

Отзыв

официального оппонента Васильева Николая Викторовича на диссертационную работу Евдокименко Ильи Анатольевича на тему «Экспериментальное исследование гидродинамических характеристик и тепломассообмена отрывных пузырьковых потоков», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности – 1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Актуальность темы исследования

Актуальность темы диссертации Евдокименко И.А. обусловлена широким применением двухфазных пузырьковых потоков в различных отраслях промышленности вследствие высокой эффективности процессов тепло- и массообмена в них. Такие системы характерны, в частности, в биотехнологиях (одном из приоритетных научно-технических направлений страны) для выращивания микроводорослей в биореакторах барботажного типа. Надежное управление интенсивностью процессов переноса тепла и массы является важной задачей для оптимизации производственных и энергетических процессов. Интенсивность этих процессов напрямую связана с гидродинамической структурой течения.

Реальные двухфазные потоки зачастую являются турбулентными со сложным межфазным взаимодействием между несущей жидкой фазой и пузырьками. Для таких систем характерны коалесценция пузырей, полидисперсность газовой фазы, взаимодействие пузырьков с турбулентными структурами и т.д., что оказывает влияние на тепло- и массообмен и требует дополнительных экспериментальных данных, количество которых в настоящее время ограничено.

Возможность контролируемого изменения гидродинамической структуры двухфазных пузырьковых течений с помощью различных пассивных завихрителей (что не требует подвода энергии извне) в целях интенсификации тепломассообменных характеристик сопровождается отрывом потока, значительно усложняющим течение. Для более глубокого понимания таких систем, а также верификации современных вычислительных методов (LES, DNS), необходимо наличие широкой экспериментальной базы по локальной и интегральной структуре отрывных пузырьковых потоков даже для сравнительно самых простых конфигураций преград-интенсификаторов.

Ввиду вышесказанного, диссертационная работа Евдокименко И.А., посвященная экспериментальному исследованию гидродинамических характеристик и тепломассообмена отрывных пузырьковых потоков, обладает несомненной актуальностью.

Цель и основные задачи исследований

Целью работы является оптимизация методов управления процессами тепло- и массообмена в пузырьковых реакторах с помощью легко обслуживаемых интенсификаторов без механических элементов и внешнего подвода энергии.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Определение особенностей влияния формы и расположения преград-интенсификаторов на интегральные гидродинамические параметры в барботажном реакторе.

2. Проведение экспериментальных исследований для определения способов интенсификации объемного коэффициента массообмена «газ-жидкость» в барботажном реакторе с варьированием расположения преград-интенсификаторов.

3. Проведение экспериментального исследования локальной гидродинамической структуры и теплообмена восходящего двухфазного потока в вертикальном канале с различными способами организации отрывных течений.

4. Выявление закономерностей влияния конструкции рабочего участка с точки зрения интенсификации теплоотдачи от нагреваемой стенки к восходящему двухфазному потоку с учетом локальных и интегральных параметров течения при разных соотношениях расходов жидкой и газовой фаз.

Структура и содержание диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы (164 наименования). Объем диссертации составляет 110 страниц, она содержит 54 рисунка, 3 таблицы и одно приложение.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи работы, научная новизна, а также теоретическая и практическая значимость результатов. Представлены основные положения, выносимые на защиту, обоснована достоверность полученных результатов и описан личный вклад автора работы.

Первая глава представляет собой обстоятельный обзор литературы, посвященной теме диссертации. В разделе 1.1 рассмотрены режимы течения двухфазных потоков. Раздел 1.2 посвящен обзору работ в области гидродинамики и массообмена в барботажных реакторах. Описаны режимы течений в пузырьковых колоннах: монодисперсный, переходный и полидисперсный. А также их характеристики и критерии перехода от одного к другому, связанные с истинным газосодержанием (ϕ) и приведенной скоростью газа (U_G). В разделе 1.2.2 приведены эмпирические корреляции для расчета

газосодержания в пузырьковых колоннах. Раздел 1.2.3 посвящен массообмену в барботажных колоннах, в качестве основного критерия выделен объемный коэффициент массопереноса (k_{La}), приведены эмпирические корреляции для его расчета в зависимости от U_G . В разделе 1.3 рассмотрены теплообмен, гидродинамика и структура течений за/перед преградами в отрывных вертикальных одно- и двухфазных потоках. В конце раздела сделаны краткие выводы и выделены нерешенные проблемы, в частности, крайне ограниченное количество работ по совместному влиянию пузырей и преград-интенсификаторов на локальные характеристики потока и теплообмен. Обоснована цель работы.

Во второй главе представлено подробное описание применяемых в работе экспериментальных методик и измерительных средств. Подробно изложены методы измерения истинного и локального газосодержания, определения режимов течения, времени перемешивания (кондуктометрический и визуальный с использованием pH-чувствительного индикатора), объемного коэффициента массообмена (метод абсорбции-десорбции кислорода). Особое внимание уделено современным оптическим методам (PIV/PLIF) для измерения полей скорости потока и теневой съемке для определения размеров и скорости пузырьков, включая описание обработки данных и оценки неопределенностей. Отдельно следует отметить разработанный в работе алгоритм определения скорости подъема пузырька на основе 10-ти последовательных кадров теневой съемки, принцип действия которого был запатентован (Приложение А к диссертации). Описаны рабочий участок и методика измерения теплообмена на стенке с использованием нагреваемой электрическим способом фольги из нержавеющей стали и тепловизионных измерений температуры.

Третья глава содержит результаты исследования гидродинамики и массообмена в барботажной колонне с преградами. В разделе 3.1 подробно описан экспериментальный стенд. Представлено описание систематических исследований влияния формы преград (прямоугольная, трапециевидная), их количества, взаимного расположения (парные, непарные), расстояния между ними и способа ввода газа (при 12-ти, 18-ти и 36-ти отверстиях-капиллярах) на истинное газосодержание и режимы течения (раздел 3.2), время перемешивания (раздел 3.3) и объемный коэффициент массообмена (раздел 3.4). Показано, что вне зависимости от формы преграды, сразу за ней наблюдается зона свободной от пузырьков жидкости. Одиночные преграды не оказывали значительного влияния на смену режимов по сравнению с реактором без преград-интенсификаторов. Использование парных преград способствует коалесценции пузырьков, что приводит к более раннему переходу между монодисперсным и переходным режимами, который

наступает при $U_G = 0,028$ м/с (без преград при $U_G = 0,051$ м/с). Особое влияние на режимные переходы оказывает выбор расстояния между парой преград. В работе рассматривались два расстояния между парами преград – 120 мм и 240 мм. Было выяснено, что близкое расположение преград способствует возникновению камер коалесценции пузырьков. При расстоянии 240 мм «камера» не образуется, а структура течения близка к классическому барботажному реактору. Такие явления характерны для обеих форм преград. Введение преград увеличивает время перемешивания при скорости $U_G = 0,004$ м/с до двух раз по сравнению с реактором без преград. При увеличении приведенной скорости газа эффект влияния преград на время перемешивания снижается. Показано, что введение преград в поток приводит к увеличению k_{La} на величину до 60% по сравнению с классической пузырьковой колонной. Причиной увеличения массообмена является рост межфазной поверхности. При этом k_{La} снижается при уменьшении количества капилляров, что объясняется генерацией меньшего количества пузырей большего размера, что уменьшает площадь межфазной поверхности.

В четвертой главе представлены результаты экспериментального исследования влияния локальной гидродинамической структуры восходящего пузырькового потока за одиночной преградой и за обратным уступом с помощью метода PIV. В разделе 4.1 подробно описана экспериментальная установка. Впервые для таких конфигураций получены количественные данные о профилях скорости жидкости в двухфазном потоке. Установлено, что введение пузырей приводит к сокращению длины зоны рециркуляции и более быстрому выравниванию профиля скорости по сравнению с однофазным потоком. Выявлено наличие свободного от пузырей слоя жидкости непосредственно за преградой, что важно для понимания механизмов теплообмена.

В пятой главе представлены результаты исследования теплообмена в восходящих отрывных пузырьковых потоках. Приведена схема измерения поля температур внешней стенки теплообменного участка. Показано, что распределение коэффициента теплоотдачи за преградой/уступом имеет характерный вид с минимумом в зоне рециркуляции и максимумом в области присоединения потока. Установлено, что одновременное введение пузырей и преграды позволяет интенсифицировать теплообмен в зоне релаксации до 2–2,8 раз по сравнению с однофазным течением в прямоугольном канале постоянного сечения. Показано, что форма задней кромки преграды оказывает большее влияние на теплообмен, чем форма передней, а угол наклона уступа (в диапазоне 60–90°) существенно не влияет на максимальную теплоотдачу в двухфазном потоке.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе.

Научная новизна

Из полученных в диссертационной работе результатов необходимо отметить, как основные, обладающие научной новизной, следующие:

- Впервые получены данные по управлению интегральными параметрами барботажных реакторов с помощью преград-интенсификаторов при сужении поперечного сечения канала до 60%. Установлены закономерности влияния расположения преград и их формы на интенсификацию тепломасоообменных процессов и изменение режимов двухфазного течения в реакторе при различных значениях начальной дисперсности газа.

- Получены объемные коэффициенты массообмена для барботажного реактора с преградами-интенсификаторами. Установка преград-интенсификаторов приводит к увеличению коэффициента массообмена до 60% по сравнению с классической пузырьковой колонной за счет изменения площади межфазного взаимодействия.

- Установлено, что комбинированный эффект от наличия дисперсной газовой фазы и создания отрыва двухфазного течения за преградами-интенсификаторами увеличивает интенсивность теплообмена в прямоугольном канале более чем в 2 раза по сравнению с однофазным потоком;

- На основе оригинальных экспериментальных данных показано, что двухфазные отрывные течения за преградой и за уступом в прямоугольном канале имеют качественно подобную между собой структуру, а введение пузырей сокращает их зону рециркуляции по сравнению с однофазным потоком.

Достоверность и обоснованность результатов и выводов, сформулированных в диссертации, обеспечивается использованием сертифицированного и откалиброванного измерительного оборудования, современных отработанных методик исследований, оценкой величин неопределенностей измерений, воспроизводимостью и согласованием полученных результатов с надежными данными других исследователей, проведением тестирования используемых методов на однофазных потоках, результаты которого сравнивались с известными корреляциями.

Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая значимость работы заключается в получении новых фундаментальных знаний о структуре отрывных двухфазных течений и механизмах переноса теплоты и массообмена в них, что может служить основой для верификации и совершенствования математических моделей газожидкостных течений.

Практическая значимость работы состоит в том, что полученные данные и выявленные закономерности могут быть непосредственно использованы при проектировании и оптимизации высокоэффективных биореакторов для культивирования микроводорослей, а также элементов энергетического и химического оборудования, в которых требуется интенсификация тепломассообмена с помощью пассивных методов. Рекомендации по выбору формы и взаимного расположения преград представляют собой практически готовый инженерный инструмент.

Апробация работы

По теме диссертации имеется достаточное количество публикаций. В том числе 1 патент на изобретение и 4 статьи в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, входящих в перечень, рекомендованных ВАК РФ, 8 статей из баз данных Scopus и Web of Science, в том числе, включая Q1. Результаты исследований, изложенных в диссертации, были представлены на 13-ти международных и всероссийских конференциях.

Соответствие диссертации паспорту специальности 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника (отрасль науки – технические): содержание работы соответствует паспорту специальности по п. 6. «экспериментальные исследования, физическое и численное моделирование процессов переноса массы, импульса и энергии в многофазных системах и при фазовых превращениях» и п. 9. «разработка научных основ и создание методов интенсификации процессов тепло- и массообмена и тепловой защиты».

Считаю, что цель и все поставленные в работе задачи решены в полном объеме и на высоком научном уровне. Работа широко апробирована. Но к работе имеется ряд замечаний.

Основные замечания по работе

1. В главе 1 приведен достаточно емкий обзор литературы по теме диссертации. Однако в ее конце не представлены выводы и заключения по результатам проведенного обзора, обычно выносимые в отдельный подраздел, из которых вытекает постановка цели и задач исследования.

2. В тексте диссертации в главе 2 приведены неопределенности прямых измерений: датчиком перепада давления, кондуктометром, кислородным датчиком, тепловизором и др. Однако не приведены данные о неопределенностях измерения основных определяемых параметров: истинного газосодержания, скоростей жидкости и газа,

объемного коэффициента массообмена, чисел Нуссельта. В то же время в автореферате такие данные присутствуют, но без какого-либо описания способа их расчета.

3. В главе 3 диссертации указано, что $κ_{га}$ для трапециевидных преград выше, чем для прямоугольных ступеней, а интенсификация достигает 50% по сравнению с классической колонной”. Этот результат связывается с двумя факторами – отсутствием коалесценции пузырей в случае трапециевидных преград, вследствие чего увеличивается площадь межфазного взаимодействия по сравнению с установкой прямоугольных ступеней, и увеличением времени пребывания пузырей в колонне. Однако не приведены количественные данные о времени пребывания пузырей в колонне и удельной межфазной поверхности, оценки величин которых усилили бы приведенную аргументацию.

4. В главе 5 полученные значения чисел Nu для пузырьковых потоков с преградами сравниваются с величинами Nu_0 , рассчитанными по корреляции Диттуса-Больтера для однофазного потока в прямоугольном канале без расширения. Следует дать пояснения о конкретном виде формулы, по которой производился расчет Nu_0 . А также об адекватности применения такого рода сравнения, например, для рассмотренных в работе величин $Re_H = 5000$ и 7500 , в связи с тем, что корреляция Диттуса-Больтера применяется при значениях чисел Рейнольдса больше 10000 .

5. В работе исследуются колонны и каналы фиксированных геометрических размеров. Отмечена зависимость газосодержания от толщины колонны в тонких зазорах, однако не обсуждается, насколько полученные закономерности по интенсификации тепло- и массообмена с помощью преград могут быть масштабированы на реальные промышленные аппараты. На рисунке 18 сделана попытка сравнения полученной зависимости $φ(U_G)$ с результатами других авторов для различного количества капилляров в прямоугольных и круглых пузырьковых колоннах. Однако не приведен анализ и выводы из данного сравнения.

6. Работа имеет ряд текстовых недоработок и ошибок. Например, на рисунках 4 и 8 очень мелким (практически неразличимым) шрифтом приведены обозначения на шкалах графиков и дополнительные надписи. В качестве десятичного разделителя в работе используются и точка, и запятая (например, оба указанных варианта применяются на страницах 27 и 42 диссертации).

Общее заключение о работе

Сделанные замечания не снижают общую положительную оценку работы. Содержание автореферата и сформулированные в нем выводы полностью соответствуют представленным в диссертации результатам исследований. Автореферат и текст

диссертации хорошо структурированы, логично изложены и обладают внутренним единством. Считаю, что диссертация Евдокименко Ильи Анатольевича представляет собой законченную научно-квалификационную работу на актуальную тему, обладает научной новизной, теоретической и практической значимостью, соответствует требованиям пунктов 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 (в действующей редакции), а ее автор Евдокименко Илья Анатольевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника.

Я, Васильев Николай Викторович, даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Евдокименко Ильи Анатольевича «Экспериментальное исследование гидродинамических характеристик и тепломассообмена отрывных пузырьковых потоков», и их дальнейшую обработку.

Васильев Николай Викторович
кандидат технических наук по специальности – 1.3.14
Теплофизика и теоретическая теплотехника, доцент,
заведующий лабораторией теплообмена в
энергетических установках
ФГБУН «Объединенный институт высоких температур
Российской академии наук» (ОИВТ РАН),
125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр. 2.
E-mail: nikvikvas@mail.ru,
тел.: +7(495)4850421.

15.04.2026 г.

Подпись Васильева Николая Викторовича заверяю
Ученый секретарь ОИВТ РАН, д.ф.-м.н.



Киверин Алексей Дмитриевич