

УДК 536.246

Г. С. Ратушняк, к. т. н., проф.; В. В. Джеджула, к. т. н., ст. викладач

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛООБМІНУ ПРИ ВІБРАЦІЙНОМУ ВПЛИВІ В БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ СУМІШАХ БІОРЕАКТОРІВ

*Розглянуто основні закономірності теплових та гідродинамічних процесів в багатокомпонентних органічних сумішах під час дії вібрації. Результати досліджень дозволяють визначати параметри теплообмінних апаратів в реакторах харчової, переробної, хімічної галузей та під час виробництва біогазу.*

**Ключові слова:** вібрація, інтенсифікація, реактор.

### Початкові передумови та постановка задачі дослідження

Моделювання процесів теплообміну і гідродинаміки при вібраційному впливі в багатокомпонентних органічних сумішах дозволить визначити оптимальні режими роботи промислових біогазових реакторів, розрахувати конструктивні розміри теплообмінних апаратів та прогнозувати збільшення продуктивності реакторів. Робота реакторів без віброактивації призводить до утворення застійних зон, температурних розшарувань, та зменшення продуктивності [1]. Омивання нагрівальних елементів реакторів вібраційними хвилями дозволить збільшити тепловіддачу, покращити перемішування та інтенсифікувати технологічний процес. Моделювання процесу теплообміну потребує проведення експериментальних досліджень для виявлення закономірностей зміни коефіцієнта тепловіддачі залежно від параметрів середовища, що омиває теплообмінник.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

У вітчизняній технічній літературі окремі питання інтенсифікації теплообміну в промислових реакторах уже висвітлені. Основна увага в останніх дослідженнях приділяється впливу властивостей субстрату, форм реактора, бульбашок біогазу, оребрення теплообмінника на протікання процесу тепловіддачі в багатокомпонентних сумішах [1-3].

### Невирішена раніше частина загальної проблеми

В науковій літературі фрагментарно розкрито вплив вібраційних процесів на теплообмін в рідинах і не досліджено процеси теплопередачі в багатокомпонентних органічних сумішах під час дії вібрації.

**Метою статті** є дослідження за результатами експериментів процесів теплообміну і гідродинаміки при вібраційному впливі в багатокомпонентних органічних сумішах та розроблення математичних моделей цих процесів.

### Результати дослідження

Експериментальні дослідження проводилися згідно розробленого плану на установці, що зображена на рис. 1. План проведення досліджень включає експерименти по вільноконвективному теплообміну у суспензіях, а також по теплообміну від нагрівального елемента до субстрату і води за умов віброуючого середовища. Межі варіювання початкових параметрів досліджень: теплого потоку ( $500 \dots 15000 \text{ Вт/м}^2$ ), температур ( $20 \dots 55 \text{ }^\circ\text{C}$ ), швидкостей руху субстрату ( $0 \dots 0,7 \text{ м/с}$ ), частота коливань ( $0 \dots 5 \text{ Гц}$ ), амплітуда коливань ( $0 \dots 0,1 \text{ м}$ ), концентрація сухої органічної речовини  $C = 8\%$  (хлібні крихти) – відповідають умовам роботи реактора біогазової установки з утилізації органічних відходів.

Установка повністю комп'ютеризована і вся інформація досліджень отримувалася і оброблялась автоматично відповідно до розробленої програми. Алгоритм програми

реалізований на мові програмування Object Pascal з використанням IDE Delphi 7.

В процесі досліджень вимірювалися такі величини:

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

За результатами дослідження розподілу температур біля теплообмінної поверхні на різній відстані від стінки у субстраті (рис. 2) обґрунтовано вибір визначальної температури рідини та температури стінки при різних способах організації конвекції.

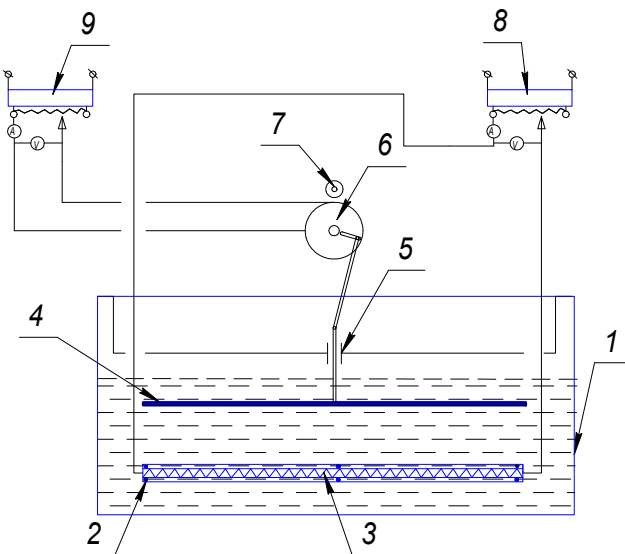


Рис. 1. Експериментальна установка для дослідження впливу вібрацій на інтенсивність тепловіддачі: 1 – прозора ємність; 2 – нагрівальний елемент з термодатчиками; 3 – електричний нагрівник; 4 – пластина-активатор; 5 – кривошипно-шатунний механізм; 6 – двигун-збурювач; 7 – індукційний тахометр; 8 – блок живлення нагрівального елемента; 9 – блок живлення двигуна-збурювача.

Експериментально встановлено, що за визначальну температуру для суспензії під час віброактивації можна приймати температуру на відстані 1,5...2,0 діаметра нагрівального елемента, а для суспензій під час вільної конвекції – 2,5...3,0 діаметра. Досліджено гідродинамічні та теплообмінні особливості у вібраційному нерівномірному в'язкому середовищі, що омиває теплообмінну поверхню.

Математична модель представлена критеріальними рівняннями, які характеризують залежність  $Nu = f(Re, Pr, Gr)$ . В основі розробленої та експериментально підтвердженої моделі (1, 2) лежать основні положення теорії тепломасообміну в багатоконпонентних сумішах [5, 6].

За результатами аналізу експериментальних даних розроблено критеріальні залежності для визначення інтенсивності тепловіддачі до субстрату за умов нерівномірного вібраційного омивання поверхні (1) та при вільній конвекції в субстратах (2).

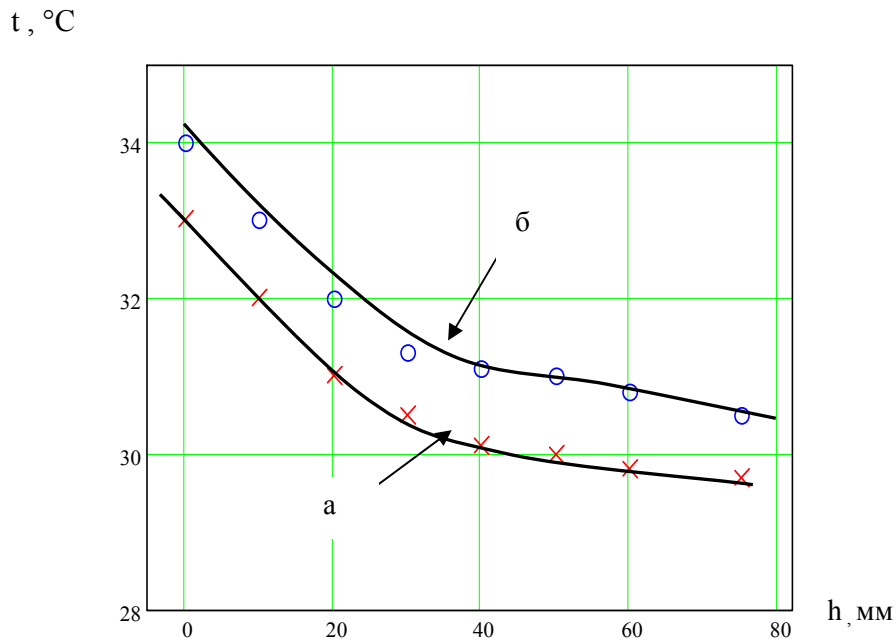


Рис 2. Розподіл температур біля теплообмінної поверхні на відстані  $h$  від стінки в субстраті при віброактивації: а) в горизонтальній площині; б) в вертикальній площині над нагрівальним елементом

Використовуючи пакет програм статистичної обробки даних Statistica 5.5, виконано регресійний аналіз експериментальних даних. За результатами аналізу, за допомогою методу Хука-Дживіса, максимальне значення коефіцієнту детермінації  $R = 0,78$  досягнуте для залежностей

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

$$Nu = 3,52 \cdot (Gr_p \cdot Pr_p)^{0,1} \cdot \left( \frac{Pr_p}{Pr_c} \right)^{0,66}, \tag{2}$$

де  $Nu$  – критерій Нусельта,  $Pr$  – критерій Прандтля,  $Gr_p$  – значення критерію Грасгофа при температурі рідини;  $Pr_p$  – значення критерію Прандтля при температурі рідини;  $Pr_c$  – значення критерію Прандтля при температурі стінки нагрівального елемента;  $Re_{\Delta u}$  – вібраційний критерій Рейнольдса, який визначається за формулою

$$Re_{\Delta u} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot d \cdot A / \nu, \tag{3}$$

де  $f$  – частота коливань, Гц;  $A$  – амплітуда коливань, м;  $d$  – діаметр нагрівального елемента, м;  $\nu$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості,  $m^2/s$ .

Рівняння (1,2) справедливі в діапазоні зміни параметрів:  $Re_{\Delta u}$ :  $0 \dots 4,08 \times 10^4$ ;  $Gr_p$ :  $2 \times 10^5 \dots 2 \times 10^6$ ;  $Pr_p$ :  $5,45 \dots 6,85$ ;  $Pr_p/Pr_c$ :  $1,04 \dots 1,15$ .

Активна вібрація дозволяє утворити середовище в біореакторі з мінімальним розшаруванням. Активному перемішуванню в більшій мірі піддаються легкі частки в верхній зоні і вода. Важкі частки нижньої зони виконують коливання в зоні, що не перевищує товщини свого шару намулювання. Таким чином спостерігається двофазне середовище: перша фаза – вода – легкі частки, друга – важкий намул в нижній частині реактора (рис. 3, 4). З часом легкі часточки розпадаються на більш мілкі і в середовищі утворюються інші фази: намул з мілких часток в нижній частині і водо-спиртова суміш у верхній частині.



Рис 3. Розширення середовища реактора без віброактивації



Рис 4. Вібраційна інтенсифікація теплообміну в реакторі

Відповідно до запропонованої математичної моделі експериментально виявлено, що вібрація середовища інтенсифікує у водному середовищі вільноконвективну тепловіддачу в 1,5...3,0 разів, в суспензії  $C = 8\%$  в 1,3...2,5 рази. Таким чином, використання віброактивації теплообміну у біореакторах дозволяє термостабілізувати та інтенсифікувати процес виробництва біогазу та економити матеріальні ресурси за рахунок зменшення площ теплообмінних пристроїв.

### Висновки

Моделювання процесів теплообміну в багатокомпонентних сумішах за допомогою розроблених емпіричних рівнянь дозволить спрогнозувати інтенсифікацію теплообміну між нагрівником і середовищем в біореакторі, визначити конструктивні розміри теплообмінних апаратів.

За результатами аналізу впливу вібрації рідини на інтенсивність тепловіддачі від нагрівальної стінки до води і субстрату обґрунтовано вибір визначальної температури рідини та температури стінки для різних способів організації конвекції. Прийнято і експериментально доведено, що за визначальну температуру для суспензії при віброактивації можна приймати температуру на відстані 1,5...2,0 діаметра нагрівального елемента, а для суспензій при вільній конвекції – 2,5...3,0 діаметра.

Досліджено теплообмінні процеси при вільній конвекції та віброактивації в багатокомпонентних органічних сумішах. За результатами моделювання та аналізу експериментальних даних отримано критеріальні рівняння тепловіддачі нагрівального елемента до середовища біореактора, що характеризуються залежністю критерію Нусельта від критеріїв Рейнольдса, Прандтля і Грасгофа.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ткаченко С.Й., Степанов Д.В., Джеджула В.В. Закономірності розподілу температурних напорів за умов локального газорідного омивання поверхні // Вісник ВПІ, 2003, № 4. - С. 42-45
2. Баадер Б., Доне Е., Брендерфер М. Биогаз: Теория и практика. -М. : Колос, 1982. –148 с.
3. Г.С. Ратушняк, В.В. Джеджула Підвищення продуктивності біогазового реактору управлінням параметрами вільноконвективних процесів теплообміну//Вісник Хмельницького національного університету - Хмельницький, 2006, №2 – с 29-31
4. Ратушняк Г.С., Джеджула В.В. Энергозбереження в системах виробництва біогазу // Сотрудничество для решения проблем отходов. Материалы IV Международной конференции. Х.: ЭкоИнформ. 2007.– С. 180 – 182.
5. Галицкий Б.М., Рыжов Ю.А., Якуш Е.В. Тепловые и гидродинамические процессы в колеблющихся потоках – М.: Машиностроение. 1977.– 256 с.

6. Lemlich R., Chung-Kong Hwu. The effect of acoustic vibration on forced convective heat transfer. // American institute of chemical engineering journal, USA – 1961 – vol. 7. – №1. – P. 102–106.

***Ратушняк Георгій Сергійович*** – завідувач кафедри теплогазопостачання;

***Джеджула В'ячеслав Васильович*** – старший викладач кафедри теплогазопостачання.  
Вінницький національний технічний університет