

На правах рукописи



Лобанов Павел Дмитриевич

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛОКАЛЬНОЙ
ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА В ЭЛЕМЕНТАХ
ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Новосибирск 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С. С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук.

Официальные оппоненты:

Митрофанова Ольга Викторовна – доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» Институт ядерной физики и технологий, отделение ядерной физики и технологий офиса образовательных программ, профессор;

Таиров Эмир Асгадович – доктор технических наук, доцент, ФГБУН Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, главный научный сотрудник;

Щеклеин Сергей Евгеньевич – доктор технических наук, профессор, ФГАУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», Уральский энергетический институт, заведующий кафедрой.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», г. Нижний Новгород.

Защита состоится «23» марта 2022 года в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.1.129.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр. академика Лаврентьева, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, <http://www.itp.nsc.ru/>.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью учреждения, просьба направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета 24.1.129.01 по адресу: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 1 (факс: (383) 330-84-80, e-mail: dissovet@itp.nsc.ru).

Автореферат разослан " ____ " _____ 20 ____ г.

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


Терехов Владимир Викторович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований. Будущее энергетики связано с развитием методов генерации тепловой и электрической энергии с минимальным потреблением горючих ископаемых и снижением выбросов парниковых газов. Одним из основных источников энергии, удовлетворяющих данным требованиям, является ядерная реакция. Однако несомненные преимущества атомной энергетики могут быть обесценены последствиями аварий, сопровождающихся выбросом радиоактивных веществ в окружающую среду. Существенно повысить эффективность и безопасность работы ядерных энергетических установок могут оптимизация конструкций существующих энергоблоков атомных электростанций на тепловых нейтронах и создание реакторов нового типа на быстрых нейтронах с жидкометаллическими теплоносителями, замкнутым ядерным топливным циклом и естественной защитой.

Исследование интегральных и, что особенно важно, локальных термогидродинамических параметров работы элементов реакторных установок (РУ) с различными типами теплоносителей необходимо для улучшения эксплуатационных характеристик. Из-за сложности экспериментального исследования работы РУ в штатных и аварийных режимах течения теплоносителя моделируют на основе расчетов. Существующие в настоящее время системные теплогидравлические коды основаны на эмпирической информации и теоретических предположениях. Появляется возможность неверного предсказания из-за несовершенства моделей, эффектов нодализации и других факторов. Требуется их доработка и верификация с учетом последних достижений в области экспериментальной гидродинамики и теплообмена.

Для снижения гидравлического сопротивления, увеличения запаса до кризиса теплообмена и его интенсификации, повышенное внимание следует уделить локальным течениям в ячейках тепловыделяющих сборок (ТВС), влиянию диаметра и шага расположения твэлов, конструкции дистанционирующих элементов на локальные термогидродинамические характеристики.

Существенной проблемой является ограниченность базы данных о закономерностях теплофизических явлений при течении теплоносителя с малыми числами Прандтля. Возникает необходимость проведения плотных работ по исследованию закономерностей гидродинамики и теплообмена тяжелых жидкометаллических теплоносителей (ТЖМТ).

Для РУ с ТЖМТ важно рассмотрение задачи о гипотетической аварии, возникающей при разрыве теплообменных трубок парогенератора (ПГ), в связи с достаточно высокой вероятностью ее возникновения. Локальное повреждение теплообменной трубки второго контура может привести к аварийным ситуациям, связанным с возможными скачками давления, кристаллизацией ТЖМТ, попаданию пузырей в ТВС и повышению реактивности и т.д. В связи с этим, необходимо определение закономерностей формирования и движения пузырей в ТЖМТ, гидродинамики присоединенных газовых пузырей, отрывных и нисходящих двухфазных потоков.

Для понимания физических механизмов особенностей локальных течений в элементах РУ и их влияния на интегральные параметры необходимо проведение исследований модельных объектов с относительно простой геометрией, но имеющих сложную структуру потока. Подобные данные необходимы для верификации и валидации различных методов расчетов, в том числе вычислительной гидродинамики (Computational fluid dynamics, CFD). Проблема тепловой перемежаемости, которая может привести к термоциклическому повреждению стенок оборудования в местах сочленений их элементов, достаточно подробно рассмотрена для водяного и воздушного теплоносителей на примере тройниковых соединений. Однако для ТЖМТ подобные данные отсутствуют, что затрудняет разработку теплогидравлических кодов и средств вычислительной гидродинамики, описывающих процессы, происходящие в РУ на быстрых нейтронах.

Таким образом, проведение экспериментальных исследований локальной гидродинамической структуры и теплообмена в элементах ядерных энергетических установок является актуальной научно-практической задачей. Подобные данные помогут более глубокому пониманию влияния дистанционирующих элементов на теплогидравлику ТВС при вариации геометрических параметров, закономерностей локальной гидродинамики и теплообмена двухфазных течений теплоносителя (в т.ч. ТЖМТ) в элементах реакторных установок, неизотермических течений ТЖМТ.

Целью данной работы является экспериментальное исследование локальной гидродинамической структуры, турбулентных характеристик и теплообмена одно- и двухфазных потоков водяного и тяжелого жидкометаллического теплоносителей в элементах ядерных энергетических установок для установления теплофизических закономерностей,

обоснования проектных решений и верификации расчетных кодов, в том числе CFD методов.

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

- исследование локальной гидродинамической структуры (напряжения трения на стенке, скорости жидкости и пузырей, распределение пузырей газа) и теплообмена одно- и двухфазных потоков в экспериментальных моделях ТВС, с дистанционирующими и перемешивающими решетками разных типов при вариации диаметра имитаторов твэлов, их количества, шага расположения, расхода теплоносителя;

- исследование локальных явлений, связанных с формированием двухфазных течений в элементах РУ, взаимодействию газовой фазы с теплоносителем, особенностей нисходящих и отрывных двухфазных течений, получение данных об отрывном диаметре пузырей, напряжении трения на стенке, скоростей дисперсной и несущей фаз, теплообмене и эволюции давления;

- проведение экспериментальных исследований и получение детальных данных по структуре температурного поля теплоносителя при неизотермических течениях ТЖМТ в соединениях трубопроводов и ячейках модели ТВС.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

1. На основе экспериментального моделирования течений теплоносителя в элементах реакторных установок определены закономерности локальных распределений осредненных и пульсационных значений скорости, напряжения трения, температуры и газосодержания.

2. Выполнено комплексное экспериментальное исследование одно- и двухфазных течений в моделях ТВС при широкой вариации конструкций дистанционирующих решеток (ДР), диаметра стержней-имитаторов твэлов, относительного расстояния между их осями, режима течения теплоносителя, установлены области возмущения потока за дистанционирующими решетками, впервые показаны особенности локальных гидродинамических параметров и распределения газовой фазы и теплообмена в этих областях.

3. Впервые выявлены и детально исследованы режимы течения нисходящего пузырькового потока с подавлением теплообменных процессов, показано, что связано с подавлением турбулентности и существенным изменением спектральных характеристик.

4. Впервые проведено экспериментальное исследование теплообмена отрывного пузырькового потока. Показано, что из-за формирования крупномасштабных вихревых структур в отрывной области потока, добавление пузырей оказывает слабое влияние на теплообмен, а в области восстановления течения интенсификация теплообмена в двухфазном потоке может достигать десятков процентов.

5. На примере Т-образного соединения трубопроводов впервые проведено экспериментальное исследование смещения разнотемпературных потоков, содержащего свинец тяжелого жидкометаллического теплоносителя. Получены данные о распределении осредненной и пульсационной температуры стенок канала и теплоносителя и их зависимости от расходов потоков, выявлены наиболее подверженные термоциклическим воздействиям области стенок канала.

Достоверность результатов подтверждается:

- повторением измерений с сохранением начальных и граничных условий при проведении экспериментальных исследований;
- использованием надежных экспериментальных методов, проведением калибровочных процедур в канонических течениях;
- анализом неопределенностей эксперимента, сравнением полученных данных с известными зависимостями;
- кросс верификацией результатов разных методов измерений, «слепым» и прямым сравнением данных экспериментов и расчетов.

Практическое значение работы. Полученные данные могут быть использованы при проектировании узлов новых поколений реакторных установок и обосновании конструкторских решений. Результаты исследования используются в ФГБУН Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, ОАО ОКБ «Гидропресс», ОАО «ОКБМ Африкантов», для настройки и верификации расчетных кодов, описывающих типовые сценарии при штатных и аварийных условиях эксплуатации РУ: теплогидравлика ТВС, процессов, происходящих в камерах смещения, а также при возникновении межконтурной неплотности в реакторе с ТЖМТ.

Результаты исследований двухфазных потоков используются для верификации расчетных моделей, предложенных в ФГБУН Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, ФГБУН Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН и других организациях.

Положения, выносимые на защиту:

- Результаты детальных экспериментальных исследований распределения осредненной и пульсационной скорости и локального газосодержания в ТВС, напряжения трения по периметру стержня-имитатора твэла и теплообмена одно- и двухфазного потока в моделях ТВС при изменении режима течения, диаметра имитаторов твэлов, относительного шага их расположения и количества;

- Экспериментальные данные о степени влияния дистанционирующих и перемешивающих решеток разных типов на локальные гидродинамические характеристики потока теплоносителя, теплообмен и гидравлическое сопротивление;

- Новые закономерности двухфазных течений, возникающих в элементах реакторных установок: данные о параметрах турбулентности, локальной гидродинамической структуре нисходящего пузырькового потока при вариации дисперсного состава газовой фазы в режимах течения с интенсификацией и ухудшением теплообмена относительно однофазного потока; результаты исследований гидродинамики и теплообмена при отрыве и восстановлении пузырькового потока;

- Экспериментальное моделирование локальных течений при взаимодействии дисперсной фазы с ТЖМТ, новые данные о формировании течения, включающие скорости всплытия пузырей в расплаве ТЖМТ, экспериментальные данные об изменении давления и свободного уровня теплоносителя в канале при «взрывном» истечении газа высокого давления в ТЖМТ;

- Приоритетные результаты по распределению осреднённых и пульсационных значений температур в области смешения двух потоков ТЖМТ с разной температурой при изменении отношения расходов «горячего» и «холодного» теплоносителя.

Личный вклад автора. Основные научные результаты, включенные в диссертацию и выносимые на защиту, получены соискателем лично. Постановка задач данного исследования производилась как лично диссертантом, так и совместно с д.ф.-м.н. Кашиным О.Н. и член-корр. РАН Прибатуриным Н.А. Стенды для проведения исследований были созданы либо лично автором (стенд для изучения течения с внезапным расширением, стенд для исследования влияния диаметра твэлов и относительного шага на гидродинамику течения в ТВС), либо в составе научного коллектива (все остальные экспериментальные установки). Автор принимал непосредственное участие в создании и

отладке методов измерений, применяемых в данном исследовании. Автором подготовлены экспериментальные стенды, проведены исследования, разработаны алгоритмы для обработки экспериментальных данных и произведены их анализ и интерпретация. Совместно с соавторами подготовлены публикации по результатам исследований, при этом вклад диссертанта был определяющим.

Апробация результатов. Результаты и материалы диссертационного исследования обсуждались:

- на международных конференциях: International Conference on Multiphase Flow (2016 г., г. Флоренция, Италия, 2019 г., г. Рио де Жанейро, Бразилия), International Conference of Nuclear Engineering (2012 г., г. Анахайм, США, 2013 г., г. Чэнду, Китай, 2014 г., г. Прага, Чехия, 2018 г., г. Лондон, Великобритания), International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (2013 г., г. Пиза, Италия, 2017 г., г. Сиань, Китай), 16th International Heat Transfer Conference (2018 г., г. Пекин, Китай), THINS 2014 International Workshop (2014 г., г. Модена, Италия), ASME 2014 Joint US-European Fluids Engineering Division Summer Meeting FEDSM 2014 (2014 г., г. Чикаго, США), Multiphase Flows - Simulation, Experiment and Application (2009, 2018, 2019 гг., г. Дрезден, Германия), International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Next Generation Nuclear Systems for Sustainable Development (FR17) (2017 г., г. Екатеринбург, РФ), 7th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics (2010 г., г. Анталья, Турция), 6th International Symposium Turbulence, Heat and Mass Transfer (2009 г., г. Рим, Италия), 6th International Symposium on Multiphase Flow, Heat Mass Transfer and Energy Conversion (2009 г., г. Сиань, Китай), Международной научно-практической конференции по атомной энергетике «Безопасность, эффективность, ресурс» (2017-2019 гг., г. Севастополь, РФ), Минский Международный форум по тепло- и массообмену (2008, 2012 гг., г. Минск, Республика Беларусь), Американо-Российском симпозиуме по гражданской ядерной энергетике (2013 г., г. Вашингтон, США);

- на российских конференциях: «Устойчивость и турбулентность течений гомогенных и гетерогенных жидкостей» (2005 г., г. Новосибирск, РФ), Российской национальной конференции по теплообмену (2006, 2010 гг., г. Москва, РФ), Межведомственном семинаре «Теплофизика 2008» (2008 г., г. Обнинск, РФ), Advanced Problems Mechanics (2009 г., г. Санкт-Петербург, РФ), МНТК «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР» (2009, 2011 гг., г. Подольск, РФ), Теплофизические

основы энергетических технологий (2011 г., г. Томск, РФ), Динамика многофазных сред (2015 г., г. Новосибирск, РФ), Сибирском теплофизическом семинаре (2005, 2017-2019 гг., Новосибирск, РФ), Семинарах ОАО «ТВЭЛ» по улучшению эксплуатационных характеристик АЭС с ВВЭР (2007-2013 гг., г. Обнинск, РФ).

Исследования проводились в рамках промышленных программ, проектов РФФИ, грантов Президента РФ для молодых кандидатов наук.

Публикации. По теме диссертации автором опубликовано 60 печатных работ, из них 22 – в ведущих реферируемых отечественных и зарубежных журналах из списка ВАК при Минобрнауки России (Журнал технической физики, Письма в ЖТФ, Теплофизика и Аэромеханика, Теплоэнергетика, ПМТФ, Int. J. of Heat and Mass Transfer, Journal of Engineering Thermophysics, Nuclear Engineering and Design, Energies, Journal of Physics: Conference Series); 37 – в материалах международных и российских конференций и семинаров. Одна статья автора включена в монографию.

Структура и объем диссертации. Диссертация изложена на 237 страницах машинописного текста, содержит 11 таблиц, 144 рисунка и состоит из введения, пяти глав и заключения. Библиографический указатель содержит 403 источника.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы цели и задачи. Показана научная новизна и практическая ценность полученных результатов.

В первой главе рассмотрены проблемы экспериментального моделирования гидродинамики и теплообмена при течении теплоносителя в элементах реакторных установок. Приведен обзор работ, описывающих исследования:

- термогидравлики одно - и двухфазных потоков в ТВС различных конструкций и компоновок твэлов, в том числе с ТЖМТ;
- локальной гидродинамики и теплообмена двухфазных пузырьковых и снарядных потоков, включая отрывные течения;
- гидродинамической и тепловой структуры потока при течении и перемешивании разнотемпературных потоков теплоносителя.

Исследования структуры потоков в ТВС РУ производится в течение многих лет. В 60х годах прошлого столетия основное внимание

было уделено исследованию интегральных параметров: осредненных скорости теплоносителя (u), напряжению трения на стенке (τ), температуры теплоносителя, определению коэффициентов трения (λ), гидравлического сопротивления (КГС, ξ) и теплообмена. Применялись отборы давления, трубки Пито и Престона, термопарные измерения.

Внедрение для исследования гидродинамики ТВС методов измерения с высоким временным разрешением: тонкопленочной анемометрии, лазерно-доплеровских измерителей скорости (ЛДИС), а в последние годы цифровой трассерной визуализации (Particle Image Velocimetry, PIV), позволяет производить измерения в областях потока, важных с точки зрения формирования локальных возмущений течения и наряду с осредненными параметрами течения получать компоненты пульсационной скорости течения теплоносителя, Рейнольдсовых напряжений, спектральных характеристик потока и т.д.

Дистанционирующие решетки, которые применяются для позиционирования твэлов, оказывают существенное влияние на локальные гидродинамические характеристики, распределение температуры и теплообмен потока теплоносителя. Коэффициент гидравлического сопротивления ТВС может существенно зависеть от типа и конструкции ДР. Для оптимизации работы РУ важную роль играет проведение детальных исследований локальных параметров течения, таких как скорость теплоносителя в ячейках, напряжение трения на стенке и пр. при вариации диаметра имитаторов твэлов и шага между ними.

Важное значение имеют двухфазные режимы течения теплоносителя, которые возникают при штатных и аварийных режимах работы РУ (течения в дренажных трубопроводах, в ТВС при обратной заливке, межконтурное взаимодействие теплоносителей, гидроударные явления). Моделирование таких течений газожидкостными течениями позволило обосновать некоторые базовые параметры. Экспериментальному исследованию структуры дисперсных газожидкостных потоков посвящен ряд работ отечественных и зарубежных авторов. Развитие теоретических моделей описания турбулентности в газожидкостном потоке сдерживается отсутствием достаточного количества экспериментальной информации для различных условий движения газожидкостных потоков. В последние 5–10 лет усиливается внимание различных исследовательских групп к двухфазным течениям в ТВС. Вопросы о распределении газовой фазы в ячейках ТВС, скорости движения пузырей и теплообмене двухфазного потока, взаимодействия пузырей с ДР остаются открытыми. Проводятся исследования процессов,

происходящих при взаимодействии газа и пара с ТЖМТ. Эти исследования важны для понимания процессов, происходящих при возникновении межконтурного взаимодействия в ПГ РУ с ТЖМТ.

При неізотермическом течении теплоносителя на стенках камер смешения возникают температурные напряжения, которые могут приводить к усталостному повреждению оборудования. Данные, полученные при исследовании смешения разнотемпературных потоков, являются актуальными с научной точки зрения (в рамках развития расчетных методов). В связи с важностью данной проблемы для безопасной эксплуатации элементов реакторных установок проводятся расчетно-экспериментальные исследования. Наибольшее количество работ посвящено исследованию процессов смешения водяного и воздушного теплоносителей с различной температурой, ограниченное количество исследований проведено с жидким натрием. Необходимо отметить, что для ТЖМТ подобных экспериментов не проводилось. В связи с необходимостью разработки РУ с ТЖМТ, выполнение подобных работ имеет приоритетное значение.

Вторая глава посвящена обзору современных методов исследования гидродинамической структуры одно- и двухфазных потоков. Приведено описание контактных и бесконтактных (неразрушающих) методов исследования и их ключевых особенностей.

Далее приведено описание методов измерений, которые были использованы в диссертационной работе. Локальное измерение скорости течения проведено с использованием ЛДИС, PIV, трубок Пито, распределений напряжения трения на стенке - электродиффузионного метода, температуры – с помощью микротермопар и скоростного тепловизора, выполнена высокоскоростная визуализация течений. Выполнен анализ неопределенности измерений δ . Эти величины равны:

- электродиффузионный метод измерения напряжения трения на стенке ($\delta = 4 \div 7 \%$);
- скоростная съемка (оригинальные методы обработки изображений двухфазных потоков ($\delta = 3 \div 5 \%$));
- цифровая трассерная визуализация (PIV) ($\delta \sim 4 \%$);
- лазерная доплеровская анемометрия ($\delta \sim 3 \div 5 \%$);
- датчики давления ($\delta = 2 \div 10 \%$);
- термография (в т.ч. скоростная), термопарные измерения ($\delta = 2 \div 7 \%$).

В третьей главе приведены результаты детальных экспериментальных исследований локальной гидродинамики и теплообмена одно- и двухфазных потоков водяного теплоносителя в 7 и 37 стержневых моделях ТВС с различными типами установленных решеток. Схема поперечного сечения используемых рабочих участков показана на рисунке 1. Диаметр стержней - имитаторов твэла составлял $D = 9, 10, 15$ мм, относительное расстояние между их осями $S/D = 1,2, 1,3, 1,4, 1,45$. Проведены исследования с использованием фрагментов ДР сотовой конструкции (более 10 типов) и модельных ДР (см. рисунок 1 б), толщина материала ДР $\sigma_{\text{реш}} = 0,25; 0,3; 0,4; 0,5, 0,6$ мм. Эксперименты проведены с водяным теплоносителем, при различных числах Рейнольдса потока ($Re = 500 \div 60000$), при температуре $25 \pm 0,2$ °С.

Получены данные об изменении напряжения трения на стенке стержня – имитатора твэла, скорости теплоносителя в ячейках, влиянии ДР на теплообмен и распределение локального газосодержания по высоте и поперечному сечению модели ТВС, перепаде давления в пучках стержней и на решетках различных конструкций.

Зависимость коэффициента трения в гладком пучке стержней λ от относительного шага между их центрами (S/D) в турбулентном режиме течения приведена на рисунке 2 а. Проведено сравнение с эмпирической корреляцией, учитывающей влияние относительного шага (Жуков и др. 1986). Расчет описывает экспериментальные данные с точностью порядка 10%.

Важным вопросом при течении теплоносителя в ТВС является азимутальная неравномерность распределения локальных гидродинамических параметров потока в межствольном пространстве. Проведено детальное исследование этого явления с вариацией диаметра стержней, относительного шага между ними, режима течения. Распределение относительного напряжения трения на стенке τ/τ_0 при ламинарном режиме течения и вариации геометрических параметров ($D, S/D$) приведено на рисунке 2 б. Линией показаны расчетные данные (Субботин и др., 1975). При относительном шаге расположения стержней $S/D = 1,2$ наблюдается достаточно большая неравномерность в распределении τ , достигающая величины порядка 20 %. Увеличение S/D приводит к более равномерному распределению τ . Изменение D практически не влияет на описанную выше картину.

Наличие ДР в ТВС приводит к возникновению возмущения течения теплоносителя, что в свою очередь сказывается на гидравлическом

сопротивлении ТВС, распределении скорости теплоносителя и интенсивности теплообмена.

Типичная зависимость коэффициента гидравлического сопротивления ДР ξ от числа Рейнольдса потока приведена на рисунке 3а. Показаны данные экспериментов, проведенных с ДР различной высоты $L_{\text{реш}}$ и толщины материала: ДР1 ($L_{\text{реш}}=25$ мм, $\sigma_{\text{реш}}=0,25$ мм) и ДР2 ($L_{\text{реш}}=30$ мм, $\sigma_{\text{реш}}=0,3$ мм). Каждая точка соответствует осредненным данным для не менее, чем 6 фрагментов 37 ячейчных дистанционирующих решеток одинаковой конструкции. Линиями приведены расчеты по корреляциям (Cigarini and Dalle Donne, 1988) и модели, учитывающей как затенение потока, так и высоту дистанционирующей решетки (Идельчик, 1992).

В ТВС РУ с водяным теплоносителем наряду с дистанционирующими решетками применяются перемешивающие решетки (ПР). Основным предназначением подобных решеток является увеличение запаса до кризиса теплообмена при более равномерном распределении температуры по сечению ТВС. Для определения оптимального расстояния L между ДР и ПР, проведены детальные исследования перепада давления в модели ТВС с последовательно установленными дистанционирующей и перемешивающей решетками при вариации Re . В результате показано (см. рис. 3 б), что ξ системы решеток близко сумме сопротивлений отдельных ДР и ПР.

В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что при обтекании потоком жидкости ДР возникают существенно неравномерные распределения скорости теплоносителя (см. рисунок 4), напряжения трения на поверхности стержня – имитатора твэла (см. рисунок 5) в зависимости от азимутального угла вокруг стержня. Из-за смыкания сот ДР, вокруг твэлов создается три «открытых» и три «закрытых» ячейки (см. рисунок 1 а). Это существенно сказывается на гидродинамической структуре течения (наиболее выражено на малых расстояниях ниже по потоку от ДР - Z).

В центральной области «открытой» ячейки относительная скорость течения жидкости u/u_0 , где u – вертикальная компонента скорости, u_0 – осредненная осевая скорость в гладком пучке стержней, выше, чем для «закрытой» (см. рис. 4). Влияние ДР также хорошо видно по распределению относительного напряжения трения на стенке имитатора твэла τ/τ_0 , где τ – напряжение трения на стенке в данной точке, τ_0 – напряжение трения на стенке в невозмущенном потоке (см. рис. 5).

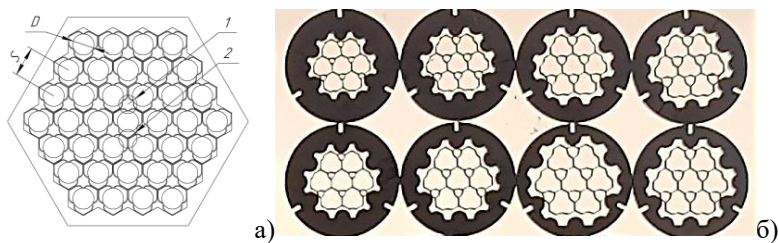


Рисунок 1 – Поперечные сечения 37ми (а) и 7ми (б) стержневых сборок: 1 – «открытая» ячейка; 2 – «закрытая» ячейка.

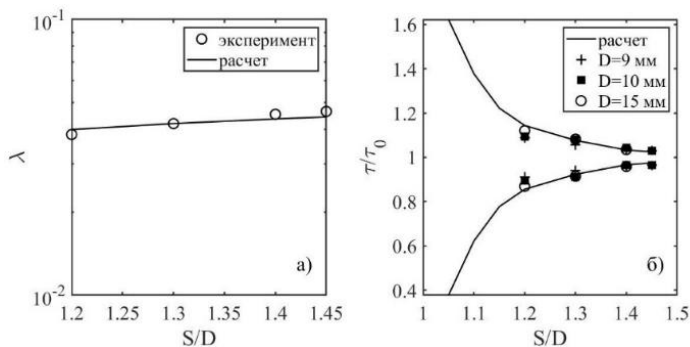


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента трения (а) и азимутальной неравномерности касательных напряжений (б) от относительного шага в пучке стержней.

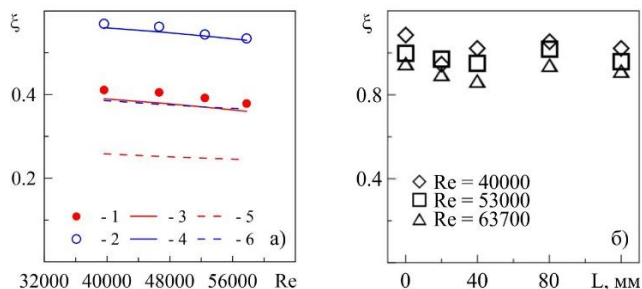


Рисунок 3 – Коэффициент гидравлического сопротивления ДР (а): 1, 2 – экспериментальные данные для ДР1 и ДР2, 3, 4 – расчеты по корреляции (Идельчик, 1992); 5, 6 – расчеты по корреляции (Cigarini and Dalle Donne, 1988); зависимость КГС от расстояния между ДР и ПР (б).

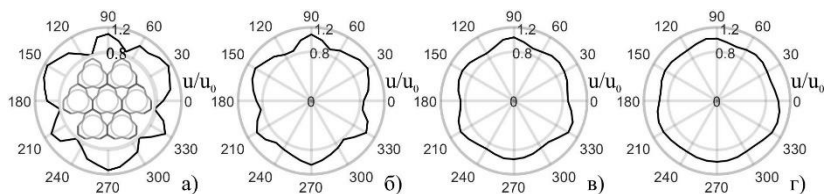


Рисунок 4 – Распределение относительной скорости теплоносителя вокруг центрального имитатора твэла: а – $Z/D = 1$; б – $Z/D = 3$; в – $Z/D = 5$; г – $Z/D = 9$.

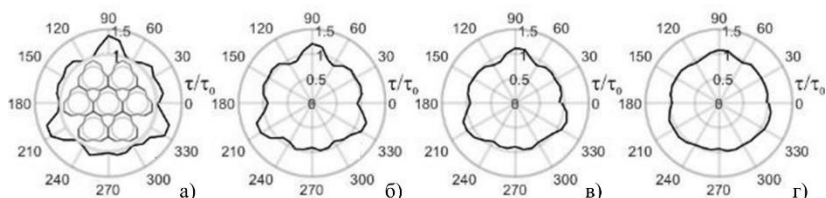


Рисунок 5 – Распределение относительного напряжения трения на стенке центрального имитатора твэла: а – $Z/D = 1$; б – $Z/D = 3$; в – $Z/D = 5$; г – $Z/D = 9$.

В рамках диссертационного исследования впервые проведены измерения скорости жидкости в межтвэльном пространстве в 7-ми и 37-ми ячейковых моделях ТВС РУ АЭС-2006 за дистанционирующей решеткой с помощью лазерного доплеровского измерителя скорости (ЛДИС). На рисунке 6 приведены распределения осевой скорости течения по поперечной координате между двумя соседними стержнями – имитаторами твэла ($V_{\text{ж}}$ - расходная скорость жидкости). Эти данные подтверждают описанные выше особенности течения за ДР с учетом наличия «открытых» и «закрытых» ячеек. Указанные закономерности подтверждены с помощью трубки Пито.

Полученные в 7-ми ячейковой модели ТВС распределения относительных пульсаций скорости в межтвэльном пространстве u'/u и напряжения трения на стенке τ'/τ приведены на рисунке 7. Установлено, что наличие ДР в потоке приводит интенсификации степени турбулентности течения. Относительные пульсации скорости в ячейках u'/u и напряжения трения на стенке имитаторов твэлов τ'/τ достигают значений порядка $0,15 \div 0,2$. При удалении от ДР происходит восстановление локальной гидродинамической структуры потока. В этой области u'/u в центрах ячеек достигает значений $0,05 \div 0,06$, а τ'/τ - около 0,15.

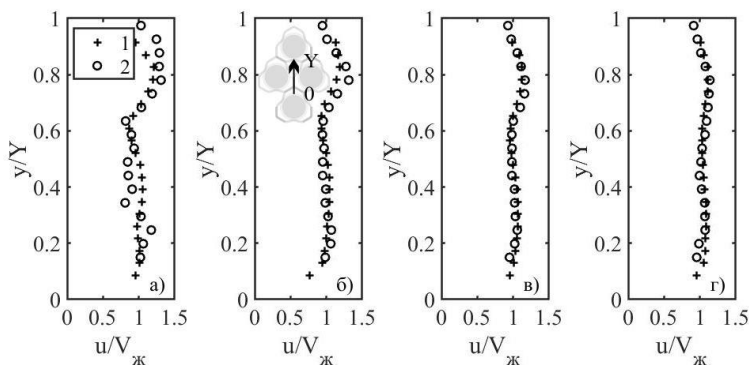


Рисунок 6 – Распределение относительной скорости в межствольном пространстве, полученные с помощью ЛДИС (1) и трубки Пито (2): а – $Z/D = 1$; б – $Z/D = 3$; в – $Z/D = 5$; г – $Z/D = 9$.

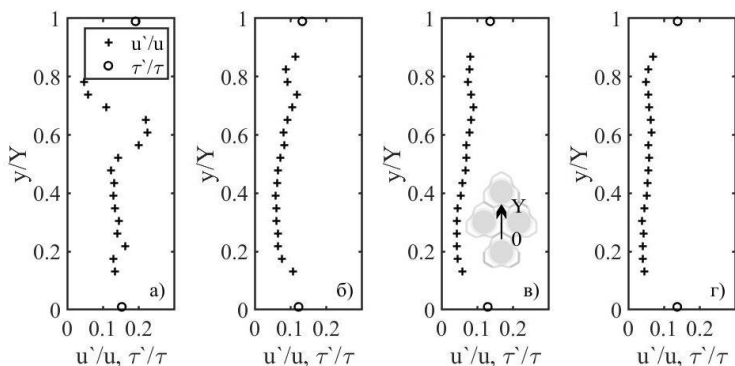


Рисунок 7 – Распределение относительных пульсаций скорости в межствольном пространстве u'/u и напряжения трения на стенке τ'/τ : а – $Z/D = 1$; б – $Z/D = 3$; в – $Z/D = 5$; г – $Z/D = 9$.

Изменение локальных параметров течения за ДР обусловлено перестройкой течения жидкости, приводящей к ускорению течения и возникновению «струй» жидкости, которые распространяются на расстояние $4 \div 7 D$ вниз по течению. Установлено, что максимальные и минимальные значения u , τ в этой области отклоняются от среднего более чем на 20%. Азимутальная неравномерность распределения осевой скорости и напряжения трения имеет тенденцию к снижению с увеличением шага между стержнями и расстояния от ДР. Измеренные в

диапазоне Re от 8000 до 60000 относительные осредненные и пульсационные значения гидродинамических параметров (u , τ) остаются практически постоянными, в том числе при изменении D .

Выполненные измерения также показали, что непосредственно за решеткой наблюдается интенсификация теплообмена в сравнении с невозмущенным потоком (см. рисунок 8 а), ее величина зависит от формы ячейки ДР, в частности от толщины материала. Установлено что чем больше толщина материала, тем выше параметр интенсификации теплообмена, определяемый по отношению Nu/Nu_0 , где Nu_0 – данные для гладкого пучка стержней. Расположение области интенсификации теплообмена примерно совпадает с областью возмущения потока ДР.

Ниже по течению располагается область восстановления потока. Для ДР1 наблюдаются значения коэффициента теплоотдачи, близкие к измеряемым в невозмущенном потоке. При увеличении $S_{\text{реш}}$ (ДР2) может наблюдаться ухудшение теплообмена на величину порядка 5-10%.

Рекомендованные за рубежом эмпирические корреляции для определения влияния ДР на теплообмен, например (Yao et.al. 1982, Holloway et.al 2005 и др.) были получены в геометрии, соответствующей РУ типа pressured water reactor (PWR). В рамках данной работы проведена аппроксимация полученных экспериментальных данных и предложена корреляция для определения интенсификации теплообмена за ДР, которая описывает результаты экспериментов с точностью порядка 5% (см. рисунок 8 а).

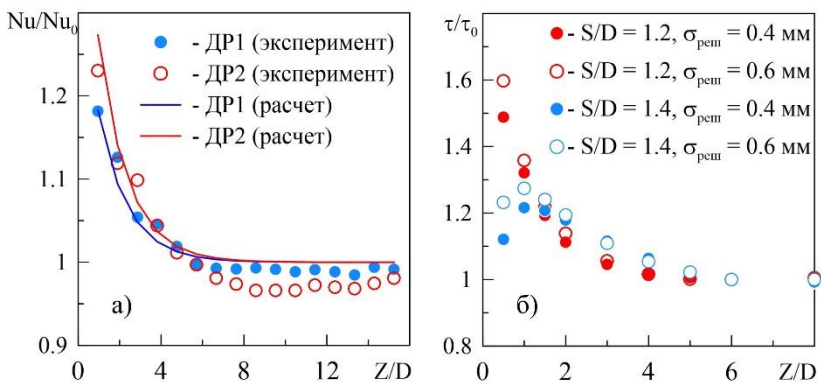


Рисунок 8 – Параметр интенсификации теплообмена (а) и распределение касательных напряжений (б) на разных расстояниях от ДР.

Распределение осредненного по азимутальному углу напряжения трения на стенке имитатора твэла ниже ДР по потоку приведено на рисунке 8 б. Данные получены в 7ми стержневой модели ТВС при $Re = 10000$. Для $S/D = 1,2$ напряжения трения непосредственно за решеткой выше, чем для большего относительного шага. Увеличение напряжения трения на стенке в сравнении с невозмущенным потоком достигает 50-60% для $S/D = 1,2$ и 20-30% для $S/D = 1,4$. Это объясняется тем, что при одинаковой толщине материала решетки площадь затенения выше при малом относительном шаге.

При кипении теплоносителя в ТВС происходит формирование двухфазного потока. В связи с этим проведено моделирование такого течения на примере газожидкостного потока. Были детально исследованы режимы течения, эволюция пузырьков по высоте и поперечному сечению ТВС, влияние пузырей на теплообмен между твэлом и потоком.

Данные о зависимости средней скорости пузырей в межтвэльном пространстве от приведенной скорости жидкости приведены на рисунке 9 а. Обнаружен линейный рост скорости пузырей с увеличением скорости жидкости. Подобное поведение пузырей может быть предсказано по корреляции (Venkateswararao et.al. 1982). Расчетные данные находятся в пределах неопределенности экспериментальных данных и эту зависимость можно использовать для определения скорости пузырей в ТВС.

Визуальные наблюдения показали наличие в потоке крупных газовых включений, размеры которых превосходят сечение ячейки и элементов ДР. С помощью метода проводимости выполнены измерения размеров пузырей на расстояниях 60 мм до ДР и 20, 100 и 240 мм ниже по потоку. Можно отметить наличие достаточно большого количества относительно крупных пузырей перед ДР (см. рис. 9 б). После прохождения двухфазным потоком ДР форма гистограммы меняется: доля мелких пузырей в потоке значительно увеличивается, а крупных – снижается. Это говорит о дроблении крупных пузырей при их взаимодействии с ДР.

За ДР и ПР наблюдалось формирование пузырьковых «факелов», которые приводят к увеличению газосодержания непосредственно за решеткой (см. рис. 9 в). Повышенное газосодержание наблюдается в области длиной $2 \div 4 D$ (в зависимости от конструкции решетки). Увеличение газосодержания по сравнению с основным потоком составляет от 10 до 30%. Наличие перемешивающей решетки приводит к частичному перераспределению газа в соседние каналы.

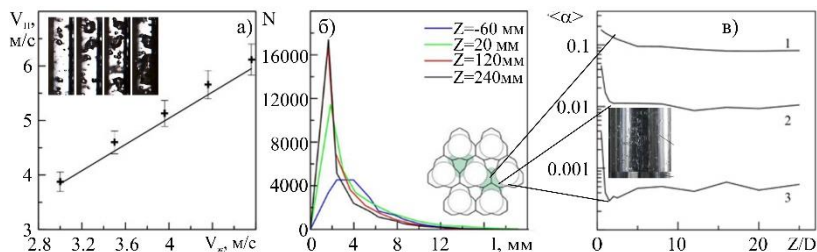


Рисунок 9 – Скорость движения пузырей (а), гистограммы распределения размеров пузырей (б) и локальное газосодержание ниже ДР по потоку (в) в 37 стержневой сборке.

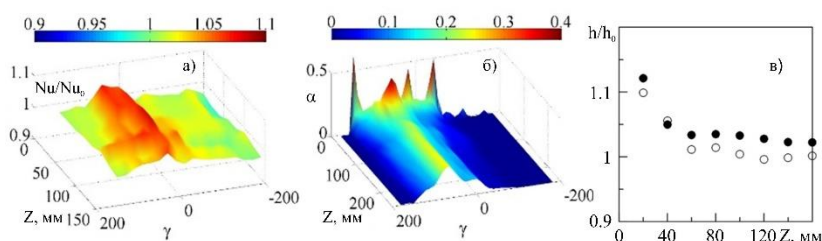


Рисунок 10 – Параметр интенсификации теплообмена (а), распределение локального газосодержания (б) в 37ми стержневой сборке стержней, распределение коэффициента теплообмена за ДР (в): открытые символы – однофазный поток; закрытые символы – двухфазный поток.

Проведена оценка влияния пузырей на интенсификацию теплообмена Nu/Nu_0 (см. рисунок 10 а). Данные о распределении локального газосодержания α для этого эксперимента приведены на рисунке 10 б. Здесь γ – азимутальный угол поворота имитатора твэла, на котором производились измерения. Можно отметить, что на удалении от ДР при значениях локального газосодержания α около 0,3 наблюдается интенсификация теплообмена на величину порядка 6÷8% (см. рисунок 10 в).

Непосредственно за ДР влияние пузырей на теплообмен практически отсутствует, и интенсификация теплообмена определяется образованием «струй» теплоносителя за ДР. Значительное влияние пузырей на теплообмен начинается на расстоянии 4÷6 D от ДР и ниже по потоку.

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований локальных гидродинамических характеристик и теплообмена двухфазных течений. Наряду с водо-водяными реакторами такие

течения могут возникать и в РУ с ТЖМТ. Одним из важных процессов является вероятное межконтурное взаимодействие потока ТЖМТ и водяного теплоносителя второго контура. Так, при разрыве трубки ПГ парожидкостная смесь под высоким давлением попадет в нисходящий поток свинцового теплоносителя. Эксперименты по моделированию разрыва трубки с газом, находящимся под высоким давлением ($P_0 > 10$ МПа) в нисходящем потоке прозрачной жидкости в трубном пучке между трубными решетками, указывают на возможность появления следующих характерных явлений (см. рисунок 11):

- формирование пузырькового потока в ТЖМТ;
- возникновение блокад течения ТЖМТ области разрыва, течение с частичным затенением потока;
- появление вблизи места разрыва крупного присоединенного пузыря;
- осцилляции формы пузыря и давления;
- отрыв пузырькового потока за трубной доской;
- нисходящее пузырьковое течение.

Эти явления были рассмотрены в работе более подробно на основе моделирования течений газожидкостным потоком.

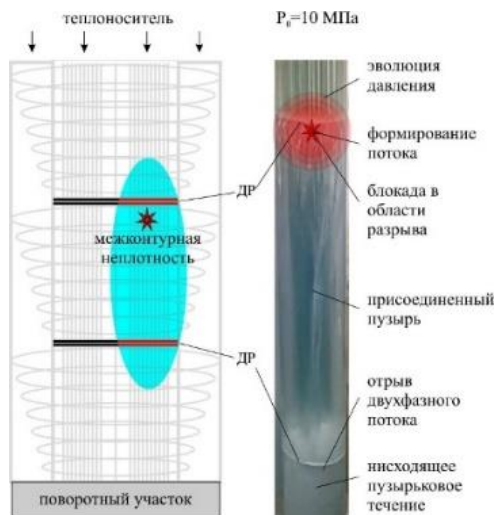


Рисунок 11 – Процессы, которые могут протекать при аварии типа «межконтурная неплотность» в ПГ РУ с ТЖМТ.

В работах (Кашинский, Рандин 1999 а,б) было показано, что в нисходящем пузырьковом течении может наблюдаться подавление турбулентности в области вблизи стенки канала. Однако степень влияния данного явления на локальную гидродинамическую структуру и теплообмен до сих пор не была выявлена. В рамках данной работы проведено исследование локальной гидродинамической структуры и теплообмена нисходящего пузырькового потока.

Результаты измерений напряжения трения на стенке одно- и двухфазного потоков с помощью электродиффузионного метода приведены на рисунке 12. Плотность вероятности распределения пульсаций трения приведена на рисунке 12 а. Заметим, что форма распределения в однофазном потоке отличается от распределения Гаусса, зависимость несимметрична, что находится в хорошем соответствии с данными (Keirbulck et. al. 2012), полученными с помощью различных экспериментальных и расчетных методов.

В двухфазном потоке форма распределения пульсаций трения изменяется. При расходных газосодержаниях $\beta=0,01$ это изменение незначительно, однако увеличение расходного газосодержания приводит к более равномерному распределению пульсаций, и кривая приближается к распределению Гаусса. Таким образом, наличие пузырей в потоке оказывает существенное влияние на распределение статистических характеристик распределения напряжения трения на стенке. Введение в поток даже малых объемов газовой фазы ($\beta=0,01$) при относительно крупных размерах пузырей $d_{п}$ может приводить к увеличению, а относительно малых $d_{п}$ – к снижению гидравлического сопротивления.

Рассмотрим данные, полученные при спектральном анализе сигнала датчика напряжения трения на стенке для однофазного потока и потоков с пузырями (см. рис. 12 б-в). Данные приведены в безразмерном виде f/S_0 , $WS_0/(\tau_w)^2$, где f – частота, W – спектральная плотность мощности, $S_0=V^{*2}/\nu$, $V^*=(\tau_w/\rho)^{1/2}$ – динамическая скорость, ρ – плотность жидкости. Спектр сигнала, полученного в однофазном потоке, находится в хорошем соответствии с результатами, представленными в (Keirbulck et. al. 2012). Добавление пузырей приводит к изменению спектра сигнала. В области средних частот появляется область, соответствующая закону распределения $1/f$ (фликкер-шум), что, видимо, является характерным для течений с пузырями относительно малых размеров. Для относительно крупных пузырей в области высоких частот кривая подчиняется закону $f^{-8/3}$, что было ранее показано для поведения

характеристик пузырьковых потоков в литературе, а при больших газодержаниях выполняется закон f^{-4} .

Результаты измерений при постоянных расходах жидкой и газовой фаз ($Re = 5000$, $\beta = 0,01$) и контролируемой степени дисперсности газовой фазы приведены на рисунке 13. Гистограммы распределения диаметров пузырей, полученные при компьютерной обработке теневых изображений двухфазного потока, приведены на рисунке 13 а.

Изменения напряжения трения на стенке и теплообмена, происходящие при добавлении в поток жидкости газовых пузырей разных размеров, можно оценить по данным, приведенным на рисунке 13 б. Можно заметить, что добавление малых пузырей практически не приводит к изменению напряжения трения на стенке в двухфазном потоке τ в сравнении с однофазным потоком (τ_0). При увеличении d_n наблюдается рост отношения τ/τ_0 и для наибольшего из рассмотренных размеров пузырей это отношение превышает 2.

Поведение зависимости отношения числа Нуссельта в двухфазном потоке Nu к числу Нуссельта в однофазном потоке Nu_0 от d_n качественно подобно распределению $\tau/\tau_0(d_n)$. Следует выделить основные отличия. При малых d_n наблюдается ухудшение теплообмена в сравнении с однофазным потоком. При прекращении подачи газа измеряемые значения коэффициента теплообмена соответствуют расчету по классическим формулам для теплообмена в гладкой трубе. При увеличении размеров пузырей наблюдается интенсификация теплообмена, однако отношение Nu/Nu_0 достигает меньшего значения в сравнении с τ/τ_0 , а именно $\sim 1,5$. Линиями на рисунке приведены данные расчёта (Лобанов и др. 2020).

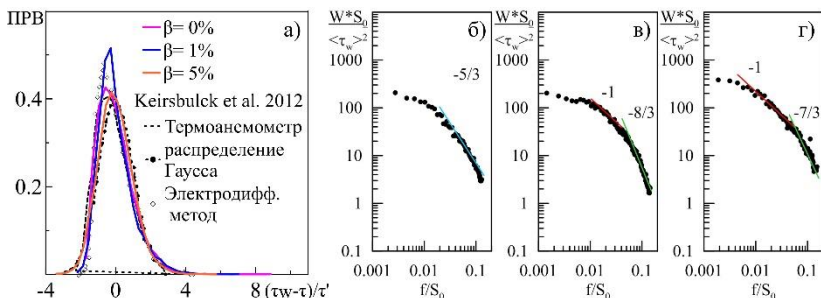


Рисунок 12 – Распределение пульсаций напряжения трения на стенке (а), спектр сигнала датчика трения: б – однофазный поток; в – $d_n = 2$ мм; г – $d_n = 0,5$ мм.

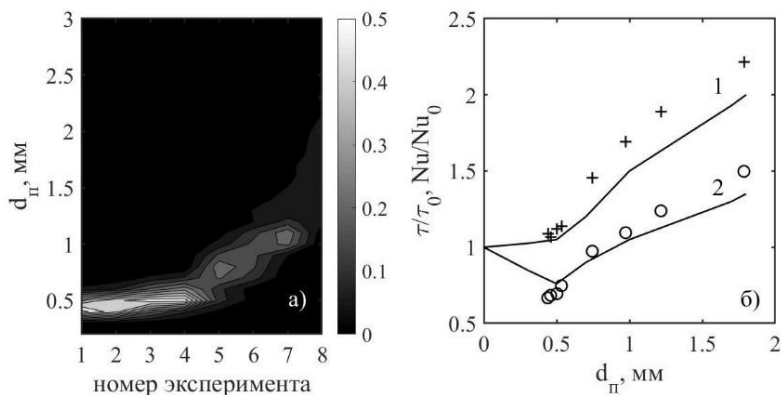


Рисунок 13 – Распределение размеров пузырей (а); экспериментальные и численные данные о распределении коэффициентов трения (1) и теплообмена (2) при постоянных расходах жидкости и газа и вариации размеров пузырей (б).

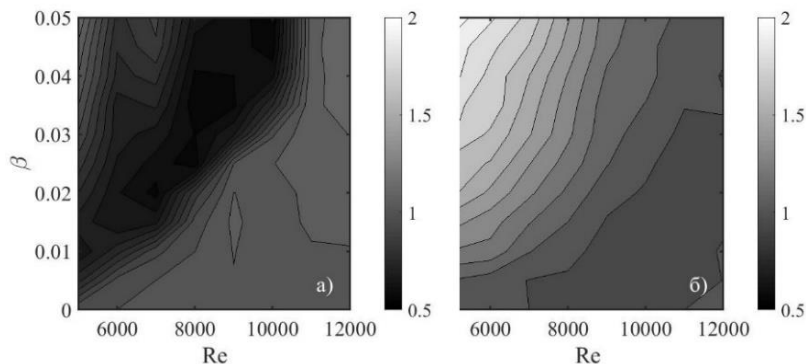


Рисунок 14 – Параметр интенсификации теплообмена Nu/Nu_0 в нисходящем пузырьковом потоке: а – $d_p = 0,2$ мм; б – $d_p = 2,2$ мм.

Проведены детальные исследования теплообмена нисходящего пузырькового потока при вариации размеров дисперсных включений (см. рисунок 14). Число Рейнольдса в ходе экспериментов изменялось в диапазоне $5000 \div 12000$ с шагом 1000, относительное расходное газосодержание β изменялось в пределах $0 \div 0,05$. Средний размер малых пузырей находился в диапазоне $0,17 \div 0,2$ мм, средний диаметр крупных пузырей был около 2,2 мм. Наличие в потоке пузырей крупных размеров

приводит к интенсификации турбулентности и, соответственно, теплообмена, а мелких – к достаточно выраженному (до -40%) подавлению теплообмена за счет «реланимаризации» потока. С увеличением Re начало возникновения эффекта подавления теплообмена смещается в область более высоких β . При Re выше 10000 эффектов интенсификации и подавления теплообмена обнаружено не было.

Впервые выполнены исследования локальной гидродинамической структуры нисходящего пузырькового потока с помощью цифровой трассерной визуализации PIV, характерные результаты измерений приведены на рисунке 15 (y – расстояние от стенки, D – диаметр трубы). Эксперименты проведены при $Re = 5000$, $\beta = 0,01$.

Распределение скоростей фаз в потоке приведено на рисунке 15 б. В однофазном потоке профиль скорости жидкости соответствует развитому турбулентному режиму течения. При добавлении в поток пузырей со средними диаметрами 1,2 мм наблюдается большой градиент скорости в пристенной области, а в центре потока скорость жидкости распределена равномерно. При $d_{п}=2,1$ мм в пристенной области потока наблюдается максимум скорости жидкости. Причиной возникновения этого эффекта является загромождение центральной области канала пузырями. Скорость скольжения пузырей примерно соответствует скорости всплытия пузырей в покоящейся жидкости.

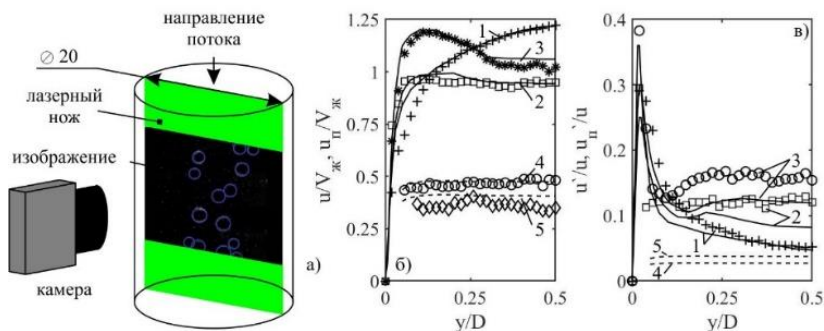


Рисунок 15 – Схема проведения эксперимента (а), распределение скорости жидкости (б) и пульсационных характеристик жидкой и газовой фаз (в) в нисходящем потоке при $Re = 5000$, $\beta = 1\%$. Точки – эксперимент, линии – расчет: сплошные линии – несущая фаза, пунктирные – газовые пузыри: 1 – однофазный поток; 2 – $d_{п} = 1,2$ мм; 3 – $2,1$ мм; 4, 5 – средние скорости и пульсации скоростей малых ($d_{п} = 1,2$ мм) и крупных ($d_{п} = 2,1$ мм) пузырей.

Пульсационные характеристики потока показаны на рис. 15 в. Для однофазного потока значения u'/U в пристенной области составляют примерно 0,3, а в центре трубы 0,05, что соответствует приведенным в литературе данным. В центральной области пузырькового потока с малыми пузырями наблюдается практически равномерное распределение. В этой области величина $u'/U \approx 0,11$. Добавление в поток более крупных пузырей приводит к большему возмущению течения в центральной области. Здесь величина интенсивности пульсаций скорости жидкой фазы $u'/U \approx 0,15$. Линиями на рисунках показаны расчеты (Evdokimenko et. al. 2020).

Отрывные двухфазные течения могут возникать при движении кипящего теплоносителя в ТВС, за трубными досками при разрыве теплообменных трубок ПГ и т.д. Результаты исследования локальной гидродинамики и теплообмена отрывного пузырькового потока в цилиндрической трубе приведены на рисунках 16, 17. Фотография отрывной области потока приведена на рисунке 16 а. За внезапным расширением трубы форма пузырей значительно отличается от круга или эллипса. В связи с этим размеры пузырей определялись с помощью теневой видеосъемки и последующей компьютерной обработки изображений до начала отрывной области. Средний диаметр пузырей находился в пределах $1,6 \div 2,3$ мм.

На рисунке 16 б приведены данные о распределении локального газосодержания, полученные с помощью планарной лазерной флуоресценции (PLIF). Известно, что в восходящем пузырьковом потоке могут формироваться седлообразные профили газосодержания. Это приводит к наличию в набегающем потоке ярко выраженных максимумов газосодержания в пристенной области. При удалении от области расширения потока происходит перестроение профилей газосодержания. Образованные профили локального газосодержания имеют максимум в пристенной области, а центральная часть потока остается практически свободной от пузырей по всей длине отрывной области.

Пример результатов исследования теплообмена пузырькового течения за внезапным расширением трубы приведен на рисунке 16 в. Эксперименты выполнены при $Re = 10200, 20000$ и 31500 и $\beta = 0,035$. В отрывной области потока наблюдается значительная интенсификация теплообмена, позиция области с наиболее выраженным эффектом примерно совпадает с расположением точки присоединения потока. Влияние пузырей на теплообмен в этом регионе практически отсутствует. В области восстановления потока пузыри перераспределяются в сечении трубы см. рис 16 б, в этой области наблюдается интенсификация

теплообмена в пузырьковом потоке в сравнении с однофазным. Данный эффект возрастает с увеличением Re и β . При $Re = 10200$ и $\beta = 0,1$ коэффициент теплообмена возрастает примерно на 300%. Таким образом, теплообмен отрывного потока в трубе и в ТВС с ДР качественно подобен.

С помощью метода PIV показано, что причиной интенсификации теплообмена в области восстановления потока является более высокий градиент скорости жидкости в пристенной области двухфазного потока в сравнении с однофазным (см. рис. 17). В отрывной области потока профили скорости жидкости для однофазного и двухфазного течений практически одинаковы. Полученные результаты находятся в хорошем соответствии с расчетами, выполненными в ИТ СО РАН (Lobanov, Pakhomov and Terekhov, 2018).

Было проведено исследование локальных осредненных и пульсационных характеристик одно- и двухфазных отрывных течений в кольцевом канале с частичным затенением сечения (см. рис. 18 а). Преграда, занимавшая 25% поперечного сечения канала, показана на рисунке серым цветом.

С помощью электродиффузионного метода получены азимутальные распределения напряжения трения и его пульсаций на различном расстоянии от преграды Z (см. рис. 18 б,в). В непосредственной близости от перегородки наблюдается сложная структура распределения напряжения трения по периметру внутренней трубы, содержащая выраженный минимум в затененной области сечения канала и два максимума, расположенных по краям этой зоны (см. рис. 18 б). При увеличении z наблюдается выравнивание азимутального распределения τ/τ_0 , однако слабое искажение структуры течения заметно при $Z > 600$ мм.

Распределение турбулентных пульсаций напряжения трения на стенке трубы при $Z < 200$ мм характеризуется резким возрастанием в затененной области и небольшим снижением в свободном сечении канала (см. рис. 18 в). На расстоянии более 400 мм от перегородки измеренные значения интенсивности турбулентных пульсаций потока соответствуют таковым при турбулентном течении невозмущенной жидкости.

При взаимодействии двухфазного потока с преградой непосредственно за областью блокировки обнаружено повышение газосодержания (см. рис. 19 а) и его неравномерное распределение в сечении канала. Ниже преграды по потоку наблюдается перестроение структуры двухфазного течения и переход от параболических профилей

газосодержания (см. рис. 19 а) к седлообразным (см. рис. 19 б). Изучение подобных эффектов важно для верификации кодов многофазной вычислительной гидродинамики (MCFD).

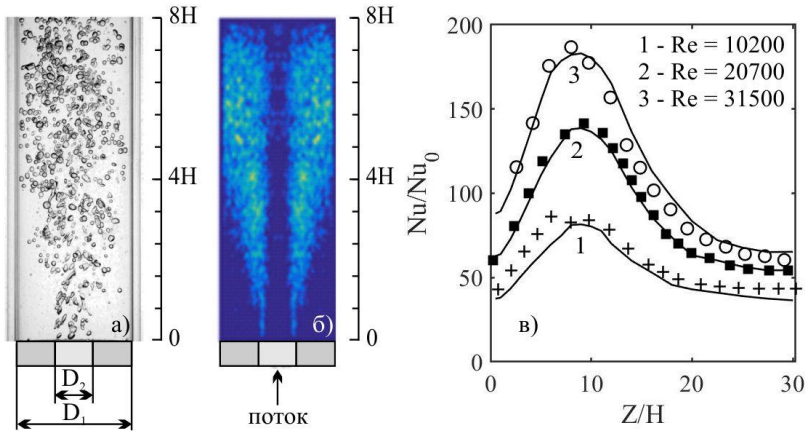


Рисунок 16 – Фотографии потока за внезапным расширением трубы $D_1 = 42$ мм, $D_2 = 15$ мм (а), распределение локального газосодержания (б) и число Нуссельта (в) за внезапным расширением трубы в пузырьковом потоке ($\beta = 0,035$).

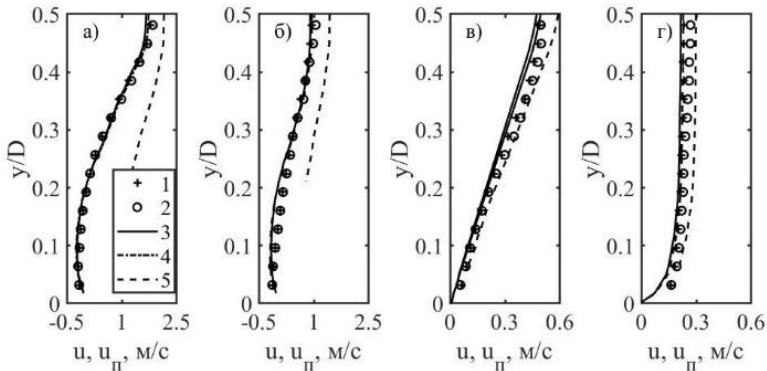


Рисунок 17 – Распределение скорости жидкости и пузырей газа за внезапным расширением трубы: 1 – u при $\beta = 0$ (эксперимент); 2 – u при $\beta = 0,035$ (эксперимент); 3 – u при $\beta = 0$ (расчет); 4 – u при $\beta = 0,035$ (расчет); 5 – u_p при $\beta = 0,035$ (расчет): а, б, в, г – $Z/D_1 = 2, 4, 6, 8$.

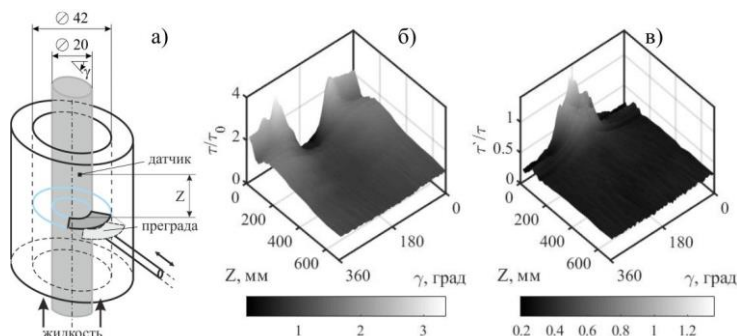


Рисунок 18 – Схема проведения эксперимента (а), поля напряжения трения на стенке (б) и его относительных пульсаций (в) в кольцевом канале с частичным затенением сечения.

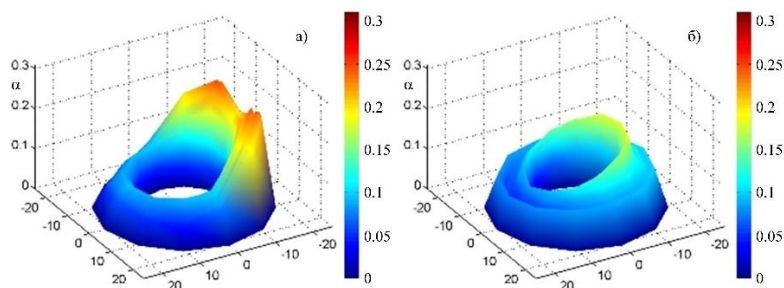


Рисунок 19 – Распределение локального газосодержания в кольцевом канале с преградой: а – $Z = 100$ мм; б – $Z = 300$ мм.

Для понимания закономерностей процессов, происходящих при малой течи теплоносителя второго контура в ПГ РУ с ТЖМТ выполнено экспериментальное исследование формирования пузырей и скорости их движения в расплавах свинца и сплава Розе. Стенд, на котором были проведены исследования, оснащен системами подвода газа, частоты генерации пузырей и сдвоенного игольчатого датчика электропроводности. Газ аргон подавался в ТЖМТ через трубку внешним диаметром 4 мм и внутренним диаметром 3 мм, расход газа варьировался в пределах $Q_F = 10 \div 1000$ мл/мин.

Зависимость объема пузырей, формируемых в ТЖМТ, $V_{\text{п}}$ от Q_F приведена на рисунке 20 а. Для сравнения на рисунке приведены данные, рассчитанные по модели, предложенной (Oguz, Prosperetti, 1993). С помощью предложенной модели получено удовлетворительное

описание результатов экспериментов в режиме отрыва пузырей, в котором их отрывной диаметр зависит от Q_T . При малых Q_T отрывной диаметр определяется балансом сил Архимеда и поверхностного натяжения и не зависит от расхода газа, что в данной модели не учитывалось.

Проведена визуализация движения пузырей газа в вертикальных цилиндрических каналах, заполненных модельным ТЖМТ, для чего была разработана оригинальная методика. Выполнены эксперименты по эволюции пузырей аргона, паров спирта и воды в свинцовом теплоносителе, находящемся при температуре 400°C . Движущиеся у стенки пузыри газа или пара хорошо различимы. Плотность распределения вероятности для скорости всплытия пузырей показана на рисунке 20 б. При этом большая часть пузырей не видима и пузыри могут двигаться в цепочках, что может приводить к существенному увеличению их скорости. Видимые размеры пузырей находились в пределах 4 до 12 мм по максимальной координате. Средняя скорость движения пузырей около 0,4 м/с, что соответствует недавно полученным в литературе данным по движению пузырей в расплавах цинка и GaInSn.

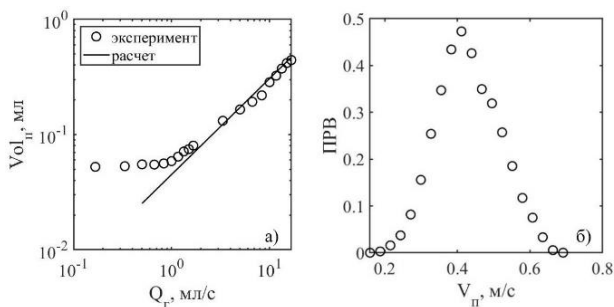


Рисунок 20 – Объем пузыря при отрыве (а) и скорость всплытия (б) пузырей в свинцовом теплоносителе.

Для определения закономерностей, возникающих при гильотинном разрыве теплообменных трубок ПГ, проведены исследования эволюции давления и свободного уровня при внезапном впрыске дисперсной фазы в заполненный ТЖМТ (сплав Розе) вертикальный канал (трубы с внутренним диаметром 26 мм). Эксперименты проводились при вариации уровня теплоносителя и начального избыточного давления. Полученные экспериментальные результаты приведены на рисунке 21 в виде линий черного цвета.

При инъекции газа наблюдается практически линейное увеличение уровня. При этом происходит образование пузыря Тейлора,

окруженного пузырями мелких размеров. После окончания формирования двухфазной области начинается колебательный процесс, связанный с возвратным движением теплоносителя и пульсациями объема пузырей. Характерные частоты процесса не превышают 5 Гц, время - не более 4-5 секунд. Пиковые значения давления могут существенно превышать начальное избыточное давление. Полученные данные были использованы в ИБРАЭ РАН для настройки теплогидравлического кода HYDRA/IBRAE/LM (линии красного цвета на рисунках).

Для понимания явлений, происходящих при аварии типа «межконтурная неплотность», проведены исследования гидродинамической картины в потоке с присоединенным газовым пузырем при вариации расходной скорости жидкости $V_{ж}$ (см. рисунок 22). Эксперименты были проведены в рабочем участке, где были проведены исследования гидродинамики и теплообмена нисходящего пузырькового потока. Данные о распределении скорости жидкости, полученные с помощью PIV (см. рис. 22 а, б), показывают равномерное распределение скорости жидкости на удалении от стенки. В пристенной области градиент скорости жидкости соответствует для различных расходов жидкости. Этот вывод подтверждается результатами измерений напряжения трения на стенке вокруг длинного присоединенного пузыря (см. рис. 22 в). Эксперименты проведены с помощью электродиффузионного метода. В начальной области течения вокруг крупной газовой каверны касательные напряжения не зависят от скорости жидкости. При удалении от носика пузыря на расстояние около 10 калибров трубы, наблюдается расслоение зависимостей, полученных при разных расходах жидкости. Предельные значения для каждой скорости совпадают с предсказанием по формуле (Nusselt 1917).

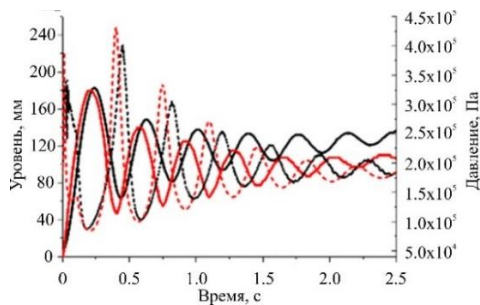


Рисунок 21 – Эволюция характеристик потока при впрыске газа в объем теплоносителя: пунктирная линия – давление; непрерывная линия – уровень свободной поверхности.

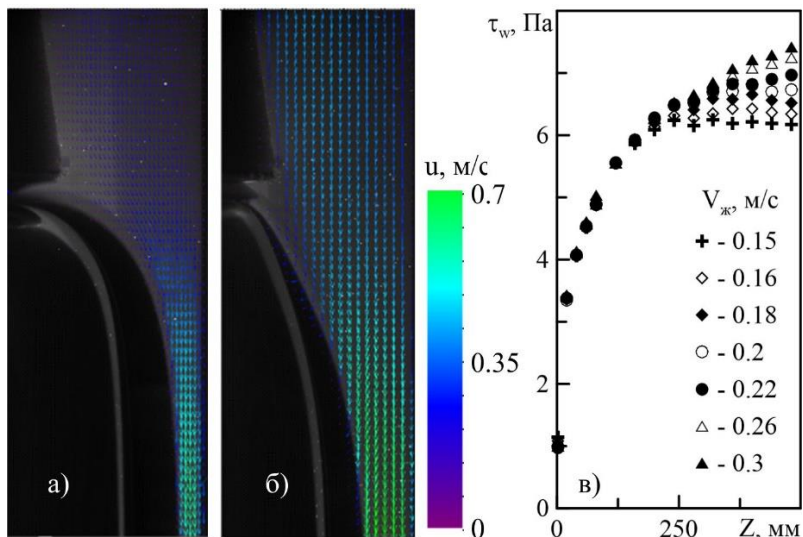


Рисунок 22 – Поля скорости жидкости при $V_{ж} = 0,15$ м/с (а), $V_{ж} = 0,3$ м/с (б), и распределение касательных напряжений на разных расстояниях от носика присоединенного пузыря (в).

В **пятой главе** приведены результаты исследований неизотермических течений ТЖМТ, встречающихся при смешении потоков теплоносителя с различной температурой в соединениях трубопроводов или ячейках ТВС в случае неравномерного тепловыделения твэлов. Для течений ТЖМТ, имеющих низкие числа Прандтля, подобных экспериментальных исследований ранее не проводилось.

Экспериментальное моделирование смешения двух разнотемпературных потоков ТЖМТ было проведено в Т-образном соединении труб. В качестве рабочей жидкости использовался сплав Розе, близкий по физическим свойствам к свинцовому теплоносителю. Схема течения в тройниковом соединении приведена на рисунке 23а. Внутренние диаметры основной трубы и бокового подвода составляли 20 и 8 мм соответственно. Толщина стенок материала смесителя – 1 мм. Были проведены измерения распределений температуры жидкости по поперечному сечению и стенки в области смешения. Отношение расходов «горячей» и «холодной» жидкостей $Q_{гор}/Q_{хол}$ изменялись в диапазоне от 0,02 до 0,63. Температуры этих потоков составляли $T_{гор}=150$ °С, $T_{хол}=120$ °С. Число Рейнольдса «холодного» потока жидкости, который подавался в трубу диаметром 20 мм, изменялось от 6500 до 14500.

Профили температуры жидкости в зоне смешения были измерены микротермопарой, перемещаемой по длине области смешения и по азимутальному углу канала. Измерение распределения температуры стенки производилось методом скоростной инфракрасной термографии с помощью тепловизора Flir Titanium 570M. Для увеличения разрешения съемок по азимутальной координате съемка производилась с трех позиций, расположенных через 60 град. относительно друг друга. Дальнейшая обработка и геометрическое преобразование полученных данных позволили получить 3D картину распределения температуры по поверхности стенки.

На рисунке 23 б, в приведены характерные профили температуры вдоль радиусов, соответствующих различным значениям окружного угла γ . Координата y здесь соответствует расстоянию от стенки трубки. Обозначение радиусов, по которым перемещался датчик, приведены на рисунке 23 а. Видно, что на небольшом расстоянии от места входа горячей жидкости структура температурного поля существенно не аксиально-симметрична. По мере увеличения расстояния от места начала смешения неравномерность температуры по сечению канала при разных значениях γ становится более плавной.

На рисунке 24 приведены типичные трехмерные распределения температуры стенки, полученные путем обработки записей ИК-камеры из трех положений. Показаны поля как усредненной температуры, так и интенсивности температурных колебаний в зоне смешивания при различных отношениях $Q_{гор}/Q_{хол}$.

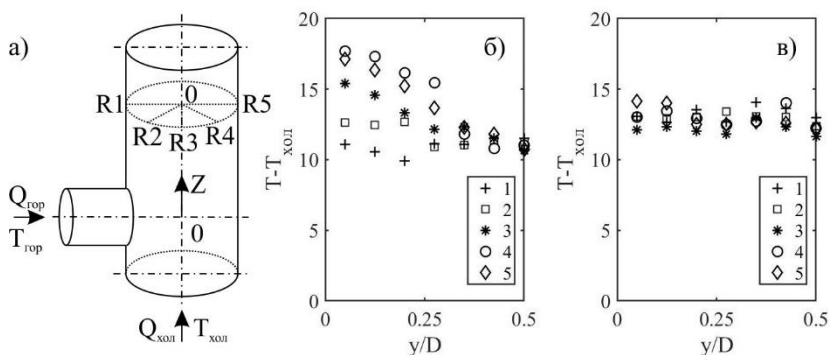


Рисунок 23 – Схема измерений (а), радиальные профили температуры: $Z = 50$ мм (б), 150 мм (в); R1-0 (1), R2-0 (2), R3-0 (3), R4-0 (4), R5-0 (5).

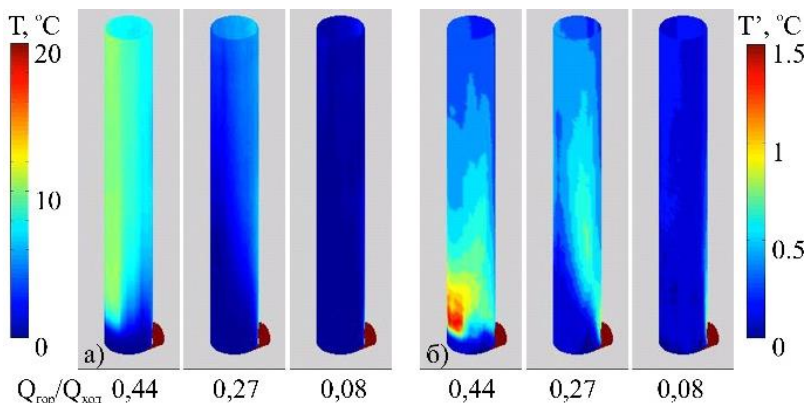


Рисунок 24 – Температура стенки тройникового смесителя (а) и ее пульсации (б).

Измерения показали, что значительная неравномерность распределения температуры образуется на расстоянии до ~ 80 мм от оси ввода «горячей» жидкости. Максимальные пульсации температуры стенки наблюдаются на фронте взаимодействия потоков. Характер распределения температуры и ее пульсаций существенно зависит от соотношения расходов горячей и холодной жидкостей.

Выполнены экспериментальные исследования распределения температуры стенки имитатора твэла в 7-ми стержневой модели ТВС ($D=9$ мм, $S/D = 1,4$) с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем (сплав Розе). В одном из имитаторов твэла (центральный или периферийный, в зависимости от конфигурации измерений) была создана зона нагрева длиной 300 мм. Проведены исследования эволюции температурного поля на поверхности соседнего с нагреваемым имитатора твэла при изменении взаимного расположения нагреваемого и измерительного имитаторов твэлов и дистанционирующей решетки.

Получены данные о неравномерности азимутального и осевого распределений температуры по поверхности стенки имитаторов твэла. Эксперименты проведены при числах Рейнольдса $8000 \div 13300$. Измерения проведены в диапазоне по высоте $0 \div 360$ мм после ДР с шагом 40 мм, диапазон изменения азимутального угла $0 \div 360$ градусов с шагом 10 градусов. Показано, что на поверхности измерительного имитатора твэла формируется «тепловое пятно» в диапазоне угловых координат от 120 до 240 градусов, что соответствует расположению двух ближайших к нагреваемому стержню каналов. При этом перенос тепла в соседние

каналы выражен слабо. Влияние ДР выражается в виде увеличения температуры поверхности стержня сразу за ДР и формирования азимутальной неравномерности распределения температурного поля на поверхности имитатора твэла.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получен ряд новых приоритетных данных по локальному теплообмену и гидродинамике теплоносителей в элементах реакторных установок с водяным и тяжелым жидкометаллическим теплоносителями, уточняющих физические модели течения теплоносителей и расчетные соотношения, обосновывающих проектные решения и существенно расширяющие матрицы верификации расчетных кодов в части данных о локальных осредненных, пульсационных тепловых и гидродинамических параметрах течений, в том числе спектральных характеристик;

Выполнены детализированные измерения параметров течения в 7-ми и 37-ми стержневых моделях ТВС ВВЭР, впервые показывающие локальное влияние ДР на возмущения распределения напряжения трения по периметру имитатора твэла в зависимости от изменения диаметра имитаторов твэла, относительного шага расположения стержней, числа стержней, распределения газовой фазы между ячейками, осевой скорости течения и влиянию ДР на теплообмен при одно и двухфазном течении. Установлено, что наличие ДР приводит к локальной интенсификации теплообмена, азимутальной неравномерности распределения гидродинамических характеристик потока (скорость, касательные напряжения), дроблению крупных пузырей. Установлено, что структура потока практически полностью восстанавливается на расстоянии $5\div 8$ калибров от ДР, подобным образом ведет себя зависимость коэффициента теплообмена.

По результатам локальных измерений гидродинамических параметров и теплообмена при одно- и двухфазных течениях в 7-ми и 37-ми стержневых моделях ТВС РУ ВВЭР с дистанционирующими решетками разной конструкции получены приоритетные результаты по теплофизическому обоснованию новых типов тепловыделяющих сборок ЯЭУ с водяным теплоносителем. В частности, впервые проведены исследования распределения напряжения трения на стенке и его пульсаций по периметру имитатора твэла в модели РУ АЭС 2006, распределения локальной скорости теплоносителя и ее пульсаций в межтвэльном пространстве, параметрах движения двухфазного течения теплоносителя в ТВС, таких как скорость пузырей, их распределение по размерам,

локальное газосодержание; показано влияние дисперсной фазы на теплообмен между имитатором ТВЭЛ и теплоносителем.

Экспериментально получены новые закономерности двухфазных течений, возникающих в элементах реакторных установок, в частности, локальном изменении структуры нисходящих пузырьковых течений, течений за преградой, течений с внезапным расширением. Впервые выявлены и исследованы режимы течения нисходящего пузырькового потока с подавлением теплообмена, показано, что добавление даже малых количеств газа в поток приводит к существенному изменению интегральных, пульсационных и спектральных параметров. Впервые показано, что взаимодействие крупномасштабных вихревых структур в отрывном пузырьковом потоке не приводит к существенной интенсификации теплообмена, которая наблюдается в области восстановления течения. Показан процесс перехода пузырей за преградой от центральной к пристеночной области течения.

Выполнено моделирование локальных течений при взаимодействии газовой фазы с ТЖМТ, определены закономерности формирования, эволюции формы и скорости движения газовых пузырей, их влияния на «захолаживание» теплоносителя. Впервые получены экспериментальные данные о «взрывном» истечении газа высокого давления в ТЖМТ, обосновывающие изменения давления и свободного уровня теплоносителя в канале. Показано, что «взрывное» истечение газа вызывает интенсивные колебания уровня ТЖМТ, возникающие при этом пульсации давления могут превышать начальное давление в канале. Результаты по «захолаживанию» тяжелого жидкометаллического теплоносителя и эволюции газовых пузырей использованы для уточнения расчетных моделей и верификации системного теплогидравлического кода HYDRA-IBRAE/LM.

Впервые, на примере Т-образного соединения трубопроводов, проведено экспериментальное моделирование смешения двух потоков тяжелого жидкометаллического теплоносителя с разной температурой для турбулентного режима течения. Получены детальные данные по распределению осреднённых и пульсационных значений температур в зоне смешения в объеме ТЖМТ и на внешней стенке тройникового смесителя в зависимости от соотношения расходов «холодного» и «горячего» теплоносителя. В результате измерений обнаружена значительная неравномерность распределения температуры стенки и жидкости в зоне смешения. Установлено, что наибольший уровень пульсаций температуры наблюдается на границе взаимодействия потоков, структура температурного поля в зоне смешения и на поверхности канала

существенно зависит от соотношения расходов разнотемпературных потоков. Результаты по закономерностям перемешивания потоков ТЖМТ с разной температурой использованы для верификации CFD кодов.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Влияние дисперсности газовой фазы на характеристики опускающего пузырькового течения / О.Н. Кашинский, В.В. Рандин, П.Д. Лобанов, Г.В. Богословцев. – 2005. – Т. 12. – № 4. – С. 637-643.
2. Experimental and numerical study of downward bubbly flow in a pipe / O.N. Kashinsky, P.D. Lobanov, M.A. Pakhomov, V.V. Randin, V.I. Terekhov // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2006. – Vol. 49. – № 19. – P. 3717-3727.
3. Кашинский, О.Н. Трение на стенке при обтекании газового снаряда опускающим потоком жидкости / О.Н. Кашинский, А.С. Курдюмов, П.Д. Лобанов. – 2008. – Т. 14. – № 1. – С. 93-98.
4. Kashinsky, O.N. The influence of a small gas addition to the structure of gas-liquid downward flow in a tube / O.N. Kashinsky, P.D. Lobanov, V.V. Randin // Journal of Engineering Thermophysics. – 2008. – Vol. 17. – № 2. – P. 120.
5. Кашинский, О.Н. Возмущение нисходящего потока жидкости стационарным газовым снарядом / О.Н. Кашинский, А.С. Курдюмов, П.Д. Лобанов. – 2010. – Т. 4. – С. 88-96.
6. Экспериментальное исследование влияния дистанционирующей решетки на структуру течения в ТВС реактора АЭС-2006 / О.Н. Кашинский, П.Д. Лобанов, Н.А. Прибатурин, А.С. Курдюмов, С.Е. Волков // Теплоэнергетика. – 2013. – № 1. – С. 63.
7. Исследование структуры зоны трехмерных возмущений однофазного потока в кольцевом канале с частичным перекрытием сечения / О.Н. Кашинский, П.Д. Лобанов, А.С. Курдюмов, Н.А. Прибатурин // Теплоэнергетика. – 2013. – № 5. – С. 41-45.
8. Динамика газовой фазы в имитаторе тепловыделяющей сборки с дистанционирующей решеткой / О.Н. Кашинский, П.Д. Лобанов, А.С. Курдюмов, Н.А. Прибатурин, С.Е. Волков // Письма В Журнал Технической Физики. – 2013. – Т. 39. – № 14. – С. 62-68.

9. Моделирование течения жидкометаллического теплоносителя в Т-образном смесителе / О.Н. Кашинский, П.Д. Лобанов, А.С. Курдюмов, Н.А. Прибатурин. – 2016. – Т. 23. – № 3. – С. 395-398.

10. Экспериментальное моделирование течения жидкометаллического теплоносителя в Т-образном смесителе / О.Н. Кашинский, П.Д. Лобанов, А.С. Курдюмов, Н.А. Прибатурин // Журнал Технической Физики. – 2016. – Т. 86. – № 5. – С. 145-148.

11. Экспериментальные исследования импульсного впрыска газа в жидкость и верификация на основе полученных данных системного теплогидравлического кода HYDRA-IBRAE/LM / П.Д. Лобанов, Э.В. Усов, А.А. Бутов, Н.А. Прибатурин, Н.А. Мосунова, В.Ф. Стрижов, В.И. Чухно, А.Э. Кутлиметов // Теплоэнергетика. – 2017. – № 10. – С. 79-86.

12. Lobanov, P.D. Experimental and numerical study of heat transfer enhancement in a turbulent bubbly flow in a sudden pipe expansion / P.D. Lobanov, M.A. Pakhomov // Journal of Engineering Thermophysics. – 2017. – Т. 26. – № 3. – С. 377-390.

13. Распределение скорости жидкости в экспериментальной модели тепловыделяющей сборки с дистанционирующей решеткой / О.Н. Кашинский, Д.В. Куликов, П.Д. Лобанов, Н.А. Прибатурин, А.И. Светоносов. – 2018. – Т. 25. – № 2. – С. 227-231.

14. Экспериментальное моделирование гидродинамики и теплообмена при пузырьковом и снарядном режимах течения газа в тяжелом жидком металле / Э.В. Усов, П.Д. Лобанов, А.Э. Кутлиметов, И.Г. Кудашов, В.И. Чухно, S.I. Lezhnin, N.A. Pribaturin, O.N. Kashinsky, A.I. Svetonov, N.A. Mosunova // Теплоэнергетика. – 2018. – Vol. 65. – № 8. – P. 82-87.

15. Lobanov, P.D. Wall shear stress and heat transfer of downward bubbly flow at low flow rates of liquid and gas / P.D. Lobanov // Journal of Engineering Thermophysics. – 2018. – Vol. 27. – № 2. – P. 232-244.

16. Lobanov, P. Experimental and numerical study of the flow and heat transfer in a bubbly turbulent flow in a pipe with sudden expansion / P. Lobanov, M. Pakhomov, V. Terekhov // Energies. – 2019. – Vol. 12. – № 14. – P. 2735.

17. Lead coolant modeling in system thermal-hydraulic code HYDRA-IBRAE/LM and some validation results / N.A. Mosunova, V.M. Alipchenkov, N.A. Pribaturin, V.F. Strizhov, E.V. Usov, P.D. Lobanov, D.A. Afremov, A.A. Semchenkov, I.A. Larin // Nuclear Engineering and Design. – 2020. – Vol. 359. – P. 110463.

18. Структура турбулентного пузырькового потока и теплообмен в вертикальной трубе / П.Д. Лобанов, М.А. Пахомов, В.И. Терехов, П.К. Дас. – 2020. – Т. 27. – № 4. – С. 593-600.

19. Экспериментальное исследование напряжения трения при течении жидкости в модели ТВС / Н.А. Прибатурин, П.Д. Лобанов, В.В. Рандин, О.Н. Кашинский, М.А. Воробьев, С.М. Волков // Теплофизика и Аэромеханика. – 2020. – Т. 27. – № 6. – С. 869-874.

20. Экспериментальное исследование смешения потоков жидкости с различной температурой в тройниковом соединении / Л.А. Большов, Н.А. Прибатурин, О.Н. Кашинский, П.Д. Лобанов, А.С. Курдюмов. – 2020. – Т. 61. – № 3. – С. 63-73.

21. The effect of gas bubbles on the flow structure and turbulence in a downward two-phase flow in a vertical pipe / I.A. Evdokimenko, P.D. Lobanov, M.A. Pakhomov, V.I. Terekhov, P.K. Das // Journal of Engineering Thermophysics. – 2020. – Vol. 29. – № 3. – P. 414-423.

22. Экспериментальное исследование влияния дистанционирующей решётки на распределение напряжения трения в модели ТВС / Н.А. Прибатурин, П.Д. Лобанов, В.В. Рандин, О.Н. Кашинский, А.С. Курдюмов, М.А. Воробьев, С.М. Волков // Теплофизика и аэромеханика. – 2021. – Т. 28. – № 4. – С. 557-567.

Глава в монографии:

Lobanov, P. Pakhomov M., Terekhov V. Chapter 2. An experimental and numerical study of turbulent bubbly flow and heat transfer in a vertical pipe with sudden expansion / In: Mohd Rafatullah (Eds) // New Insights into Physical Science. Book Publisher International. – 2020. – P. 23-45.