

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
(НИЯУ МИФИ)

На правах рукописи

БАЙСОВ АХМЕД МАГОМЕДОВИЧ

РАЗРАБОТКА ОБОБЩЕННЫХ СООТНОШЕНИЙ ДЛЯ РАСЧЕТА  
КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛООТДАЧИ В ТЕПЛО ВЫДЕЛЯЮЩИХ СБОРКАХ  
ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ, ОХЛАЖДАЕМЫХ ВОДОЙ СВЕРХКРИТИЧЕСКОГО  
ДАВЛЕНИЯ

05.14.03 Ядерные энергетические установки, включая проектирование,  
эксплуатацию и вывод из эксплуатации

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Автор:



Москва 2022

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ» (НИЯУ МИФИ)

Научный руководитель: к.т.н., доцент НИЯУ МИФИ  
Харитонов В.С.

Официальные оппоненты: д.т.н., заведующая отделением  
ИБРАЭ РАН Мосунова Н.А.

д.т.н., главный научный сотрудник  
АО «ГНЦ РФ-ФЭИ» Сорокин А.П.

д.т.н., научный руководитель по научно-  
технической информации  
АО «НИКИЭТ» Габараев Б.А.

Защита состоится "14" сентября 2022 г. в 17 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета МИФИ.01.03 в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ» (НИЯУ МИФИ) по адресу:  
115409, г. Москва, Каширское шоссе, д.31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ и на сайте <https://ds.mephi.ru>.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в двух экземплярах, заверенных печатью организации, по адресу НИЯУ МИФИ.

Автореферат разослан " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
к.т.н., доцент



Куликов Е.Г.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность исследования

В связи с растущим мировым энергопотреблением, сопровождающимся возрастающей тенденцией к снижению выброса углеводородов, в развитых и развивающихся странах возрастает интерес к развитию ядерной энергетики. Международное агентство по атомной энергии считает, что следующим шагом в ее развитии является переход к энергоблокам с реакторами 4-го поколения, что позволит увеличить воспроизводство ядерного топлива в ядерных реакторах, замкнуть ядерный топливный цикл и повысить безопасность энергоустановок за счет использования свойств самозащищенности.

Одним из таких реакторов, рекомендованных для детальной разработки участниками Международного форума «Поколение-4», является реактор ВВЭР-СКД, охлаждаемый водой сверхкритического давления. Основными конкурентными преимуществами ВВЭР-СКД по сравнению с обычными водоохлаждаемыми реакторами будут: повышенный коэффициент полезного действия, который может достичь 45%, а также возможность создания одноконтурной схемы, что приведет к снижению капитальных затрат. В тоже время, одноконтурная схема требует существенных исследований для обеспечения безопасности энергоблоков АЭС с ВВЭР-СКД. Другим свойством реакторов с водой сверхкритического давления является возможность ужесточения спектра нейтронов и, соответственно, повышения воспроизводства ядерного топлива в активной зоне реактора.

Основной особенностью данного типа реакторов является то, что вода, поступающая на вход в реактор, имеет давление выше критического значения 22,06 МПа. Тем самым исключается фазовый переход воды при нагреве в активной зоне. Однако все теплофизические свойства воды претерпевают существенные изменения в области псевдокритической температуры, что определяет связанные с этим специфические особенности тепло и массопереноса.

Для создания прототипа данного типа реакторов необходимо решить ряд научно-технических задач. Одной из первостепенных задач, наряду с выбором конструкционных материалов для оболочек ТВЭЛов и корпуса реактора из-за высоких температур и потоков нейтронов, является разработка обоснованных рекомендаций для расчета теплоотдачи от поверхности ТВЭЛов к теплоносителю в условиях сильного изменения теплофизических свойств теплообменной среды.

Изучение теплообменных процессов в обогреваемых каналах, охлаждаемых различными средами при сверхкритических давлениях, было начато еще в 50-ые годы прошлого века. Вследствие трудности теоретического анализа переноса тепла вблизи критической точки расчетные рекомендации по теплоотдаче к средам сверхкритического давления разрабатывались преимущественно на основе эмпирического подхода.

Поэтому возможность использования известных к настоящему времени соотношений для расчета теплоотдачи к воде СКД, которые были разработаны для труб, применительно к затесненным каналам тепловыделяющих сборок требует тщательного анализа, особенно для условий ухудшенного теплообмена. Кроме того, необходимо уточнение безразмерных комплексов и их значений, определяющих смену режимов теплоотдачи. Поскольку должна быть, несомненно, исключена возможность установления в активной зоне режимов ухудшенного теплообмена, приводящих к недопустимому росту температуры тепловыделяющих элементов.

Практически неисследованным остается вопрос о подходах, применимых для расчета коэффициента теплоотдачи в переходных областях, когда по длине обогреваемого канала одновременно реализуются различные режимы теплообмена.

Разработка новых и анализ существующих соотношений для расчета коэффициента теплоотдачи должны выполняться с использованием как полученных ранее, так и новых данных по теплообмену, полученных на современных исследовательских установках. При этом при анализе и обобщении экспериментальных данных необходимо учитывать все значимые факторы, влияющие на теплообмен.

С учетом изложенного, актуальной задачей для развития инженерных методик обоснования теплогидравлики реакторов с водой сверхкритического давления является разработка комплексной модели для расчета теплоотдачи в средах сверхкритического давления в режимах нормального, улучшенного и ухудшенного теплообмена.

### **Цель работы**

Разработка универсальной расчетной модели теплоотдачи в средах сверхкритического давления в режимах нормального, улучшенного и ухудшенного теплообмена, а также ее тестирование как путем сопоставления с экспериментальными данными по теплоотдаче, так и в составе поячейковой программы при теплогидравлическом анализе тепловыделяющих сборок с водой сверхкритического давления.

### **Задачи исследования**

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Обработаны и проанализированы доступные из открытых литературных источников современные экспериментальные данные по коэффициентам теплоотдачи к воде и модельным средам сверхкритического давления в каналах различной геометрии, в том числе и в пучках стержней, которые объединены в единую базу данных.

2. Разработана расчетная модель теплообмена при течении воды сверхкритического давления в ТВС, включающая

- соотношение, которое описывает изменение коэффициента теплоотдачи в режимах нормального, улучшенного, ухудшенного, а также смешанного теплообмена в диапазоне изменения геометрических и режимных параметров, характерном для реакторов типа ВВЭР-СКД;

- карта режимов теплообмена, которая позволяет на основе безразмерных критериев термического ускорения и энтальпии идентифицировать реализуемые в ТВС режимы теплообмена при известных значениях режимных параметров потока;

- выражение для предельной тепловой нагрузки в ТВС в зависимости от массовой скорости потока воды и гидравлического диаметра канала, при которой начинается переход от режимов с нормальной теплоотдачей к ухудшенной.

3. Сопоставлением с экспериментальными данными обоснована возможность применения разработанного соотношения для расчета коэффициента теплоотдачи к модельным средам, таким как диоксид углерода и фреоны, в различных каналах при сверхкритических давлениях.

4. С использованием предложенной модели теплообмена разработан программный модуль для расчета теплоотдачи к воде сверхкритического давления, который внедрен в модернизированную поячейковую программу ТЕМПА-СК, предназначенную для расчета теплогидравлических процессов в ТВС и активной зоне реакторов типа ВВЭР-СКД.

5. Проведена верификация модернизированной программы ТЕМПА-СК путем сопоставления расчетных зависимостей с экспериментальными данными по изменению температуры по окружности и высоте обогреваемых стержней в тесных сборках, а также выполнена кросс-верификация ТЕМПА-СК с поячейковыми программами ASSERT-PV и COBRA-SC.

6. С помощью модернизированной программы ТЕМПА-СК выполнен анализ влияния конструкции дистанционирующей решетки и дополнительных вытеснителей на теплогидравлические процессы в ТВС двухзаходного варианта активной зоны ВВЭР-СКД.

#### **Научная новизна**

Впервые разработана расчетная модель теплообмена при течении воды сверхкритического давления в ТВС, которая включает:

1. новое соотношение, которое со среднеквадратичным отклонением от экспериментальных данных около 19% описывает изменение коэффициента теплоотдачи в режимах нормального, улучшенного, ухудшенного, а также смешанного теплообмена в широком диапазоне изменения геометрических и режимных параметров ( $d_r = 2,5\text{--}10$  мм,  $p = 22,5\text{--}28$  МПа,  $G = 200\text{--}2000$  кг/(м<sup>2</sup>·с),  $q = 200\text{--}2500$  кВт/м<sup>2</sup>), характерном для реакторов типа ВВЭР-СКД;

2. новую карту режимов теплообмена в воде сверхкритического давления, которая позволяет на основе безразмерных критериев термического ускорения и энтальпии идентифицировать реализуемые в ТВС режимы теплообмена при известных значениях режимных параметров потока;

3. новое выражение для предельной тепловой нагрузки в ТВС в зависимости от массовой скорости потока воды и гидравлического диаметра

канала, при которой начинается переход от режимов с нормальной теплоотдачей к ухудшенной.

### **Практическая значимость работы**

С использованием программного модуля, реализующего разработанную расчетную модель теплообмена модернизирована поячковая программа ТЕМПА-СК, предназначенная для обоснования теплогидравлических характеристик проектируемого реактора ВВЭР-СКД.

С помощью модернизированной программы ТЕМПА-СК было проведено исследование теплогидравлики прототипа тепловыделяющей сборки в активной зоне реактора ВВЭР-СКД. Выработаны рекомендации по модернизации конструкции ТВС, позволяющие уменьшить неравномерность подогревов теплоносителя по ее сечению.

### **Положения, выносимые на защиту**

На защиту выносятся:

1. Разработанная модель теплоотдачи при течении воды и модельных сред сверхкритического давления, включающая:

- соотношение для расчета коэффициента теплоотдачи в режимах нормального, ухудшенного, улучшенного, а также смешанного теплообмена в тесных пучках стержней в широком диапазоне изменения режимных параметров при течении воды и модельных сред сверхкритического давления;

- безразмерные критерии, позволяющие предсказывать реализуемые режимы теплообмена в воде сверхкритического давления при известных значениях режимных параметров потока;

- выражение для определения предельной тепловой нагрузки в зависимости от массовой скорости потока воды и диаметра канала, при которой начинается переход от режимов с нормальной теплоотдачей к ухудшенной.

2. Результаты сопоставления с экспериментальными данными результатов расчета по разработанному соотношению коэффициентов теплоотдачи к воде и модельным средам сверхкритического давления в тесных пучках стержней.

3. Результаты верификации модернизированной программы ТЕМПА-СК путем сопоставления с экспериментальными данными по теплоотдаче в модельных тепловыделяющих сборках.

4. Результаты расчетных исследований теплогидравлических характеристик для прототипа ТВС реактора ВВЭР-СКД и рекомендации по модернизации ее конструкции, позволяющие уменьшить неравномерности подогревов теплоносителя по сечению.

### **Достоверность полученных данных**

Достоверность разработанного соотношения подтверждена сравнением полученных расчетных значений коэффициентов теплоотдачи с экспериментальными данными. Достоверность результатов расчета по модернизированной программе ТЕМПА-СК подтверждается сравнением с экспериментальными данными на пучках стержней и с результатами

расчетов по известным зарубежным программам. В целом достоверность полученных результатов также подтверждается их опубликованием в реферируемых журналах, а также представлением на российских и международных конференциях.

### **Апробация работы**

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих 14 всероссийских и международных конференциях, семинарах и школах: XII Международной молодежной научно-практической конференции «Будущее атомной энергетики – AtomFuture 2016» (Обнинск 2016 г.); XXIII Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, 2017 г.); 19-ой Международной конференции молодых специалистов по ядерным энергетическим установкам (Подольск, 2017 г.); VI Международной молодежной научной школе-конференции «Современные проблемы физики и технологий» (Москва, 2017 г.); 10-ой и 11-ой международной научно-технической конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР» (МНТК-2017, 2019) (Подольск, 2017, 2019 г.); 21-ой Школе-семинаре «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках» (Санкт-Петербург, 2017 г.); Всероссийской конференции с элементами научной школы для молодых учёных «XXXIII Сибирский теплофизический семинар» (Новосибирск, 2017 г.); Международной конференции «Современные проблемы теплофизики и энергетике» (Москва, 2017 г.); XVIII Школе молодых учёных ИБРАЭ РАН «Безопасность и риски в атомной энергетике» (Москва, 2017 г.); Курчатовской междисциплинарной молодежной научной школе (Москва, 2017 г.); The 9<sup>th</sup>, 10<sup>th</sup> International Symposium on Supercritical-Water-Cooled Reactors (ISSCWR-9, 10) (Ванкувер, 2019 г.; Прага, 2021 г.); Научно-техническая конференция молодых специалистов «Инновации в атомной энергетике» (Москва 2019 г.).

### **Личный вклад автора**

Автор работы принимал непосредственное участие: в поиске, отборе и анализе экспериментальных данных по измерению коэффициента теплоотдачи; в разработке определяющих безразмерных критериев; в проведении расчетов и сопоставлении результатов расчетов с экспериментальными данными и другими корреляциями; во внедрении расчетных соотношений в программу ТЕМПА-СК и в проведении верификации программы на экспериментальных данных.

### **Публикации**

Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 10 статьях в журналах, рекомендованных ВАК и индексируемых в реферативных базах Scopus и Web of Science, а также в 14-ти сборниках трудов и тезисов докладов, указанных выше конференций, семинаров и школ.

### **Структура и объем работы**

Диссертационная работа включает введение, пять глав, заключение, список использованных источников. Объем диссертации состоит из 208 страниц, в том числе 68 рисунков и 22 таблиц. Список литературы содержит 206 наименований.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** изложены аргументы для подтверждения актуальности исследования, обоснована цель работы и перечислены формулировки выполненных задач, описана значимость и прикладная ценность полученных результатов. Помимо этого, выделены положения, которые выносятся на защиту, приведены сведения об объеме работы, ее апробации и числе соответствующих публикаций.

**В первой главе** приведены основные результаты предыдущих исследований в области теплоотдачи к сверхкритическим средам в вертикальных обогреваемых каналах на основе выполненного аналитического обзора литературных источников. Подтвержден высокий интерес научных групп из различных стран к изучению процессов теплообмена к жидкостям при сверхкритических давлениях для проектирования инновационных реакторных установок.

Проиллюстрированы существенные изменения теплофизических параметров вблизи соответствующих значений критического давления  $p_{кр}$  и температуры  $t_{кр}$  для воды и модельных сред. Показано отсутствие полного термодинамического подобия между различными средами, используемыми в экспериментальных исследованиях.

Показана особая значимость вопроса о влиянии переменности теплофизических свойств водного теплоносителя на теплоотдачу от поверхности ТВЭЛов, которые приводят к коренной перестройке структуры течения. В первую очередь, обусловленную возникновением термического ускорения и архимедовых сил за счет изменения плотности.

Анализ большого числа расчетных соотношений продемонстрировал недостаточность знаний о турбулентном переносе импульса и тепла в тепломассообменных процессах при течении жидкости с переменными физическими свойствами. Из-за чего обработка экспериментальных данных довольно затруднительна, так как коэффициент теплоотдачи зависит от большого числа параметров, что значительно усложняет выбор существенных критериев, определяющих процесс теплообмена.

В 70-х годах прошлого века на начальном этапе исследований был предложен ряд соотношений для расчета коэффициента теплоотдачи в круглых трубах. Описание теплообмена в сверхкритической области параметров основывается, преимущественно, на эмпирическом подходе. Расчетные соотношения получаются на основе модификации проверенных формул либо Диттуса - Болтера (1930), либо Петухова – Кириллова (1958), разработанных для расчета коэффициента теплоотдачи при турбулентном течении жидкости в круглых трубах. Для учета переменности свойств



жидкости в этих формулах вводят дополнительные поправочные множители, однако, при этом, предложенные корреляции не являются универсальными и не позволяют удовлетворительно рассчитать коэффициент теплоотдачи при различных режимах теплообмена вблизи критической точки. Наиболее известными соотношениями прошлого столетия являются формулы Бишоп (1964), Свенсона (1965), Краснощекова-Протопопова (1966), Ямагаты (1972), Джексона-Фьюстера (1979), Уоттса-Чоу (1982), Курганова-Анкудинова (1985). В последнее десятилетие в связи с разработкой в разных странах концептуальных проектов ВВЭР-СКД появились новые экспериментальные данные по теплообмену в средах сверхкритического давления, на базе которых следующими авторами были предложены новые расчетные соотношения для определения коэффициента теплоотдачи: Джексон (2009), Ченг (2009), Бае (2009), Мокри (2011), Гупта (2011), Чен-Фанг (2014), Ванг (2014).

На момент начала диссертационного исследования не существовало универсальных методик или простых соотношений, позволяющих с приемлемой точностью предсказывать коэффициент теплоотдачи к воде сверхкритического давления при различных режимах теплообмена в ТВС, в особенности для режимов с ухудшенным теплообменом в широком диапазоне параметров без привязки к конкретному набору экспериментальных данных. Большинство высоко цитируемых и используемых для предварительных оценок корреляций были разработаны для труб малого диаметра и только несколько соотношений были построены на базе экспериментов с пучками стержней. Тем не менее, в зарубежные поканальные и системные коды были внедрены замыкающие соотношения для расчета теплообмена и гидродинамики, с использованием которых были выполнены первые расчеты номинальной работы на мощности, а также различных аварийных сценариев для концептуальных проектов реакторов со сверхкритическими параметрами.

Таким образом, сформулированные цель и задачи данного исследования подтверждают острую необходимость в разработке более надежной универсальной методики расчета теплообмена на основе обобщения доступных современных экспериментальных данных с последующим внедрением в отечественные расчетные программы.

**Во второй главе** перечислены основные требования по формированию банка экспериментальных данных по коэффициентам теплоотдачи к средам при сверхкритическом давлении, дано описание современных экспериментальных стендов, использующихся для данных исследований, а также перечислены расчетные программы, позволяющие численно моделировать теплогидравлические процессы в тепловыделяющих сборках с водой при сверхкритическом давлении.

На основе экспериментальных данных для выработки обобщенных рекомендаций по определению коэффициента теплоотдачи при вынужденном движении воды при сверхкритическом давлении возможно использование двух подходов: это либо создание корреляции на основе

безразмерных критериев и поправочных коэффициентов, учитывающих значительное изменение свойств среды в канале при различных сочетаниях режимных параметров, либо разработка скелетных таблиц с фиксированными дискретными значениями выбранных параметров по аналогии с определением критического теплового потока при кризисе теплоотдачи. Первый способ характеризуется тем, что даже при отсутствии обширных экспериментальных данных, можно на основе гипотез о характере процесса и анализа размерностей наиболее значимых параметров выделить определяющие критерии, с помощью которых на имеющемся наборе данных построить приемлемые по точности корреляции. Второй способ можно использовать при наличии достаточно большого массива данных, полученных различными исследовательскими коллективами на отличных друг от друга экспериментальных стендах. Поскольку при построении скелетных таблиц, проводится скрупулезный, но только качественный отбор экспериментальных точек без выявления характерных закономерностей, которые, как предполагается, отражены в самих численных значениях интересующего параметра. Тем не менее, общим началом перечисленных методов является отбор и формирование соответствующей совокупности экспериментальных точек измеренных значений коэффициента теплоотдачи.

Приведено описание имеющихся в различных лабораториях исследовательских стендов и методик, с помощью которых были получены наиболее достоверные опытные данные по теплоотдаче к средам сверхкритического давления. Также перечислены поядейковые и системные компьютерные программы, позволяющие моделировать как отдельные каналы, так и контуры циркуляции теплоносителя со сверхкритическими параметрами теплоносителя в реакторе, с указанием используемых в кодах замыкающих соотношений для описания характеристик теплопереноса.

Отбор и систематизация опубликованных в открытых литературных источниках экспериментальных данных по теплообмену в трубах, кольцевых каналах и пучках стержней, охлаждаемых водой и модельными средами сверхкритического давления проводился с учетом выполнения условий подобия: геометрического (форма и размеры канала, для сборок - диаметр стержней, относительный шаг), гидродинамического (идентичность режимов течения, которая определяется массовой скоростью потока и гидравлическим диаметром) и термодинамического подобия (соответствующие значения давления и температуры).

Учитывались дополнительные факторы, влияющие на теплоотдачу: ориентация канала и направление потока в нем, тип дистанционирования в сборке. При анализе данных проверялось выполнение условия теплового баланса. Также выделялись данные, сильное отклонение которых от основной массы данных не имело объяснения. Анализировалась погрешность экспериментальных данных.

В результате были подготовлены наборы оцененных экспериментальных данных, которые далее использовались для выявления определяющих безразмерных критериев, разработки и верификации

универсальных соотношений для расчета коэффициента теплоотдачи к воде сверхкритического давления в тепловыделяющих сборках.

Общее число экспериментальных точек для пучков стержней составило 1815 из 7 источников, охватывающие следующие диапазоны параметров:  $d_T = 8 - 10$  мм,  $p = 23 - 28$  МПа,  $G = 200-2700$  кг/(м<sup>2</sup>с) и  $q = 200-3200$  кВт/м<sup>2</sup>.

**В третьей главе** изложена разработанная методика расчета коэффициента теплоотдачи при движении воды сверхкритического давления в пучках стержней.

При изучении процессов теплообмена к средам сверхкритических параметров было выделено три характерных режима теплообмена, которым присущ различный характер изменения температуры стенки и коэффициента теплоотдачи по длине обогреваемого канала: нормальный, ухудшенный и улучшенный.

Нормальные режимы характеризуются тем, что зависимости конвективного коэффициента теплоотдачи от чисел Рейнольдса и Прандтля для среды с переменными теплофизическими свойствами имеют примерно такой же вид, как и при постоянных свойствах. Соответственно для обеспечения надежного теплосъема в активной зоне в основу работы ядерного реактора должны быть положены именно такие режимы теплообмена или режимы улучшенного теплообмена, при которых происходит значительное увеличение коэффициента теплоотдачи. Вместе с тем, необходимо корректно определять условия возможного наступления ухудшенных режимов теплообмена, при которых возникают значительные повышения температур оболочек тепловыделяющих элементов. Режимы ухудшенной теплоотдачи недопустимы в активной зоне ВВЭР-СКД. Однако, при проведении анализов безопасности реакторов, необходимо корректно оценивать уровень устанавливающейся при этом теплоотдачи.

При получении обобщенной зависимости для описания коэффициента теплоотдачи при движении воды сверхкритического давления в пучках стержней в качестве базового соотношения было использовано соотношение, разработанное на кафедре теплофизики НИЯУ МИФИ, под руководством профессора В.И. Деева:

$$Nu_{ж.н} = Nu_0 \left( \frac{\rho_c}{\rho_{ж}} \right)^{0,25} \left( \frac{\overline{c_p}}{c_{p,ж}} \right)^n. \quad (1)$$

В соотношении (1) число Нуссельта  $Nu_0$  определяется по известному соотношению Диттуса–Болтера  $Nu_0 = 0,023 Re_{ж}^{0,8} Pr_{ж}^{0,4}$ , где числа Нуссельта  $Nu_0$ , Рейнольдса  $Re_{ж}$  и Прандтля  $Pr_{ж}$  содержат физические свойства среды при среднемассовой температуре жидкости  $t_{ж}$ ; поправки на изменение свойств по поперечному сечению канала представляют собой отношения плотности среды  $\rho_c$  при температуре стенки  $t_c$  к плотности  $\rho_{ж}$  при температуре  $t_{ж}$  и среднеинтегральной по сечению канала теплоемкости  $\overline{c_p}$  к удельной теплоемкости при постоянном давлении  $c_{p,ж}$  при температуре  $t_{ж}$ ;  $n = 0,6$  при

$\overline{c_p}/c_{p\text{ ж}} \leq 1$  и  $n = 0,4$  при  $\overline{c_p}/c_{p\text{ ж}} \geq 1$ . Формула (1) со среднеквадратичным отклонением 25% описывает массив более 4000 опытных точек из 20-ти (отечественных и зарубежных) источников (за период с 1963 по 2016 годы) по нормальной теплоотдаче к потоку воды сверхкритического давления в вертикальных трубах.

Для выяснения характеристик и условий существования различных режимов теплоотдачи к воде сверхкритического давления в ТВС были рассмотрены опубликованные опытные данные для пучков стержней. Анализ всей совокупности рассмотренных экспериментальных данных показал, что, если среда находится в удалении от псевдофазового перехода, а, именно, когда модуль относительной энтальпии  $\Delta h/h_m = (h - h_m)/h_m$  больше 0,5, где  $h_m$  энтальпия, вычисленная при псевдокритической температуре, то режим теплообмена всегда носит нормальный характер. В области энтальпий среды вблизи  $h_m$  могут существовать различные режимы теплоотдачи.

Отмечено, что в опытах, которые проводились при достаточно больших массовых скоростях воды и относительно малых тепловых нагрузках, режимы ухудшенной теплоотдачи не были обнаружены.

Режимы ухудшенного теплообмена в области сверхкритического давления наиболее вероятны при высоких тепловых нагрузках и небольших массовых скоростях воды. С ростом энтальпии потока в зоне отрицательных значений  $\Delta h/h_m$  происходило сначала падение коэффициента теплоотдачи, а затем его восстановление до нормальной величины. Степень ухудшения теплообмена зависела от соотношения тепловой нагрузки и массовой скорости. В большинстве опытов ухудшение теплоотдачи начиналось при значениях относительной энтальпии  $\Delta h/h_m$  от  $-0,5$  до  $-0,3$ .

Наиболее сложный характер изменения теплоотдачи наблюдается в режимах переходного теплообмена, существование которых было также отмечено из анализа экспериментальных данных. Таким режимам обычно свойственна определенная неустойчивость, вследствие чего могут наблюдаться самопроизвольные переходы от одного режима теплообмена к другому.

Ввиду небольшого гидравлического диаметра каналов охлаждения в активных зонах ядерных реакторов критерий Грасгофа мал, поэтому влияние гравитационных сил на процесс теплообмена можно не учитывать и определяющую роль должно играть термическое ускорение.

К факторам, существенным для процесса термического ускорения в потоке воды сверхкритического давления, были отнесены гидравлический диаметр канала  $d_T$ , режимные параметры – плотность теплового потока на стенке  $q$  и массовая скорость потока  $G$ , а также физические свойства жидкости – удельная теплоемкость при постоянном давлении  $c_p$ , коэффициент динамической вязкости  $\mu$  и коэффициент объемного термического расширения  $\beta$ . Выполненный анализ размерностей перечисленных величин дал два безразмерных комплекса: критерий

Рейнольдса  $Re = Gd_r/\mu$  и критерий ускорения  $K = q\beta/(Gc_p)$ , учитывающий влияние изменения плотности теплоносителя.

В процессе обработки результатов 1815 опытных точек, полученных в 48 сериях экспериментов (Wang (2014, 2016), Gu (2015), Hu (2018)) для пучков стержней было установлено, что для получения обобщенных зависимостей для расчета коэффициента теплоотдачи можно использовать комплексный критерий термического ускорения в следующем виде  $K_{Am} = Re_m^{0,5} / K_m$ , а отношение  $Nu_3/Nu_{ж.н}$  достаточно рассматривать как функцию критерия  $K_h = K_{Am} \cdot \Delta h / h_m$  (индекс  $m$  означает, что физические свойства среды  $\mu$ ,  $\beta$  и  $c_p$  выбираются при псевдокритической температуре  $t_m$ ). Кроме того, из соображений компактности выражений и результатов численных расчетов было предложено записывать критерии  $K_{Am}$  и  $K_h$  в виде  $\tilde{K}_{Am} = (Re_m \times 10^{-5})^{0,5} / (K_m \times 10^3)$  и  $\tilde{K}_h = \tilde{K}_{Am} \Delta h / h_m$ .

На рисунке 1 приведены результаты обработки результатов экспериментов в виде зависимости отношения числа Нуссельта, найденного по экспериментальным данным, к числу Нуссельта, рассчитанному по формуле (1),  $Nu_3/Nu_{ж.н}$  от  $\tilde{K}_h$  при двух фиксированных значениях критерия  $\tilde{K}_{Am}$ .

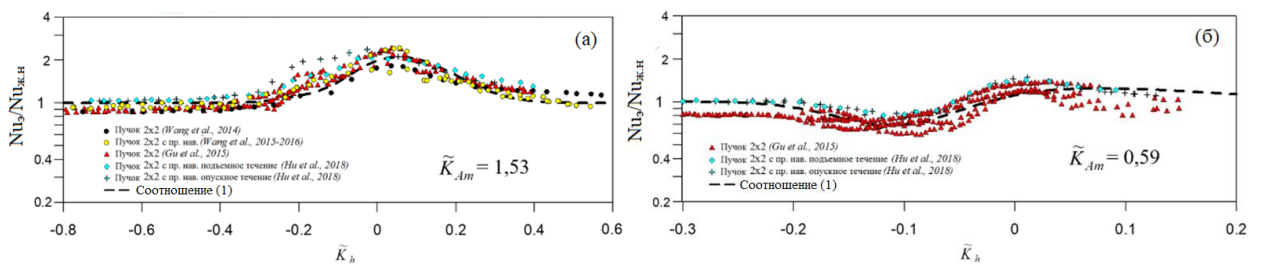


Рисунок 1 – Режимы улучшенного (а) и ухудшенного (б) теплообмена в пучках стержней

Для того чтобы описать в математической форме кривые, усредняющие опытные данные на рисунке 1, были использованы специально подобранные экспоненциальные функции. Детальный анализ всей совокупности рассмотренных экспериментальных данных показал, что режимы с улучшенной теплоотдачей,  $\tilde{K}_{Am} > 2,5$  удовлетворительно описываются функцией

$$Y_1 = 1 + 1,5 \exp(-30 \tilde{K}_h^2 + 3 \tilde{K}_h), \quad (2)$$

а режимы существенно ухудшенного теплообмена  $\tilde{K}_{Am} < 0,1$  – функцией

$$Y_2 = 1 - 0,15 \exp(-125 \tilde{K}_h^2 - 25 \tilde{K}_h). \quad (3)$$

Определенные таким образом зависимости  $Y_1$  и  $Y_2$  описывают предельные случаи, соответственно, для режимов улучшенной и ухудшенной теплоотдачи.

В смешанных (или переходных) режимах на теплоотдающих поверхностях реализуются одновременно режимы улучшенной (нормальной) и ухудшенной теплоотдачи, причем вклад каждого такого режима в

суммарный процесс зависит от значения  $\tilde{K}_{Am}$ . Тогда для математической формы описания режимов теплообмена в общем случае может быть использована суперпозиция функций  $Y_1$  и  $Y_2$  с определенным весовым показателем.

Следовательно, поправочный множитель для зависимости (1) будет иметь вид

$$Y = (1 - \zeta)Y_1 + \zeta Y_2, \quad (4)$$

где  $\zeta = \exp(-0,5\tilde{K}_{Am}^2)$  – весовой показатель, зависящий от значения  $\tilde{K}_{Am}$ .

Таким образом, рекомендуемое итоговое соотношение для проведения расчетов теплоотдачи в режимах нормального, улучшенного, ухудшенного, а также смешанного теплообмена имеет вид:

$$Nu_{ж} = Nu_0 \left( \frac{\rho_c}{\rho_{ж}} \right)^{0,25} \left( \frac{\overline{c_p}}{c_{pж}} \right)^n Y, \quad (5)$$

где поправочный множитель  $Y$  вычисляется по формулам (2) – (4). На рисунке 2 показан характер изменения поправочного множителя  $Y$  при различных значениях  $\tilde{K}_{Am}$ .

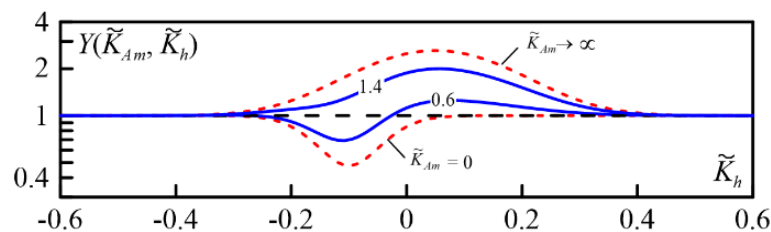


Рисунок 2 - График поведения поправочного множителя  $Y$  при различных значениях критерия  $\tilde{K}_{Am}$

На основе статистической обработки расчетных значений коэффициента теплоотдачи было показано, что система уравнений (1 - 5) удовлетворительно описывает данные по теплоотдаче, полученные в экспериментах со всеми пучками, при этом среднеквадратичное отклонение для всех изученных режимов теплообмена в воде составляет около 19%.

Результаты сравнения с известными соотношениями для труб на базе опытных данных по теплоотдаче к воде СКД в пучках обогреваемых стержней показывают, что формулы Бишоп, Джексона-Фьюстера, Курганова-Анкудинова для нормальных режимов теплообмена дают отклонения расчетов от экспериментов в среднем на уровне 19% и соответствуют погрешности определения коэффициента теплоотдачи по соотношению (5). Однако для ухудшенных режимов теплообмена разработанная методика демонстрирует лучшие результаты. На рисунке 3 приведены результаты расчетов коэффициента теплоотдачи по различным уравнениям и соотношениям (1 - 5) для условий улучшенного и ухудшенного режимов теплообмена.

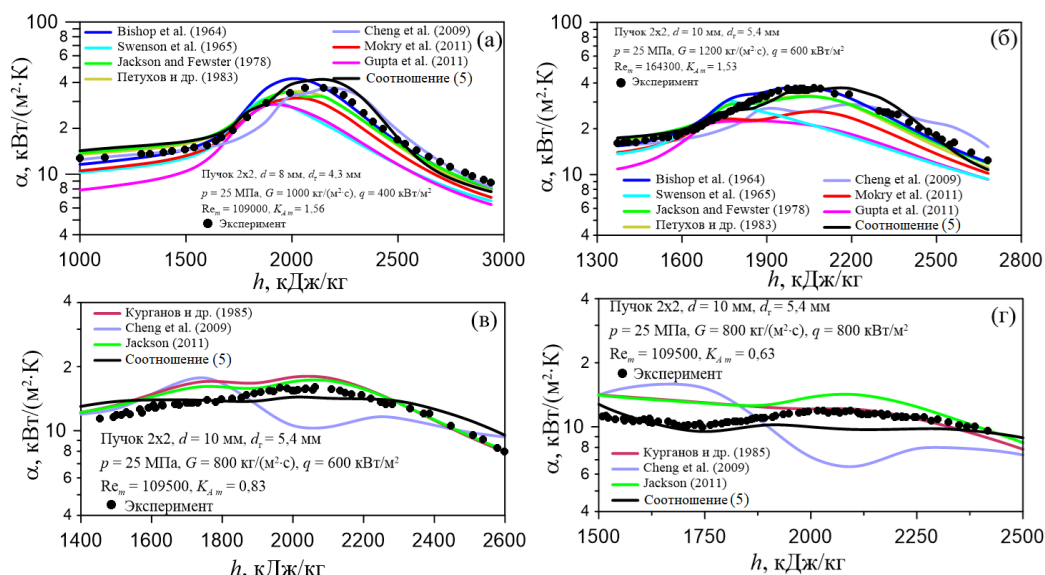


Рисунок 3 - Сравнение результатов расчета коэффициентов теплоотдачи по соотношениям разных авторов с опытными данными для пучка стержней: (а) Wang (2015), (б – г) Gu (2015)

Для подтверждения общих закономерностей теплообмена при сверхкритических параметрах и обоснования правильного выбора безразмерных критериев были проанализированы данные для модельных сред (диоксид углерода, фреоны R-12 и R-132a). Результаты обработки опытных данных, демонстрирующие те же тенденции поведения коэффициента теплоотдачи, как и для воды, представлены на рисунках 4 и 5.

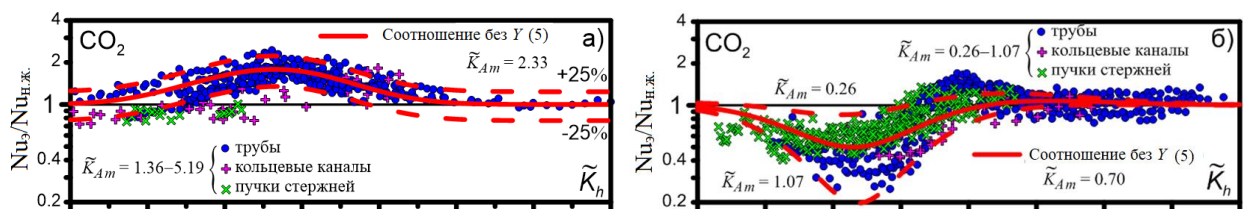


Рисунок 4 - Результаты обработки опытных данных для диоксида углерода: а – режимы улучшенного теплообмена; б – режимы с ухудшенным теплообменом

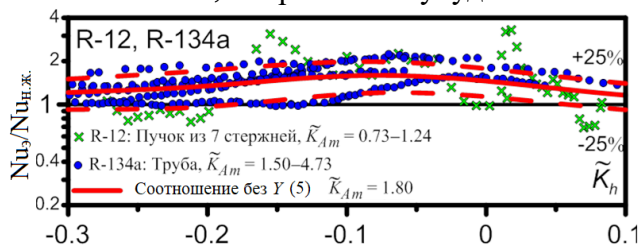


Рисунок 5 - Режимы улучшенного теплообмена в опытах с фреонами

Статистический анализ отклонений экспериментальных данных для модельных сред от значений, рассчитанных по формуле (5) с измененными численными коэффициентами в поправочных функциях  $Y_{1,2}$ , показал, что относительные среднеарифметические расхождения не превышают 3%, а среднеквадратичные отклонения составляют 20%. Следует отметить, что



использование различных значений коэффициентов в поправочных функциях указывает на термодинамическую неэквивалентность этих сред и воды.

Для режимов с ухудшенным теплообменом были рассмотрены существующие методики их идентификации и продемонстрировано, что подобные подходы искусственны и не соответствуют сущности физических явлений. Поэтому на основе введенных безразмерных критериев  $K_{Am}$  и  $K_h$  были предложены карты режимов теплообмена (рисунок 6). При построении карт было предложено различать две группы ухудшенных режимов теплообмена. Ухудшенные режимы теплообмена второй группы отличаются: более сильным, чем в первой группе, снижением коэффициента теплоотдачи; смещением зоны с минимальной теплоотдачей в сторону более отрицательных значений относительной энтальпии; явной неустойчивостью протекающих процессов (вариант Б). Если же построить “оггибающую кривую” с использованием поправочной функции соотношения (5) для обеих групп ухудшенных режимов, то можно получить консервативную оценку предельно низких коэффициентов теплоотдачи (вариант В).

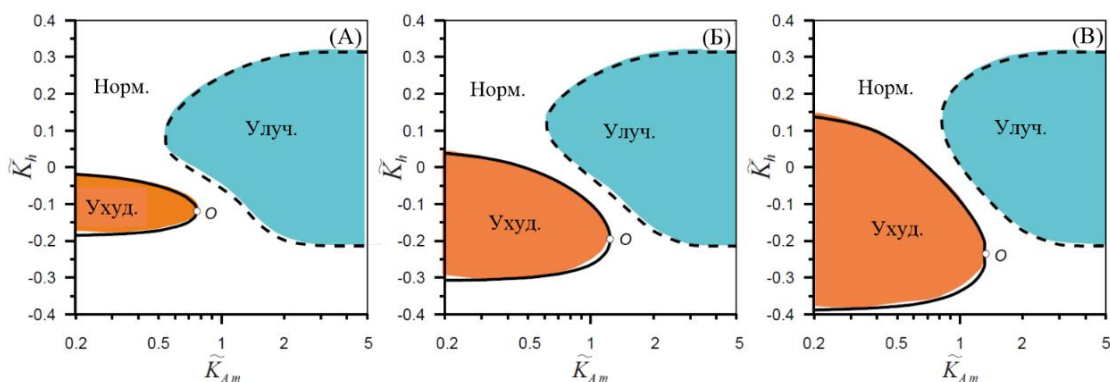


Рисунок 6 – Карты режимов теплообмена: (А) для данных отнесенных к первой группе ухудшенных режимов, (Б) для данных отнесенных ко второй группе ухудшенных режимов, (В) самый консервативный вариант

На диаграммах рисунка 6 буквой "О" обозначены точки, выше которых ухудшения теплоотдачи не происходит. Исходя из этого, было получено соотношение для предельной величины теплового потока в нормальном режиме теплообмена

$$q_{\text{пред}} = C \cdot 10^{-5} d^{0.5} G^{1.5} \frac{c_{p,m}}{\beta_m \mu_m^{0.5}}, \quad (6)$$

где  $C = 0,414, 0,255, 0,242$  соответствуют вариантам А, Б, В карты режимов теплообмена.

Стоит отметить, что при анализе ухудшенных режимов не рассматривались случаи повышения температуры на входе обогреваемых каналов, поскольку экспериментальные данные по данному вопросу не очень многочисленны и противоречивы.

**В четвертой главе** приведено описание модернизированной программы ТЕМПА-СК и программная реализация методики расчета



теплообмена, анализ выбора замыкающего соотношения для гидравлического сопротивления.

Практическое применение разработанной методики было реализовано путем разработки программного модуля для расчета теплоотдачи к воде сверхкритического давления, а также гидравлического сопротивления, который был внедрен в модернизированную поячейковую программу ТЕМПА-СК, предназначенную для расчета теплогидравлических процессов в ТВС и активной зоне реакторов типа ВВЭР-СКД.

В программу ТЕМПА-СК заложена поячейковая методика расчета с учетом межканального перемешивания теплоносителя, которая основана на уравнениях сохранения массы, импульса и энергии, записанных в интегральной форме для однофазного теплоносителя для неподвижных в пространстве контрольных объемов.

Для решения краевой задачи на основе системы обыкновенных дифференциальных уравнений, полученной из исходной системы путем ряда преобразований и осреднений, используется численная схема, основанная на методе FLIC.

При модернизации программы для выбора замыкающего соотношения для расчета гидравлического сопротивления в каналах при течении сред сверхкритических параметров, были изучены опубликованные работы (Тарасова и Леонтьева (1968), Кондратьева (1969), Красякова (1973), Ишигаи (1976), Дядякин и Попов (1977), Разумовский (1984, 1985), Lei (2012, 2016), Zhang (2016, 2020), посвященные данной теме. Авторы работ отмечают трудность при теоретическом описании гидродинамики турбулентных течений вблизи критической точки. С этим связана обнаруженная в ходе проведенного исследования неопределенность и противоречивость интерпретации опубликованных в 2018 году экспериментальных данных Н. Wang. Причиной этого является характер зависимости коэффициента сопротивления трения  $\xi(t_b)$  в области сверхкритических давлений от температуры, которая, в свою очередь, влияет на величину плотности среды при расчете  $\xi$  по уравнению Дарси–Вейсбаха. Оценки показали, что эта ошибка непосредственно связана с погрешностями измерения температуры воды на входе (или выходе) канала, неточностью в расчетах тепловых потерь в окружающую среду и с погрешностями при определении расхода воды и тепловой мощности, подведенной к каналу на участке измерения перепада давления.

На рисунке 7 проведено сравнение результатов расчетов, показывающих изменение относительной величины коэффициента сопротивления трения с ростом энтальпии потока воды в области сверхкритических давлений.

В результате, и с учетом того, что термическое ускорение, обусловленное падением плотности среды при нагреве, является основным фактором, определяющим особенности процессов переноса в воде сверхкритического давления, в качестве замыкающего соотношения для

расчета гидравлического сопротивления в программе ТЕМПА-СК было выбрано соотношение В.Н. Попова (1965)

$$\frac{\xi}{\xi_0} = (\rho_c / \rho_{ж})^{0,4}, \quad (7)$$

где  $\xi_0$  определяется по формулам для изотермического течения однофазной среды.

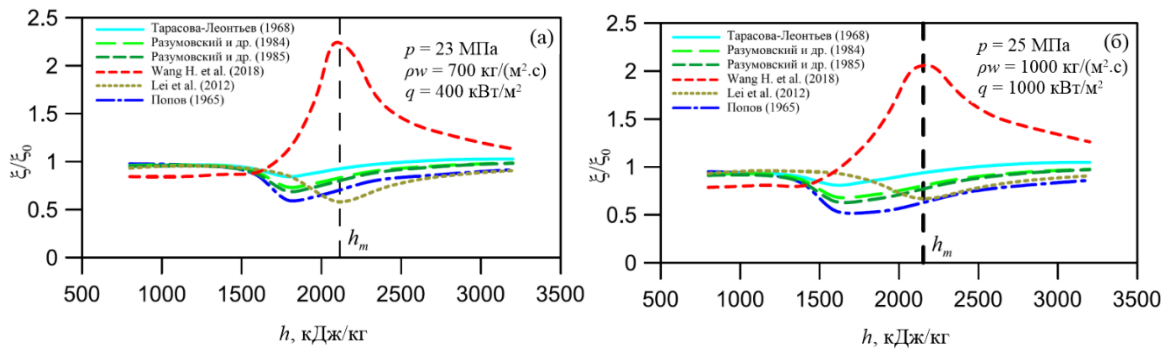


Рисунок 7 – Сравнение результатов расчета по разным корреляциям коэффициента сопротивления трения при неизотермическом турбулентном движении воды в гладкой трубе диаметром 8 мм

В ходе проведенной модернизации программы ТЕМПА-СК в нее в виде отдельного модуля были внедрены универсальное расчетное соотношение (1)-(5) для расчета коэффициента теплоотдачи и формула (7) для гидравлического сопротивления.

Предложенная методика расчета коэффициента теплоотдачи позволила расширить область применения программы ТЕМПА-СК не только для воды, но и для модельных сред при сверхкритическом давлении, таких как диоксид углерода и фреоны R12, R134a.

Для совершенствования алгоритма расчета теплогидравлических процессов по программе ТЕМПА-СК в различных средах сверхкритического давления были сформированы в виде двоичных файлов таблицы теплофизических свойств для каждой конкретной среды. В таблицах теплофизические свойства задаются в зависимости от плотности и энтальпии, а не от давления и температуры, как было сделано ранее. Соответствующее изменение алгоритма программы ТЕМПА-СК позволило увеличить скорость расчетов в 2 раза.

**В пятой главе** представлены результаты верификации программы ТЕМПА-СК.

Для проверки достоверности расчетов теплогидравлических процессов в средах сверхкритического давления по программе ТЕМПА-СК использовались эксперименты по измерению температуры теплоотдающих стенок в пучках стержней в режимах с различной интенсивностью теплообмена, а также результаты расчетов по аналогичным поячейковым программам COBRA-SC и ASSERT-PV.

Поскольку в текущей версии ТЕМПА-СК отсутствует модель, описывающая поперечное перемешивание среды за счет ребер или проволочных навивок на поверхности теплообмена, то для сопоставления с результатами расчетов использовались данные экспериментов только с гладкими стержнями в пучке. Влияние на характер течения специальных дистанционирующих решеток, при их наличии, учитывалось заданием коэффициентов местных сопротивлений, которые определялись в соответствии с типом и заданными геометрическими размерами этих устройств.

На рисунке 8 представлено сравнение результатов расчетов распределения температуры стенок двух из четырех нагреваемых электрическим током трубок, размещенных в квадратном кожухе (пучок 2×2). Экспериментальные данные (Li, 2013), представленные на рисунке 8 (а) и (б), получены в условиях, которые характерны для режимов ухудшенного теплообмена. Видно, что результаты расчета изменения температуры стенок трубок согласуются с экспериментальными данными, среднеквадратичное отклонение составляет по программе ТЕМПА-СК – 5%, 3%, а для программы COBRA-SC – 10% и 7%. Кривые, рассчитанные по программе COBRA-SC, располагаются в среднем на 4% выше кривых  $T_w$ , рассчитанных по программе ТЕМПА-СК. Поскольку для определения коэффициента теплоотдачи в расчетах по программе COBRA-SC использовалась корреляция Свенсона (1968), которая дает заниженные значения по сравнению с разработанной корреляцией (5). Обе программы фиксируют резкое снижение температуры стенки в местах расположения дистанционирующих устройств в пучке, свидетельствуя об интенсификации теплообмена за счет дополнительного перемешивания теплоносителя.

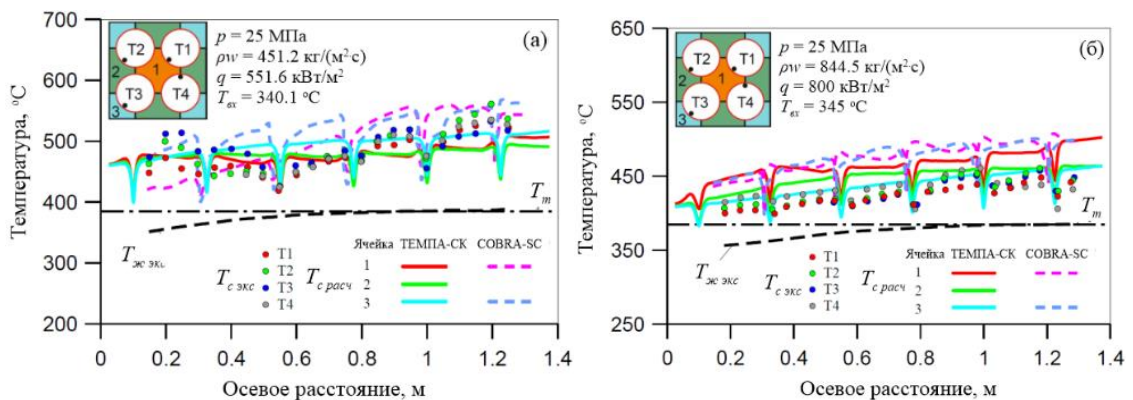


Рисунок 8 – Сравнение результатов расчета температур стенки и теплоносителя с использованием программ ТЕМПА-СК и COBRA-SC с экспериментальными данными для пучка стержней 2×2, охлаждаемого водой сверхкритического давления (Li, 2013)

На трех графиках (а), (б) и (в) рисунка 9 приведены экспериментальные данные по изменению температуры по окружности нагреваемых трубок в четырехтрубном пучке, охлаждаемом водой сверхкритического давления, в сравнении с результатами расчетов температуры стенки по программам ТЕМПА-СК и ASSERT-PV для

различных ячеек при выбранных трех характерных значениях среднемассовой температуры воды в пучке. Во всех случаях, как эксперименты, так и расчеты показывают симметричное изменение температуры стенки по окружности труб с максимумом в угловых ячейках. Применение поканальных методик позволяет определить только средние в пределах рассматриваемой ячейки значения температуры, при этом перетечки тепла по стенке трубы от одной ячейки к другой за счет теплопроводности не учитываются. Этими причинами, в основном, можно объяснить некоторое расхождение расчетных и экспериментальных результатов, которое для программы ТЕМПА-СК составило в среднем 1,5%. Различия в расчетах по программам может быть вызвано также использованием разных корреляционных соотношений по теплоотдаче. Так в программе ASSERT-PV использовалась корреляция Джексона (1974).

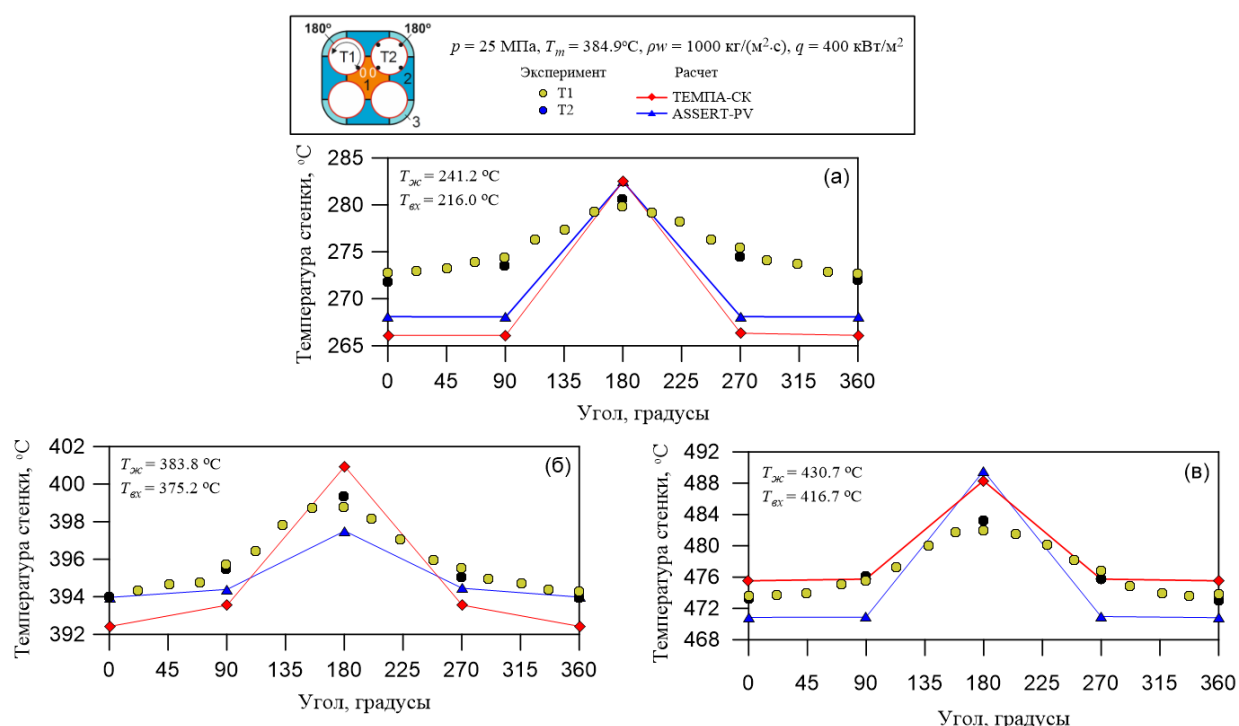


Рисунок 9 – Сравнение результатов расчетов по программам ТЕМПА-СК и ASSERT-PV с экспериментальными точками по изменению температуры по окружности нагреваемых трубок в пучке 2×2 при различных значениях среднемассовой температуры охлаждающей воды: (a)  $T_{жс} < T_m$ , (b)  $T_{жс} \approx T_m$ , (c)  $T_{жс} > T_m$  (Wang, 2014)

На рисунке 10 приведены результаты расчетов по программе ТЕМПА-СК в сравнении с данными экспериментов, проведенных с модельными средами. Из представленных графиков видно, что расчеты вполне адекватно описывают наблюдавшиеся в опытах закономерности изменения температур теплоносителя и теплоотдающих поверхностей по длине пучков с разным количеством греющих элементов. Максимальные среднеквадратичные отклонения для экспериментов с диоксидом углерода и фреоном R-134a, соответственно, составляют – 30% и 1,5%. Расчеты на осевом расстоянии от 0 до 0,5 м для диоксида углерода имеют существенные отличия по сравнению с экспериментом, что может быть связано, с

конструктивными особенностями на входе в канал, которые не учитываются при расчете из-за недостатка информации, а также с недостаточно корректным расчетом поперечного переноса тепла и импульса для модельных сред.

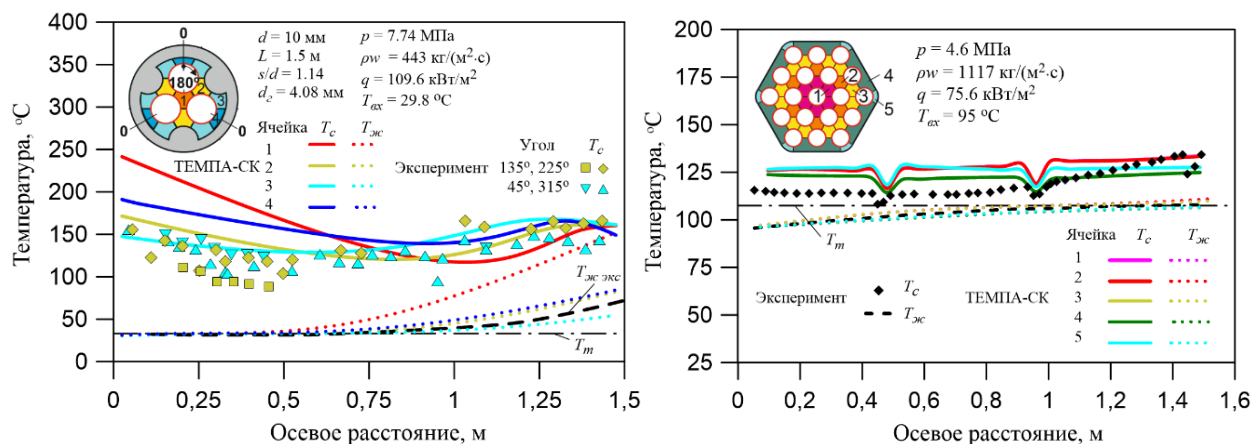


Рисунок 10 – Результаты расчета с помощью программы ТЕМПА-СК распределения температур: (а) в ячейках 3-х стержневого пучка, охлаждаемого диоксидом углерода при сверхкритическом давлении (Eter, 2016), (б) в ячейках 19-ти стержневого пучка, охлаждаемого фреоном R-134a при сверхкритическом давлении (Richards, 2013)

Выполненные тестовые расчеты по модернизированной программе ТЕМПА-СК в сравнении с данными экспериментов с водой сверхкритического давления показали, что максимальное среднеквадратичное отклонение для температуры стенки составило 5%. Результаты верификации подтверждают работоспособность внедренной методики расчета коэффициента теплоотдачи в качестве основного замыкающего соотношения. Некоторые отклонения численных значений температуры стенок имитаторов твэлов от полученных в эксперименте может быть связано или с не учетом поперечной теплопроводности стенок стержней, или с тем, что в программе ТЕМПА-СК модель турбулентного переноса импульса в поперечном направлении недостаточно корректно учитывает особенности течения сверхкритических сред.

С помощью модернизированной программы ТЕМПА-СК была смоделирована одна двенадцатая часть ТВС двухзаходного варианта реактора ВВЭР-СКД (рисунок 11). Результаты расчета, представленные на рисунке 12, показали, что вследствие большего размера боковых каналов по сравнению с центральными каналами происходит вытеснение потока из центра в периферию, что приводит к существенному дисбалансу в подогревах. Для решения данной проблемы был предложен альтернативный вариант с внедрением дополнительного вытеснителя, который должен располагаться по всей длине чехла ТВС, тем самым компенсируя различие в проходных сечениях и выравнивая поток и подогрев теплоносителя по сечению ТВС в целом. Рисунок 12 демонстрирует, что предлагаемая форма вытеснителя позволяет снизить максимальные значения температуры оболочки твэла с 680°C до 640°C, и, кроме того, сделать распределение



температуры теплоносителя на выходе из ТВС более равномерным, уменьшая возможные термомеханические повреждения ТВЭЛ из-за существенных температурных градиентов.



Рисунок 11 – Нодализация модель ТВС реактора ВВЭР-СКД и вариант дистанционирующей решетки

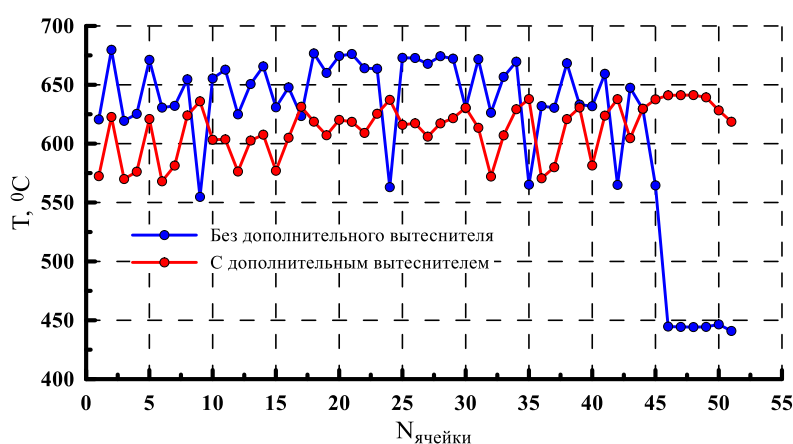


Рисунок 12 – Результаты расчета температуры теплоносителя на выходе из ТВС прототипа ВВЭР-СКД с учетом и без учета дополнительного вытеснителя

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. На основе анализа опубликованной экспериментальной информации по теплообмену в каналах различной геометрии, охлаждаемых средами сверхкритического давления, составлена база данных, использовавшихся для разработки и обоснования рекомендаций по расчету теплоотдачи при течении воды сверхкритического давления в ТВС.

2. Разработана расчетная модель теплообмена при течении воды сверхкритического давления в ТВС, которая включает:

- новое соотношение, которое со среднеквадратичным отклонением от экспериментальных данных около 19% описывает изменение коэффициента теплоотдачи в режимах нормального, улучшенного, ухудшенного, а также смешанного теплообмена в широком диапазоне изменения геометрических и режимных параметров ( $d_r = 2,5\text{--}10$  мм,  $p = 22,5\text{--}28$  МПа,  $G = 200\text{--}2000$  кг/(м<sup>2</sup>·с),  $q = 200\text{--}2500$  кВт/м<sup>2</sup>), характерном для реакторов типа ВВЭР-СКД;

- новую карту режимов теплообмена в воде сверхкритического давления, которая позволяет на основе безразмерных критериев термического ускорения и энтальпии идентифицировать реализуемые в ТВС

режимы теплообмена при известных значениях режимных параметров потока;

- новое выражение для предельной тепловой нагрузки в ТВС в зависимости от массовой скорости потока воды и гидравлического диаметра канала, при которой начинается переход от режимов с нормальной теплоотдачей к ухудшенной.

3. Сопоставлением с экспериментальными данными обоснована возможность применения разработанного соотношения для расчета коэффициента теплоотдачи к модельным средам, таким как диоксид углерода и фреоны, в различных каналах (круглых трубах, кольцевых каналах и пучках стержней) при сверхкритических давлениях. Однако различия численных значений коэффициентов в поправочном множителе соотношения для теплоотдачи для рассмотренных сред и воды указывает на их термодинамическую неэквивалентность.

4. С использованием предложенной модели теплообмена разработан программный модуль для расчета теплоотдачи к воде сверхкритического давления, который внедрен в модернизированную поячейковую программу ТЕМПА-СК, предназначенную для расчета теплогидравлических процессов в ТВС и активной зоне реакторов типа ВВЭР-СКД. Усовершенствование алгоритма определения теплофизических свойств сверхкритической среды позволило в 2 раза повысить скорость счета по модернизированной программе ТЕМПА-СК.

5. Проведена верификация модернизированной программы ТЕМПА-СК путем сопоставления расчетных зависимостей с экспериментальными данными по изменению температуры по окружности и высоте обогреваемых стержней в тесных сборках и показано хорошее совпадение результатов расчета с экспериментальными данными для воды при сверхкритическом давлении, среднеквадратичное отклонение не превышает 5%. Также выполнена кросс-верификация ТЕМПА-СК с поячейковыми программами ASSERT-PV и COBRA-SC и отмечено качественное согласование результатов расчета. Анализ количественных расхождений показал, что они могли быть связаны с не учетом поперечной теплопроводности стенок стержней.

6. С помощью модернизированной программы ТЕМПА-СК выполнен анализ влияния конструкции дистанционирующей решетки и дополнительных вытеснителей на теплогидравлические процессы в ТВС двухзаходного варианта активной зоны ВВЭР-СКД. Предложен вариант конструкции ТВС с дополнительным вытеснителем, позволяющим уменьшить неравномерность подогревов теплоносителя по ее сечению.

### **Основные публикации по теме диссертации:**

Статьи в журналах, входящих в перечень ВАК:

1. Деев В.И., Харитонов В.С., Чуркин А.Н., Байсов А.М. Режимы теплообмена при движении воды сверхкритических параметров в вертикальных каналах // Теплоэнергетика, 2017, № 11, с. 75 – 83.

2. Байсов А.М., Чуркин А.Н. Валидация программы ТЕМПА-СК на экспериментах с пучками тепловыделяющих стержней, охлаждаемых водой сверхкритического давления // Вопросы атомной науки и техники, Серия: Физика ядерных реакторов, 2022, № 1, с. 1 – 13. (принята к печати).

Статьи в журналах, индексируемым в базах Scopus и Web of Science:

1. V. I. Deev, V. S. Kharitonov, A. N. Churkin, and A. M. Baisov. Heat Transfer Regimes for a Flow of Water at Supercritical Conditions in Vertical Channels // Thermal Engineering, 2017, Vol. 64, No. 11, pp. 849 – 855.

2. V. I. Deev, V. S. Kharitonov, A. N. Churkin, A. M. Baisov. The conditions of similarity and generalized dependences for calculating convective heat transfer in supercritical pressure coolants // Journal of Physics: Conference Series, 2017, №891, 012050.

3. V. I. Deev, V. S. Kharitonov, A. M. Baisov, A. N. Churkin. Universal dependencies for the description of heat transfer regimes in turbulent flow of supercritical fluids in channels of various geometries // Journal of Supercritical Fluids, 2018, Vol. 135, pp. 160 – 167.

4. V. I. Deev, V. S. Kharitonov, A. M. Baisov, A. N. Churkin. Heat transfer in rod bundles cooled by supercritical water – Experimental data and correlations // Thermal Science and Engineering Progress, 2020, Vol. 15, 100435.

5. V. I. Deev, V. S. Kharitonov, A. M. Baisov, A. N. Churkin. A New Approach to Generalization of Experimental Data on Heat Transfer to Fluids in Supercritical Region // Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science, 2020, Volume 15, 021109

6. V. I. Deev, V. S. Kharitonov, A. M. Baisov, A. N. Churkin. Hydraulic resistance of supercritical pressure water flowing in channels – A survey of literature // Nuclear Engineering and Design, 2021, 380, 111313.

7. V. I. Deev, V. S. Kharitonov, A. M. Baisov, A. N. Churkin. Heat transfer characteristics of water under supercritical conditions // International Journal of Thermal Sciences, 2022, 171, 107238

8. A. M. Baisov, A. N. Churkin, V. I. Deev, V. S. Kharitonov. Testing the Modified Subchannel TEMPA-SC Code in Comparison with Experiments and Other Computer Codes // Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science, 2022, 2022, NERS-21-1101, 10.1115/1.4053049.