

ОТЗЫВ

**официального оппонента на диссертацию ЛОБАНОВА Павла Дмитриевича
“ Экспериментальное моделирование локальной гидродинамики и
теплообмена в элементах ядерных энергетических установок ”,
представленную на соискание учёной степени доктора технических наук по
специальности 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника**

Актуальность темы. Атомная энергетика играет весомую роль в структуре энергетики страны, и ее значение в перспективе будет только возрастать. Поэтому пристальное внимание уделяется вопросам обеспечения безопасности и надежности ядерных реакторов, а также повышения их эффективности. В этой связи необходимо иметь совершенные и надежно верифицированные детальные расчетные коды, позволяющие моделировать и исследовать вплоть до локального уровня процессы в штатных и аварийных режимах оборудования, и на этой основе осуществлять оптимизацию конструктивных элементов и режимных параметров реакторных установок с учетом критериев надежности и экономичности. В настоящее время имеется ограниченный объем надежных экспериментальных данных, характеризующих особенности однофазных и двухфазных течений в трактах теплоносителей ядерных энергоустановок. Тем самым, рассматриваемая в диссертации П.Д. Лобанова проблема комплексного и широко развернутого экспериментального исследования закономерностей локальной гидродинамики и теплообмена в элементах ядерных энергетических установках с водяным и жидкометаллическим теплоносителями, безусловно, актуальна. Полученные новые экспериментальные данные важны как для понимания физических механизмов особенностей локальных течений теплоносителей, так и для верификации имеющихся и создаваемых системных теплогидравлических кодов в ядерной энергетике.

Оценка основного содержания. Диссертация изложена на 237 страницах и включает введение, 5 глав основного текста, заключение, библиографический список из 403 наименований, сопровождается 144 рисунками и 11 таблицами. По теме диссертации имеется 22 публикации в изданиях из списка ВАК и ведущих зарубежных журналах. Одна статья представлена в виде раздела монографии.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы цель и задачи работы, научная новизна полученных результатов и положения, выносимые на защиту.

В главе 1 представлен анализ экспериментальных исследований гидродинамики и теплообмена при течении теплоносителя в элементах реакторных установок. Рассмотрен широкий круг выполненных работ и результатов, полученных за последние 60 лет в области исследования гидравлического сопротивления, касательного напряжения, теплообмена, турбулентных пульсаций скорости и температуры в каналах и сборках различной геометрии. Раздельно рассмотрены состояния исследований для реакторов с водяным и жидкометаллическим теплоносителями. Большое внимание уделено особым режимам гидродинамики и теплообмена в элементах реакторных установок с жидкометаллическим теплоносителем. Рассмотрены гипотетическая авария с разрывом трубок парогенератора второго контура, и попаданием воды и пара в

жидкий металл. Дан анализ состояния исследования ряда отдельных проблем – эволюция растущих пузырьков и движение различных форм паровой фазы в жидкой среде, нисходящие пузырьковые потоки, особенности температурного режима в камере смешения потоков разной температуры. Обоснованы цели и задачи диссертационного исследования.

Глава 2 посвящена обзору существующих методов исследования гидродинамической структуры одно- и двухфазных течений. Представлены характеристики бесконтактных и контактных измерений. Из представленного обзора выделены и описаны наиболее чувствительные современные методы, применяемые в диссертационной работе. К таковым относятся: лазерно-доплеровский метод измерения скорости и пульсационных составляющих, трассерный метод измерения полей скорости, электродиффузионный метод измерения напряжения трения на стенке, метод высокоскоростной цифровой визуализации структуры двухфазного потока, измерение распределения поверхностной температуры с помощью скоростного тепловизора и др. Приведенные методы указывают на высокий уровень инструментального обеспечения выполненных автором работы экспериментов.

В главе 3 представлены результаты большого числа экспериментов по исследованию локальной гидродинамики и теплообмена однофазного водяного теплоносителя в 7-ми и 37-ми стержневых сборках с различными типами дистанционирующих решеток. Определены характер и глубина влияния решеток на распределение касательных напряжений и теплообмена вниз по потоку. Получены данные по перепаду давлению в пучках стержней и гидравлическому сопротивлению двух типов решеток. С помощью лазерного доплеровского измерителя получены азимутальные и хордовые распределения осевой скорости в межстержневом пространстве. Выявлены расстояния, на которых угасают возмущения, вносимые в поле скоростей дистанционирующими решетками. Исследовано влияние диаметра и относительного шага в сборке на профиль скорости в межстержневом пространстве и на напряжение трения на стенке. Сделан вывод об уменьшении трения при увеличении относительного шага между стержнями, и увеличении при этом пульсаций в области турбулентного течения жидкости. Для переходной области выявлена неравномерность зависимости пульсаций напряжения от относительного шага в пучке. В этой же главе представлены методика и средства измерения локального газосодержания в 37-ми стержневой сборке при точечном и распределенном по сечению вводе газа. Получены распределения газосодержания при разных способах ввода и расхода газа, а также изменение этого распределения за дистанционирующей решеткой. Показано, что при достижении в ячейке газосодержания порядка 0,3 происходит перераспределение газа в соседние ячейки. Отмечена интенсификация теплообмена в ячейке, в которой движется газ.

В главе 4 представлены результаты экспериментального моделирования процессов взаимодействия пароводяной смеси второго контура с жидкометаллическим теплоносителем в случае возникновения межконтурной разгерметизации. В первой части исследования используется впрыск газа в нисходящий поток холодной воды. Полученные данные позволяют оценить влияние размеров пузырьков и величины газосодержания на изменения напряжения трения и коэффициента теплоотдачи. Выявлена интенсификация теплообмена при добавлении в поток крупных пузырей и его ухудшение при

добавлении в поток мелких пузырей в области невысоких чисел Рейнольдса. Исследованы распределения скорости жидкости в нисходящем пузырьковом потоке и определены средние скорости газовых пузырьков. На отдельных экспериментальных стендах исследованы гидродинамика и теплообмен отрывного пузырькового потока за внезапным расширением, а также распределения скорости жидкости и локального газосодержания в кольцевом канале с преградой.

Во второй части главы представлены результаты исследования процессов при инъекции легкой фазы в жидкометаллический теплоноситель. Даны описания специальных стендов и методик экспериментов и измерений. Получены данные по частоте отрыва газовых пузырей от отверстия истечения, отрывным объемам пузырей в зависимости от расхода газа, скорости их движения в объеме жидкости, величине локального газосодержания. Проведено исследование взаимодействия воды и водяного пара, а также паров этилового спирта с жидкометаллическим теплоносителем. Отдельное исследование посвящено анализу пульсаций давления и колебанию уровней воды и сплава Розе при импульсной подаче газа в нижнюю часть установки. Исследованы гидродинамика и теплообмен в окрестности пузыря Тэйлора для нисходящего потока воды.

В главе 5 представлены результаты исследования двух типов тепловой неравномерности в потоке жидкометаллического теплоносителя. В качестве одного из них рассмотрен режим смешения двух потоков, имеющих различные температуры, в камере смешения типа «тройник». С помощью инфракрасной видеокамеры получены поля распределения температуры и ее пульсации на поверхности стенки трубы в области смешения при различных сочетаниях расходов смешиваемых жидкостей. Измерены радиальные профили температуры теплоносителя на различных расстояниях от места подвода горячей жидкости в основной поток. Приведены результаты исследования температурной неравновесности в сборке вертикальных стержней.

Научная новизна диссертационной работы. Критерию новизны в полной мере соответствует большая группа результатов, полученных П.Д. Лобановым. 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 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.

Необходимо отметить, что работа выполнена на высоком уровне и содержит большое количество новых актуальных данных о локальных гидродинамических параметрах и теплообмене в элементах ядерных энергетических установок. Полученные результаты обладают необходимой степенью **достоверности**, определяемой использованием современных методов исследования, их дублированием, проведением калибровочных процедур в канонических течениях и сравнении с известными литературными зависимостями.

Практическое значение работы обусловлена выявлением новых закономерностей течений одно- и двухфазных потоков теплоносителей в элементах ядерных энергетических установок и использованием результатов исследований для верификации и валидации расчетных кодов в ведущих отечественных предприятиях атомной отрасли.

По материалу диссертации возникли следующие **замечания**.

1. В разделе 3.1.6 диссертации представлены данные по теплообмену за дистанционирующей решеткой для центрального стержня. Учитывая, что периферийные стержни находятся с точки зрения теплообмена в менее благоприятных условиях, стоило включить их в предмет исследования.
2. На рис. 33б показана немонотонная зависимость величины пульсаций напряжения трения от относительного шага в решетке при $Re = 2500$. Для полноты представления гидродинамической картины течения здесь недостает зависимости гидравлического сопротивления от относительного шага в решетке при этом же значении числа Рейнольдса.
3. Представленные в разделе 5.1.7 распределения пульсаций температуры стенки в процессе смешения разнотемпературных потоков жидкометаллического теплоносителя не позволяют судить об амплитудных и частотных характеристиках пульсаций, влияющих на термоциклическую усталость материала.
4. На рисунках 103-110 на оси ординат указано абсолютное давление P , тогда как графики приведены для избыточного давления $(P-P_0)$.
5. В разделе списка литературы п.п. 356, 357, 363, 382, 383, 393, 401, 403 диссертации и п.п. 1, 3, 5, 9, 13, 18, 20 автореферата приводятся год, том, номер соответствующих изданий, но отсутствуют их названия.

Заключение. Сделанные замечания не влияют на высокую оценку представленной диссертационной работы. Материалы диссертации достаточно полно опубликованы в ведущих научных изданиях. Изложенные результаты можно характеризовать как существенный вклад в решение крупной научной проблемы достижения фундаментальных экспериментально обоснованных знаний в области локальной гидродинамики и теплообмена в элементах реакторных установок с водяным и тяжелым жидкометаллическим теплоносителем. Здесь получены новые данные, которые используются для настройки отечественных расчетных кодов на ведущих предприятиях атомной отрасли РФ для обоснования штатных и аварийных режимов работы РУ.

Диссертация Лобанова П.Д. является законченной научно-квалификационной работой в области исследования параметров работы ядерных энергетических установок, соответствующей специальности 1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника. Содержание автореферата соответствует 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 степени доктора технических наук по специальности 1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Официальный оппонент,
доктор технических наук
(05.14.04 – Энергетические системы и комплексы),
доцент, главный научный сотрудник
отдела теплосиловых систем ФГБУН Института
систем энергетики им. Л.А. Мелентьева
Сибирского отделения РАН

 Таиров Эмир Асгадович
04.03.2022

Подпись Таирова Э.А. заверяю



Почтовый адрес: 664033 Иркутск, ул. Лермонтова, 130

Адрес электронной почты: tairov@isem.irk.ru

Наименование организации: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук» (ИСЭМ СО РАН).