

ОТЗЫВ

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

Диссертация Евдокименко Ильи Анатольевича посвящена экспериментальному изучению отрывных двухфазных газожидкостных течений в барботажных реакторах и вертикальных каналов с преградами-интенсификаторами и направлена на получение новых данных о совместном влиянии отрыва потока и газовых пузырей на гидродинамическую структуру и тепломассообмен.

Двухфазные газожидкостные течения играют важную роль в различных технологических процессах и системах, в частности, в энергетических установках, связанных с интенсивной передачей тепла. Процессы формирования, роста и отрыва газовых пузырей сопровождаются сложной нестационарной динамикой, оказывают значительное влияние на структуру потока, и как следствие, определяют характер переноса тепла и массы. Дополнительный интерес представляет управление структурой потока за счет искусственного создания отрыва с использованием завихрителей, позволяющих интенсифицировать перемешивание и увеличить площадь межфазного взаимодействия, но значительно усложняющих структуру течения. Ограниченность экспериментальных данных для каналов с завихрителями, наблюдаемая даже для однофазных отрывных течений и особенно выраженная для двухфазных потоков, определяет **актуальность и практическую значимость** выполненного исследования.

Научная новизна работы заключается в получении экспериментальных данных о влиянии преград-интенсификаторов на структуру двухфазного течения и процессы тепло- и массообмена в барботажных реакторах, включая закономерности воздействия их формы и расположения на коалесценцию пузырей и межфазную поверхность. Установлено, что применение преград приводит к увеличению объемных коэффициентов массообмена и интенсификации теплообмена за счёт комбинированного эффекта газовой фазы и отрывных зон течения. Показано также, что двухфазные отрывные течения имеют сходную структуру для различных типов геометрических неоднородностей, при этом наличие пузырей существенно изменяет характеристики рециркуляционных областей.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Полный объём диссертации составляет 110 страниц с 54 рисунками, 3 таблицами и 1 приложением. Список литературы содержит 164 наименования.

Во **введении** обоснована актуальность темы, определены цель и задачи исследования, а также изложены научная новизна, практическая значимость и основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** представлен анализ современного уровня исследований двухфазных пузырьковых течений. Приведена общая классификация газожидкостных течений. Особое внимание уделено особенностям гидродинамики и процессов массообмена в барботажных колоннах-реакторах, а также влияния различных завихрителей на эти параметры. Автором отмечены, как и достижения, так и существующие недостатки известных подходов к исследованию двухфазных течений. Представлена систематизация известной информации по отрыву газожидкостного потока в вертикальных каналах при наличии преград или уступов, что позволяет обосновать необходимость проведения экспериментальных исследований гидродинамической структуры и характеристик тепломассообмена.

Во **второй главе** подробно изложены применённые в работе экспериментальные методы и подходы к исследованию гидродинамики и процессов переноса в двухфазных системах. В частности, для исследования гидродинамических характеристик использовались, такие методы как, определение истинного газосодержания на основе измерения перепада давления, кондуктометрический метод для оценки времени перемешивания, также применялись оптические методы (тенева съёмка и цифровая трассерная визуализация). Процессы переноса изучались при помощи метода абсорбции–десорбции растворённого кислорода для определения объемного коэффициента массообмена и скоростной термографии для исследования температурных полей. Совокупность данных методик обеспечивает комплексное изучение как гидродинамических характеристик, так и параметров тепломассообмена в исследуемых системах.

Третья глава посвящена исследованию влияния преград-интенсификаторов на интегральные гидродинамические параметры и массообмен в барботажном реакторе. Показано, что в классической пузырьковой колонне переход между режимами замедляется из-за равномерного распределения большого числа инжекторов, ограничивающих взаимодействие пузырьков. Установлено, что введение преград существенно влияет на гидродинамику: парные преграды усиливают коалесценцию и ускоряют смену режимов, тогда как их разнесение или непарное расположение изменяет характер всплытия пузырьков и перемешивания. При этом применение преград позволяет увеличить коэффициент массообмена за счёт роста межфазной поверхности, тогда как уменьшение числа инжекторов приводит к обратному эффекту.

В четвертой главе внимание уделяется исследованию локальной гидродинамической структуры восходящего отрывного пузырькового течения в вертикальном канале с преградами различных форм. Автором диссертации установлено, что за одиночной преградой независимо от её формы формируется зона возвратного течения, сопровождающаяся асимметрией профилей скорости и образованием области, свободной от пузырей. Показано, что введение газовой фазы сокращает длину рециркуляционной зоны и смещает точку присоединения потока ближе к преграде, а также влияет на динамику движения пузырей, вызывая их локальное замедление с последующим ускорением. Аналогичные закономерности наблюдаются в каналах со ступенчатым расширением, где присутствие пузырей также способствует сокращению зоны рециркуляции и ускоренному восстановлению потока.

Пятая глава посвящена исследованию теплообмена на стенке в вертикальном канале с различной организацией отрыва (одиночная преграда/уступ). Проведен анализ структуры теплоотдачи на стенке. Показана однотипность структуры для одно- и двухфазных течений. Установлено, что введение газовой фазы приводит к значительной интенсификации теплообмена и увеличению его эффективности с ростом газосодержания. Выявлено влияние геометрии канала на структуру потока: введение преграды увеличивают теплоотдачи по всей длине участка, в то время как установка уступа интенсифицирует теплообмен лишь в зоне релаксации. Уделяется внимание влиянию формы преград и уступов на теплоотдачу. Выяснено, что особенности отрыва потока перед преградой также оказывают влияние на теплообмен, тогда как изменение угла уступа практически не влияет на распределение числа Нуссельта.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

Достоверность полученных результатов обеспечивается применением современных экспериментальных методов, выполнением калибровочных процедур и высокой воспроизводимостью измерений. Используемые подходы предварительно проверялись на однофазных потоках с последующим сопоставлением результатов с известными корреляциями.

Личный вклад автора заключается в самостоятельном выполнении исследований. Автор принимал участие в разработке и создании экспериментальных установок и стендов, проведении и подготовке всех экспериментов, представленных в работе, а также в разработке и верификации методов обработки данных. Кроме того, автор осуществлял анализ и интерпретацию полученных результатов, участвовал в подготовке публикаций в рецензируемых журналах и представлении докладов на научных конференциях.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 9 работ, включая регистрацию 1 патента и 8 статей в печатных изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых журналов и изданий, рекомендованных ВАК.

Соответствие автореферата диссертации

Основные разделы работы, результаты и выводы представлены в автореферате. Автореферат соответствует содержанию диссертации и удовлетворяет требованиям ВАК.

Замечания по диссертационной работе:

1. В выносимых на защиту положениях на стр. 8 указано условие «малого газосодержания». При этом в выводах к Главе 3 на стр. 68 уже говорится «в области средних газосодержаний». Необходимо уточнить диапазон объемных долей газа φ , на котором были проведены исследования, и соотнести его с определениями «малого» и «среднего» газосодержания.

2. При обсуждении достоверности полученных результатов утверждается, что «результаты сравнивались с известными корреляциями». В тексте диссертации данные сравнения не приведены. Здесь же важно отметить, что «публикация результатов исследований в жестко рецензируемых научных журналах» не является критерием достоверности полученных данных и образцом научного стиля изложения.

3. При описании результатов на рис. 17 (стр. 48) сказано: «Уменьшение количества капилляров приводит к переходу от «тонкой» к «грубой» инъекции». Для корректного восприятия необходимо пояснить, что стоит за этими терминами.

4. В выводе 4 к главе 3 (стр. 68) сказано, что «...приводит к увеличению объемного коэффициента массообмена на величину **60%** по сравнению с классической пузырьковой колонной». Однако на стр. 66 встречаются тезисы «интенсификация достигает **50%** по сравнению с классической колонной» (в начале страницы) и «интенсивность может достигать величины на **70%** большей, чем для классической пузырьковой колонны» (в конце страницы). Требуется объяснить отличие этих утверждений от формулировки соответствующего им вывода, либо привести их к соответствию.

5. Вывод 1 по всей диссертации на стр. 90 носит информативный характер о проделанной работе и вряд ли претендует на новое научное достижение. Основные результаты по работе указаны в последующих четырех выводах.

6. Стоит отметить большое количество орфографических ошибок, которые затрудняют понимание текста диссертации, а также неудачное расположение описаний результатов относительно рисунков.

Приведенные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы и не снижают значимость полученных в ней результатов.

Заключение

Диссертационное исследование Евдокименко Ильи Анатольевича «Экспериментальное исследование гидродинамических характеристик и теплообмена отрывных пузырьковых потоков» полностью соответствует требованиям п.9-11, 13, 14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 №842 (в действующей редакции), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.14. – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук (специальность 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы), директор Института механики им. Р.Р. Мавлютова – обособленного структурного подразделения Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук, 450054, г. Уфа, Пр. Октября, д. 71, +7 (347) 2-355-255, e-mail: monk@anrb.ru

17.09.202



Галимзянов Марат Назипович

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова – обособленного структурного подразделения Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук, 450054, г. Уфа, Пр. Октября, д. 71, +7 (347) 2-355-255, e-mail: monk@anrb.ru

Подпись М.Н. Галимзянова заверяю.

И.О. начальника ОК УФИЦ РАН



Г.Ф. Зайнуллина

Я, Галимзянов Марат Назипович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Евдокименко Ильи Анатольевича, и их дальнейшую обработку.