зсуву при сталій швидкості зсуву, рідини розділяються на тиксотропні та реопектичні [9].

Реонестабільність субстратів на основі відходів тваринництва проявляється у схильності до тиксотропії [4]. В тиксотропному матеріалі його консистенція залежить від тривалості дії сил зсуву та величини швидкості зсуву [9]. Якщо такий матеріал в стані спокою деформувати зі сталою швидкістю, то його структура буде руйнуватись [10]. Тиксотропія є оборотним процесом – після зникнення збурень рідини, її структура поступово відновлюється. Це пояснюється наявністю колоїдних частинок в суміші. Крива плинності тиксотропного матеріалу, що визначена безпосередньо після прикладання напруження зсуву така, як для ньютонівської рідини [9].

Крива ефективної в'язкості структурованих рідин з тиксотропною структурою характеризується двома сталими ньютонівськими в'язкостями [10]: якщо прикладати напруження $\tau' < \tau'_0$, яке не перевищує межі міцності просторової структури, то відбувається повільна течія зі сталою в'язкістю практично незруйнованої структури $\mu_{\text{еф}0}$; при подальшому збільшенні напруження $\tau > \tau'_0$, відбувається руйнування структури рідини і в'язкість починає зменшуватись до мінімальної її величини – в'язкості повністю зруйнованої структури $\mu_{\text{еф}m}$. При подальшому збільшенні τ , $\mu_{\text{еф}m}$ лишається сталою. В залежності від ступеня зруйнованості структури $\mu_{\text{еф}}$ структурованої рідини змінюється в межах $\mu_{\text{еф}0} \leq \mu_{\text{еф}} \leq \mu_{\text{еф}m}$. Отже, відмінністю структурованих рідин від інших неньютонівських є можливість побудови повної реологічної кривої ефективної в'язкості з початковою $\mu_{\text{еф}0}$ і кінцевою $\mu_{\text{еф}m}$ ньютонівськими в'язкостями [10].

Такі особливості тиксотропних реонестабільних матеріалів дозволили нам сформулювати концепцію експериментально-розрахункового методу визначення інтенсивності теплообміну в реонестабільних тиксотропних сумішах. При дослідженні теплообміну в субстратах за умов вільної конвекції – визначальною стає ньютонівська в'язкість незруйнованої структури $\mu_{\text{еф}0}$, при дослідженні теплообміну за умов інтенсивної вимушеної конвекції при попередньому зруйнуванні структури – визначальною стає ньютонівська в'язкість $\mu_{\text{еф}m}$.

В теплотехнологічному обладнанні систем переробки органічних відходів (СПОВ), де відбуваються процеси нагрівання і охолодження субстратів з тиксотропними властивостями, в залежності від виду обладнання, наявності та періодичності перемішування (вільний, вимушений рух), передісторії субстрату (попередньо зруйнована структура, чи субстрат в стані спокою) можемо мати різного ступеня зруйновану структуру. Відповідно до цього, субстрат може набувати різної $\mu_{\text{еф}}$ – ньютонівської та неньютонівської, що суттєво буде впливати на інтенсивність теплообміну, а отже – і на якість протікання біохімічних процесів.

Зменшення в'язкості спостерігається не тільки при тривалих деформаціях [2-4], але і з часом, при зберіганні, внаслідок процесів бродіння, густина рідкого гною зменшується, в'язкість

при цьому знижується [11].

Таким чином, для коректного розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі при проектуванні теплотехнологічного обладнання СПОВ, необхідно дослідити інтенсивність теплообміну субстрату з різним ступенем зруйнованості структури та з різною біохімічною передісторією (свіжий субстрат, на початковій стадії бродіння, в стадії активного анаеробного бродіння, зброджений).

Біохімічні процеси що проходять під час бродіння субстрату, накладають обмеження: швидкість руху суміші повинна бути в межах $w < 0,6$ м/с; температура теплообмінної стінки повинна не перевищувати 60°C.

Відповідно до наведених вимог, для виконання багатоваріантних досліджень субстратів, конструкція базового експериментального стенда в системі ЕРМ для дослідження реонестабільних тиксотропних рідин повинна бути простою у використанні, невеликого розміру, не вимагати великої кількості натурної суміші (рідкого гною), містити перемішувальний пристрій, просту, доступну в обслуговуванні конструкцію теплообмінної поверхні.

Для проведення базового експерименту дослідження теплообміну при вимушеній конвекції в системі ЕРМ, базовий експериментальний стенд [12] обладнано додатково пропелерною мішалкою, діаметром $d_m=0,058$ м, з трьома лопатями, кут нахилу кожної 60°. Співвідношення діаметрів мішалки та внутрішньої робочої порожнини базової установки $d_m/D_b = 0,6$. Мішалка встановлена співвісно з внутрішньою посудиною базової установки [12] біля нижнього днища на відстані 17 мм, приводиться в дію електродвигуном, спричиняє висхідний рух рідини. Методика проведення серії дослідів наведена [12]. В межах однієї серії дослідів кількість обертів мішалки стала.

Основні дослідження

Виконано уточнення критеріальної залежності для розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі при перемішуванні пропелерною мішалкою для умов, що створюються в базовому експериментальному стенді. Для цього проведено базовий експеримент при вимушеній конвекції з рідинами, теплофізичні властивості яких відомі (тарувальні рідини): вода, безводний гліцерин, цукровий розчин з концентрацією 40 % та 50 %. В розрахунках прийнято, що визначальна швидкість руху рідини дорівнює половині лінійної швидкості руху крайньої точки пропелера мішалки w_{max} . Тоді, за аналогією розподілу профілю швидкостей по перерізу в круглій трубі при вимушеній течії рідини (рис. 1, а), критерій Рейнольдса для наших умов (рис. 1, б) знаходимо за такою формулою

$$Re^* = \frac{\bar{w} \cdot 2\delta}{\nu}, \quad (1)$$

де $2\delta = D_b - d_m$, δ – товщина граничного шару, м; ν – кінематична в'язкість рідини при \bar{t}_2 , м²/с; діаметр внутрішньої порожнини $D_b = 0,097$ м. Критерії Re^* для тарувальних рідин змінювались в межах $Re^* = 20 \dots 14000$. При цьому найменші значення Re^* відповідають гліцерину (20...200), середні – цукровому розчину (100...5000), високі (1100...14000) – воді.

Середня швидкість руху рідини $\bar{w} = 0,5 \cdot w_{max}$ змінювалась від 0,01 до 0,3 м/с, а середній температурний перепад між гарячим теплоносієм і рідиною, що нагрівається дорівнював $\bar{\Delta t}_\delta = 5 \dots 30^\circ C$, $\bar{\Delta t}_\delta = (\bar{t}_1 - \bar{t}_2)$, де \bar{t}_1 – середня температура грійного теплоносія, \bar{t}_2 – середня температура досліджуваної суміші.

За умов нагріву і перемішування рідини, вимушена конвекція супроводжується вільною конвекцією. В нашому випадку ситуація ускладнюється тим, що процес теплообміну в базовому експериментальному стенді відбувається в нестационарних умовах – на початку базового експерименту $\bar{\Delta t}$ максимальне, вплив вільної конвекції на інтенсивність тепловіддачі найбільший. Оскільки $\bar{\Delta t}$ змінюється протягом базового експерименту, відповідно і профіль швидкостей при сумісній дії вільної і вимушеної конвекції змінюється.

Дослідження теплообміну проводились для гною великої рогатої худоби (ВРХ) вологістю 92 %, та свиней – вологістю 94 %. Середні значення в'язкості гною тваринного походження знаходяться в діапазоні $1,3 \cdot 10^{-3} \dots 9,81 \cdot 10^{-5}$ м²/с [11]. Зважаючи на це і [13], прийнято, що рух гною під час дослідів ламінарний, в'язкісно-гравітаційний режим.

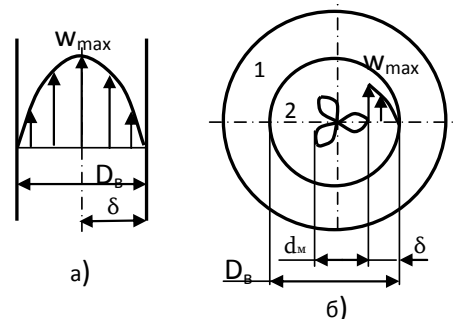


Рис. 1. Розподіл швидкостей при вимушеному русі рідини при стаціонарних умовах: а) кругла труба; б) базова експериментальна установка; 1 – зовнішня порожнина, гарячий теплоносій; 2 – внутрішня посудина, холодний теплоносій, досліджувана речовина

Якщо реонестабільні тиксотропні рідини, що знаходяться в стані спокою, деформувати, то їх структура порушується і вони поводять себе як ньютонівські [9, 10].

Відповідно до створеної моделі процесу теплообміну, прийняли, що коефіцієнт тепловіддачі при перемішуванні тарувальних рідин можна виразити критеріальним рівнянням такого вигляду [13]

$$Nu = C \cdot Re^{n_1} \cdot Pr_p^{n_2} \cdot (Gr \cdot Pr_p)^{n_3} \cdot \left(\frac{Pr_p}{Pr_{cm}} \right)^{0,25}, \quad (2)$$

де C – константа критеріального рівняння; Gr – критерій Грасгофа; Pr – критерій Прандтля; n_1, n_2, n_3 – показники степеня. Щоб використати критеріальне рівняння (2) для опису теплообміну при вимушеному русі в базовій експериментальній установці, виконано уточнення сталої C та показника n_1 , а n_2 та n_3 прийнято як в рівнянні, що описує рух в круглій трубі $n_2=0,33; n_3=0,1$. За визначальні прийнято два лінійних розміри: для вільної конвекції визначальною є висота теплообмінної поверхні H , для вимушеної – 2δ (рівняння 1). Результат обробки експериментів у вигляді залежності (2) дозволило отримати наступне рівняння для тарувальних рідин

$$Nu = 0,0549 \cdot Re_{2\delta}^{0,589} \cdot Pr_p^{0,33} \cdot (Gr_H \cdot Pr_p)^{0,1} \cdot \left(\frac{Pr_p}{Pr_{cm}} \right)^{0,25}, \quad (3)$$

$$Nu = \frac{\alpha_{\delta}^{вим} \cdot 2\delta}{\lambda}, \quad (4)$$

структуризація цього критеріального рівняння –

$$\alpha_{\delta}^{вим} = 0,0549 \cdot K\Phi B_{\delta}^{експ} \cdot \underbrace{\left[w^{0,589} \cdot (g \cdot \Delta T_{\delta})^{0,1} \cdot \frac{H_{\delta}^{0,3}}{2\delta^{0,41}} \right]}_{\Pi_{\delta}^{вим}} \cdot \left(\frac{Pr_p}{Pr_{cm}} \right)_{\delta}^{0,25}, \quad (5)$$

комплекс фізичних властивостей в базовому режимі при вимушеній конвекції

$$K\Phi B_{\delta}^{експ} = C_p^{0,43} \cdot \rho^{0,43} \cdot \beta^{0,1} \cdot \lambda^{0,57} \cdot \nu^{-0,359}, \quad (6)$$

де β – коефіцієнт температурного розширення, ν – кінематична в'язкість, ρ – густина, C_p – теплоємність, λ – теплопровідність рідини; $\alpha_{\delta}^{вим}$ – базовий коефіцієнт тепловіддачі при вимушеному русі. Визначальним лінійним розміром в (3) прийнято 2δ – вважаємо, що вимушений рух найбільше впливає на $\alpha_{\delta}^{вим}$, ніж вільний. Визначальна температура в (3) t_2 .

Запропонована нами структура критеріального рівняння (2) частково узгоджується а рівнянням для простої пропелерної мішалки, якщо теплообмін відбувається через стінку апарата [6].

$$Nu = 0,37 \cdot Re_{ц}^{2/3} \cdot Pr^{1/3} \cdot \left(\frac{\mu_p}{\mu_{ст}} \right)^{0,14}, \quad (7)$$

де $Nu = \alpha D / \lambda$; $Re_{ц} = n d^2 \rho / \nu$, d – діаметр мішалки; D – внутрішній діаметр апарата; n – кількість

обертів; μ_p – коефіцієнт динамічної в'язкості, що визначається за середньою температурою рідини.

При проведенні базового експерименту дослідження інтенсивності теплообміну намагалися відтворити реальні умови та передісторію субстрату в теплотехнологічному обладнанні СПОВ – підігрівнику (нагрівання свіжого розведеного гною), реакторі (нагрівання забродившого субстрату після однократного та декількох нагрівань та охолоджень), теплоутилізаторі (охолодження забродившого субстрату після багатократного нагріву і охолодження). При обробці експериментальних даних середні коефіцієнти теплопередачі між гарячим і холодним теплоносіями в системі (рис. 1, б) визначали таким чином

$$k_{\text{експ}} = \frac{Q_2}{F_{\text{ТО}} \cdot \Delta t}, \quad (8)$$

де $F_{\text{ТО}}$ – площа теплообмінної поверхні; $\Delta t = \bar{t}_1 - \bar{t}_2$ – середній температурний напір, Q_2 – тепловий потік, що сприймається холодним теплоносієм (натурною рідиною).

Експериментальний коефіцієнт тепловіддачі для рідкого гною (субстрату) $\alpha_{\bar{\sigma}}^{\text{вим}}$ знаходимо із співвідношення

$$\frac{1}{k_{\text{експ}}} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} + \frac{1}{\alpha_{\bar{\sigma}}^{\text{вим}}}; \quad (9)$$

$$\alpha_{\bar{\sigma}}^{\text{вим}} = \left(\frac{1}{k_{\text{експ}}} - \frac{1}{\alpha_1} - \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} \right)^{-1}, \quad (10)$$

де $\delta_{\text{ст}}$, $\lambda_{\text{ст}}$ – товщина та теплопровідність стінки теплообмінної поверхні, α_1 – розрахунковий коефіцієнт тепловіддачі від гарячого теплоносія (води) до стінки, який визначається за критеріальним рівнянням відповідно режиму теплообміну в кільцевому каналі

$$\overline{Nu}_1 = 0,757 \cdot Ra_1^{0,25} \cdot \left(\frac{Pr_p}{Pr_c} \right)_1^{0,25}, \quad (11)$$

де визначальним розміром є висота циліндричної теплообмінної поверхні $H = 0,108$ м, визначальною є середня температура грійного теплоносія \bar{t}_1 . Рівняння (8) отримано в результаті дослідження умов теплообміну в елементах базової експериментальної установки даних геометричних розмірів [12] при вільній конвекції за допомогою тарувальних рідин, і збігається з критеріальним рівнянням, що описує теплообмін при вільній конвекції біля вертикальної стінки. Проведений фізичний експеримент (рис. 2) з рідким гномем ВРХ і свиней на базовому експериментальному стенді показав, що інтенсивність процесу тепловіддачі при вимушеній конвекції до відходів свиней вища, ніж до відходів ВРХ.

А також досліджено вплив передісторії рідкого гною на процес теплообміну (рис. 2): експериментальні коефіцієнти тепловіддачі при вимушеній конвекції $\alpha_{\bar{\sigma}}^{\text{вим}}$ збродженого гною свиней вищі в 1,5...1,8 раза ніж для свіжого розведеного, для відходів ВРХ – $\alpha_{\bar{\sigma}}^{\text{вим}}$ збродженого гною вищі в 2,1...2,8 раза ніж для свіжого.

В процесі обробки експериментальних даних всіх дослідів із субстратом при знаходженні $K_{\text{ФВ}}^{\text{експ}}_{\bar{\sigma} \text{ вим}}$ запропоновано новий підхід відносно [8] до врахування поправки на напрям теплообміну $(Pr_p/Pr_{\text{ст}})^{0,25}$ з використанням ТФВ «частково-модельної рідини» (рис. 3), який полягає в наступному. В першому наближенні $(Pr_p/Pr_{\text{ст}})^{0,25}$ розраховували з використанням теплофізичних властивостей (ТФВ) води. Аналізували отриману характеристику $K_{\text{ФВ}}^{\text{експ}}_{\bar{\sigma} \text{ вим}} = f(\bar{t})$ і порівнювали з розрахунковими характеристиками $K_{\text{ФВ}}^{\text{експ}}_{\bar{\sigma} \text{ вим}} = f(\bar{t})$ для відомих модельних рідин. За "частково-модельну рідину" для врахування $(Pr_p/Pr_{\text{ст}})^{0,25}$ приймалася та рідина, для якої закономірність зміни $\left[K_{\text{ФВ}}^{\text{розрах}}_{\bar{\sigma} \text{ вим}} \right]_M$ від температури була еквідистантна до отриманої в першому наближенні $K_{\text{ФВ}}^{\text{експ}}_{\bar{\sigma} \text{ вим}} = f(\bar{t})$ субстрату. В наступному наближенні $K_{\text{ФВ}}^{\text{експ}}_{\bar{\sigma} \text{ вим}} = f(\bar{t})$ уточнювали, враховуючи $(Pr_p/Pr_{\text{ст}})^{0,25}$ з

використанням ТФВ вибраної «частково-модельної» рідини.

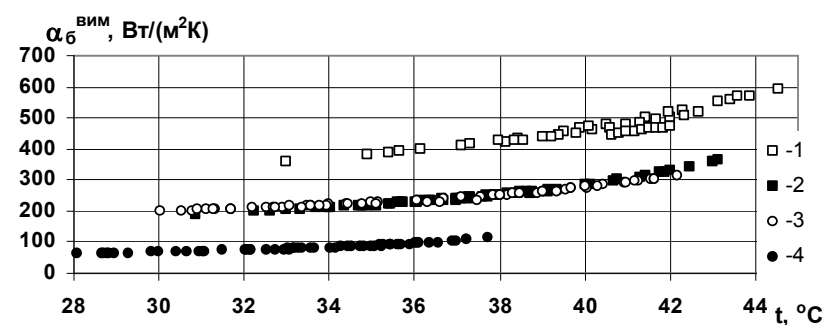


Рис. 2. Залежність $\alpha_6^{\text{вим}}$ від середньої температури гною свиней і ВРХ з різною передісторією, визначальна швидкість 0,2 м/с. Гній свиней вологістю 94 %: 1 – зброджений; 2 – свіжий розведений. Гній ВРХ вологістю 92 %: 3 – зброджений; 4 – свіжий розведений

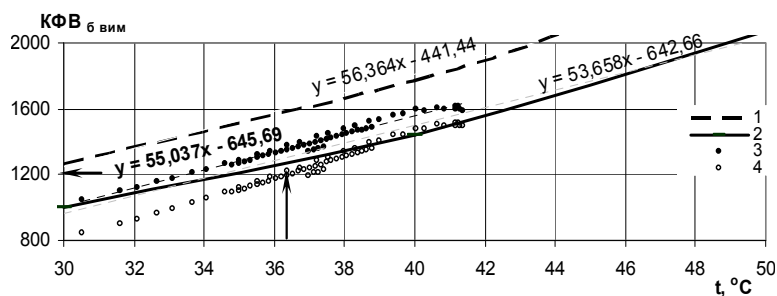


Рис. 3. Метод визначення частково-модельної та модельної рідин в ЕРМ для реонестабільної суміші:

1 – «частково-модельна» рідина – цукровий розчин, концентрація 79 %; 2 – «модельна» рідина – цукровий розчин, концентрація 80 %; 3 – експериментальні точки після першого наближення $(Pr_p/Pr_{ст})^{0,25}$; 4 – експериментальні точки після наближення $(Pr_p/Pr_{ст})^{0,25}$ за теплофізичними властивостями «частково-модельної» рідини

Дослідження субстрату ВРХ вологістю 92 % (рис. 4, табл. 2). Перед проведенням першої серії дослідів зі свіжим субстратом його інтенсивно перемішали. Тривалість проведення однієї серії дослідів базового експерименту 20...35 хвилин. Після першого нагрівання свіжого субстрату за час експерименту на поверхні відстоялася мутна вода. Свіжий субстрат дуже схильний до седиментації, навіть протягом базового експерименту та при наявності постійного перемішування.

Із рис. 4, 5 видно, що на величину та закономірність зміни характеристики $KФВ_{6\text{вим}}^{\text{експ}} = f(\bar{t})$ та $\alpha_{\text{ер}}^{\text{шук}} = f(\bar{t})$ впливає передісторія субстрату, умови проведення експерименту, зокрема швидкість руху. Так, найвищі $KФВ_{6\text{вим}}^{\text{експ}}$ для перебродившого субстрату після однократного нагріву та охолодження. По мірі збільшення кількості нагрівів та охолоджень значення $KФВ_{6\text{вим}}^{\text{експ}}$ зменшуються. Для свіжого субстрату $KФВ_{6\text{вим}}^{\text{експ}}$ менші за $KФВ_{6\text{вим}}^{\text{експ}}$ збродженого. Це пояснюється тим, що при виникненні процесів бродіння в субстраті в'язкість його зменшується, порівняно з в'язкістю свіжого субстрату. А також тим, що при збільшенні швидкості руху крива течії реонестабільних субстратів стає подібними до ньютонівських рідин [9, 10]. Якісно аналогічні результати отримані і для гною свиней, вологістю 94 %. Отже, можна зробити висновок, що при дослідженні інтенсивності тепловіддачі в реонестабільних рідинах, до яких відносяться субстрати, базовий експеримент потрібно проводити з моделюванням передісторії субстрату, з відповідною швидкістю руху. А також, базовий експеримент, проведений при одній швидкості (базовій), можна переносити на іншу швидкість (шукану) – яка буде в реальній установці.

З використанням проведених досліджень (рис. 4), були визначені експериментально-розрахункові коефіцієнти тепловіддачі $\alpha_{\text{ер}}^{\text{шук}}$ в шуканому режимі теплообміну – при вимушеному русі в кільцевому каналі з середньою швидкістю $\bar{w}=0,1...0,2$ м/с з еквівалентним діаметром $d_c = 0,05$ м, в'язкісно-гравітаційна течія (рис. 5).

Коефіцієнти тепловіддачі $\alpha_{\text{ер}}^{\text{шук}}$ розраховували на основі залежності $KФВ_{6\text{вим}}^{\text{експ}} = f(\bar{t})$ за допомогою поправок переходу із базового вимушеного режиму в шуканий $\Pi_{6\text{-ш}}$, які визначалися з використанням теплофізичних властивостей модельних рідин. За алгоритмом, наведеним вище (рис. 3) вибрано «частково-модельну рідину» і «модельну рідину». Для кожного базового

експерименту з субстратом зі своєю передісторією підібрана була своя «частково-модельна» і «модельна рідина». Вибір «частково-модельної рідини» дозволив врахувати поправку на напрям теплообміну $(Pr_p/Pr_{ct})^{0,25}$, «модельної рідини» – дозволив визначити поправки переходу із базового в шуканий режим.

Таблиця 2

Умови проведення базового експерименту при вимушеній конвекції, субстрат ВРХ вологістю 92 % (рис. 4)

№ точки (рис.4)	Передісторія субстрату	Умови проведення експерименту	
Експерименти над одним і тим же субстратом	1	Свіжий розведений гній. Однорідний, в'язкий. В гної наявні тверді волокнисті включення довжиною не більше 1,5...2 мм. В процесі експерименту проведено нагрівання субстрату.	Середня швидкість руху рідини 0,19 м/с. Середній температурний перепад між твердою стінкою і субстратом $\Delta t=6...19\text{ }^\circ\text{C}$.
	2	Витримка гною в анаеробних умовах протягом шести діб при температурі навколишнього середовища 23...26 $^\circ\text{C}$. В субстраті присутні бульбашки газу, незначний осад, відділився верхній шар, наявні флотаційні процеси твердих часток по об'єму. Перед дослідженням субстрат ретельно перемішано. В процесі експерименту проведено нагрівання субстрату до остаточної температури з подальшим охолодженням.	Середня швидкість руху рідини 0,19 м/с. $\Delta t=6...17\text{ }^\circ\text{C}$.
	3	Інтенсивне перемішування. Нагрівання охолодженого субстрату до проміжної температури.	Середня швидкість руху рідини 0,195 м/с. $\Delta t=12...19\text{ }^\circ\text{C}$.
	4	Інтенсивне перемішування. Нагрівання підігрітого субстрату до остаточної температури з подальшим охолодженням.	Середня швидкість руху рідини 0,135 м/с. $\Delta t=11...18\text{ }^\circ\text{C}$.
	5	Інтенсивне перемішування. Нагрівання охолодженого субстрату до проміжної температури.	Середня швидкість руху рідини 0,135 м/с. $\Delta t=8...13\text{ }^\circ\text{C}$.
	6	Інтенсивне перемішування. Нагрівання підігрітого субстрату.	Середня швидкість руху рідини 0,088 м/с. $\Delta t=19...23\text{ }^\circ\text{C}$.

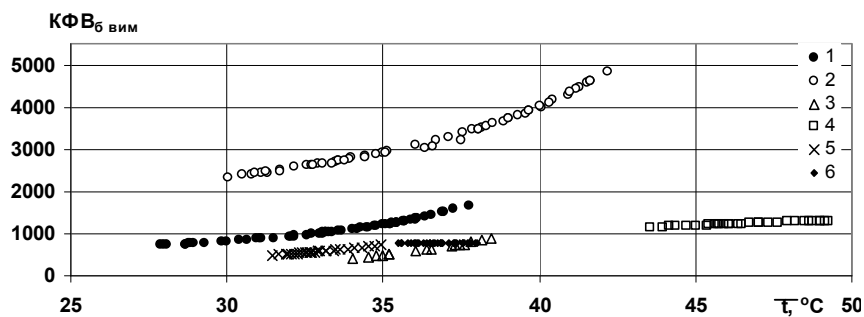


Рис. 4. Залежність базового комплексу фізичних властивостей при вимушеному русі $KFV_{б\text{ вим}}^{\text{експ}}$ від температури для субстрату ВРХ вологістю 92 % з різною передісторією (табл. 3): 1, 2, 3 – середня швидкість руху рідини $w=0,19...0,2$ м/с; 4, 5 – $w=0,13...0,15$ м/с; 6 – $w=0,08...0,1$ м/с.

Таким чином, нами запропоновано ЕРМ визначення інтенсивності теплообміну для реонестабільних сумішей, який оснований на методах застосування ТФВ «частково-модельної рідини» для врахування поправки на напрям теплообміну $(Pr_p/Pr_{ct})^{0,25}$, та використання ТФВ «модельної рідини» для визначення поправки переходу із базового режиму в шуканий режим $\Pi_{б-ш}$.

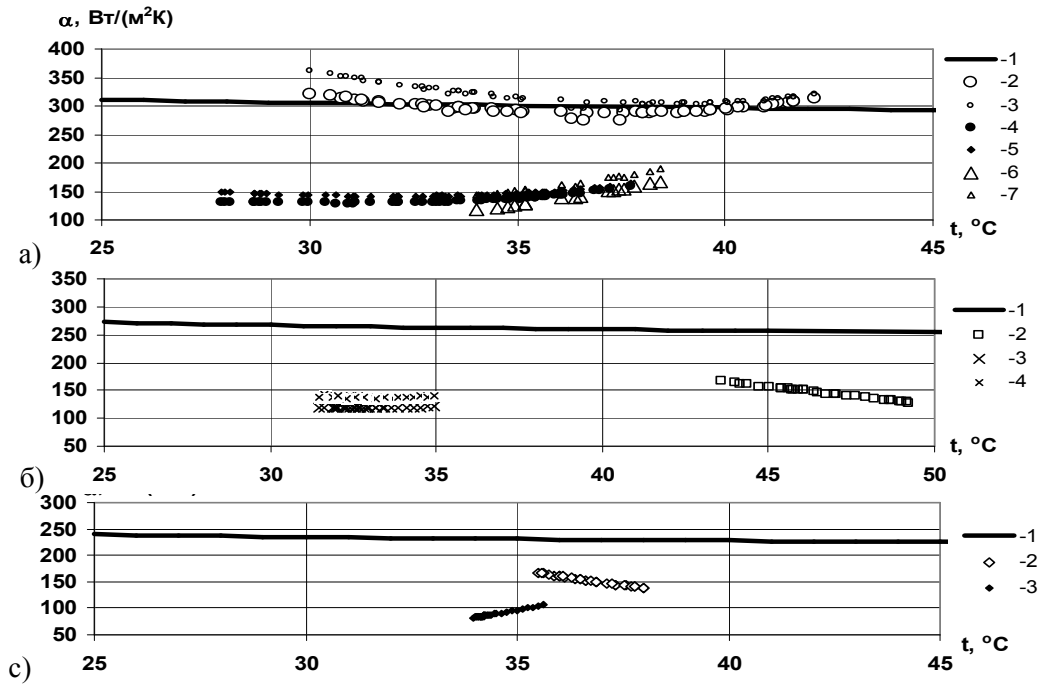


Рис. 5. Порівняння $\alpha_{ep}^{шук}$ для субстрату ВРХ вологістю 92 % з [9]:

а) $w=0,19...0,2$ м/с: 1 – розрахункова крива 0,2 м/с [9]; 2,3 – точка № 2 (див. табл. 3); 4, 5 – № 1; 6,7 – № 3; б) $w=0,13...0,15$ м/с: 1 – розрахункова крива 0,15 м/с [9]; 2 – точка № 4 (табл. 3); 3, 4 – № 5; с) $w=0,08...0,1$ м/с: 1 – розрахункова крива 0,1 м/с [9], 2 – точка № 6 (табл. 3); 3 – субстрат в стані бродіння після багатократного нагрівання та охолодження.

На рис. 5 розрахункові криві отримані за емпіричною залежністю на основі експериментальних досліджень конвективної тепловіддачі при вимушеному русі рідкого субстрату ВРХ в кожухотрубному теплообмінному апараті [6]. В [6] досліджено теплообмін рідкого збродженого субстрату ВРХ.

Із рис. 5 видно, що при багатократному нагріванні та охолодженні субстрату інтенсивність тепловіддачі зменшується на 40...50 %. Для субстрату ВРХ 92 %, витриманого в анаеробних умовах після однократного нагріву протягом шести діб, розбіжність визначених за ЕРМ $\alpha_{ep}^{шук}$ із [6] до 10 % (рис. 5, а). Таким чином, на запропонованій нами базовій установці в системі ЕРМ є більші можливості дослідження реонестабільних тиксотропних сумішей.

Висновки

- Запропоновано і обґрунтовано експериментально-розрахунковий метод визначення інтенсивності теплообміну в реонестабільних тиксотропних сумішах, який відрізняється тим, що базовий експеримент по дослідженню процесів теплообміну в таких сумішах проводиться не при вільній [7], а при вимушеній конвекції з різною реологічною та біохімічною передісторією суміші. Це дає можливість отримати характеристику $KФВ_{б\text{вим}}^{\text{експ}} = f(\bar{t})$, яка відображає теплофізичні властивості тиксотропної рідини при різних тепло- і гідродинамічних умовах і характеризує інтенсивність процесу теплообміну в певних умовах.
- Запропонований ЕРМ дозволяє оцінювати величину коефіцієнтів тепловіддачі до реонестабільних тиксотропних сумішей в різних їх станах, для режимів теплообміну, які мають місце в теплообмінному обладнанні різного призначення в системі БГУ.
- Проведено експериментальне дослідження процесу теплообміну в тиксотропних сумішах на базовому експериментальному стенді при вимушеній конвекції, з циліндричною теплообмінною поверхнею діаметром 0,097 м, висотою 0,108 м для свіжого рідкого гною і збродженого гною (субстрату) свиней, вологістю 94 %, та великої рогатої худоби, вологістю 92 %. Визначено тенденцію зміни коефіцієнта тепловіддачі до рідкого гною тваринного походження від передісторії – для рідкого збродженого гною коефіцієнти тепловіддачі в 1,5...2,8 раза вищі, ніж для свіжого.

- Показано, що коефіцієнти тепловіддачі, визначені за запропонованим експериментально-розрахунковим методом, з проведенням фізичних експериментів на нашому настільному стенді малих розмірів, мають розбіжність до 10 % з експериментальними результатами, одержаними на традиційному експериментальному стенді (кільцевий канал з еквівалентним діаметром $d_e = 0,05$ м), в якому лише довжина робочої експериментальної ділянки становить 12 м. Тобто, немає необхідності створення енергозатратних, матеріаломістких експериментальних установок, близьких за геометричними розмірами до натурних об'єктів, для моделювання реальних умов теплообміну, в реонестабільних рідинах.
- Експериментально підтверджено можливість застосування даного методу для дослідження інтенсивності теплообміну рідкого гною та субстратів великої рогатої худоби, свиней, які є характерними представниками тиксотропних реонестабільних рідин.

Використана література

1. Елюхина И. В. Об интерпретации реологических свойств водных растворов глицерина в экспериментах с капиллярным вискозиметром / В. И. Елюхина, В. М. Хисамов, В. П. Бескачко // Материалы V Всероссийской конференции молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям с участием иностранных ученых, 2004. – Режим доступа: <http://www.ict.nsc.ru/ws/YM2004/8609/yelyukhina2.html>
2. Тропин А. Н. Повышение эффективности работы самотечной системы удаления навоза путем оптимизации ее конструктивных и технологических параметров / А. Н. Тропин // Автореф. дис. на соиск уч. степ. канд. техн. наук. – Санкт-Петербург-Павловск: Издательство ГНУ СЗНИИМЭСХ Россельхозакадемии, 2011. – 24 с.
3. Кузин В. А. Выбор элементов поточной технологической линии удаления навоза для фермерских хозяйств / В. А. Кузин, А. Н. Ковальчук // Проблемы современной аграрной науки: материалы международной заочной научной конференции. Министерство сельского хозяйства Российской Федерации, Красноярский государственный аграрный университет. – 2011. – С. 116-120.
4. Васильев В. А. Справочник по органическим удобрениям / А. В. Васильев, Н. В. Филиппова. – М. : Росагропромиздат, 1988. – 255 с.
5. Богданов П. В. Система подогрева жидкого свиного навоза в технологиях анаэробного сбраживания / П. В. Богданов // автореф. дис. на соиск уч. степ. канд. техн. наук. – Москва, ВИЭСХ, 1990. – 18 с.
6. Бердыев О. Экспериментальное исследование теплообмена в установках по выработке биогаза / О. Бердыев // автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Ашхабад, НПО “Солнце”, 1989. – 24 с.
7. Ткаченко С. Й. Тепломасообмінні та гідродинамічні процеси в елементах систем біоконверсії / С. Й. Ткаченко, Н. В. Резидент // Монографія. – Вінниця: Універсум – Вінниця, 2011. – 132 с.
8. Ткаченко С. Й. Застосування поняття «модельна рідина» в експериментально-розрахунковому методі / С. Й. Ткаченко, Н. В. Пішеніна // Вісник ВПІ. – 2012. – № 3. – С. 41-46.
9. Уилкинсон У. Л. Неньютоновские жидкости. Гидромеханика, перемешивание и теплообмен / У. Л. Уилкинсон. Под ред. А. Л. Лыкова. Перевод с англ. З. П. Шульмана. – М.: Мир, 1964. – 216 с.
10. Овчинников П. Ф. Реология тиксотропных систем / П. Ф. Овчинников, Н. Н. Круглицкий, Н. В. Михайлов. – К.: Наукова думка. – 1972. – 120 с.
11. Бесподстилочный навоз и его использование для удобрения; [пер.с нем. П. Я. Семенова]. – М.: Колос. 1978. – 271 с.
12. Пішеніна Н. В. Теплообмін в складних сумішах в умовах природної конвекції / Н. В. Пішеніна // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. – 2011. – № 2. – С. 140-148.
13. Исаченко В. П. Теплопередача / В. П. Исаченко [и др.]. – [3-е изд. доп.]. – М. : Энергия, 1975. – 488 с.
14. Попов В. Д. Основы теории тепло- и массообмена при кристаллизации сахарозы / В. Д. Попов. – М. : Пищевая промышленность, 1973. – 320 с.

Ткаченко Станіслав Йосипович – д.т.н., професор, завідувач кафедри теплоенергетики Вінницького національного технічного університету.

Пішеніна Надія Володимирівна – асистент кафедри теплоенергетики Вінницького національного технічного університету.