

ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Лобанова Павла Дмитриевича
«ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛОКАЛЬНОЙ
ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА В ЭЛЕМЕНТАХ ЯДЕРНЫХ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК»,

представленной на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 1.3.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника»

Актуальность темы

Разрабатываемые при проектировании и обосновании безопасности современных ЯЭУ с ВВЭР и ТЖМТ теплогидравлические коды, опираясь на законы сохранения массы, количества движения и энергии одно- и двухфазного турбулентного потока теплоносителя, содержат большой объем эмпирической информации, необходимой для разработки замыкающих моделей локальных процессов переноса импульса тепла и массы. По сути, именно глубина и качество необходимых для разработки таких моделей экспериментов подтверждают актуальность темы и служат повышению уровня расчетного обоснования современного высоконапряженного оборудования ЯЭУ, в первую очередь, тепловыделяющих сборок (ТВС) активных зон.

Список используемые соискателем для исследования гидродинамики ТВС экспериментальных методик фиксации и обработки сигналов высокого временного разрешения содержит методы: тонкопленочной анемометрии, лазерно-доплеровских измерителей скорости (ЛДИС), цифровой трассерной визуализации (Particle Image Velocimetry, PIV) и др. Они важны для измерения и анализа вклада локальных возмущений течения, Рейнольдсовых напряжений, спектральных характеристик потока и т.д. Кроме того, в работе широко использованы традиционные методы измерений: напряжения трения на стенке - электродиффузионный, трубки Пито, температуры – с помощью микротермопар и скоростного тепловизора, а также высокоскоростная визуализация течений. Такой арсенал средств измерений и обработки информации указывают на высокий уровень проведенных исследований и их актуальность для проблем обоснования безопасности ЯЭУ.

Научная новизна полученных результатов: **1.** На основе проведенных экспериментов 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 в широком диапазоне вариантов конструкций дистанционирующих решеток (ДР), шага расположения твэл, режимов течения, границ области возмущения потока за ДР, 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 это 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 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: - 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. 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 смешения, 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 1- и 2-фазного 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; 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, выносимые на защиту, получены соискателем лично. Постановка задач данного исследования

производилась как лично диссертантом, так и совместно с д.ф.-м.н. Кашинским 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 твэл 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.

В первой главе рассмотрены проблемы экспериментального моделирования гидродинамики и теплообмена при течении теплоносителя в элементах реакторных установок. Приведен обзор работ термогидравлики одно- и двухфазных потоков в ТВС различных конструкций и компоновок твэл, 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.

Вторая глава посвящена обзору и анализу современных экспериментальных методов исследования гидродинамической структуры одно- и двухфазных потоков. Приведено описание контактных и бесконтактных методов измерений, использованных в диссертационной работе. Для локальных измерений скорости течения использованы методы: ЛДИС, PIV, трубок Пито, распределений напряжения трения на стенке - электродиффузионного метода, фиксации температуры – с помощью микротермопар и скоростного тепловизора, реализована высокоскоростная визуализация течений.

Выполнен анализ неопределенности измерений - δ : – электродиффузионный метод измерения напряжения трения на стенке ($\delta=4\div7\%$); - скоростная съемка (оригинальные методы обработки изображений двухфазных потоков ($\delta = 3\div5\%$)); - цифровая трассерная визуализация (PIV) ($\delta \sim 4\%$); - лазерная доплеровская анемометрия ($\delta \sim 3\div5\%$); - датчики давления ($\delta = 2\div10\%$); - термография (в т.ч. скоростная), термопарные измерения ($\delta = 2\div7\%$).

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 дистанционирующих (ДР) и перемешивающих (ПР) решеток. Использованы ДР сотовой конструкции (10 типов) и модельных ДР с толщиной стенки от 0,25 до 0,6 мм, при различных числах Рейнольдса (от 500 до 60000) и температуре $25 \pm 0,2$ °С. Получены данные об изменении напряжения трения на стенке имитатора твэл, скорости потока в ячейках, влиянии ДР на теплообмен и распределение локального газосодержания по высоте и поперечному сечению ТВС и перепаде давления на решетках различных конструкций. Важным вопросом является азимутальная неравномерность распределения локальных параметров потока в межтвэльном пространстве ТВС. Проведено детальное исследование этого явления с вариацией диаметра стержней, относительного шага между ними, режима течения. Для определения оптимального расстояния между ДР и ПР проведены исследования перепада давления в модели ТВС с последовательно установленными ДР и ПР при вариации расхода. Показано, что коэффициент сопротивления системы решеток близок к их сумме. В экспериментах установлено, что при обтекании потоком ДР возникают неравномерные распределения скорости теплоносителя, напряжения трения на поверхности имитатора твэла в зависимости от азимутального угла. Из-за смыкания сот ДР, вокруг твэл создается три «открытых» и три «закрытых» ячейки. Это существенно сказывается на гидродинамической структуре течения на малых расстояниях ниже по потоку от ДР. 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». В диссертации впервые проведены измерения скорости жидкости в межтвэльном пространстве в 7-ми и 37-ми ячеистых моделях ТВС РУ АЭС-2006 за ДР с помощью ЛДИС. Эти данные подтверждают описанные выше особенности течения за ДР с учетом наличия «открытых» и «закрытых» ячеек. Указанные закономерности подтверждены с помощью трубки Пито. Установлено, что наличие ДР в потоке приводит интенсификации степени турбулентности течения. Относительные пульсации скорости в ячейках u'/u и напряжения трения на стенке имитаторов твэл τ'/τ достигают значений порядка $0,15 \div 0,2$. При удалении от ДР происходит восстановление локальной гидродинамической структуры потока.

В четвертой главе исследованы процессы, которые могут происходить при аварии типа «межконтурная неплотность» в ПГ РУ с ТЖМТ которая возникает при разрыве трубки ПГ, тогда 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, Рис. 11: - а)- формирование пузырькового потока в ТЖМТ; б)- возникновение блокад течения ТЖМТ области разрыва, течение с частичным затенением потока; в)- появление вблизи места разрыва крупного присоединенного пузыря, ухудшение гидравлики контура и теплообмена; г)- осцилляции формы пузыря и давления; д)- отрыв пузырькового потока за трубной доской; е)- нисходящее пузырьковое течение. Эти явления были рассмотрены в работе более подробно на основе моделирования течений газожидкостным потоком. В частности,...

далее следуют стр. 19-31! описания деталей и результатов экспериментов (курсив мой). Здесь, по мнению рецензента, следует сделать замечания, относящиеся к логике последующего изложения соискателем результатов его исследований: 1) нет ссылки на источник Рис. 11; 2) изложение результатов исследований в главе 4 во многом бы выиграло при более тесной связи со списком этих явлений, в этом случае соискатель стал бы автором 1-ой

ВЕРИФИКАЦИОННОЙ МАТРИЦЫ *локальных экспериментов, сопровождающих «межконтурную неплотность», что лишь украсило бы эту работу; 3) конечно, при этом в тексте и на рисунках должны стоять ссылки на свои и чужие работы; 4) в настоящем виде текст главы 4 страдает громоздкостью, не смотря на несомненные экспериментальные достижения соискателя.*

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. Обработка и геометрическое

преобразование полученных данных позволили получить 3D картину распределения температуры по поверхности стенки. 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 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 твэл и дистанционирующей решетки. Получены данные о неравномерности азимутального и осевого распределений температуры по поверхности стенки имитаторов 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 твэл, относительного шага, числа стержней, распределения газовой фазы между ячейками, осевой скорости течения и влиянию ДР на теплообмен при одно и двухфазном течении. Установлено, что структура потока и теплообмен практически полностью восстанавливаются на расстоянии $5\div 8$ калибров от ДР. По результатам локальных измерений теплообмена и гидродинамики при одно- и двухфазных течениях в 7-ми и 37-ми стержневых моделях ТВС РУ ВВЭР с ДР разной конструкции получены приоритетные результаты по теплофизическому обоснованию новых типов ТВС ЯЭУ с ВВЭР. В частности, впервые проведены исследования распределения напряжения трения на стенке и его пульсаций по

периметру твэл в модели РУ АЭС 2006, распределения локальной скорости теплоносителя и ее пульсаций в межтвэльном пространстве, параметрах движения двухфазного течения в ТВС, скорости пузырей, их распределению по размерам, локальному газосодержанию; показано влияние дисперсной фазы на теплообмен. Экспериментально получены новые закономерности локальных изменений 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. 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 опытные данные о «взрывном» истечении газа высокого давления в ТЖМТ. Показано, что «взрывное» истечение газа вызывает интенсивные колебания уровня ТЖМТ. Результаты по «захолаживанию» ТЖМТ 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.

Заключение по представленному автореферату

В целом, указанные выше замечания и погрешности не снижают научной и практической ценности выполненной соискателем работы, полученные результаты являются новыми научными знаниями в области локальной гидродинамики и теплообмена одно и двухфазных потоков в элементах ЯЭУ. Автореферат диссертации Лобанова П. Д. отвечает требованиям Положения о порядке присуждения учёных степеней (в том числе требованиям п. 9), предъявляемым ВАК к научно-квалификационной работе: основные научные результаты опубликованы в 22 рецензируемых изданиях из списка ВАК. В ней, на основе разработанных автором экспериментальных методик и реализующих их стендов получены весьма значимые для проблем обоснования безопасности ЯЭУ с ВВЭР и ТЖМТ новые экспериментальные данные по гидродинамике и теплообмену одно- и двухфазных потоков, имеющие большое значение для разработки перспективных, научно обоснованных технических проектов ЯЭУ.

Представленные в автореферате диссертации результаты исследования являются вполне законченной научно-исследовательской работой, выполненной самостоятельно на высоком научном уровне, а её автор Лобанов Павел Дмитриевич заслуживает присуждения учёной степени доктора технических наук по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника.

Главный специалист –
Доктор технических наук
(01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника)
Отдел 2.02, Отделение Теплофизики
24 февраля 2022г.

Корниенко Юрий Николаевич



телефон (4967) 65-2953
8-910-593-4318

e-mail: grpress@grpress.podolsk.ru

Подпись Корниенко Ю. Н. заверяю
Заместитель генерального директора по персоналу -
начальник отделения 9.00
Захаров Антон Борисович

24 февраля 2022 г.

ул. Орджоникидзе, д. 21, г. Подольск,
Московская обл., 142103, РФ
АО Опытное Конструкторское Бюро «ГИДРОПРЕСС»
телефон: (4967)54-2516; (495)502-7910; Факс: (4967)54-2733;
e-mail: grpress@grpress.podolsk.ru

