

УДК 536.246

Г. С. Ратушняк, к. т. н., проф.; В. В. Деджула, к. т. н., ст. преподаватель

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ВИБРАЦИОННОМ ВЛИЯНИИ В МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СМЕСЯХ БИОРЕАКТОРОВ

Рассмотрены основные закономерности тепловых и гидродинамических процессов в многокомпонентных органических смесях при действии вибрации. Результаты исследований разрешают определять параметры теплообменных аппаратов в реакторах пищевой, перерабатывающей, химической областей и при производстве биогаза.

Ключевые слова: вибрация, интенсификация, реактор.

Начальные предпосылки и постановка задачи исследования

Моделирование процессов теплообмена и гидродинамики при вибрационном влиянии в многокомпонентных органических смесях разрешит определить оптимальные режимы работы промышленных биогазовых реакторов, рассчитать конструктивные размеры теплообменных аппаратов и прогнозировать увеличение производительности реакторов. Работа реакторов без виброактивации приводит к образованию застойных зон, температурных расслоений, и уменьшение производительности [1]. Омывание нагревательных элементов реакторов вибрационными волнами разрешит увеличить теплоотдачу, улучшить перемешивание и интенсифицировать технологический процесс. Моделирование процесса теплообменную нуждается в проведении экспериментальных исследований для выявления закономерностей изменения коэффициента теплоотдачи в зависимости от параметров среды, которая омывает теплообменник.

Анализ последних исследований и публикаций

В отечественной технической литературе отдельные вопросы интенсификации теплообмена в промышленных реакторах уже освещены. Основное внимание в последних исследованиях отводится влиянию свойств субстрата, форм реактора, пузырьков биогаза, оребрение теплообменника на протекание процесса теплоотдачи в многокомпонентных смесях[1-3].

Нерешенная раньше часть общей проблемы

В научной литературе фрагментарно раскрыто влияние вибрационных процессов на теплообмен в жидкостях и не исследованы процессы теплопередачи в многокомпонентных органических смесях при действии вибрации.

Целью статьи являются исследования по результатам экспериментов процессов теплообмена и гидродинамики при вибрационном влиянии в многокомпонентных органических смесях и разработка математических моделей этих процессов.

Результаты исследования

Экспериментальные исследования проводились согласно разработанному плану на установке, которая изображена на рис. 1. План проведения исследований включает эксперименты по свободноконвективному теплообмену в суспензиях, а также по теплообмену от нагревательного элемента к субстрату и воде при условиях вибрирующей среды. Границы варьирования начальных параметров исследований: теплового потока

(500...15000 Вт/м²), температур (20...55 °С), скоростей движения субстрата (0...0,7 м/с), частоты колебаний (0...5 Гц), амплитуды колебаний (0...0,1 м), концентрация сухого органического вещества $C = 8\%$ (хлебные крошки) – отвечают условиям работы реактора биогазовой установки из утилизации органических отходов.

Установка полностью компьютеризирована и вся информация исследований получалась и обрабатывалась автоматически согласно разработанной программе. Алгоритм программы реализован на языке программирования Object Pascal с использованием IDE Delphi 7.

В процессе исследований измерялись следующие величины:

- температура жидкости с помощью трех термощупов на базе датчиков DS 1626S;
- напряжение и ток, который подается на нагреватель и рассчитывалась тепловая мощность;
- температура на каждом с термодатчиков, что заложены в стенку нагревательного элемента;
- время проведения эксперимента фиксировалось хронометром.

По результатам исследования распределения температур возле теплообменной поверхности на разном расстоянии от стенки в субстрате (рис. 2) обоснован выбор определяющей температуры жидкости и температуры стенки при разных способах организации конвекции.

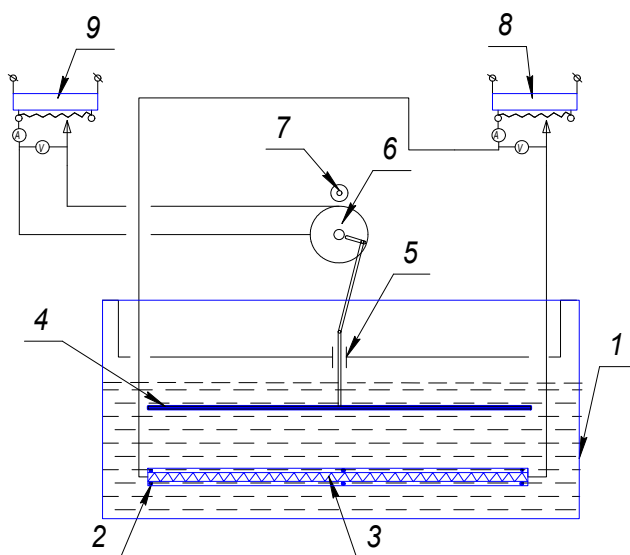


Рис. 1. Экспериментальная установка для исследования влияния вибраций на интенсивность теплоотдачи:

1 – прозрачная емкость; 2 – нагревательный элемент с термодатчиками; 3 – электрический нагреватель; 4 – пластина-активатор; 5 – кривошипно-шатунный механизм; 6 – двигатель; 7 – индукционный тахометр; 8 – блок питания нагревательного элемента; 9 – блок питания двигателя.

Принято, что за определяющую температуру для суспензии при виброактивации можно принимать температуру на расстоянии 1,5...2,0 диаметра нагревательного элемента, а для суспензий при свободной конвекции - 2,5...3,0 диаметра. Исследовано гидродинамические и теплообменные особенности в вибрационной неравномерной вязущей среде, которая омывает теплообменную поверхность.

Математическая модель представлена критериальными уравнениями, которые характеризуют зависимость $Nu = f(Re, Pr, Gr)$. В основе разработанной и экспериментально подтвержденной модели (1, 2) лежат основные положения теории тепломассообмена в многокомпонентных смесях [5, 6].

По результатам анализа экспериментальные данные разработаны критериальные зависимости для определения интенсивности теплоотдачи к субстрату при условиях неравномерного вибрационного омывания поверхности (1) и при свободной конвекции в субстратах (2).

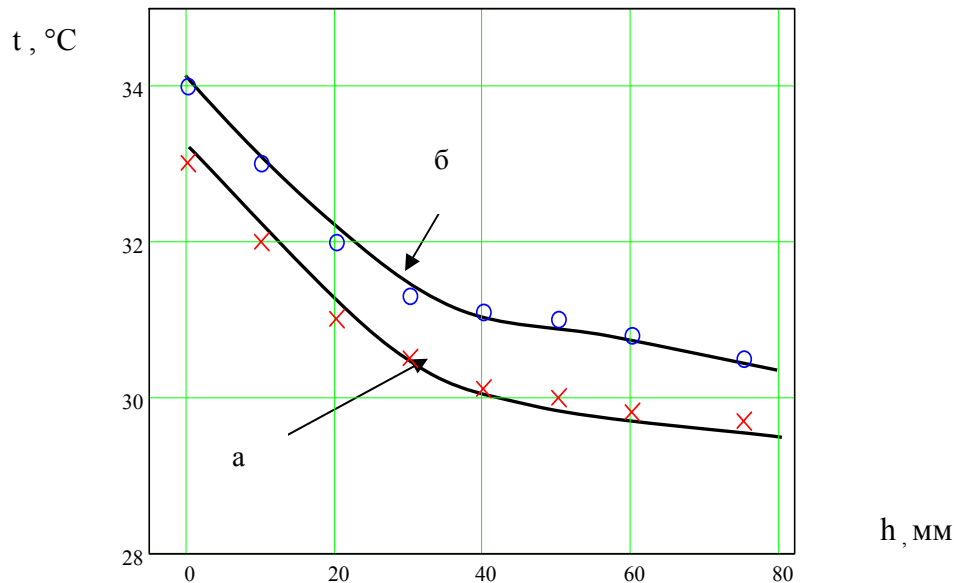


Рис 2. Распределение температур около теплообменной поверхности на расстоянии h от стенки в субстрате при виброактивации: а) в горизонтальной плоскости; б) в вертикальной плоскости над нагревательным элементом

Используя пакет программ статистической обработки данных Statistica 5.5, выполнен регрессионный анализ экспериментальных данных. По результатам анализа, с помощью метода Хука-Дживиса, максимальное значение коэффициента детерминации $R=0,78$ достигнутое для зависимостей

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

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

где Nu – критерий Нусельта, Pr – критерий Прандтля, Gr_p – значение критерия Грасгофа при температуре жидкости; Pr_p – значение критерия Прандтля при температуре жидкости; Pr_c – значение критерия Прандтля при температуре стенки нагревательного элемента; $Re_{\Delta u}$ – вибрационный критерий Рейнольдса, который определяется по формуле

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

где f – частота колебаний, Гц; A – амплитуда колебаний, м; d – диаметр нагревательного элемента, м; ν – коэффициент кинематической вязкости, m^2/s .

Уравнения (1, 2) справедливые в диапазоне изменения параметров: $Re_{\Delta u}$: $0 \dots 4,08 \times 10^4$; Gr_p : $2 \times 10^5 \dots 2 \times 10^6$; Pr_p : $5,45 \dots 6,85$; Pr_p/Pr_c : $1,04 \dots 1,15$.

Активная вибрация разрешает образовать среду в биореакторе с минимальным расслоением. Активному перемешиванию в большей мере подвергаются легкие частицы в верхней зоне и вода. Тяжелые частицы нижней зоны выполняют колебание в зоне, которая не превышает толщины своего пласта наслоения. Таким образом, наблюдается двухфазная среда: первая фаза – вода – легкие частицы, вторая – наслоение тяжелых частиц в нижней части реактора (рис 3, 4). Со временем легкие дольки распадаются на более мелкие и в среде образуются другие фазы: ил из мелких частиц в нижней части и водо-спиртовая смесь в верхней части.



Рис 3. Расслоение среды реактора без виброактивации



Рис 4. Вибрационная интенсификация теплообмена в реакторе

Согласно предложенной математической модели экспериментально выявлено, что вибрация среды интенсифицирует в водной среде свободноконвективную теплоотдачу в 1,5...3,0 раз, в суспензии $C = 8\%$ в 1,3...2,5 раза. Таким образом, использование виброактивации теплообмена в биореакторах позволяет термостабилизировать и интенсифицировать процесс производства биогаза и экономить материальные ресурсы за счет уменьшения площадей теплообменных устройств.

Выводы

Моделирование процессов теплообмена в многокомпонентных смесях с помощью разработанных эмпирических уравнений разрешит спрогнозировать интенсификацию теплообмена между нагревателем и средой в биореакторах, определить конструктивные размеры теплообменных аппаратов.

По результатам анализа влияния вибрации жидкости на интенсивность теплоотдачи от нагревательной стенки к воде и субстрат обоснован выбор определяющей температуры жидкости и температуры стенки при разных способах организации конвекции. Принято и экспериментально доказано, что за определяющую температуру для суспензии при виброактивации можно принимать температуру на расстоянии 1,5...2,0 диаметра нагревательного элемента, а для суспензий при свободной конвекции – 2,5...3,0 диаметра.

Исследованы теплообменные процессы при свободной конвекции и виброактивации в многокомпонентных органических смесях. По результатам моделирования и анализа экспериментальных данных получены критериальные уравнения теплоотдачи нагревательного элемента к среде биореактора, которые характеризуются зависимостью критерия Нуссельта от критериев Рейнольдса, Прандтля и Грасгофа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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 управління параметрами вільноконвективних процесів теплообміну // Вісник Хмельницького національного університету - Хмельницький, 2006, №2 – с 29-31
4. Ратушняк Г.С., Джеджула В.В. Енергозбереження в системах виробництва біогазу // Сотрудничество для решения проблем отходов. Материалы IV Международной конференции. Х.: ЭкоИнформ. 2007.– С. 180 – 182.
5. Галицейский Б.М., Рыжов Ю.А., Якуш Е.В. Тепловые и гидродинамические процессы в колеблющихся // Наукові праці ВНТУ, 2008, № 1

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 Георгий Сергеевич – заведующий кафедрой теплогазоснабжения;

Джеджула Вячеслав Васильевич – старший преподаватель кафедры теплогазоснабжения.
Винницкий национальный технический университет