

На правах рукописи



Воробьев Максим Александрович

**Влияние дисперсной фазы на локальную структуру и теплообмен
пузырьковых течений в области малых газосодержаний**

1.3.14 Теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискании ученой степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН)

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник
Кашинский Олег Николаевич

Официальные оппоненты: Мусакаев Наиль Габсалямович – доктор физико-математических наук, профессор, Тюменский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук, директор филиала

Васильев Николай Викторович – кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, старший научный сотрудник

Ведущая организация: Институт механики им. Р.Р. Мавлютова — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук

Защита состоится «14» июня 2023 года в 9 часов 30 минут на заседании диссертационного совета 24.1.129.01, созданного на базе ИТ СО РАН по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИТ СО РАН: www.itp.nsc.ru. Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью учреждения, просьба отправлять на имя ученого секретаря диссертационного совета по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, д. 1. (e-mail: dissovet@itp.nsc.ru).

Автореферат разослан «__» апреля 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.ф.-м.н., профессор РАН



Терехов Владимир Викторович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Двухфазные газожидкостные течения представляют собой один из наиболее интенсивно развивающихся разделов механики и теплообмена многофазных систем. Изучение пузырьковых течений играет важную роль для химической и атомной промышленности, металлургии, оксигенации и очистки воды. Создание микропузырей является важной областью исследований в материаловедении и пищевой индустрии. В различных медицинских приложениях пузыри микронного размера используются для разрушения тромбов или доставки лекарств. Пузырьковые течения реализуются при добыче нефти и газа, а так же в биореакторных установках и тепловых насосах абсорбционного типа. Знание информации о структуре, осредненных и пульсационных характеристиках пузырьковых потоков необходимо при создании современных энергоустановок. В связи с этим требуется постоянное улучшение методик расчета двухфазных потоков, которые могли бы стать базой для проектирования и безопасной эксплуатации технических устройств. Вследствие чрезвычайного разнообразия геометрических характеристик технических установок 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 дисперсности газовой фазы, направления движения фаз, и геометрии канала.

Показано, что изменяя размер пузырьков в потоке жидкости можно управлять параметрами течения. Генерация газовой фазы на капиллярах, погруженных в поток жидкости – один из способов создания пузырькового течения с контролируемой дисперсностью газовой фазы. Большая часть работ по исследованию отрыва пузырька в потоке жидкости сконцентрирована на изучении формирования пузырьков на отверстиях в стенке канала в восходящем потоке. Данные об особенностях генерации пузырьков в опускных течениях, а также информация о влиянии положения инжектора газа в потоке на отрыв пузырька, носят фрагментарный характер.

Несмотря на обширную базу экспериментальных данных о структуре опускного пузырькового течения в трубах, в литературе наблюдается недостаток информации о характеристиках спутных опускных пузырьковых течений при малых расходах фаз. Практически отсутствуют прямые экспериментальные исследования структуры опускного пузырькового

течения при докритических числах Рейнольдса, и вблизи режима зависания газовой фазы.

Существует большое количество работ по исследованию газожидкостных течений в сборках стержней. При этом применяемые в работах методики измерения не позволяют определять значения локальных характеристик течения в пристенной зоне стержней. Не раскрыта проблема влияния дистанцирующих решеток на характеристики двухфазного потока в сборке.

В связи с изложенным, возникает необходимость проведения экспериментальных исследований для получения надежных данных о локальной структуре пузырьковых потоков. Эта информация может послужить основой для разработки современных методов расчета двухфазных потоков.

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

Задачи:

- Определить особенности процесса генерации дисперсной фазы при истечении газа из одиночного капилляра, в восходящем, и в нисходящем потоке жидкости при различных размерах капилляра, его ориентациях в потоке, и различных вязкостях рабочей жидкости. Выделить основные параметры, влияющие на размер формируемого пузырька.
- Экспериментально исследовать локальные гидродинамические 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 со значительным ростом истинного газосодержания, когда групповая скорость всплытия пузырьков близка к скорости жидкой фазы.
- На основе измерений дисперсности газовых включений при отрыве от одиночного капилляра провести экспериментальные исследования распределения коэффициента теплообмена и напряжения трения на стенке в модели вертикальной сборки стержней квадратной компоновки. В том числе, получить распределение локального газосодержания по сечению канала сборки и исследовать влияние на это распределение возмущения течения от элементов, дистанцирующих стержни друг от друга.

Научная новизна:

- Определены режимы процесса генерации дисперсной фазы на одиночном капилляре в потоке жидкости при различных условиях. Экспериментально показано, что на размер пузыря оказывает влияние направления течения и ориентации капилляра в потоке. Показано, что при

одиноким режиме отрыва наблюдается значительное влияние диаметра капилляра на размер пузыря, при этом при переходе в зону с коалесценцией рост среднего диаметра пузыря при увеличении расхода газа имеет схожую тенденцию для капилляров разного диаметра.

- Впервые получены экспериментальные данные о локальной гидравлической структуре опускного пузырькового течения вблизи режима зависания газовой фазы, и при докритических числах Рейнольдса жидкой фазы. Показано качественное подобие структур течения в однофазном развитом турбулентном потоке и псевдотурбулентном пузырьковом течении. Установлено, что даже при малых газосодержаниях газовая фаза оказывает значительное влияние на локальную структуру потока.
- Проведено экспериментальное исследование теплообмена вертикального стержня в модели сборки квадратной компоновки к адиабатическому пузырьковому потоку при различных расходах фаз. Впервые экспериментально измерены напряжение трения и пульсации напряжения трения на стенке вертикального стержня в сборке при восходящем пузырьковом течении.
- Определено, 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.
- Впервые получены распределения локального газосодержания вблизи стенок стержней в ячейке вертикальной сборки квадратной компоновки. Показано, что наличие дистанцирующих элементов приводит к перестроению профиля газосодержания от колоколообразного к седлообразному. Обнаружено влияние структуры распределения газовой фазы по сечению канала на напряжение трения и интенсивность турбулентных пульсаций в пристенной зоне стержней сборки.

Достоверность полученных результатов. Достоверность полученных 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.

Научная и практическая значимость работы. Полученные знания о режимах генерации дисперсной фазы на капилляре в потоке жидкости, важны для ряда 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.

На защиту выносятся:

1. Результаты экспериментального исследования режимов генерации газовых включений при истечении газа из одиночного капилляра в поток жидкости, при различных параметрах системы, включая зависимость диаметров пузырьков от геометрических и режимных параметров.
2. Результаты экспериментальных исследований локальных гидродинамических характеристик опускного пузырькового потока при докритических числах Рейнольдса жидкой фазы.
3. Результаты экспериментальных исследований локальных характеристик опускного пузырькового потока вблизи режима зависания газовой фазы, когда групповая скорость пузырьков близка к скорости жидкой фазы.
4. Результаты экспериментального исследования теплообмена, напряжения трения, распределения газовой фазы по сечению канала, влияния дистанцирующих элементов на параметры потока в адиабатическом пузырьковом течении в вертикальной сборке стержней квадратной компоновки.

Личный вклад соискателя. 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.

Апробация работы. 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 тепломассообмена» 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).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 36 работ, включая 13 статей, в том числе 12 статей – в печатных изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендованных ВАК.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 138 страниц с 84 рисунками и 4 таблицами. Список литературы содержит 245 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, определена цель и поставлены задачи исследований, сформулированы научная новизна и практическая значимость работы, представлены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава диссертации посвящена обзору современного состояния исследований пузырьковых течений. Показано влияние расходных параметров фаз на интегральные и локальные характеристики пузырьковых потоков. Несмотря на интенсивные исследования в тематике, множество проблем открыты. Существует ряд работ посвященных численному моделированию движения газожидкостных смесей (*Serezawa and Kataoka, 1991; Bois, 2017; Pakhomov and Terekhov, 2016*). Но развитие теоретических моделей движения газожидкостных потоков сдерживается отсутствием достаточного количества экспериментальной информации, полученной для различных условий движения.

В работах (*Nakoryakov et al. 1981; Madavan et al. 1984*) показано, что дисперсность газовой фазы в потоке существенно влияет на параметры течения. Наиболее ярко данное влияние проявляется в монодисперсных газожидкостных смесях, когда отсутствует конкуренция между эффектами вызванными пузырями различных размеров. Рассмотрены разнообразные способы создания монодисперсной газожидкостной смеси. Показано, что генерация пузырьков при отрыве газовой фазы от капилляра, погруженного в поток жидкости, является наиболее применимой для технологических устройств. Большая часть экспериментальных и теоретических работ по исследованию отрыва пузырька в потоке жидкости сконцентрирована на изучении формирования пузырька на отверстии в стенке канала в восходящем потоке. Данные об особенностях генерации пузырьков в опускных течениях, а также информация о влиянии положения инжектора газа в потоке на отрыв пузырька, носят фрагментарный характер.

Показано, что локальная структура спутных опускных пузырьковых течений существенно отличается от структуры восходящих. В работе (*Dong and Hibik, 2021*) приводится обзор экспериментальных работ по исследованию спутных опускных двухфазных потоков. Большинство экспериментальных исследований выполнены с использованием воды в качестве несущей фазы, как правило, числа Рейнольдса жидкой фазы в этих работах соответствуют развитому турбулентному режиму. Режимы с малыми расходами фаз по-прежнему остаются малоизученными. Важным вопросом при изучении газожидкостного течения является степень влияния пузырьков газа на пульсационные характеристики жидкости. Детальный обзор исследований по псевдотурбулентности, вызванной относительным движением пузырей, приведен в работе (*Joshi et al., 2017*). Чтобы отделить влияние перемешивания жидкости пузырями от собственной турбулентности жидкости требуются эксперименты при ламинарных режимах течения. В случае спутных опускных пузырьковых потоков, если средняя скорость жидкости равна групповой скорости всплывающих пузырьков газа, реализуется так называемый режим зависания газовой фазы, когда величина истинного газосодержания может принимать значения в широком диапазоне при

нулевом расходе газа. Опускные пузырьковые течения с расходными параметрами фаз соответствующими режиму зависания изучены весьма слабо. Работа (*Ганчев и Пересадыко, 1985*) – одно из немногих исследований посвященных данной теме. Но, из-за особенностей подачи газа, в данной работе распределение пузырей по размерам существенно меняется вверх по течению в связи с их активной коалесценцией, что приводит к значительному изменению параметров течения.

Последние 10-15 лет заметна тенденция перехода ведущих групп, которые многие годы проводили исследования двухфазных течений в трубах, к исследованиям в каналах, используемых в современных технологиях. Большой интерес со стороны научного сообщества проявляется к каналам – сборкам стержней, имитирующим тепловыделяющие сборки ядерных реакторов. Исследования термогидравлических характеристик однофазных течений в моделях тепловыделяющих сборок проводится во многих отечественных и зарубежных лабораториях. Результаты отечественных исследований сведены в учебных пособиях и справочниках Б.С. Петухова, В.И. Субботина, П.Л. Кириллова. В процессе штатной работы ядерных установок типа ВВЭР в активной зоне происходит кипение теплоносителя, так же в случае аварийной ситуации в установках типа ВВЭР возможно его закипание. Численные коды, предназначенные для прогнозирования аварийных ситуаций в ядерных реакторах, основаны, как правило, на двухжидкостных моделях. Надежные экспериментальные данные о распределении газовой фазы в канале ТВС необходимы как для составления замыкающих соотношений, так и для верификации моделей. В настоящее время, в литературе присутствует большое количество экспериментальных и теоретических работ по исследованию как истинного газосодержания (*Murase et al., 1986; Kamei et al. 2010*), так и распределения газовой фазы по сечению канала (*Clark et al. 2014; Ren et al., 2017*) при газожидкостном течении в сборках стержней. При этом применяемые в описанных выше работах методики измерения локального газосодержания не позволяют определять его значения в пристенной зоне стержней, а так же в узких зазорах между ними. Так же, несмотря на некоторое количество работ, посвященное исследованию гидродинамических характеристик пузырьковых потоков в сборках стержней, данные о структуре течений (особенно в пристенной зоне стержней) остаются фрагментарными. Не раскрыта проблема влияния дистанцирующих решеток на характеристики двухфазного потока в сборке. В литературе нет работ по теплообмену при пузырьковом течении в ТВС, позволяющих выделить вклад относительного движения газовых пузырьков на интенсификацию передачи тепла от стержня сборки к потоку.

Вторая глава посвящена описанию экспериментальных методик используемых в работе, достоверности и неопределенности полученных данных.

Для определения дисперсности газовой фазы в потоке при малых газосодержаниях, пузырьковое течение снималось на фото или видеокамеру в проходящем свете. Полученные теневые изображения обрабатывались автоматически при помощи алгоритма разработанного в среде Matlab.

Для измерения локальных характеристик пузырькового течения (напряжение трения на стенке канала, скорость жидкой фазы, локальное газосодержание и дисперсность газовой фазы) применялся электродиффузионный метод (*Накоряков и др., 1986*). Метод основан на измерении скорости диффузии активных ионов к электроду-датчику, помещенному в поток. Описаны особенности метода и применяемой измерительной аппаратуры для различных типов датчиков.

Описана методика измерения теплообмена в газожидкостном потоке в сборке стержней при обогреваемой стенке стержня с помощью резистивных датчиков температуры.

Описаны основные источники неопределенности измеряемых величин. Системы подачи жидкой и газовой фаз калибровались, что обеспечило стандартное среднеквадратичное отклонение расхода не более 1% и 2,5% соответственно. Аппаратура, использованная для измерения тока датчиков, обеспечивала точность измерений тока с погрешностью не более 0,5%. Неопределенность при измерении диаметра пузыря по теневым изображениям потока составляет не более 12%. Неопределенность измерений при использовании электродиффузионного метода составляет 7% для напряжения трения, и 4% для скорости жидкой фазы. При измерении локального газосодержания электродиффузионным датчиком, наблюдается систематическая ошибка, показания датчика занижены на 3,2-15,7%.

В третьей главе рассмотрены результаты исследований формирования дисперсной газовой фазы на капилляре в потоке жидкости. В разделе 3.1 описывается экспериментальная установка и рабочие каналы. Первая часть эксперимента посвящена исследованию влияния расходных параметров жидкости и газа, направления течения и ориентации капилляра, на размер пузырей при отрыве в потоке жидкости от капилляра или отверстия в стенке канала (раздел 3.2). Рабочим каналом служила труба квадратного сечения шириной 10 мм. Рабочей жидкостью – дистиллированная вода. Использовались три конфигурации расположения отверстия, через которое производился ввод газа в поток. Отверстие капилляра располагалось заподлицо с одной из стенок канала, было расположено в центре канала, и в третьем случае капилляр, находящийся в центре канала, был направлен по потоку жидкости (рисунок 1). Эксперименты проводились в восходящем и опускном течениях жидкости. Эксперимент проводился при числах

Рейнольдса в диапазоне 650 – 12400. Расход газа варьировался в диапазоне $Q_g = 0,0167 - 1,67$ мл/с. На рисунке 1 результаты измерений сгруппированы таким образом, что бы было проще оценить влияние положения капилляра в канале и направления потока на размер формируемых пузырей. При одинаковых расходах фаз (во всем исследуемом диапазоне их значений) самые мелкие пузыри получаются при отрыве от капилляра расположенного в центре канала поперек потока, при этом самые крупные формируются на капилляре расположенном в центре канала по потоку. При малых скоростях жидкости отрывной диаметр пузырей выше в опускном режиме течения, чем в восходящем. Увеличение U_L приводит к выравниванию размеров пузырей для обоих случаев. В опускном течении векторы скорости жидкости и силы Архимеда направлены в противоположные стороны, что приводит к замедлению уноса пузырька от отверстия капилляра в опускном течении и увеличению времени его роста. При увеличении U_L значительно выше относительной скорости всплытия пузыря влияние направления потока жидкости на его размер становится незначительным.

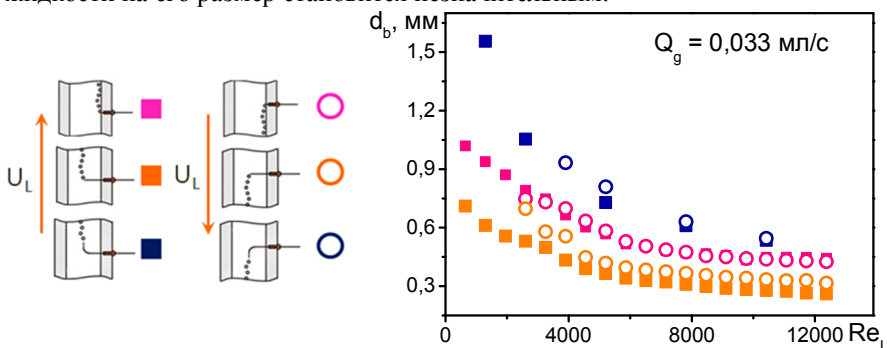


Рисунок 1 – Влияние способа ввода газа в поток и направления течения на размер пузыря.

Вторая часть эксперимента (раздел 3.3) посвящена исследованию влияния физических свойств жидкости и диаметра капилляра на отрыв пузыря в потоке. Рабочим каналом служила труба круглого сечения внутренним диаметром 15 мм. Рабочей жидкостью – глицерин, температура которого в процессе эксперимента поддерживалась равной 70, 80 и 90 °С. Газ подавался в поток через капилляр, вклеенный в центральную часть рабочего участка. Отверстие капилляра было расположено в центре канала. Эксперимент проводился в опускном течении при числах Рейнольдса в диапазоне 80 – 300. Расход газа варьировалось в диапазоне $Q_g = 0,0167 - 1,67$ мл/с. Эти параметры были выбраны потому, что именно при таком направлении течения и положении капилляра наблюдались наиболее интересные режимы отрыва, требующие более детального изучения. Использовались капилляры с внутренним диаметром 0,5 и 0,16 мм. На рисунке 2 представлена зависимость

объема пузырька, формируемого на капилляре, от расходов фаз при различных диаметрах капилляра и вязкостях рабочей жидкости. Оси обезразмерены в соответствии с работой (Oguz and Prosperetti, 1993), где $V_{Fr} = \frac{\pi \sigma d_o}{\rho_L g}$ - отрывной объем пузыря в покоящейся жидкости по модели

Фрица, $Q_{cr} = \pi \left(\frac{16}{3g^2} \right)^{\frac{1}{6}} \left(\frac{\sigma d_o}{2\rho} \right)^{\frac{5}{6}}$ – критический расход газа, при котором в покоящейся жидкости происходит переход от одиночного отрыва пузырька к отрыву с коалесценцией вблизи капилляра.

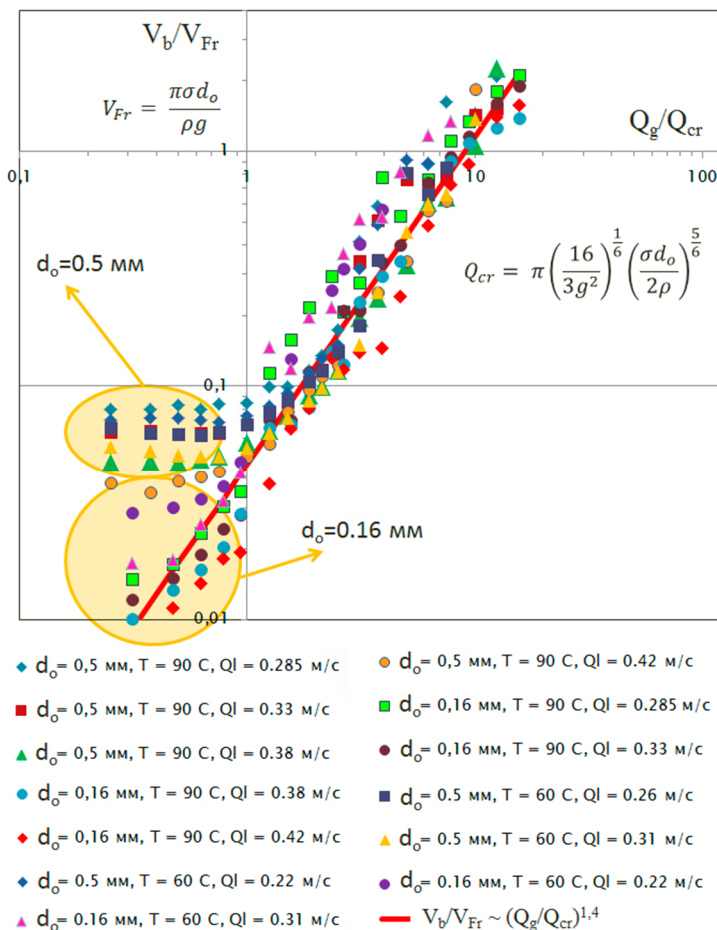


Рисунок 2 – Зависимости среднего объема пузырька от расходов фаз в безразмерных координатах.

При $Q_g/Q_{cr} > 1$ экспериментальные результаты, полученные для капилляров разного диаметра и разных вязкостей жидкости ложатся вблизи одной кривой $V_b/V_{Fr} \sim (Q_g/Q_{cr})^{1.4}$, при этом в зоне $Q_g/Q_{cr} < 1$, в отличие от работы (Oguz and Prosperetti, 1993) наблюдается существенное влияние диаметра капилляра, и вязкости жидкости на объем формируемого пузырька.

Третья часть эксперимента (раздел 3.4) посвящена исследованию режимов генерации пузырьков в потоке жидкости. Параметры эксперимента аналогичны данным в разделе 3.3. При достаточно маленьких расходах газа (примерно от 2 до 12 мл/мин для капилляра с $d_o = 0,5$ мм, и от 2 до 6 мл/мин для тонкого капилляра $d_o = 0,16$ мм) реализуется режим одиночного отрыва, когда пузырь, оторвавшийся от капилляра, слабо влияет на отрыв последующего. Эта область и соответствует полочке на рисунке 2. Для такого режима отрыва характерен один ярко выраженный пик на гистограмме размеров (рисунок 3 а). При малых расходах газа (примерно от 2 до 6 мл/мин для капилляра с $d_o = 0,5$ мм, и до 2 мл/мин для тонкого капилляра $d_o = 0,16$ мм) можно наблюдать импульсный режим отрыва пузыря (рисунок 3 б), когда цепочка пузырей периодически прерывается и возобновляется. При таком режиме, который является частным случаем одиночного отрыва, наблюдается так же лишь один пик на гистограмме размеров. При увеличении расхода газа наблюдается переход от режима одиночного отрыва к режиму, для которого свойственны два ярко выраженных пика на гистограмме размеров (рисунок 3 в). Видно, что дополнительный пик на гистограммах соответствует пузырям вдвое большего объема, чем пузыри относящиеся к основному пику. Это дает основание утверждать, что большие пузыри возникают в результате коалесценции маленьких вблизи капилляра. При дальнейшем увеличении расхода газа доля крупных пузырей растет, в некоторых случаях при увеличении расхода газа течение вновь может перейти в режим, для которого характерен только один ярко выраженный пик на гистограмме размеров, но в этом случае, генерируемые пузыри будут не результатом одиночного отрыва, а следствием коалесценции вблизи капилляра. Пример такого течения представлен на рисунке 3 г. При дальнейшем повышении расхода газа наблюдались более сложные режимы отрыва. На гистограмме размеров пузырей в таких режимах можно обнаружить более двух ярко выраженных пиков рисунке 3 д. При расходах газа порядка 100 мл/мин можно наблюдать переход отрыва пузыря к струйному режиму, для которого характерен большой разброс пузырей по размерам, а так же сильное отклонение формы пузырей от сферической. Примеры таких течений представлены на рисунке 3 е. Из-за сложной трехмерной формы пузырей и перекрытия их изображений такие режимы не поддаются компьютерной обработке.

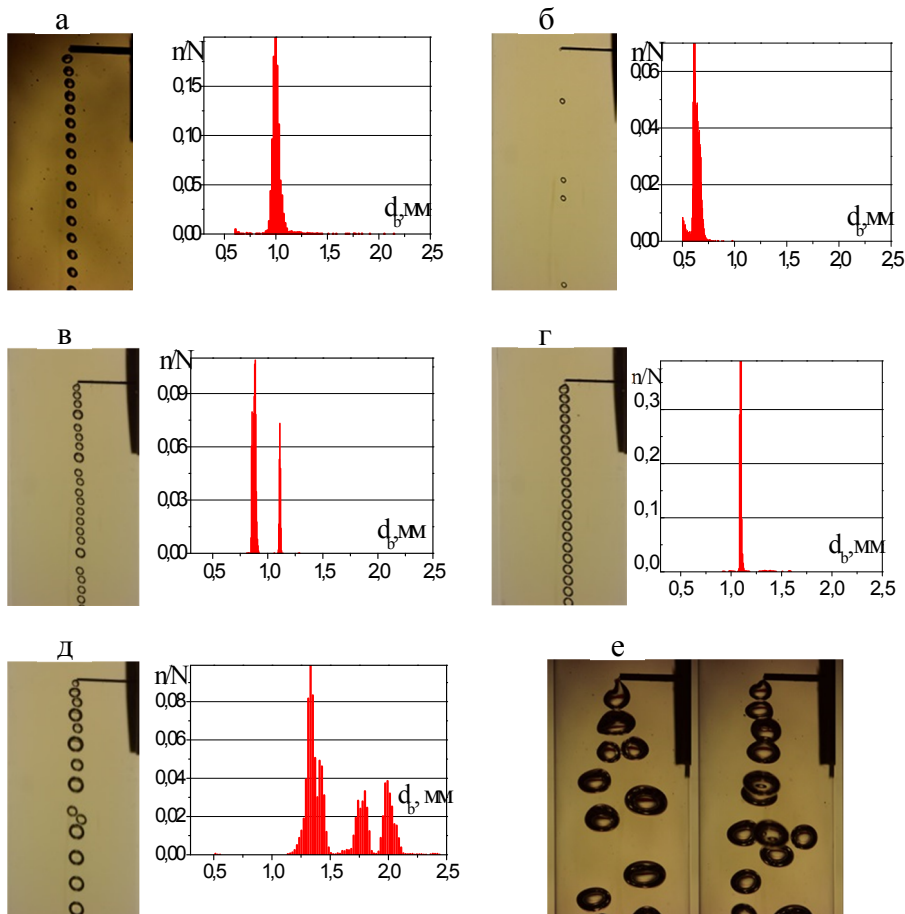


Рисунок 3 – (а) $d_o = 0,5$ мм, $T = 90$ °С, $U_L = 0,33$ м/с, $Q_g = 8$ мл/мин; (б) $d_o = 0,16$ мм, $T = 70$ °С, $U_L = 0,19$ м/с, $Q_g = 2$ мл/мин; (в) $d_o = 0,16$ мм, $T = 70$ °С, $U_L = 0,22$ м/с, $Q_g = 10$ мл/мин; (г) $d_o = 0,16$ мм, $T = 70$ °С, $U_L = 0,22$ м/с, $Q_g = 15$ мл/мин; (д) $d_o = 0,16$ мм, $T = 70$ °С, $U_L = 0,19$ м/с, $Q_g = 15$ мл/мин; (е) $d_o = 0,5$ мм, $T = 80$ °С, $U_L = 0,25$ м/с.

Четвертая глава посвящена результатам исследования опускного пузырькового течения в режиме зависания газовой фазы и при докритических числах Рейнольдса по жидкой фазе. В разделе 4.1 описывается экспериментальная установка и рабочие участки. Исследование опускного спутного пузырькового течения вблизи режима зависания газовой фазы, представленное в разделе 4.2, проводилось на канале внутренним диаметром 14 мм. Рабочей жидкостью служил электродиффузионный электролит на основе дистиллированной воды. Эксперимент проводился при

числах Рейнольдса по жидкой фазе в диапазоне 2900 – 6450. Расходное газосодержание варьировалось в диапазоне $\beta = 0,005 - 0,07$. Диаметр пузырьков был определен при автоматической обработке теневых изображений, средние значения диаметров находились в диапазоне от 1 до 3 мм. На рисунке 4 а представлена полученная зависимость напряжения трения на стенке канала в опускном пузырьковом течении при различных расходах фаз. τ_0 – напряжение трения в однофазном потоке. Для всех исследуемых расходов фаз отношение $\tau_w/\tau_0 > 1$. Как правило, в опускных двухфазных потоках напряжение трения больше чем в однофазном. Качественно похожие результаты были получены в работе (*Kashinsky and Randin, 1999*). Интенсивность турбулентных пульсаций в пристенной зоне канала τ'/τ_w представлена на рисунке 4 б.

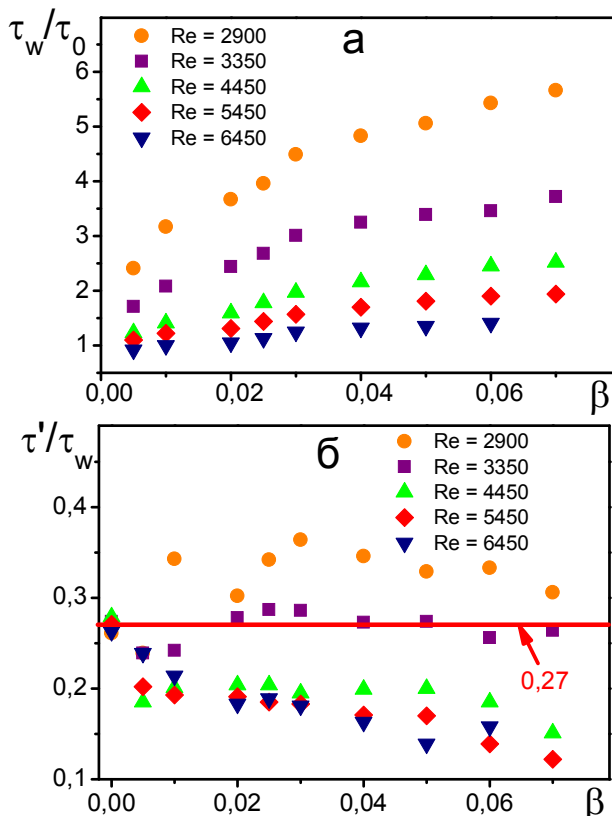


Рисунок 4 – (а) Напряжение трения на стенке канала; (б) Пульсации напряжения трения на стенке канала.

τ' – среднеквадратичное отклонение напряжения трения на стенке канала. В однофазном потоке величина отношения τ'/τ_w принимает значение равное 0,27 при всех исследуемых расходах жидкой фазы. Для $Re = 3350, 4450, 5450$ и 6450 наблюдается тенденция к уменьшению интенсивности турбулентности с ростом β , что качественно соответствует данным полученным в исследованиях других авторов. Для $Re = 2900$ в случае, когда течение наиболее близко к режиму зависания газовой фазы, наблюдается нетипичное для опускного пузырькового течения поведение пульсаций напряжения трения на стенке канала – его значение больше чем в однофазном потоке примерно на 20%.

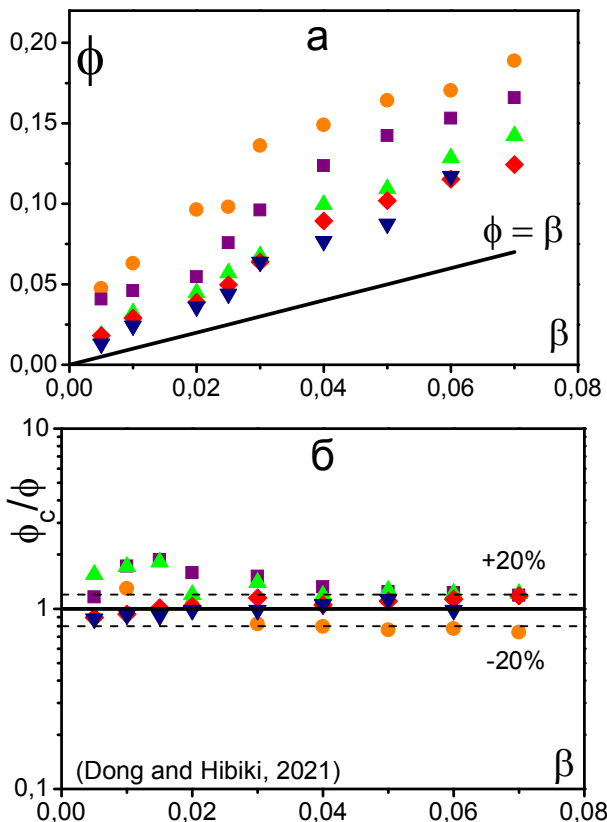


Рисунок 5 – (а) Истинное газосодержание при различных расходах фаз; (б) Сравнение экспериментальных данных с корреляцией на основе модели потока дрейфа.

По измеренным U-образным манометром перепадам давления в пузырьковом потоке $\Delta P'$ и значениям напряжения трения на стенке канала

было рассчитано истинное газосодержание φ (рисунок 5 а) согласно выражению:

$$\varphi = \frac{\Delta P' d - 4H\tau_w}{\rho_L g H d}. \quad (1)$$

Полученные значения φ сравнивались со значениями, рассчитанными при помощи корреляций φ_c , основанных на модели потока дрейфа. Модели (*Clark and Flemmer, 1985a; Goda et al., 2003*) показывают неудовлетворительное совпадение с экспериментальными данными во всем диапазоне исследуемых расходных параметров фаз. Более сложная современная модель (*Dong and Hibiki, 2021*) описывает экспериментальные результаты с неплохой точностью (рисунок 5 б), но в зоне низких расходных газосодержаний и вблизи режима зависания газовой фазы ошибка расчетов все еще больше 20%.

Исследование опускного пузырькового течения при докритических числах Рейнольдса представлено в разделе 4.3. Эксперимент проводился на канале с внутренним диаметром 20 мм. В качестве рабочей жидкости использовался электродиффузионный электролит на основе водоглицериновой смеси. Числа Рейнольдса, по жидкой фазе равнялись 500, 1000 и 1500. Расходное объемное газосодержание изменялось в пределах 0,005 до 0,1. Средние значения диаметров пузырьков находились в диапазоне от 2,6 до 3,5 мм. Измеренные профили локального газосодержания приведены на рисунке 6 а. Вблизи стенки существует кольцевая область чистой жидкости, свободная от пузырей газа. При малых значениях расходного газосодержания профиль α имеет колоколообразную форму. При увеличении β газосодержание принимает примерно постоянные значения в центральной части трубы. При наибольших значениях β профиль локального газосодержания имеет небольшой локальный максимум при промежуточном значении радиуса. На рисунке 6 б приведены измеренные профили скорости жидкости в двухфазном потоке. Видно, что даже малая добавка газовой фазы приводит к существенной деформации профилей скорости, выражающейся в их выполаживании. В центральной части трубы значения скорости жидкости близки к постоянным. В то же время возникает максимум скорости при промежуточном значении радиуса, который более выражен при больших значениях β . Происходит также существенное возрастание градиента скорости в пристенной зоне. На основе измеренных профилей локального газосодержания и напряжения трения на стенке были рассчитаны профили напряжения трения в потоке. Использовалось балансное соотношение, приведенное в работе (*Sato et al. 1981*):

$$\tau = \tau_w \left(\frac{r}{R} \right) - \frac{1}{2} r g [\bar{\rho} - \rho_i(r)]. \quad (2)$$

На рисунке 6 г видно, что введение газовой фазы приводит к значительной деформации распределения трения даже при малых значениях

расходного газосодержания. Это связано с дифференциальной плавучестью, вызванной неравномерным распределением газовой фазы по сечению трубы. В центральной части трубы значения трения становятся близкими к нулю и даже отрицательными. Этим качественно объясняется выполаживание профилей скорости жидкости в центральной зоне. В результате градиент скорости жидкости в пристенной области возрастает. Измеренные значения среднеквадратичных пульсаций скорости жидкости в полулогарифмических координатах закона стенки приведены на рисунке 6 в. Профили пульсаций скорости близки при существенном различии значений β . Максимальные значения отношения u'/u_τ лежат в диапазоне от 1,5 до 2, что близко к соответствующим значениям для однофазного турбулентного течения в трубах. Таким образом, динамическая скорость является адекватным масштабом для пульсаций скорости жидкости в псевдотурбулентном пузырьковом течении.

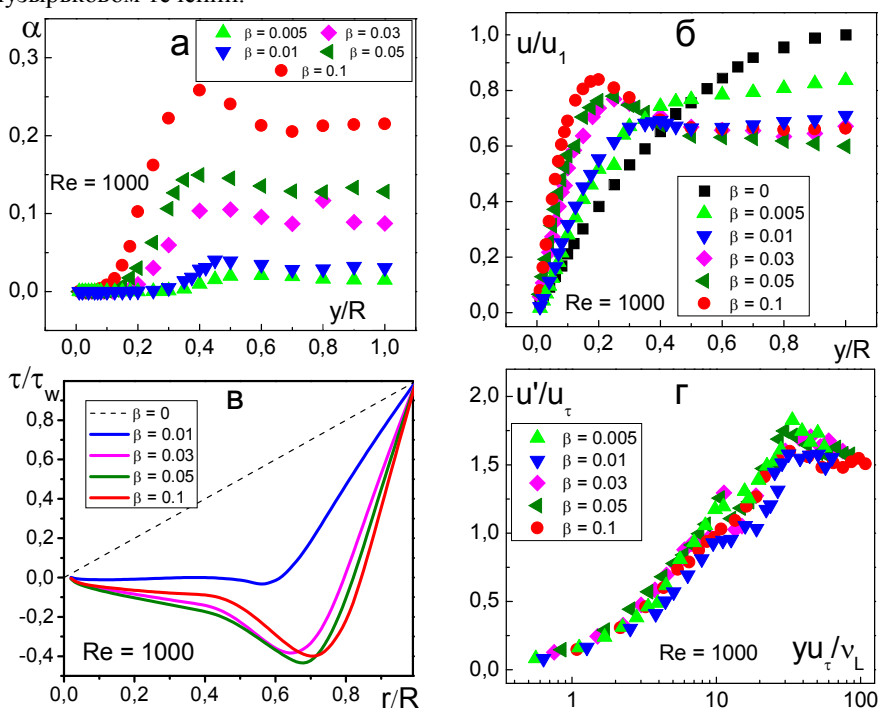


Рисунок 6 – (а) Профили локального газосодержания; (б) Профили скорости; (в) Профили пульсаций скорости в координатах закона стенки; (г) Касательное напряжение по сечению трубы.

В пятой главе представлены результаты исследования характеристик пузырькового течения в сборке стержней. В разделе 5.1 описано устройство

экспериментальной установки и измерительных участков. Рабочим каналом служила сборка из 9 вертикально расположенных стержней (диаметром 9,1 мм) в квадратной компоновке, удерживаемых между собой четырьмя дистанцирующими решетками. В качестве рабочей жидкости использовался электродиффузионный электролит на основе дистиллированной воды. Эксперимент проводился при числах Рейнольдса 4000 – 11000. Гидравлический диаметр определялся как отношение четырех площадей сечения канала к его периметру и был равен 9,7 мм. Среднерасходное газосодержание β варьировалось в диапазоне от 3 – 10%. На рисунке 7 а представлены результаты измерений теплообмена в зависимости от числа Рейнольдса для различных расходных газосодержаний. Датчик температуры находился на 250 мм ($h/D_h = 25,8$) выше дистанцирующей решетки. По оси ординат отложено отношение Nu/Nu_0 , где Nu_0 – число Нуссельта в однофазном потоке в соответствующем режиме. Наибольшее влияние на теплообмен газовая фаза оказывает при малых числах Рейнольдса и это влияние существенно возрастает с увеличением газосодержания. Заметим, что при больших числах Рейнольдса, интенсивность теплообмена не стремится к значению в однофазном потоке, а больше него на 20 – 30%. Зависимость безразмерного коэффициента теплоотдачи от расстояния до дистанцирующей решетки представлена на рисунке 7 б. Сплошная линия соответствует корреляции из работы (Qiao et al., 2016), где Nu^* – значение числа Нуссельта в однофазном потоке без влияния дистанцирующей решетки. Видно, что при удалении от решетки вклад газовой фазы в интенсификацию теплообмена возрастает.

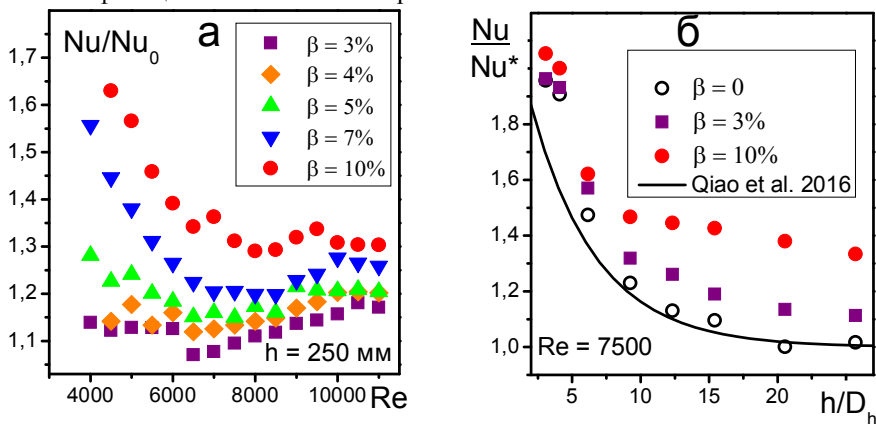


Рисунок 7 – (а) Зависимость теплообмена от числа Рейнольдса при различных газосодержаниях. Расстояние до дистанцирующей решетки; (б) Зависимость коэффициента теплообмена от приведенного расстояния от решетки при различных газосодержаниях.

При помощи датчика проводимости типа «лобовая точка» введенного в поток через отверстие в стержне сборки, получено распределение локального газосодержания вокруг центрального стержня сборки и на линиях соединяющих центральный и боковой, а так же центральный и угловой стержни сборки. Распределение газовой фазы не имеет аксиальной периодичности соответствующей симметрии сечения сборки. Отсутствие аксиальной симметрии в восходящем пузырьковом потоке в трубах круглого сечения наблюдалось ранее и в работах других авторов. На рисунке 8 показаны распределения локального газосодержания между центральным и угловым стержнем. Вблизи дистанцирующей решетки наблюдается колоколообразный профиль. Но при удалении от дистанцирующей решетки реализуются седлообразные профили газосодержания.

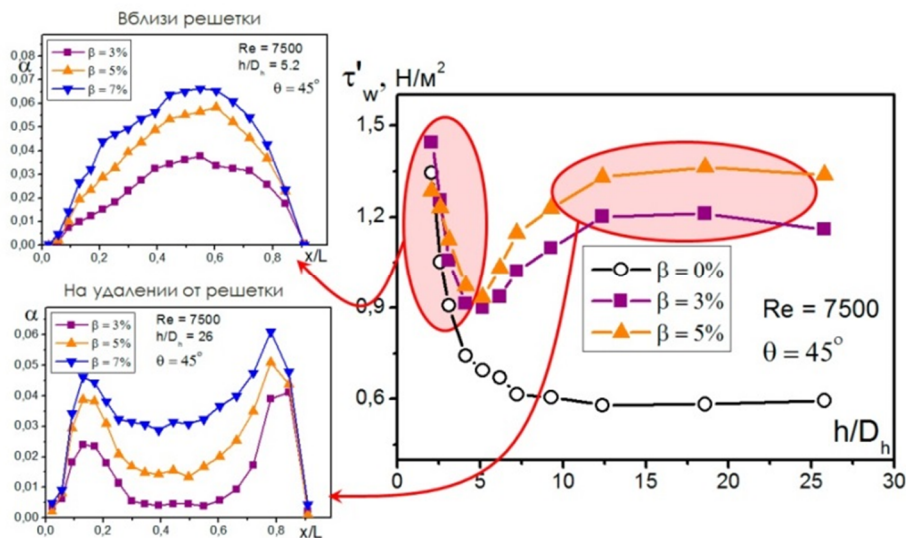


Рисунок 8 – Влияние распределения газовой фазы структуру течения.

При этом максимумы распределения становятся более выраженными с увеличением числа Рейнольдаса и уменьшении газосодержания. Напряжение трения и пульсации напряжения трения на стенке центрального стержня сборки при различных расходах фаз и угловых ориентациях датчика были измерены при помощи электродиффузионного метода. Существенное увеличение значения напряжения трения наблюдается сразу за дистанцирующей решеткой. Далее величина τ_w быстро убывает при увеличении расстояния между датчиком и решеткой от 50 до 100 мм. При дальнейшем удалении датчика от решетки напряжение трения в однофазном потоке продолжает медленно уменьшаться, выходя на постоянное значение.

При этом на удалении от решетки течение имеет весьма симметричный вид – величины τ_0 при различных углах слабо отличаются. Зависимость τ_w от расстояния до решетки при пузырьковом режиме течения имеет более сложный существенно немонотонный вид, и большее отличие по углу. Результаты измерения пульсаций напряжения трения τ'_w представлены на рисунке 8.

В случае однофазного потока пульсации ведут себя так же, как и средняя величина – быстро убывают с увеличением расстояния до дистанцирующей решетки. Добавление газовой фазы приводит к существенному росту пульсаций. Так же для двухфазного потока наблюдается необычное поведение - ярко выраженный минимум пульсаций на расстоянии 30 – 50 мм от решетки и максимум на удалении 150-200 мм. При удалении от решетки течение принимает осесимметричный вид. Дистанцирующая решетка существенно меняет структуру потока. В области решетки поперечное сечение канала значительно сужено, что приводит к ускорению потока жидкости. Эти струи жидкости и приводят к существенному росту пульсаций и напряжения трения вблизи решетки. С удалением от решетки скорость жидкости уменьшается и на некотором расстоянии начинает соответствовать невозмущенному потоку. Для объяснения не монотонности зависимости напряжения трения и пульсаций напряжения трения от расстояния до дистанцирующей решетки необходимо сопоставить эту зависимость с особенностями распределения газовой фазы в различных зонах сборки (рисунок 8). Как было показано выше, вблизи дистанцирующей решетки профили газосодержания имеют куполообразную форму и пузыри концентрируются в центре ячейки сборки, в связи с этим вклад газовой фазы в интенсификацию турбулентных пульсаций в пристенной зоне стержней невелик. При удалении от решетки происходит перестроение профиля газосодержания к седлообразному и газовая фаза концентрируется в узкой зоне вблизи стержня, что объясняет происходящий при этом рост пульсаций напряжения трения.

При обработке сигналов датчика трения были получены спектры турбулентных пульсаций в пристенной зоне центрального стержня сборки (рисунок 9). Показано, что как в однофазном потоке, так и в области вблизи дистанцирующей решетки с ростом частоты наблюдается затухание по закону близкому к Колмогоровскому ($-5/3$), в то время как на удалении от решетки в пузырьковом (в зоне которая соответствует седлообразному профилю газосодержания) практически весь спектр можно описать законом (-1) .

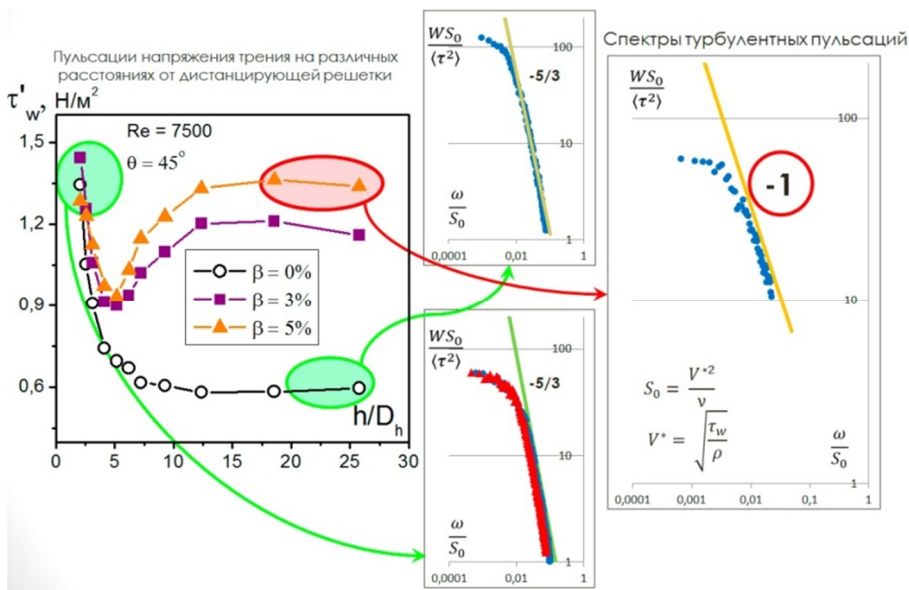


Рисунок – 9. Спектры турбулентных пульсаций.

Основные выводы по диссертации:

1. Проведено систематическое исследование процесса отрыва пузыря при истечении газа из одиночного капилляра находящегося в потоке жидкости. Обнаружено влияние ориентации капилляра в потоке жидкости на размер формируемого пузырька. Показано, при расходе газа меньше критического значения наблюдается существенное влияние диаметра капилляра и вязкости жидкости на размер формируемого пузырька.
2. Проведено исследование локальных характеристик опускного пузырькового течения вблизи режима зависания газовой фазы. Впервые установлено, что относительные пульсации напряжения трения в опускном пузырьковом течении вблизи режима зависания газовой фазы выше, чем в однофазном на 20%. Восстановлены значения истинного газосодержания путем анализа баланса сил, действующих на столб двухфазной смеси.
3. В исследованиях опускного пузырькового течения при докритических числах Рейнольдса по жидкой фазе показано, что при малых газосодержаниях происходит существенная деформация профилей касательного напряжения по сечению трубы, что приводит к выполаживанию профиля скорости. Показано, что в пузырьковом течении при малых газосодержаниях возникают псевдотурбулентные пульсации скорости в пристенной зоне даже при докритических числах Рейнольдса,

адекватным масштабом для этих пульсаций является динамическая скорость.

4. Для восходящих пузырьковых адиабатических потоков в вертикальной сборке стержней квадратной компоновки получены данные о: теплообмене стержней сборки с пузырьковым потоком, напряжении трения на стенке стержня. Величины напряжения трения и пульсаций напряжения трения на поверхности вертикального стержня существенно возрастают при введении в поток жидкости газовой фазы. Впервые показано, что зависимости этих величин от расстояния до дистанцирующей решетки принимают немонотонный вид, что кардинально отличается от однофазного течения.
5. Проведены экспериментальные исследования распределения локального газосодержания по сечению сборки. Впервые показано, что распределение газовой фазы по сечению канала не имеет аксиальной симметрии. Влияние дистанцирующей решетки приводит к перегруппировке распределения газовой фазы. Это объясняет существенное влияние газовой фазы на гидродинамические и турбулентные характеристики потока и соответственно немонотонное изменение трения на стенке стержня при удалении от решетки.

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. P. 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
10. **Vorobyev M.A.**, Kashinsky O.N. Distribution of wall shear stress for a bubbly flow in rod assembly // J. Phys. Conf. Ser. 2020. Vol. 1675, № 1. P. 012027. (из перечня ВАК).
11. **Vorobyev M.A.**, Kashinsky O.N. Experimental study of local void fraction distribution in bubble flow in rod assembly // J. Phys. Conf. Ser. 2019. Vol. 1369, № 1. P. 012028. (из перечня ВАК).
12. **Vorobyev M.A.**, Kashinsky O.N. Heat transfer of a bubbly flow in a vertical rod bundle 3X3 // J. Phys. Conf. Ser. 2018. Vol. 1105, № 1. P. 012073. (из перечня ВАК).
13. Kashinsky, O.N., Randin, V.V., **Vorobyev, M.A.** Experimental study of laminar downward bubbly flow in a vertical tube// Journal of Physics: Conference Series, 2018, 1105(1), 012072 (из перечня ВАК).