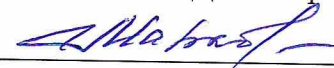


УТВЕРЖДАЮ

Директор ИТ СО РАН

Академик РАН Д.М. Маркович



25 декабря 2020 г.



Заключение

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН).

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук «Экспериментальное моделирование локальной гидродинамики и теплообмена в элементах ядерных энергетических установок» выполнена в ИТ СО РАН. В период подготовки диссертации с 2002 по 2020 г. соискатель Лобанов Павел Дмитриевич работал в Лаборатории физико-химической гидромеханики и Лаборатории проблем тепломассопереноса Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук. В 2002 г. окончил Новосибирский государственный технический университет по направлению «Машины и аппараты химических производств и предприятий строительных материалов». В 2006 г. после окончания очной аспирантуры ИТ СО РАН защитил диссертацию кандидата технических наук «Двухфазное пузырьковое течение в вертикальной трубе при малых газосодержаниях» по специальности 01.04.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Актуальность работы связана с необходимостью оптимизации конструкций существующих энергоблоков атомных электростанций на тепловых нейтронах и создания реакторов нового типа на быстрых нейтронах с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями. Совершенствование интегральных характеристик реакторных установок невозможно без детального рассмотрения закономерностей локальных течений и теплообмена. Для понимания физических механизмов развития локальных течений в элементах реакторных установок и их влияния на интегральные параметры необходимы комплексные расчетно-экспериментальные исследования. При этом, использование современных расчетных методов, включая CFD моделирование, для прогноза развития локальных течений может дать правильный результат только при надежной верификации и валидации этих методов. В этой связи повышенное внимание должно быть уделено проведению модельных экспериментальных исследований локальной гидродинамики и теплообмена в ключевых элементах реакторных установок. Результаты таких исследований составляют базу для матриц верификации расчетных кодов и в ряде случаев могут быть использованы для обоснования принимаемых проектных (конструктивных) решений.

Так, необходимо детальное исследование локальных одно- и двухфазных течений в ячейках тепловыделяющих сборок с определением влияния конструкции дистанционирующих и перемешивающих элементов, диаметров и шага расположения твэлов, на локальные термогидродинамические характеристики.

В связи с разработкой реакторных установок с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями (ТЖМТ) требуются данные об особенностях течения теплоносителей с малыми числами Прандтля. Это прежде всего исследования тепловой перемежаемости течения, включая смешение потоков с разными температурами, взаимодействия теплоносителя с парогазовой фазой, эволюции парогазовых пузырей в ТЖМТ, моделирование возможного развития отрывных и нисходящих двухфазных потоков.

Целью данной работы являлось 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.

Задачами исследования являлось:

- исследование локальной гидродинамической структуры (напряжение трения на стенке, скорость 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:

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, диаметра стержней-имитаторов твэлов, относительного расстояния между их осями, режима течения теплоносителя, детализированы области возмущения потока за дистанционирующими решетками (ДР), впервые исследованы особенности локальных гидродинамических и тепловых параметров в каналах ТВС и их роль при взаимодействии течений в соседних ячейках ТВС.

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.

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, проведением калибровочных процедур в канонических течениях, анализе неопределенностей эксперимента, сравнении с известными литературными зависимостями.

Практическое значение работы.

Ключевые результаты исследований были переданы в заинтересованные организации (АО «ОКБМ Африкантов», ИБРАЭ РАН, АО «ОКБ Гидропресс») для настройки и верификации расчетных кодов, описывающих типовые сценарии при штатных и аварийных условиях эксплуатации реакторных установок, в том числе с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем.

На защиту выносятся следующие положения:

Результаты детальных исследований распределения осредненной и пульсационной скорости и локального газосодержания в ТВС, напряжения трения по периметру стержня-имитатора ТВЭЛ 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 влиянии дистанционирующих и перемешивающих решеток разных типов на локальные гидродинамические характеристики потока теплоносителя, теплообмен и гидравлическое сопротивление;

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;

Результаты экспериментального моделирования 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. Кашинским О.Н. и член-корр. РАН Прибатуриным Н.А. Автор принимал непосредственное участие в создании стендов и отладке методов измерений. Он подготовил экспериментальные стенды, провел исследования, разработал алгоритмы для обработки экспериментальных данных и произвел их анализ и интерпретацию. Совместно с соавторами подготовил публикации по результатам исследований, вклад диссертанта был определяющим.

Результаты диссертационной работы в полном объеме опубликованы в 22 рецензируемых российских и международных изданиях и представлены на более чем 35 всероссийских и международных конференциях и семинарах.

Список работ, опубликованных по теме диссертации.

Статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий:

1. Кашинский О.Н., Рандин В.В., Лобанов П.Д., Чимитов Т.Д. Опускное пузырьковое течение при малых расходных газосодержаниях // Теплофизика и Аэромеханика. 2004. т. 11, № 4 с. 619-624.
2. Кашинский О.Н., Рандин В.В., Лобанов П.Д., Богословцев Г.В. Влияние дисперсности газовой фазы на характеристики опускного пузырькового течения // Теплофизика и аэромеханика. 2005. Т. 12, № 4. С. 637-643.
3. Kashinsky O.N., Lobanov P.D., Pakhomov M.A., Randin V.V., Terekhov V.I. Experimental and numerical study of downward bubbly flow in a pipe // Int. J. of Heat and Mass Transfer. 2006. V. 49. pp. 3717-3727.
4. Кашинский О.Н., Курдюмов А.С., Лобанов П.Д. Трение на стенке при обтекании газового снаряда опускным потоком жидкости // ТиА. 2008. Т.14. №1. С. 93-98.
5. Kashinsky O.N., Lobanov P.D., Randin V.V. The influence of a small gas addition to the structure of gas-liquid downward flow in a tube // J. of Eng. Thermophysics. 2008. V.17 №2. pp. 120-125.
6. Кашинский О.Н., Курдюмов А.С., Лобанов П.Д. Возмущение нисходящего потока жидкости стационарным газовым снарядом. // МЖГ. № 4, 2010, С. 88-96.
7. Кашинский О.Н., Лобанов П.Д., Прибатурин Н.А., Курдюмов А.С., Волков С.Е. Экспериментальное исследование влияния дистанционирующей решетки на структуру течения в ТВС реактора АЭС-2006 // Теплоэнергетика. 2013. т. 1. С. 63.
8. Кашинский О.Н., Лобанов П.Д., Прибатурин Н.А., Курдюмов А.С. Исследование структуры зоны трехмерных возмущений однофазного потока в кольцевом канале с частичным перекрытием сечения // Теплоэнергетика. 2013. т. 5. С. 3-8.

9. Кашинский О.Н., Лобанов П.Д., Курдюмов А.С., Прибатурин Н.А., Волков С.Е.. Динамика газовой фазы в имитаторе тепловыделяющей сборки с дистанционирующей решеткой // Письма в ЖТФ, 2013, том 39. с. 62-68.
9. Кашинский О.Н., Лобанов П.Д., Курдюмов А.С., Прибатурин Н.А. Моделирование течения жидкометаллического теплоносителя в Т-образном смесителе // Теплофизика и аэромеханика. 2016. Т.23, № 3, с. 395-398.
10. Кашинский О.Н., Лобанов П.Д., Курдюмов А.С., Прибатурин Н.А. Экспериментальное моделирование течения жидкометаллического теплоносителя в Т-образном смесителе // Журнал технической физики. 2016. Т 86, №.5. с. 145-148.
11. Лобанов П.Д. [и др.]. Экспериментальные исследования импульсного впрыска газа в жидкость и верификация на основе полученных данных системного теплогидравлического кода HYDRA-IBRAE/LM // Теплоэнергетика. 2017. № 10. С. 79–86.
12. Lobanov, P.D., Pakhomov, M.A., 2017. Experimental and numerical study of heat transfer enhancement in a turbulent bubbly flow in a sudden pipe expansion // Journal of Engineering Thermophysics 26, 377–390.
13. О.Н. Кашинский, Д.В. Куликов, П.Д. Лобанов, Н.А. Прибатурин, А.И. Светоносков. Распределение скорости жидкости в экспериментальной модели тепловыделяющей сборки с дистанционирующей решеткой // Теплофизика и аэромеханика. 2018, № 2, С. 227-231.
14. Усов Э. В., Лобанов П. Д., Кутлиметов А. Э., Кудашов И. Г., Чухно В. И., Лежнин С. И., Прибатурин Н. А., Кашинский О. Н., Светоносков А. И., Мосунова Н. А. Экспериментальное моделирование гидродинамики и теплообмена при пузырьковом и снарядном режимах течения газа в тяжелом жидком металле // Теплоэнергетика, 2018, Т. 8, С. 82-87.
15. Lobanov P.D. Wall Shear Stress and Heat Transfer of Downward Bubbly Flow at Low Flow Rates of Liquid and Gas // Journal of Engineering Thermophysics, 2018, Vol. 27, No. 2, pp. 232–244.
16. Lobanov, P., Pakhomov, M.; Terekhov, V. Experimental and numerical study of the flow and heat transfer in a bubbly turbulent flow in a pipe with sudden expansion // Energies 2019, 12, 2735.
17. Mosunova, N.A., Alipchenkov, V.M., Pribaturin, N.A., Strizhov, V.F., Usov, E.V., Lobanov, P.D., Afremov, D.A., Semchenkov, A.A., Larin, I.A. Lead coolant modeling in system thermal-hydraulic code HYDRA-IBRAE/LM and some validation results // Nuclear Engineering and Design. 2020. (359). С. 110463.
18. Большов Л.А., Прибатурин Н.А., Кашинский О.Н., Лобанов П.Д., Курдюмов А.С., Экспериментальное исследование смешения потоков жидкости с различной температурой в тройниковом соединении // ПМТФ. 2020. Т. 61 № 3.
19. Прибатурин Н.А., Лобанов П.Д., Рандин В.В., Кашинский О.Н., Воробьев М.А., Волков С.М. Экспериментальное исследование распределения напряжения трения в 7-ми стержневой модели ТВС // Теплофизика и Аэромеханика. 2020.
20. Evdokimenko, I.A., Lobanov, P.D., Pakhomov, M.A., Terekhov, V.I., Das, P.K. The effect of gas bubbles on the flow structure and turbulence in a downward two-phase flow in a vertical pipe // J. Engin. Thermophys. 2020. Т. 29. № 3. С. 414–423.

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

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.

Соответствие содержания диссертации паспорту специальности.

Диссертация Лобанова П.Д. посвящена изучению локальной гидродинамики и теплообмена в элементах ядерных энергетических установок и соответствует паспорту специальности 01.04.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника» для технических наук.

Решение о рекомендации работы к защите.

Диссертация «Экспериментальное моделирование локальной гидродинамики и теплообмена в элементах ядерных энергетических установок» Лобанова Павла Дмитриевича рекомендуется к защите на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

Заключение принято на заседании семинара Института теплофизики им. Кутателадзе СО РАН. На заседании присутствовали 41 человек, в том числе 2 академика РАН, 2 член-корреспондента РАН, 18 докторов наук и 10 кандидатов наук. Результаты голосования: «за» - 41 человек, «против» - нет, «воздержалось» - нет, протокол №73/6-2020 от «25» декабря 2020 года.

Председатель семинара

Алексеевко Сергей Владимирович,
д.ф.-м.н., академик РАН

Секретарь семинара

Мулладжанов Рустам Илхамович,
д.ф.-м.н., ст.н.с. Лаборатории физических основ
энергетических технологий ИТ СО РАН

Собственноручный подписи
Алексеевко С.В.
Мулладжанов Р.И.
удостоверяю
Начальник отдела кадров
ИТ СО РАН
С.Ю. Гроховец

