

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора технических наук, профессора

Щеклеина Сергея Евгеньевича

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

Атомная энергетика является одним из основных источников электрической и тепловой энергии. Дальнейшее развитие ядерных энергетических установок связано с увеличением точности прогнозирования параметров работы атомных электростанций в штатных и аварийных условиях работы. Используемые для этих целей расчетные коды требуют дополнительной настройки на надежных экспериментальных данных о локальной гидродинамической структуре и теплообмене в элементах ядерных энергетических установок.

Важнейшую роль играет исследование течений жидкометаллических теплоносителей для создания новых реакторных установок с замкнутым топливным циклом и естественной безопасностью. Несмотря на развернутую в последнее время масштабную экспериментальную кампанию, количество подобных данных до сих пор ограничено.

Использование современных оптических методов исследования (лазерные доплеровские анемометры, цифровая трассерная анемометрия - PIV), скоростных видео- и термографических регистраторов позволяют получить необходимую экспериментальную информацию об осредненных и пульсационных характеристиках течений теплоносителей.

Вышеописанное обосновывает **актуальность** данного диссертационного исследования.

Оценка содержания диссертации Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения и изложена на 237 страницах текста, содержит 11 таблиц, 144 рисунка. Библиографический указатель содержит 403 источника.

Во **введении** обоснована актуальность исследования, представлены цели и задачи работы, положения, выносимые на защиту, сформулированы научная новизна и практическая ценность полученных результатов.

В первой главе представлен обзор работ, посвященных исследованиям течений различных типов теплоносителей в тепловыделяющих сборках ядерных энергетических

установок, двухфазных потоков в течениях с различной геометрией и работ, посвященных проблемам, возникающим при смешении разнотемпературных потоков.

Вторая глава посвящена обзору контактных и бесконтактных экспериментальных методов, применяемых для исследования локальных и интегральных параметров течения теплоносителей. На примере исследования в сборке вертикальных стержней приведено описание основных экспериментальных методов, использованных в данной работе, оценка неопределенности измерений. Важно отметить использование широкого спектра оригинальных методов. К примеру, электродиффузионный метод является единственным, позволяющим проводить исследования локальных гидродинамических параметров в пристенной области в не масштабированной по размерам твэльной кассете. Исследования с помощью метода лазерной доплеровской анемометрии для реакторов ВВЭР с учетом влияния дистанционирующих элементов также ранее не проводились.

В третьей главе представлены результаты исследований в модельных 7 и 37 стержневых сборках вертикальных стержней при изменении расходов водяного теплоносителя и дисперсной фазы (в случае двухфазного потока), диаметра и относительного шага имитаторов твэлов. Получены новые данные о влиянии дистанционирующих решеток (ДР) на пространственное распределение осредненной и пульсационной скорости жидкости, напряжения трения на стенке, коэффициенты теплообмена. Установлено, что за ДР наблюдается значительное возмущение гидродинамической структуры потока и интенсификация теплообмена, показаны области, в которых происходит затухание указанных явлений.

В рамках определения особенностей развития процессов, возникающих при разрыве теплообменной трубки парогенератора, в **четвертой главе** проведено моделирование процессов в водо-воздушной среде и при взаимодействии тяжелого жидкометаллического теплоносителя с дисперсной фазой. Несмотря на значительное количество проведенных ранее исследований двухфазных потоков, ряд результатов получен впервые.

В пятой главе приведены результаты экспериментальных исследований неизотермических течений тяжелого жидкометаллического теплоносителя. Получены детальные данные по распределению осреднённых и пульсационных значений температур в зоне смешения в объеме ТЖМТ и на внешней стенке тройникового смесителя. Обнаружена значительная неравномерность распределения температуры 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.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы проведенных исследований.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

- 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, 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.

Работа выполнена на высоком научном уровне с использованием широкого спектра экспериментальных методов, в том числе и оригинальных подходов. В тексте работы приводится большое количество новых экспериментальных данных о локальной гидродинамической структуре и теплообмене в элементах ядерных энергетических установок. **Достоверность результатов** подтверждена использованием современных методов исследования и их предварительной калибровкой, основанной на надежных

литературных данных, а также повторными измерениями при одинаковых входных условиях и использованием дублирующих методов для получения представительных результатов.

Использование результатов работы в ведущих предприятиях отечественной атомной промышленности: ФГБУН Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, АО ОКБ «Гидропресс», АО «ОКБМ Африкантов», для настройки и верификации расчетных кодов, описывающих типовые сценарии при штатных и аварийных условиях эксплуатации РУ, говорит о высоком **практическом значении** работы для атомной промышленности РФ. Не меньшую ценность имеет ряд приведенных в диссертационном исследовании новых данных.

Вопросы и замечания оппонента.

1) В активных зонах современных АЭС применяется, как правило восходящее течение теплоносителя. Автор использовал в ряде экспериментальных исследований нисходящее течение жидкой фазы, что требует обоснования.

2) Ряд экспериментов по газо-жидкостным потокам проведен при условиях температур, существенно более низких, чем реальные параметры ЯЭУ. Перенос этих данных на более высокие температуры и давления требует соответствующей проверки не только по причине изменения теплофизических параметров, но и вследствие возможности возникновения фазовых переходов вследствие протекания гидродинамических процессов в поле энерговыделения.

3) Использование сплава Розе при проведении исследований вполне оправдано, однако ставит задачу переноса полученных результатов на более высокотемпературные ТЖМТ- (Pb, Pb- Bi).

4) При исследованиях прикрепленных газовых и особенно паровых снарядов также требуется учитывать нестационарные процессы, связанные с теплоподводом от боковой поверхности и испарения, либо парообразования в обтекающей снаряд пленке жидкости.

5) Автором детально рассмотрены гидродинамические и тепловые процессы при обтекании ТЖМТ дистанционирующих решеток ТВС, однако существенно меньше внимания уделено перемешивающим решеткам, что также представляет большой интерес- особенно протяженность зоны воздействия на течение.

6) Не совсем удачное размещение рисунков и их описаний. Например: описание рис.3 приведено на стр. 61, а сам рисунок на стр.64; описание рис.4 на стр.65, а сам рисунок на стр.67.

Заключение

Приведенные замечания не влияют на общую высокую оценку диссертационной работы. В ходе выполнения работы решена крупная научная проблема, связанная с определением новых закономерностей течения водяного и тяжелого жидкометаллического теплоносителей и верификацией на основе полученных данных расчетных кодов, обосновывающих безопасную эксплуатацию ядерных энергетических установок, о чем свидетельствуют включенные в текст диссертации справки о внедрении результатов. Это говорит о значимом влиянии результатов диссертационной работы на развитие страны.

Диссертация Лобанова П. Д. является законченной научно-квалификационной работой в области, соответствующей специальности 1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника. Содержание автореферата и диссертации соответствуют. 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, заслуживает присуждения степени доктора технических наук по специальности 1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Официальный оппонент,

Доктор технических наук (01.04.14 – Теплофизика и молекулярная физика), доктор технических наук (01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника), профессор

Заведующий кафедрой атомных станций
и возобновляемых источников энергии

 Шчеклеин Сергей Евгеньевич

02.03.2022 г.

Подпись Шчеклеина С.Е. заверяю

Ученый секретарь





Морозова В. А.

Адрес: 620002, Уральский федеральный округ, Свердловская область, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19.

ФГАУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»

E-mail: s.e.shcheklein@urfu.ru

Тел.: 8 (343) 375-95-08