

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе

Нижегородского государственного

технического университета им. Р.Е. Алексеева,

доктор физико-математических наук, профессор

Куркин Андрей Александрович

«24» февраля 2022 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

ФГБОУ ВО Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева

на диссертационную работу Лобанова Павла Дмитриевича «Экспериментальное моделирование локальной гидродинамики и теплообмена в элементах ядерных энергетических установок», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Актуальность темы

Одним из приоритетных направлений развития атомной энергетики Российской Федерации является создание ядерных энергетических установок с высокими эксплуатационными качествами. В отечественных проектных организациях ведутся активные работы по увеличению максимально допустимой мощности реакторных установок ВВЭР для поднятия выработки электроэнергии, что осуществимо только при гарантированном обеспечении надежной и безаварийной работы активной зоны. Необходима разработка и создание реакторов нового типа на быстрых нейтронах с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями (ТЖМТ) для реализации замкнутого ядерного топливного цикла.

Обеспечение безаварийной работы активной зоны и других элементов реактора требует проведения научно-исследовательских работ, направленных на увеличение эксплуатационного ресурса и надежности элементов реакторных установок (РУ). 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. Решение выделенных задач требует изучения локальных гидродинамических процессов и теплообмена.

Таким образом, экспериментальное исследование гидродинамики теплоносителей в активной зоне и других узлах реакторных установок с различными типами теплоносителей является **актуальной** научной задачей, решение которой позволяет

обосновать теплотехническую надежность и безопасность ядерных энергетических установок.

Автором диссертации получены следующие **новые результаты**:

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

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.

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.

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.

На примере Т-образного соединения трубопроводов впервые проведено экспериментальное исследование смешения 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 использованием надежных экспериментальных методов, с проведением калибровочных процедур в канонических течениях, сравнении полученных данных с известными зависимостями, использованием различных экспериментальных методов (например ЛДА и PIV) для исследования изучаемого процесса.

Практическое значение работы определяется тем, что полученные в работе данные полезны для понимания закономерностей течения теплоносителей в элементах ядерных энергетических установок, а также использованием результатов экспериментов для настройки и верификации отечественных кодов вычислительной гидродинамики, используемых для проектирования и обоснования безопасности перспективных ЯЭУ в ИБРАЭ РАН, АО ОКБ «Гидропресс», АО «ОКБМ Африкантов» и других организациях.

Оценка содержания диссертации Диссертация изложена на 234 страницах машинописного текста, содержит 11 таблиц, 144 рисунка и состоит из введения, пяти глав и заключения. Библиографический указатель содержит 403 источника.

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 РУ. Приведены исследования структуры потоков и теплообмена в тепловыделяющих сборках реакторных установок, выделено существенное влияние дистанционирующих элементов на теплогидравлику потока. Отмечена важность проведения детальных исследований локальных параметров течения, таких как скорость теплоносителя в ячейках, напряжение трения на стенке и прочее при вариации диаметра имитаторов твэлов и шага между ними для оптимизации работы РУ.

Развитие теоретических моделей описания турбулентности в двухфазных потоках сдерживается отсутствием достаточного количества экспериментальной информации для различных условий. Вопросы о распределении газовой фазы в ячейках ТВС, скорости движения пузырей и теплообмене двухфазного потока, взаимодействия пузырей с дистанционирующими решетками (ДР) остаются открытыми. Проводятся исследования процессов, происходящих при взаимодействии газа и пара с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем. Эти исследования важны для понимания процессов, происходящих при возникновении межконтурного взаимодействия в парогенераторе.

На стенках камер смешения неизотермических потоков возникают температурные напряжения, которые могут приводить к усталостному повреждению оборудования. 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. В связи с необходимостью разработки РУ с ТЖМТ, выполнение подобных работ имеет приоритетное значение.

Во **второй главе** приведен обзор современных методов исследования гидродинамической структуры одно- и двухфазных потоков. Приведено описание контактных и бесконтактных (неразрушающих) методов исследования и их ключевых особенностей. 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, приведена оценка неопределенностей измерений.

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. Эксперименты проведены при различных диаметрах имитаторов твэлов и шаге их расположения в треугольной компоновке. Использованы дистанционирующие решетки с разной геометрией. Эксперименты проведены с водяным теплоносителем, при различных числах Рейнольдса потока ($Re = 500 \div 60000$).

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. Рассмотрены гидродинамические параметры системы, состоящей из дистанционирующей и перемешивающей решеток. В рамках диссертационного исследования впервые проведены измерения скорости жидкости в межствольном пространстве в 7-ми и 37-ми ячейстых моделях ТВС РУ АЭС-2006 за дистанционирующей решеткой с помощью лазерного доплеровского измерителя скорости (ЛДИС).

В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что при обтекании потоком жидкости ДР возникают существенно неравномерные распределения скорости теплоносителя, напряжения трения на поверхности стержня – имитатора твэла в зависимости от азимутального угла вокруг стержня, а также пульсационных характеристик указанных величин. Выявлено влияние конструктивных особенностей решеток. Из-за смыкания сот ДР, вокруг твэлов создается три «открытых» и три «закрытых» ячейки. Это существенно сказывается на гидродинамической структуре течения.

Показано, что непосредственно за решеткой наблюдается интенсификация теплообмена в сравнении с невозмущенным потоком, ее величина зависит от формы ячейки ДР, в частности от толщины материала. Установлено что чем больше толщина материала, тем выше параметр интенсификации теплообмена, расположение области интенсификации теплообмена примерно совпадает с областью возмущения потока ДР.

Представлены детальные исследования режимов течения, эволюции пузырьков по высоте и поперечному сечению ТВС, влияния пузырей на теплообмен между твэлом и потоком. Показано, что на ДР происходит дробление крупных пузырей, что вероятно связано с образованием пузырьковых «факелов» за решетками.

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований локальных гидродинамических характеристик и теплообмена двухфазных течений, которые могут возникать при межконтурном взаимодействии РУ с жидкометаллическим теплоносителем.

Проведены детальные исследования гидродинамики теплообмена нисходящего пузырькового потока при вариации размеров дисперсных включений. Получены новые данные об ухудшении теплообмена двухфазного потока в сравнении с однофазным, которое может достигать значительных величин.

Приведены результаты экспериментального исследования локальной гидродинамики и теплообмена отрывного пузырькового потока в цилиндрической трубе. 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 в этой области наблюдается интенсификация теплообмена в пузырьковом потоке в сравнении с однофазным. 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.

С помощью электродиффузионного метода, ЛДА и PIV проведено исследование азимутальных распределений гидродинамических параметров одно- и двухфазного

потоков в частично затененном кольцевом канале. Приведены данные о существенно трехмерной структуре потока и перераспределении фаз, вызванном наличием преграды.

Выполнено экспериментальное исследование формирования пузырей и скорости их движения в расплавах свинца и сплава Розе. Проведена визуализация движения пузырей газа в вертикальных цилиндрических каналах, заполненных модельным ТЖМТ, для чего была разработана оригинальная методика.

Для определения закономерностей, возникающих при гильотинном разрыве теплообменных трубок ПГ, приведены данные исследования эволюции давления и свободного уровня при внезапном впрыске дисперсной фазы в заполненный водой и ТЖМТ вертикальный канал.

С помощью электродиффузионного метода и PIV определены основные закономерности распределения локальных гидродинамических параметров в потоке с присоединенным газовым пузырем при вариации расходной скорости жидкости.

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. Были проведены измерения распределений температуры жидкости по поперечному сечению и стенки в области смешения.

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 теплоносителя.

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). 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.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы проведенных исследований.

Замечания по диссертации

1. Приведенные в Главе 3 исследования гидродинамики и теплообмена в тепловыделяющей сборке проведены при относительно малых числах Рейнольдса (до 70000). Из текста диссертации не ясно, насколько полученные данные могут быть применимы для обоснования работоспособности реакторных установок, где числа Рейнольдса гораздо выше.

2. В обзоре литературы не представлены ссылки на работы, посвященные исследованию течений жидкометаллических теплоносителей, проведенные в НГТУ им. Р.Е. Алексеева.
3. Для моделирования процессов, происходящих при течении тяжелого жидкометаллического теплоносителя, использовался сплав Розе. Использование теплоносителей (свинец, свинец-висмут) позволило бы увеличить практическую значимость работы.
4. При исследовании двухфазных потоков с жидкометаллическими теплоносителями использовался инертный газ. В случае межконтурного взаимодействия в теплоноситель поступит водяной пар. Насколько применимы данные, полученные в диссертационном исследовании для прогнозирования развития аварийной ситуации?

Заключение

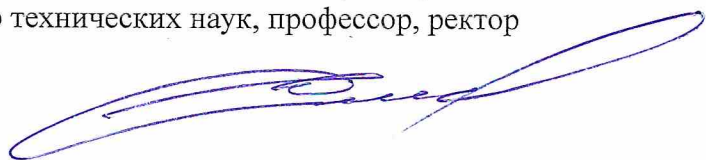
Несмотря на приведенные замечания отметим, что в работе приведено большое количество новых и актуальных данных по гидродинамике и теплообмену теплоносителей в узлах реакторных установок с водяным и тяжелым жидкометаллическим теплоносителями, существенно пополняющие объем знаний в данной области и используемых для верификации отечественных расчетных кодов вычислительной гидродинамики, применяемых в ведущих организациях атомной промышленности РФ.

Диссертация Лобанова П.Д. является законченной научно-квалификационной работой в области экспериментального моделирования локальных гидродинамических параметров в элементах реакторных установок, соответствующей специальности 1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника. Работа написана ясным научным языком. Автореферат достаточно полно и точно отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа «Экспериментальное моделирование локальной гидродинамики и теплообмена в элементах ядерных энергетических установок» удовлетворяет требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением правительства РФ №842 от 24.09.2013, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор Лобанов Павел Дмитриевич, несомненно, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Отзыв обсужден и одобрен на заседании научного семинара образовательно-научного института ядерной энергетики и технической физики им. академика Ф.М. Митенкова НГТУ, протокол №2 от 24.02.2022 г.

Заведующий кафедрой «Атомные и тепловые станции»
федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования «Нижегородский
государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»,
доктор технических наук, профессор, ректор



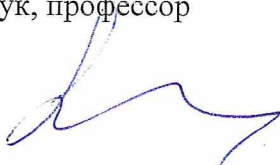
Дмитриев Сергей Михайлович

Заведующий кафедрой «Ядерные реакторы и энергетические установки»
федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования «Нижегородский
государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»,
доктор технических наук, профессор



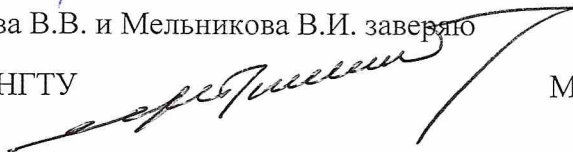
Андреев Вячеслав Викторович

Профессор кафедры «Ядерные реакторы и энергетические установки»
федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования «Нижегородский
государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»,
доктор технических наук, профессор



Мельников Владимир Иванович

Подпись Дмитриева С.М., Андреева В.В. и Мельникова В.И. заверяю
ученый секретарь Ученого совета НГТУ



Мерзляков И.Н.

603950, г. Н. Новгород, ул. Минина, д.28, e-mail: ftf@nntu.ru, тел. (831) 436-63-53