



УТВЕРЖДАЮ

Директор ИТ СО РАН
академик РАН Маркович Д. М.

14 марта

2023 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института теплофизики им. С. С. Кутателадзе
Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН)

Диссертация «Влияние дисперсной фазы на локальную структуру и теплообмен пузырьковых течений в области малых газосодержаний» на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН).

В 2015 году Воробьев Максим Александрович окончил магистратуру в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет» по направлению «Физика».

В 2019 году Воробьев Максим Александрович окончил очную аспирантуру в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН по направлению подготовки 03.06.01 Физика и астрономия. Кандидатские экзамены сданы во время обучения в аспирантуре.

В настоящее время Воробьев М.А. работает младшим научным сотрудником в ИТ СО РАН в лаборатории основ безопасности и эффективного использования реакторных установок (6.4).

Научный руководитель — Кашинский Олег Николаевич, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории физической

гидродинамики (6.2) Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Актуальность работы

Изучение пузырьковых течений играет важную роль для современной промышленности. Постоянное улучшение методик расчета двухфазных потоков необходимо для проектирования и безопасной эксплуатации технических устройств. Из-за разнообразия, как геометрических характеристик технических установок, так и режимных параметров потока, в настоящее время не представляется возможным обобщенное описание двухфазных газожидкостных течений. Для существующих методик расчета требуется значительное количество эмпирической информации о локальной структуре потока, полученной на основе эксперимента. Пузырьковые течения изучаются уже многие годы, в литературе показано, что локальная структура потока существенно зависит от размера газовых включений, относительного направления движения фаз, и геометрических особенностей канала.

В литературе показано, что пузыри различного размера могут приводить как к росту, так и к снижению гидравлического сопротивления или турбулентных пульсаций в потоке. Формирование газовых пузырьков на капиллярах, погруженных в поток жидкости — один из способов создания пузырькового течения с контролируемым размером газовых включений. Большая часть работ посвященных исследованию этой темы сконцентрирована на изучении формирования дисперсной фазы на отверстиях в стенке канала в восходящем потоке. Особенности генерации пузырьков в опускных течениях, а также влияние положения капилляра в потоке на отрыв пузырька, в настоящее время слабо изучены.

В литературе наблюдается недостаток исследований о локальной структуре спутных опускных пузырьковых течениях при малых расходах фаз. Практически отсутствуют прямые экспериментальные исследования структуры опускного пузырькового течения при докритических числах Рейнольдса, а так же вблизи режима зависания газовой фазы.

В мире активно исследуются газожидкостные течения в моделях вертикальных сборок стержней. Но используемые в работах экспериментальные методики не позволяют измерять локальные характеристики двухфазных течений в пристенной зоне стержней. Так же плохо изучено влияние дистанцирующих элементов сборки на характеристики двухфазного потока.

Таким образом, необходимо экспериментальное исследование пузырьковых течений при малых расходах газовой фазы для получения надежных данных об их локальных характеристиках. Полученная в работе информация может послужить базой для разработки современных методов расчета двухфазных потоков.

Цель диссертационной работы: экспериментальное исследование влияния дисперсной фазы на локальные характеристики и теплообмен пузырьковых течений в области малых газосодержаний, включая процессы генерации пузырьковой смеси.

Поставлены и решены следующие **задачи**:

- Исследование процесса генерации газовой фазы при истечении газа из капилляра, в потоке жидкости при различных направлениях потока жидкости, размерах капилляра, его ориентациях в потоке, и различных вязкостях рабочей жидкости. Определить основные факторы, влияющие на размер формируемого пузырька.
- Определить экспериментально локальные характеристики опускного пузырькового потока, такие как скорость жидкости, газосодержание и напряжение трения на стенке канала при докритических числах Рейнольдса жидкой фазы, и в течениях, близких к режиму зависания газовой фазы, когда групповая скорость всплытия пузырьков близка к скорости жидкой фазы.
- На основе полученных данных о дисперсности пузырей формируемых при отрыве от одиночного капилляра, провести экспериментальные исследования распределения коэффициента теплообмена и напряжения трения на стенке в модели вертикальной сборки стержней квадратной компоновки. Получить распределение газовой фазы по сечению модели сборки и исследовать влияние на это распределение возмущения течения от элементов, дистанцирующих стержни друг от друга.

Научная новизна:

1. Показано, что на размер пузыря формируемого на одиночном капилляре в потоке жидкости оказывает влияние направления течения и ориентация капилляра. Показано, что при расходе газа меньше критического наблюдается влияние диаметра капилляра и вязкости жидкости на размер пузыря, при этом при расходах газа больше критического рост среднего диаметра пузыря при увеличении расхода газа имеет схожую тенденцию для капилляров разного диаметра.

2. Получены экспериментальные данные о локальных гидродинамических характеристиках опускного пузырькового течения вблизи режима зависания газовой

фазы, и при докритических числах Рейнольдса жидкой фазы. Показано, что структура пузырькового течения при докритических числах Рейнольдса по жидкой фазе качественно подобна течению однофазного потока в развитом турбулентном режиме. Обнаружено, что даже при малых расходах газа, дисперсная фаза оказывает значительное влияние на локальную структуру потока.

3. Проведено экспериментальное исследование теплообмена вертикального стержня в модели сборки квадратной компоновки к адиабатическому пузырьковому потоку при различных расходах фаз. Впервые экспериментально определены напряжение трения и пульсации напряжения трения на стенке вертикального стержня в сборке при восходящем пузырьковом течении.

4. Обнаружено, что значения напряжения трения и пульсаций напряжения трения существенно зависят от расстояния до дистанцирующей решетки, и эта зависимость имеет немонотонный вид, в отличие от однофазного случая.

5. Впервые получены профили локального газосодержания вблизи стенок стержней в ячейке вертикальной сборки квадратной компоновки. Профили локального газосодержания изменяются при удалении от дистанцирующей решетки от колоколообразного к седлообразному виду. Показано влияние структуры распределения газовой фазы по сечению канала на турбулентную структуру течения в пристенной зоне стержней сборки.

Теоретическая и практическая значимость.

Полученные данные о режимах генерации газовой фазы на капилляре в потоке жидкости, применимы для технических приложений, в которых существует необходимость контроля дисперсности газовой фазы при движении пузырьковой среды. Например, в абсорбционных насосах и биореакторах пузырькового типа, где размер газовых включений определяет скорость массообмена.

Экспериментальные данные о параметрах опускных пузырьковых течений при докритических числах Рейнольдса и вблизи режима зависания газовой фазы расширяют и дополняют существующие знания об опускных пузырьковых течениях. Полученные результаты могут быть использованы для верификации расчетных моделей пузырьковых течений при малых расходах фаз.

Экспериментальные данные об особенностях пузырьковых течений в вертикальной сборке стержней квадратной компоновки позволяют создать реальную физическую картину течений двухфазных газожидкостных смесей в сборках, способствуют пониманию механизмов влияния газовой фазы на теплогидравлические

параметры течения, могут быть использованы при верификации расчетных защитных кодов для анализа аварийных ситуаций на АЭС.

Достоверность результатов обеспечивается использованием современных методов, проведением калибровочных измерений, анализом погрешностей, воспроизводимостью полученных экспериментальных данных. Используемые методики тестировались в однофазных потоках, а результаты сравнивались с известными корреляциями. Достоверность полученных данных обусловлена также публикацией результатов исследований в жестко рецензируемых научных журналах.

Личный вклад автора. Основные научные результаты, включенные в диссертацию и выносимые на защиту, получены соискателем лично. Вклад автора состоял в проектировании и сборке экспериментальных установок и рабочих участков, подготовке и проведении всех представленных в работе экспериментов, разработке и тестировании комплекса численных алгоритмов для анализа базы полученных экспериментальных данных, обработке и анализе результатов, подготовке статей для публикации в рецензируемых журналах и докладов на конференциях. Постановка задачи и основные методы исследования сформулированы руководителем диссертационной работы д.ф.–м.н. О.Н. Кашинским.

Соответствие содержания диссертации специальности, по которой она рекомендуется к защите:

Диссертация М.А. Воробьева посвященная экспериментальному исследованию влияния дисперсной фазы на локальную гидродинамическую структуру и теплообмен пузырьковых течений при малых расходах газовой фазы соответствует паспорту специальности 1.3.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника» для физико-математических наук.

Апробация результатов

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих международных и всероссийских конференциях: Минский Международный форум по тепло- и массообмену (Республика Беларусь, Минск, 2012, 2016); ICONE International Conference on Nuclear Engineerin (Chengdu, China, 2013; Charlotte, North Carolina, USA, 2016); 9th International Conference on Multiphase Flow (Firenze, Italy, 2016); Международная научная студенческая конференция МНСК (Новосибирск, 2014, 2015); Российская национальная конференция по теплообмену РНКТ (Москва, 2014, 2018); Всероссийская школа-конференция с международным

участием «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики» (Новосибирск 2014, 2016, 2018); Всероссийская научная конференция «Теплофизика и физическая гидродинамика» с элементами школы молодых ученых. (Алушта, 2015, Ялта, 2019, Сочи, 2022); Всероссийская конференция «Сибирский теплофизический семинар» (Новосибирск, 2015, 2017, 2018); XXI Всероссийская научно-техническая конференция «Энергетика: эффективность, надежность, безопасность» (Томск, 2015); IV Международный семинар с элементами научной школы для молодых ученых ISHM (Новосибирск, 2016); Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики (Томск, 2016); «Фундаментальные и прикладные проблемы теплообмена» Школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева (Санкт-Петербург, 2017; Москва, 2019); Школа-конференция «Теоретические и вычислительные проблемы механики сплошных сред» (Новосибирск, 2017); 5th International Workshop on Heat/Mass Transfer Advances for Energy Conservation and Pollution Control (Новосибирск, 2019).

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

1. Воробьев М.А., Кашинский О.Н., Лобанов П.Д., Чинак А.В. Формирование мелкодисперсной газовой фазы в восходящем и опускном потоке жидкости // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2012. № 4. С. 75-81 (из перечня ВАК).
2. Воробьев М.А., Кашинский О.Н., Рандин В.В. Опускное пузырьковое течение в трубе при докритических числах Рейнольдса // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2019. № 2. С. 119-125 (из перечня ВАК).
3. Воробьев М.А. Теплообмен в восходящем пузырьковом течении в вертикальной сборке стержней // Теплофизика и аэромеханика. 2019. Т. 26. № 2. С. 247-253 (из перечня ВАК).
4. Kashinskii O.N., Vorobyev M.A. Wall Shear Stress in a Model of 3 • 3 Rod Bundle // J. Eng. Thermophys. 2020. Vol. 29, № 3 (из перечня ВАК).
5. Vorobyev M.A., Kashinsky O.N. Specific features of downward bubbly flow near the vanishing gas flow regime // Interfacial Phenomena and Heat Transfer, 2023, 11(1):11–19 (из перечня ВАК).
6. Kashinsky O.N., Vorobyev M.A., Lobanov P.D., Chinak A.V. Regimes of formation of bubbly flows // Int. Conf. Nucl. Eng. Proceedings, ICONE. American Society of Mechanical Engineers (ASME), 2016. Vol. 3. (из перечня ВАК).
7. Kashinsky O.N., Vorobyev M.A., Lobanov P.D., Chinak A.V. Bubble Generation From an Orifice in Upward and Downward Liquid Flow // ICONE. American Society of Mechanical Engineers (ASME), 2013. Vol. 4. (из перечня ВАК).

8. Воробьев М.А., Кашинский О.Н., Лобанов П.Д., Чинак А.В. Режимы генерации пузырей в потоке вязкой жидкости // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: физика. 2015. Vol. 10, № 3. Р. 70–75. (из перечня ВАК).

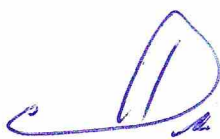
9. Воробьев М.А., Кашинский О.Н., Лобанов П.Д., Чинак А.В. Режимы формирования пузырьковых потоков в вязкой жидкости // Труды Института механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН, Том 11 (2016), № 2, с. 254–262

Решение о рекомендации работы к защите

Диссертация «Влияние дисперсной фазы на локальную структуру и теплообмен пузырьковых течений в области малых газосодержаний» Воробьева Максима Александровича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Решение принято на заседание 5 секции Учёного Совета Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук. Председатель заседания – академик РАН Алексеенко Сергей Владимирович. На заседании присутствовало 29 человек, в том числе 1 академик РАН, 1 член-корр. РАН, 17 докторов и 12 кандидатов наук.

Результаты голосования: «за» - 29 человек, «против» - 0, «воздержалось» - 0, протокол № 01-2023 от 9 марта 2023 г.



Председатель семинара
Алексеев Сергей Владимирович
академик РАН,
научный руководитель ИТ СО РАН



Секретарь семинара
Лукашов Владимир Владимирович
к.т.н, в.н.с лаборатории
физических основ энергетических
технологий ИТ СО РАН