

НИЦ «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

На правах рукописи



ЗУБКОВ АНТОН ГЛЕБОВИЧ

**РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КРИЗИСА
ТЕПЛООТДАЧИ В АКТИВНЫХ ЗОНАХ ВОДООХЛАЖДАЕМЫХ ЯДЕРНЫХ
РЕАКТОРОВ**

Специальность 2.4.9. Ядерные энергетические установки, топливный цикл,
радиационная безопасность

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт»).

Научный руководитель: *Олексюк Дмитрий Анатольевич*
кандидат технических наук, начальник Отдела теплофизических исследований НИЦ «Курчатовский институт». г. Москва.

Официальные оппоненты: *Лобанов Павел Дмитриевич*
доктор технических наук, старший научный сотрудник федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе» Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН), г. Новосибирск;

Яшников Дмитрий Аркадьевич
кандидат технических наук, начальник лаборатории отдела экспертизы программ для ЭВМ федерального бюджетного учреждения «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (ФБУ «НТЦ ЯРБ»), г. Москва.

Ведущая организация: Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского» (АО «ГЦН РФ-ФЭИ»), г. Обнинск.

Защита состоится 12 мая 2026 г., начало в 14:00, на заседании диссертационного совета 02.1.003.08 на базе НИЦ «Курчатовский институт» по адресу 123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЦ «Курчатовский институт» и на сайте <http://nrcki.ru>

Автореферат разослан «__» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 02.1.003.08
к.ф.-м.н.



Д.А. Шкаровский

Актуальность работы. В настоящее время, более 90 % ядерных энергетических реакторов охлаждаются водяным теплоносителем. Из них большую часть (более 75 %) занимают реакторы, активная зона (АЗ) которых охлаждается водой под давлением (это реакторы водо-водяные энергетические ректоры – ВВЭР и их зарубежные аналоги – PWR).

Учитывая специфику производства электроэнергии с помощью источника, обладающего радиоактивностью и свойством остаточного энерговыделения при остановке, требования к обеспечению безопасности энергоблоков атомных электростанций (АЭС) выдвигаются такого же уровня жесткости, как и по уровню экономической эффективности.

Первыми двумя барьерами на пути распространения ионизирующих излучений в окружающую среду являются топливная матрица и оболочка твэла. Для этих элементов в проекте АЭС предусмотрены пределы – численные значения основных технологических параметров – не превышение которых гарантирует целостность оболочки и топливной таблетки в различных режимах эксплуатации.

Наиболее вероятная причина значительного нарушения целостности твэлов – локальный перегрев, который может произойти по причине нарушения условий их охлаждения. Наиболее вероятной причиной локального перегрева оболочки, связанной с протеканием теплофизических процессов, является возникновение кризиса теплоотдачи – резкого изменения характера теплоотдачи от твэла к теплоносителю и вызванного этим быстрого роста температуры поверхности. Условия охлаждения твэлов рассматриваются в специальном разделе проекта АС – теплогидравлической части. В ней выполняется анализ теплотехнической надежности (ТТН) АЗ реактора.

Значительная часть критериев, проверяемая при обосновании ТТН, сводятся к обеспечению запаса до кризиса теплоотдачи. Причина этого заключается в том, что природа кризиса пузырькового кипения (DNB – departure from nucleate boiling) в реакторе с водой под давлением такова, что его возникновение практически гарантированно приведет к разгерметизации и/или повреждению твэл. Усугубляет ситуацию тот факт, что кризис теплоотдачи является одним из наиболее чувствительных к внешним параметрам теплофизических процессов, которые могут возникать в АЗ реактора.

Таким образом, для обоснования ТТН крайне важно определять запас до кризиса (или DNBR – departure from nucleate boiling ratio), а следовательно, и величину критического теплового потока (КТП). Не взирая на методику определения величины DNBR (консервативная или статистическая), величина КТП и погрешность методики (корреляции) его определения вносят наибольший вклад в результирующую величину запаса.

Существующие корреляции для определения КТП в пучках твэлов тепловыделяющих сборок (ТВС), в том числе используемые при обосновании ТТН, содержат множество эмпирических коэффициентов, подобранных для наилучшего соответствия экспериментальным данным. Однако, при одинаковых режимных параметрах, разные корреляции могут давать значительный разброс значений КТП — от 30 % до двукратного отличия, особенно при низких и

отрицательных относительных энтальпиях. Это связано с тем, что каждая корреляция основана на конкретной выборке данных, полученных для конкретных геометрий. Таким образом, конструкция ТВС существенно влияет на величину КТП. Основная рекомендация при определении величины КТП в ТВС ядерных реакторов – использовать корреляции, созданные специально для данной конструкции ТВС. Однако при выходе за рекомендованный диапазон применимости по режимным параметрам или изменении конструкции ТВС, результаты, полученные по таким корреляциям, могут быть некорректными.

На этапе концептуального проектирования, качественную оценку влияния конструктивных изменений на КТП могут дать "скелетные" таблицы, основанные на экспериментальных данных в трубах. Однако многочисленные поправочные коэффициенты, применяемые в таких методиках к базовым табличным значениям, не позволяют считать эти оценки количественно достоверными.

Перспективным решением может стать применение для оценки величины КТП механистической модели КТП – модели, основанной на физическом представлении о возникновении кризиса теплоотдачи типа DNB.

При правильном выборе замыкающих соотношений (для моделей паросодержания, отрывных диаметров паровых пузырей и т.д.) и настройке эмпирических коэффициентов на основе репрезентативного набора экспериментальных данных, равномерно распределенных по всему диапазону параметров для широкого спектра конструкций ТВС, механистическая модель КТП может приобрести предсказательную способность при сопоставимой величине погрешности с корреляциями, «заточенными» для данной конструкции.

Таким образом, актуальной становится задача создания методики определения величины КТП в пучках твэлов ТВС для ВВЭР в широком диапазоне режимных параметров на основе механистических моделей возникновения кризиса теплоотдачи, так как подобная методика на данный момент в отечественной практике отсутствует.

Цель работы – разработка методики определения величины КТП в пучках твэлов ТВС водоохлаждаемых ядерных реакторов (ВВЭР) в широком диапазоне режимных параметров теплоносителя на основе физических представлений о природе возникновения кризиса теплоотдачи с учетом локальных параметров теплоносителя и ее настройка в составе кода SC-INT на созданной базе данных по локальным параметрам КТП в пучках стержней.

Задачи работы. Для достижения цели были поставлены следующие основные задачи:

1. Анализ закономерностей возникновения кризиса теплоотдачи в условиях, характерных для активных зон реакторов с водой под давлением, а также способов определения КТП в пучках твэлов активных зон водоохлаждаемых ядерных реакторов;

2. Выбор физической модели возникновения кризиса теплоотдачи типа DNB для условий, имеющих место при течении теплоносителя в ТВС водоохлаждаемого ядерного реактора. Ее модернизация для наилучшего описания характерных особенностей КТП, наблюдаемых в экспериментах по исследованию кризиса теплоотдачи в пучках стержней реакторов типа ВВЭР;

3. Конструирование методики определения КТП в широком диапазоне режимных параметров и режимов течения двухфазного теплоносителя на основе физически обоснованных моделей DNB. Разработка алгоритма расчета величины КТП. Адаптация и внедрение методики в код SC-INT;

4. Анализ методов измерения локальных параметров теплоносителя в моделях ТВС водоохлаждаемых реакторов. Разработка методики выполнения экспериментальных исследований локальных параметров теплоносителя в электрообогреваемых моделях ТВС на теплофизическом стенде КС и последующей обработки экспериментальных данных;

5. Выполнение серии экспериментальных исследований кризиса теплоотдачи и локальных параметров теплоносителя на моделях ТВС реакторов ВВЭР;

6. Выполнение настройки замыкающих соотношений кода SC-INT для наилучшего описания экспериментальных данных в исследованных пучках стержней по разработанному алгоритму с целью повышения точности получения локальных параметров в координате кризиса.

7. Пополнение банка данных по КТП и локальным параметрам теплоносителя выполненными экспериментами. Расчет и формирование базы данных по локальным параметрам теплоносителя в координате возникновения КТП с помощью кода SC-INT;

8. Оптимизация коэффициентов в замыкающих соотношениях применяемых моделей КТП на основе рассчитанной по SC-INT базы данных по локальным параметрам теплоносителя в КТП;

9. Определение с помощью предложенной методики КТП величины DNBR в ТВС новой конструкции для реактора ВВЭР для оценки применимости и работоспособности методики.

Методы исследования. В работе применены общенаучные методы исследования, а именно теоретико-эмпирический. Кроме того, при получении математического описания физической модели возникновения КТП использован метод формализации. Из экспериментальных методов при проведении экспериментальных исследований применялись следующие методы: эксперимент, сравнение и моделирование.

Объект исследования: тепловыделяющие сборки водоохлаждаемых ядерных реакторов с водой под давлением.

Предмет исследования: теплогидравлические процессы, приводящие и сопровождающие возникновение кризиса теплоотдачи в потоке теплоносителя, омывающем пучок тепловыделяющих элементов в ТВС водоохлаждаемых ядерных реакторов.

Научная новизна. Научная новизна работы заключается в получении следующих основных результатов:

1. Предложена методика определения величины КТП в пучках стержней реакторов с водой под давлением (ВВЭР и PWR) в широком диапазоне режимных параметров, основанная на физических механизмах возникновения кризиса теплоотдачи;

2. Предложена и реализована методика валидации по локальным параметрам теплоносителя моделей субканального кода с последующим расчетным получением локальных параметров теплоносителя в координате возникновения КТП;

3. Выполнены серии экспериментальных исследования локальных параметров теплоносителя в многостержневых электрообогреваемых моделях ТВС на стенде КС;

4. Выполнены серии экспериментальных исследований КТП на многостержневых электрообогреваемых моделях ТВС на стенде КС.

Практическая значимость. Предлагаемая методика определения величины КТП в широком диапазоне режимных параметров теплоносителя и режимов течения двухфазной смеси на основе физических моделей возникновения кризиса теплоотдачи позволит определять величину запаса до кризиса в ТВС новых конструкций на стадии их проектирования в отсутствие экспериментальных данных по величине КТП. Это повысит обоснованность принятия решений по конструктивным параметрам ТВС на стадии ее эскизного проектирования с целью повышения ее безопасности и экономической эффективности.

Положения, выносимые на защиту. На защиту выносятся следующие положения:

1. Методика определения величины КТП на основе механистических моделей возникновения кризиса теплоотдачи с набором замыкающих соотношений;

2. Методика проведения экспериментальных исследований и анализа полученных экспериментальных данных по локальным параметрам теплоносителя (температура и скорость) в многостержневых электрообогреваемых моделях ТВС;

3. Серия экспериментальных исследований локальных параметров в многостержневых электрообогреваемых моделях ТВС на теплофизическом стенде КС;

4. Серия экспериментальных исследований КТП на многостержневых электрообогреваемых моделях ТВС на теплофизическом стенде КС;

5. Способы настройки расчетных моделей исследованных моделей ТВС для определения локальных параметров теплоносителя в программе SC-INT для дальнейшего получения банка данных по локальным параметрам теплоносителя в координате возникновения кризиса.

Достоверность и обоснованность. Достоверность полученных экспериментальных результатов подтверждается:

1. Использованием современного экспериментального оборудования и прикладных программ для управления процессом эксперимента и сбора данных;

2. Первичной обработкой экспериментальных данных и анализом данных, выполненными с использованием пакетов анализа;

3. Повторением измерений с сохранением начальных и граничных условий при проведении экспериментальных исследований;

4. Анализом неопределенностей эксперимента, сравнением полученных данных с известными зависимостями;

5. Кросс-верификацией результатов разных методов измерений и прямым сравнением данных экспериментов и расчетов.

Достоверность полученных расчетных данных подтверждается:

1. Использованием для внедрения методики КТП аттестованной в Ростехнадзоре программы SC-INT;
2. Дополнительной валидацией коэффициентов замыкающих соотношений программы SC-INT на результатах экспериментов по локальным параметрам теплоносителя;
3. Сравнением использованных зависимостей для расчета параметров двухфазного потока с аналогичными, а также экспериментальными данными;
4. Валидацией полученной методики на большом массиве экспериментальных данных по КТП.

Апробация работы. Основные положения, сформулированные в диссертационной работе, были представлены на 11 российских и международных научных конференциях и семинарах, среди которых:

1. Научно-техническая конференция «Теплофизика реакторов нового поколения (Теплофизика – 2022)», 14-16 сентября 2022, г. Обнинск, ГНЦ РФ-ФЭИ.
2. Восьмая российская национальная конференция по теплообмену (РНКТ-8), 17-22 октября 2022 г. «НИУ «МЭИ», г. Москва;
3. Научно-техническая конференция «Теплофизика реакторов нового поколения (Теплофизика – 2024)», 16-19 апреля 2024, г. Обнинск, ГНЦ РФ-ФЭИ.
4. 17-й Минский международный форум по теплообмену, 20-24 мая 2024 г., г. Минск;
5. Международная научно-техническая конференция «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики» (МНТК-2024). 18-19 сентября 2024 г., АО «ВНИИАЭС»

Публикации. Основные результаты научных исследований, положенных в основу диссертационного исследования, изложены 4 научных статьях, рецензируемых ВАК. Список публикаций приведен в конце автореферата.

Личный вклад соискателя. Автор работы принимал непосредственное участие:

1. В разработке программы и методики проведения экспериментов по исследованию локальных параметров и КТП в моделях ТВС реакторов ВВЭР и PWR;
2. В сборке имитаторов ТВЭЛов многостержневых моделей ТВС, финальной сборке и оснащении их измерительными датчиками;
3. В выполнении цикла экспериментов по исследованию КТП и локальных параметров в моделях ТВС реакторов ВВЭР;
4. В первичной обработке, анализе и интерпретации полученных в результате цикла экспериментов данных;
5. В пополнении и последующем анализе банка данных по КТП и локальным параметрам НИЦ «Курчатовский институт»;

На основе выполненного анализа автором лично:

1. Предложена методика определения величины КТП в широком диапазоне режимных параметров теплоносителя и режимов течения двухфазного потока на основе физических представлений о возникновении кризиса теплоотдачи;
2. Методика определения КТП и замыкающие соотношения для определения параметров двухфазного потока внедрены в субканальный код SC-INT;
3. Выполнена настройка коэффициентов и валидация методики в составе кода SC-INT на банке данных по КТП;
4. Полученная методика применена к анализу величины DNBR в кассете для реактора ВВЭР с измененными относительно штатной ТВС ВВЭР конструкционными и геометрическими параметрами.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, списка литературы, и содержит 209 страниц машинописного текста, 99 рисунков, 11 таблиц, 156 формул. Список литературы включает 230 наименований.

Основные положения и результаты исследований

Во введении обоснована актуальность исследования, сформулированы его цель, задачи, положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая значимость, степень достоверности и апробация результатов, полученных в диссертации.

В первой главе приводится анализ литературных источников, посвященных феноменологии возникновения кризиса теплоотдачи типа DNB как при кипении жидкости как в большом объеме, так и в потоке теплоносителя. Показано, что на кризис типа DNB определяющее влияние оказывают локальные параметры теплоносителя (относительная энтальпия и массовая скорость) и двухфазного потока (массовое и объемное паросодержание).

Приводится анализ наиболее признанных отечественных и одной зарубежной корреляций для определения КТП в пучках стержней (табл. 1), использующихся главными конструкторами ТВС при обосновании ТГН АЗ (корреляция Безрукова Ю.А., Tong L.S. W-3, CRT), других корреляций (корреляции Осмачкина В.С., Смолина В.Н., RNC-SUB (корреляция Олексюка Д.А.)), а также скелетных таблиц Groeneveld (LUT-2006). Выполняется их сравнение в рамках общей области определения и за ее пределами.

Таблица 1. Диапазоны применимости и погрешности рассмотренных корреляций для КТП

| Корреляция | Режимные параметры | | | Погрешности | | Количество точек |
|---------------|--------------------|------------------------------|---------------|--------------|--------------|------------------|
| | p , МПа | G , кг/(м ² ·с) | x , отн.ед | Δ , % | σ , % | |
| Ю.А. Безруков | 7,45 – 16,70 | 700 – 3800 | - 0,07 – 0,40 | 1,0 | 13,1 | 765 |
| В.С. Осмачкин | 3,00 – 19,00 | 200 – 4500 | - 0,20 – 0,80 | 5,6 | 14,8 | 690 |
| В.Н. Смолин | 2,90 – 18,60 | 350 – 5000 | - 0,20 – 0,60 | 1,5 | 5,5* | 2868 |
| Д.А. Олексюк | 3,30 – 20,00 | 500 – 5000 | - 0,30 – 0,90 | 0,5 | 13,9 | 4252 |
| L.S. Tong | 7,00 – 16,00 | 1350 – 6750 | - 0,25 – 0,15 | 0,1 | 7,6 | 809 |
| CRT | 13,00 – 17,00 | 1000 – 4000 | - 0,10 – 0,30 | 0,1 | 10,0 | 700 |

* - для своей методики автором приводится погрешность расчета критической мощности, тогда как в остальных случаях приводятся погрешности определения КТП

Для анализа поведения корреляций в зависимости от основных режимных параметров выполнен расчет для следующих условий – трубы длиной 2500 мм с гидравлическим диаметром 10,6 мм (что эквивалентно гидравлическому диаметру регулярного подканала ТВС реактора ВВЭР). Величина КТП на рис. 1 и 2 приведена для выходного сечения трубы при варьировании одного из режимных параметров и фиксации остальных. Фиксированными значениями являлись величина относительной энтальпии $x = 0,05$, массовой скорости $G = 3500 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ и давления $p = 16,0 \text{ МПа}$. Указанные параметры характерны для условий в «горячей струе» ВВЭР-1000.

Из представленных графиков можно видеть, что корреляции имеют сильную зависимость от величины относительной энтальпии (рис. 1), и значительно менее ярко выраженную зависимость от двух остальных режимных параметров (рис. 2). Явление инверсии (неоднозначного влияния массовой скорости на величину КТП) не отражает ни одна из рассмотренных корреляций.

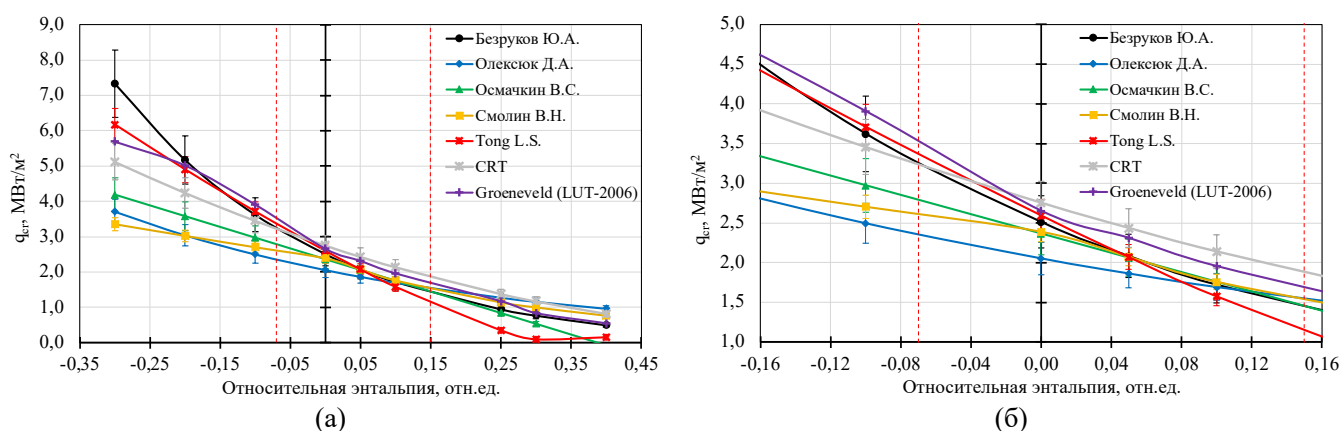


Рис. 1. Величина КТП при варьировании относительной энтальпии при $G = 3500 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ $p = 16,0 \text{ МПа}$: (а) – общая область; (б) – укрупненно область наименьшего общего диапазона.

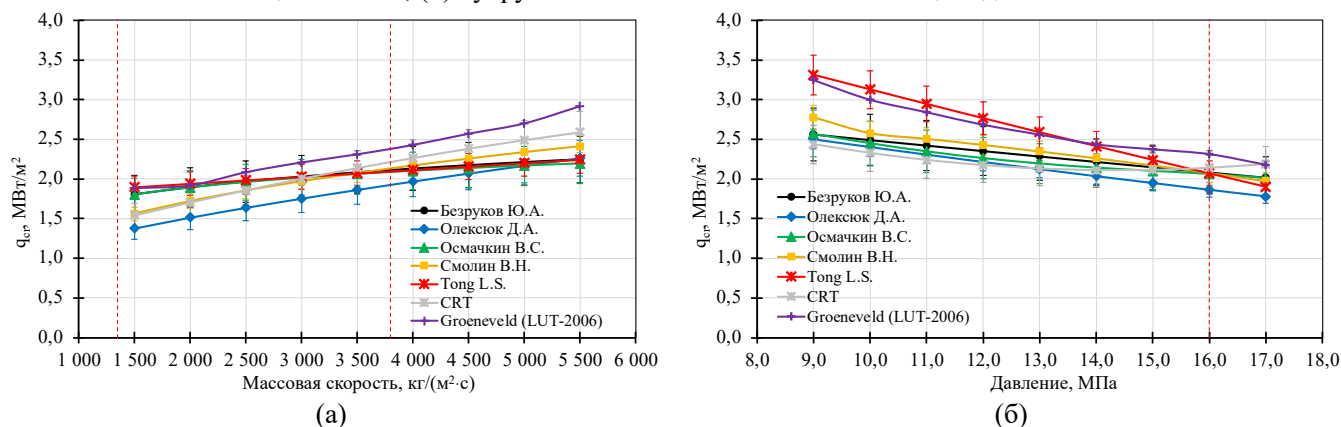


Рис. 2. Величина КТП при варьировании: (а) – давления при $x = 0,0$ отн. ед. и $G = 3500 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; (б) – массовой скорости при фиксированной относительной энтальпии $x = 0,05$ отн. ед. и $p = 16,0 \text{ МПа}$. Вертикальными пунктирными линиями на графиках отмечены наименьшие общие диапазоны применимости корреляций, соответствующие табл. 1.

В качестве альтернативы корреляциям, приводится описание и анализ трех наиболее признанных механистических моделей DNB в трубах – модель коалесценции пузырей (МКП) Weisman&Pei [1], модель парового blankets (МПБ) Lee&Mudawwar [2] и модель обновления пограничного слоя Захарова (модернизированная модель роста сухих пятен Ягова) [3]. Отмечается актуальность применения подобных методик, а также отсутствие примеров их применения к большому массиву данных по величине КТП в пучках стержней.

Приводится краткий анализ отечественных и зарубежных субканальных кодов – основных инструментов расчета локальных параметров теплоносителя при теплогидравлических расчетах АЗ реакторов типа ВВЭР и PWR, а также описание субканального кода SC-INT и его основных замыкающих соотношений, в который была внедрена разрабатываемая методика определения величины КТП. Обращается внимание на необходимость настройки замыкающих соотношений субканального кода на экспериментальных данных по локальным параметрам теплоносителя в ТВС с целью повышения точности их расчета при дальнейшем определении КТП.

Приводится анализ способов экспериментального измерения локальных параметров потока теплоносителя в многостержневых моделях ТВС, а именно – скорости и температуры. Для измерения скорости были выбраны зонды отбора полного давления – трубки Пито. Поля температуры в поперечном сечении на выходе из моделей ТВС были получены путем установки в теплоноситель термопарных датчиков высокой точности.

На основе проанализированного материала, целью исследования ставится разработка и внедрение в код SC-INT универсальной методики определения величины КТП в широком диапазоне режимных параметров теплоносителя на основе феноменологических (механистических) моделей возникновения кризиса типа DNB, а также учета кризиса теплоотдачи типа dryout (DO). Для оптимизации коэффициентов в замыкающих соотношениях методики и повышения точности расчета кодом SC-INT локальных параметров теплоносителя, получение экспериментальных данных по локальным параметрам теплоносителя и величине КТП на многостержневых моделях ТВС. Структура предлагаемой методики совместно с комплексом замыкающих соотношений и ее обеспечения валидационной базой представлены на рисунке 3.



Рис. 3. Общая структура универсальной методики определения величины КТП, ее составных частей и экспериментальных исследований, направленных на поддержку ее валидации

Во второй главе описываются результаты экспериментального исследования локальных параметров, перепадов давления, а также величины КТП на многостержневых моделях ТВС-2006. Экспериментальные исследования выполнялись на первой петле высокого давления (ПВД-1) теплофизического стенда КС в НИЦ «Курчатовский институт».

Исследования локальной температуры на выходе из зоны тепловыделения выполнялись с помощью термопар, установленных в 28 подканалах моделей ТВС, а измерение скорости – трубками Пито, установленными в четырех подканалах (датчиками оснащены 32 из 36 подканалов). Для проведения экспериментов было разработано и собрано устройство, осуществляющее разведение и позиционирование датчиков (рис. 4). Представлено описание системы первичных датчиков и вторичной аппаратуры, позволившая выполнить данные исследования.

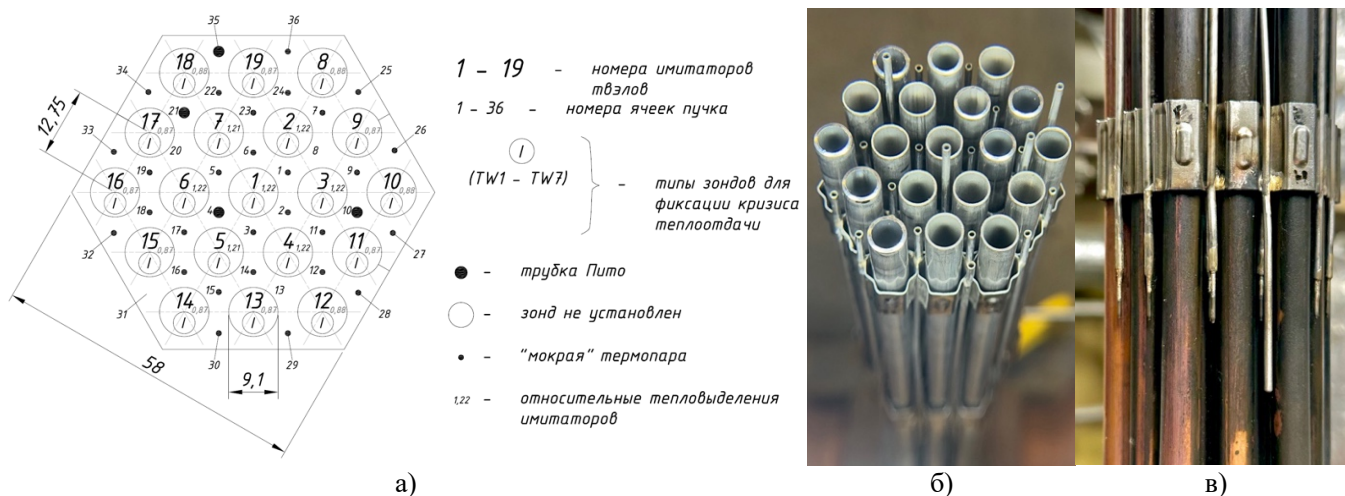


Рис 4. а) Схема поперечного сечения модели ТВС-2006 с указанием типа и расположения датчиков, б) вид на капилляры для позиционирования термопар и трубки Пито в составе устройства позиционирования на этапе его сборки и в) установленном на пучок виде

Показан алгоритм настройки замыкающих соотношений кода SC-INT на результатах измерений локальной температуры и скорости теплоносителя, а также перепадов давления на участках модели ТВС. На основе величин перепадов давления определяются гидравлические характеристики моделей ТВС, в частности – величина гидравлического сопротивления фрагментов штатных дистанционирующих решеток (ДР).

Для определения данной величины, был выполнен специальный цикл экспериментов, в котором на выделенной базе для измерения перепадов давления в каждой из четырех серий находилось, соответственно, 4, 5, 6 и 7 фрагментов ДР.

По результатам обработки экспериментальных значений перепада (рис. 5), была расчетно определена величина КГС фрагмента ДР, которая составила 0,35, а также ее зависимость от числа Re (рис. 6).

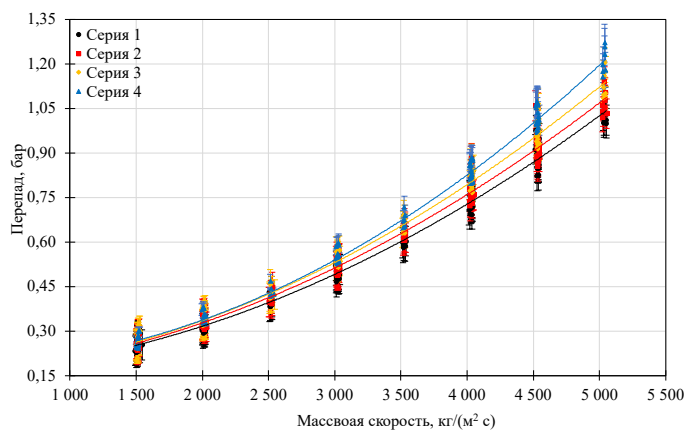


Рис. 5. Зависимость парадов давления от массовой скорости для различных серий (для серий с первой по четвертую). Сплошные линии – аппроксимирующие экспериментальные данные кривые.

По результатам анализа локальных скоростей теплоносителя, выполнена «тонкая» настройка замыкающих соотношений, отвечающих за гидравлические характеристики исследованных моделей – распределение местных гидравлических сопротивлений по подканалам, а также величина поправки на отличие коэффициента гидравлического сопротивления трения в круглой трубе и канале сложной формы, образованного стержнями пучка. В итоге, для исследованных моделей ТВС-2006, достигнуто удовлетворительное согласие расчета с экспериментом как для изотермических (рис. 7а), так и для неизотермических (рис. 7б) режимов. Для 150 экспериментальных состояний с изотермическим режимом течения теплоносителя и 80 состояний в режимах с подводом мощности, получена нулевая среднеарифметическая погрешность описания расчетом эксперимента при СКО $\bar{\sigma}_{Uch} = 6,8 \%$.

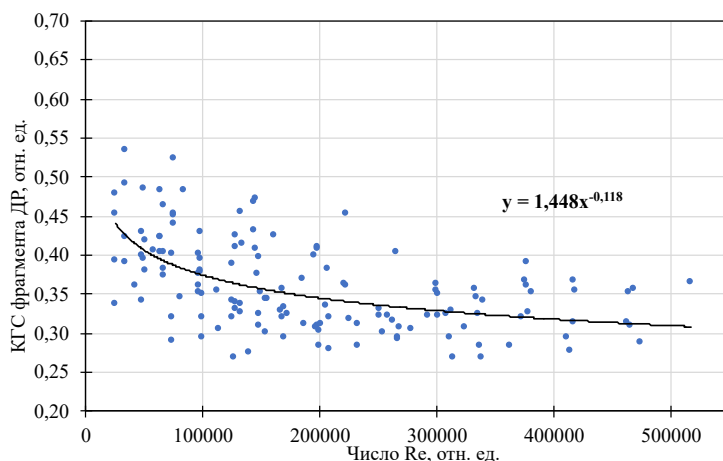


Рис. 6. Зависимость КГС фрагмента ДР от числа Re

Из анализа отклонений расчетной температуры от экспериментальной определялась величина коэффициента в корреляции для поперечного турбулентного перемешивания в однофазной области.

Из анализа отклонений расчетной температуры от экспериментальной определялась величина коэффициента в корреляции для поперечного турбулентного перемешивания в однофазной области.

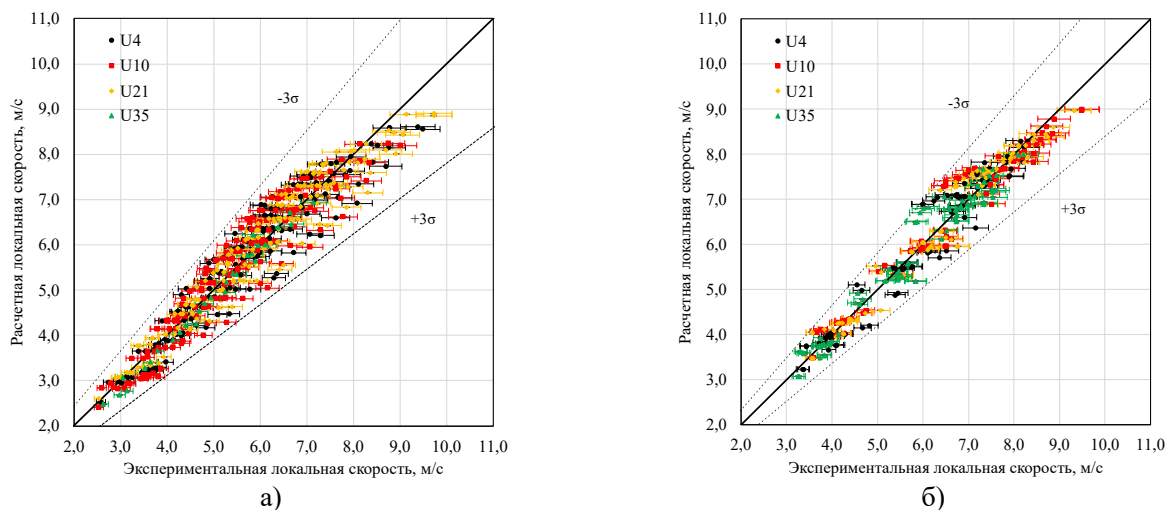


Рис.7. Сравнение расчетных и экспериментальных скоростей теплоносителя в подканалах №4 (U4), №10 (U10), №21 (U21) и №35 (U35) для модели ТВС-2006 (а) для изотермических режимов и (б) режимов с подводом мощности

Далее, с использованием настроенных замыкающих соотношений, выполнялась обработка экспериментальных данных по величине КТП и получение локальных параметров потока теплоносителя в месте возникновения кризиса теплоотдачи в эксперименте.

Выполненные эксперименты дополнили банк данных НИЦ «Курчатовский институт» по КТП и локальным параметрам теплоносителя.

В третьей главе анализируется применимость рассмотренных в первой главе механистических моделей КТП, оптимизированных на основе данных о КТП в трубах, на репрезентативном наборе данных по величине КТП в пучках стержней реакторов ВВЭР и PWR. В

расчетах, дополнительно к значениям КТП по каждой из исследуемых моделей, определялись реперные величины КТП: по корреляции Безрукова Ю.А. для ТВС реакторов ВВЭР и по корреляции Tong L.S. W-3 для ТВС PWR. Было получено, что все три феноменологические модели удовлетворительно описывают экспериментальные данные (рис. 8), полученные как на моделях ТВС ВВЭР, так и PWR.

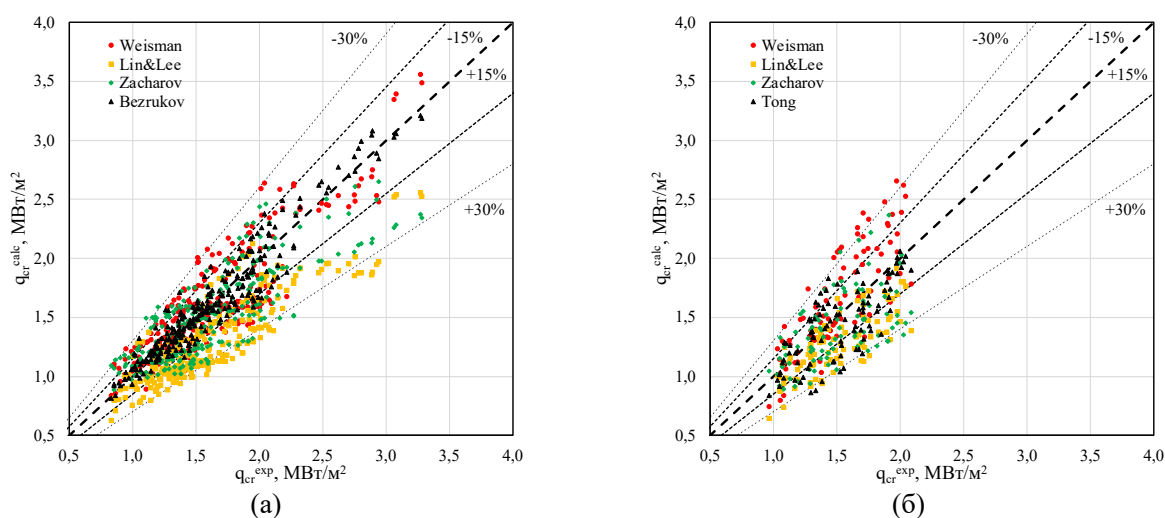


Рис. 8. Сравнение экспериментальной величины КТП с расчетом при использовании механистических моделей и (а) – корреляции Безрукова для моделей ТВС ВВЭР, (б) – корреляции Tong W-3 для моделей ТВС PWR

На основе анализа, в качестве базовой модели DNB, для дальнейшей модернизации выбрана модель МКП, как наиболее гибкая для ее модернизации для расчета КТП в пучках стержней с различными конструктивными особенностями.

На основе применения модели МКП к банку данных по КТП в пучках стержней ТВС ВВЭР, было показано, что МКП адекватно описывает данные вплоть до объемного паросодержания 0,70 с присутствием параметрических трендов от массовой скорости и давления – модель не описывает явление инверсии КТП при изменении массовой скорости (рис. 9).

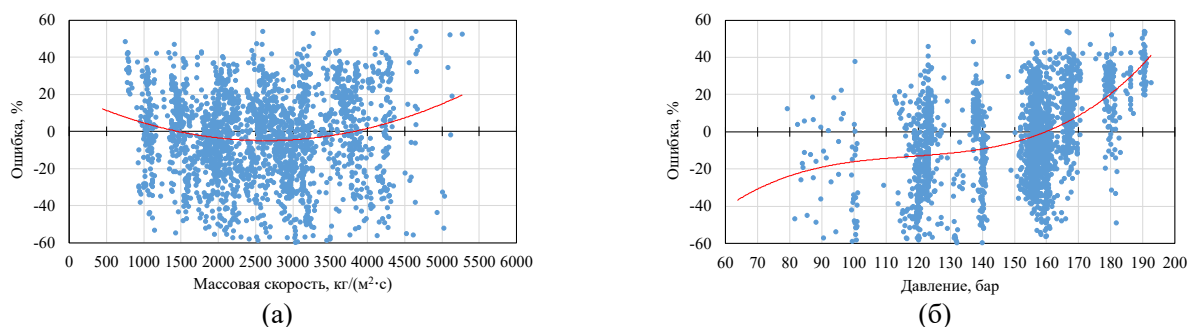


Рис. 9. Зависимости ошибки определения КТП по МКП от а) массовой скорости и б) давления, для набора точек с объемным паросодержанием $\varphi < 0,75$.

Однако несмотря на то, что в выборку из банка вошли модели ТВС ВВЭР, заметная доля точек лежит в области высоких объемных паросодержаний. Для выборки более чем из 3500 точек, доля с локальным (расчетным) $\varphi > 0,70$ составляет более 20 %. В подавляющем большинстве, эти точки характеризуются давлениями от ниже 120 бар и массовыми скоростями ниже 3000 кг/(м²·с). При таких режимных параметрах и величинах паросодержания, стоит ожидать смены режима течения с пузырькового или дисперсного на дисперсно-кольцевой, что повлечет за собой смену механизма кризиса теплоотдачи с DNB на DO (рис. 10 а)), либо некоторой трансформации механизма возникновения кризиса типа DNB (рис 10 б)).

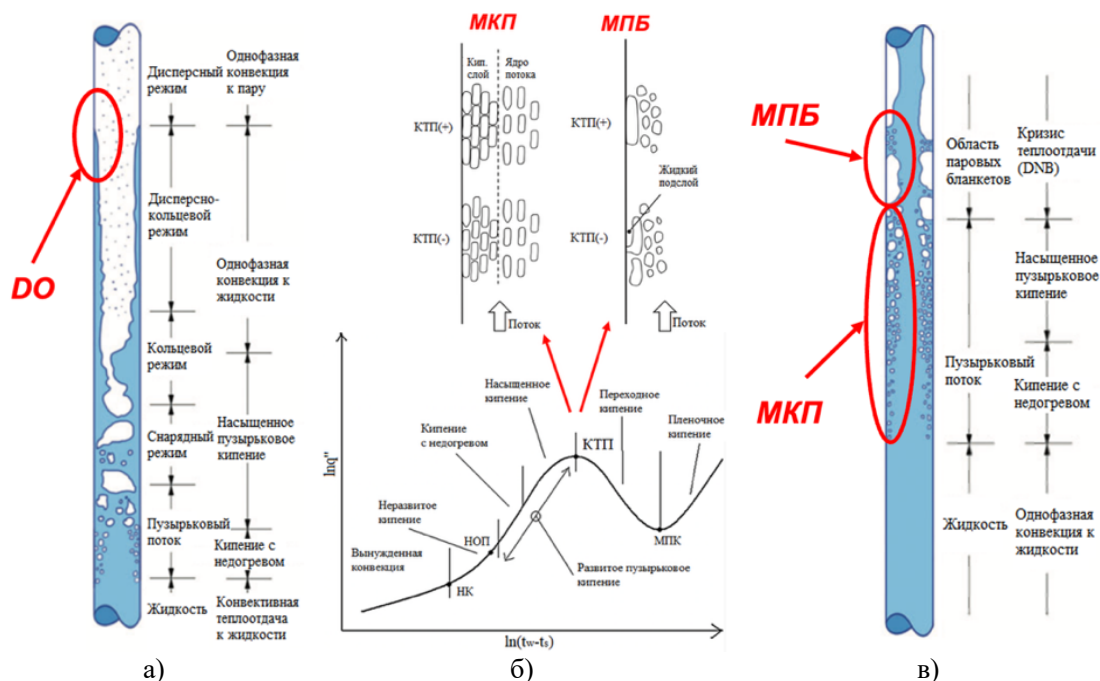


Рис. 10. а) Кризис теплоотдачи типа DO в структуре двухфазного потока и иллюстрация к модели смены механизмов DNB: б) положение различных механизмов DNB на кривой кипения, в) области их существования структуре двухфазного потока

Расчет банка по МПБ показал, что модель сохраняет удовлетворительную работоспособность при $\varphi \cong 0,72 - 0,82$, тогда как МКП, как было указано выше, корректно описывает данные в пучках стержней вплоть до $\varphi \cong 0,70$. Однако обе рассмотренные модели не описывают точки с паросодержанием $\varphi > 0,80$. На основе этого сделано предположение о том, что при определенных режимных параметрах может иметь место два различающихся механизма кризиса типа DNB, которые сменяют друг друга (рис. 10 б) и в)).

В связи с этим, была предложена методика определения величины КТП, в которой в качестве основной модели используется МКП, в качестве поддерживающей при повышенных φ (выше 0,67) выступает МПБ, а при φ выше 0,85 – корреляция для кризиса теплоотдачи типа DO. Таким образом, предложена методика определения величины КТП в широком диапазоне режимных параметров на основе феноменологических моделей кризиса типа DNB и корреляции для DO. Для гладкости перехода от одной модели КТП к другой, вводятся зоны линейной интерполяции между ними.

Для устранения выявленных параметрических тредов от основных режимных параметров, в первую очередь – явления неоднозначного влияния массовой скорости (инверсии кризиса), была предложена модернизация модели МКП. Для корректного описания зависимости КТП от локальных параметров, была введена модификация параметра a в комплексе, отвечающем за интенсивность двухфазной турбулентности в МКП [1]:

$$i_b = 0.462 Re^{-0.1} (k')^{0.6} \left(\frac{D_b}{D}\right)^{0.6} \left[1 + a \left(\frac{\rho_l - \rho_g}{\rho_g}\right)\right] \quad (1)$$

Параметр a был представлен в следующем виде:

$$a = a_{base} \cdot G_{corr} \cdot P_{corr} \quad (2)$$

где G_{corr} и P_{corr} – коэффициенты коррекции параметра a_{base} для учета влияния массовой скорости и давления.

Оригинальная зависимость параметра a от массовой скорости была модернизирована с введением в зависимость характерного «прогиба» с целью учета инверсии (обратного влияния массовой скорости на величину КТП):

$$G_{corr} = \begin{cases} (G/G_{crit})^{b_1}, & G \leq G_{crit} \\ (G/G_{crit})^{b_2}, & G > G_{crit} \end{cases} \quad (3)$$

Для устранения параметрических трендов от давления была введена следующая зависимость:

$$P_{corr} = \begin{cases} C \cdot (p/P_{crit}^{low})^{b_3} & p \leq P_{crit}^{low} \\ (p/P_{crit}^{mid})^{b_4} & P_{crit}^{low} < p \leq P_{crit}^{mid} \\ (p/P_{crit})^{b_5 + (p/P_{crit}^{mid})^{b_6}} & p > P_{crit}^{mid} \end{cases} \quad (4)$$

Критериальные параметры – массовая скорость G_{crit} и давления P_{crit}^{low} и P_{crit}^{mid} , а также коэффициенты b_1 и b_2 , $b_3 - b_6$ и C , определяются из сопоставления расчета с экспериментальными данными. Также, из сопоставления расчета с экспериментом определяются величины a_{base} , параметр k' в уравнении (1).

Для устранения тренда МПБ от давления также была предложена ее модернизация, а именно: для устранения параметрического тренда от давления и устранения значительного завышения методикой МПБ величины КТП при низких давлениях, была введена поправка в виде $(p/p_{cr})^n$, где p_{cr} – величина критического давления.

В результате, вырождение для эмпирического коэффициента C из оригинальной МПБ [2] записывается в следующем виде:

$$C = a_1 Y_r^{a_2} Re^{(a_3 - \frac{a_4 \alpha}{1 - x_r})} (p/p_{cr})^{n_1} \quad (5)$$

Где коэффициенты $a_1 - a_4$ и степень n_1 определяется из сопоставления с экспериментом.

Выбранная для описания кризиса ДО корреляции была модернизирована для улучшения учета зависимости КТП от объемного паросодержания:

$$q_{cr} = k(1 - \varphi)^{n_2} h_{fg} \rho_g^{0.5} [g\sigma(\rho_f - \rho_g)]^{0.25} \quad (6)$$

Показатель степени n_2 подбирается на основе сопоставления расчетных и экспериментальных данных, также, как и константа k .

Для повышения точности описания движения двухфазной смеси, были проанализированы методики определения как массового, так и объемного паросодержания. По результатам анализа для работы в составе методики КТП используются модели массового паросодержания Levy (а также модель энтальпии начала отрыва паровых пузырей Levy), и модель потока дрейфа Zuber&Findlay для объемного паросодержания в модификации для коэффициента распределения и скорости дрейфа Dix. Выбранная модель паросодержания позволяет учесть профиль распределения паросодержания по сечению подканала что устраняет недостаток субканального кода в виде усредненных по сечению подканалов параметров потока теплоносителя. В заключение приводится алгоритм работы методики в составе кода SC-INT.

В четвертой главе описывается использованная для оптимизации коэффициентов в выбранных моделях КТП база данных по локальным параметрам потока теплоносителя при КТП (рис. 11), созданная с помощью субканального кода SC-INT на основе банка данных. База получена на основе расчета экспериментальных состояний, содержащихся в банке. Полученная база содержит в себе более 4100 точек, полученных в пучках стержней реакторов типа ВВЭР с различными конструктивными исполнениями в широком диапазоне режимных параметров теплоносителя.

Показан результат оптимизации предложенной методики определения КТП на полученной базе данных.

Для модернизированной МКП путем сопоставления расчета с экспериментом, были определены коэффициенты в уравнениях (1) – (4). Величина a_{base} определена равной 0,1387. Расчетным путем было определено, что минимум на величине G_{criter} для рассмотренного набора данных имеет место на массовой скорости 2500 кг/(м²·с), коэффициенты b_1 и b_2 равны соответственно -0,625 и -0,045.

Величина G_{criter} хорошо согласуется с оригинальной методикой. Кроме того, при анализе методики Захарова [3], в которой отдельное внимание уделено описанию инверсии КТП, было обнаружено, что область между «малыми» и «большими» скоростями проходит в области 2000 кг/(м²·с). Величина P_{criter}^{low} составила 80 бар, величина P_{criter}^{mid} – 130 бар, величина коэффициентов b_3 , b_4 , b_5 и b_6 составила: -0,80, -0,60, -0,85, 2,85, коэффициент C равен 1,25. Величина k' в уравнении (1) была получена равной 2,1.

Для модели DNB МПБ была выполнена оптимизация коэффициентов в замыкающем соотношении (5). Коэффициенты оказались равными $a_1 = 4700$, $a_2 = -0,06$, $a_3 = -0,9$, $a_4 = 0,5$. Степень в уравнении (5) определена равной $n_1 = 0,23$. Коэффициенты в корреляции для описания DO (6) k и n_2 равны соответственно 0,0825 и 0,41.

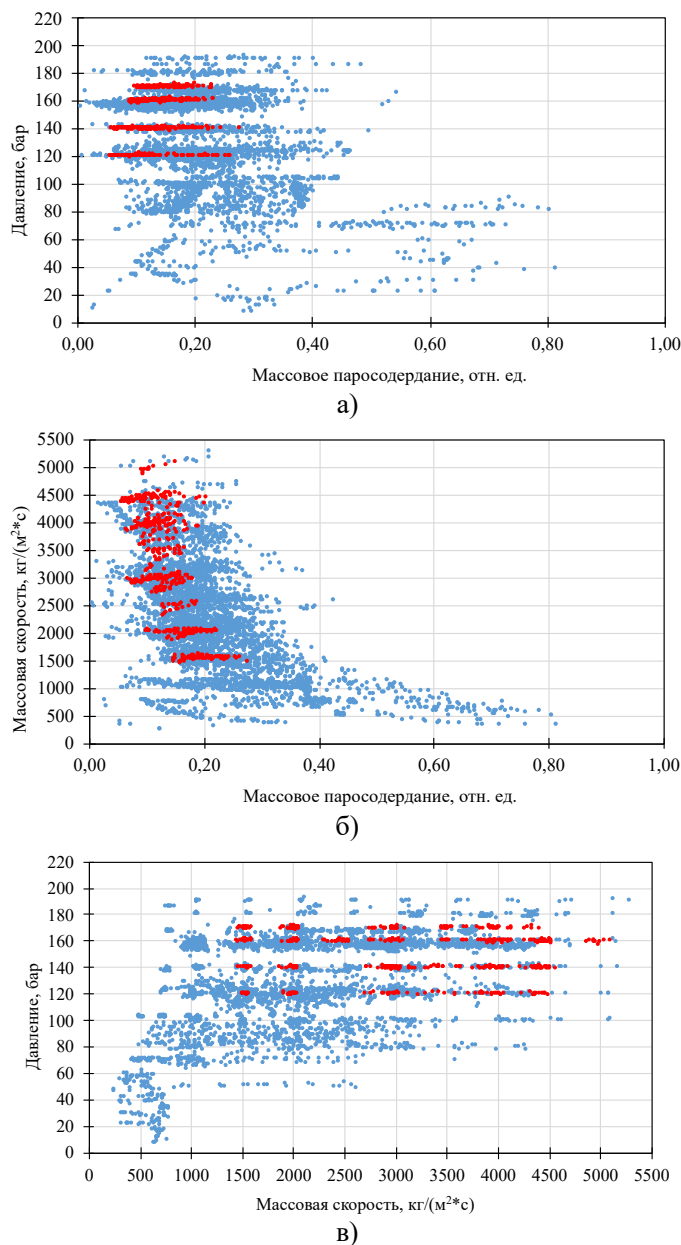


Рис. 11. Области полученной базы локальных параметров в КТП. Красным отмечены точки, полученные автором.

Приводится сравнение полученной методики с «классическими» корреляциями, в частности, корреляцией Безрукова Ю.А. Показано, что предлагаемая методика обладает сопоставимой с рассмотренными корреляциями точностью при отсутствии параметрических трендов.

Для 2300 точек с $\varphi < 0,75$ в области определения, близкой ко корреляции Безрукова, использующейся при проектных расчетах РУ ВВЭР, модернизированная МКП для определения КТП при DNB дает СКО $\sigma = 17,6\%$ с нулевым среднеарифметическим отклонением (несмещенная оценка), а также отсутствие параметрических трендов (рис. 12). В сравнении с корреляцией Безрукова, методика дает несмещенную оценку при отсутствии параметрических трендов (рис. 13).

Работа предложенной методики определения КТП для всего объема данных показывает хорошее согласие расчета с экспериментом. Покрывается весь диапазон объемных паросодержаний (рис. 14а)).

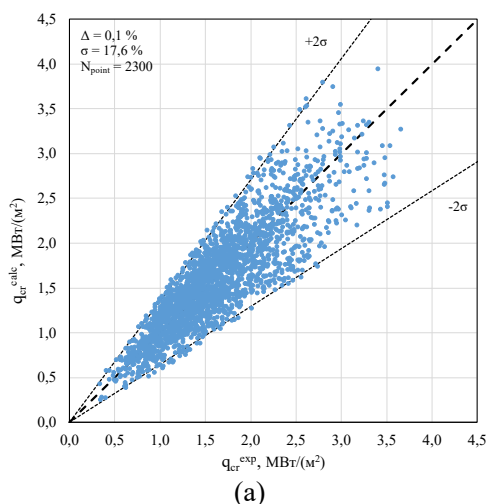


Рис. 13. Сравнение экспериментальной величины КТП с расчетной по: а) модернизированной МКП б) корреляции Безрукова.

Для 4131 точек расширенного диапазона режимных параметров, методика дает нулевое среднеарифметическое отклонение при величине стандартного отклонения $\sigma = 19,6\%$ (рис. 14б)). Как и для модернизированной МКП, методика в целом дает несмещенную оценку КТП благодаря настройке коэффициентов в замыкающих соотношениях для МПБ и корреляции для DO.

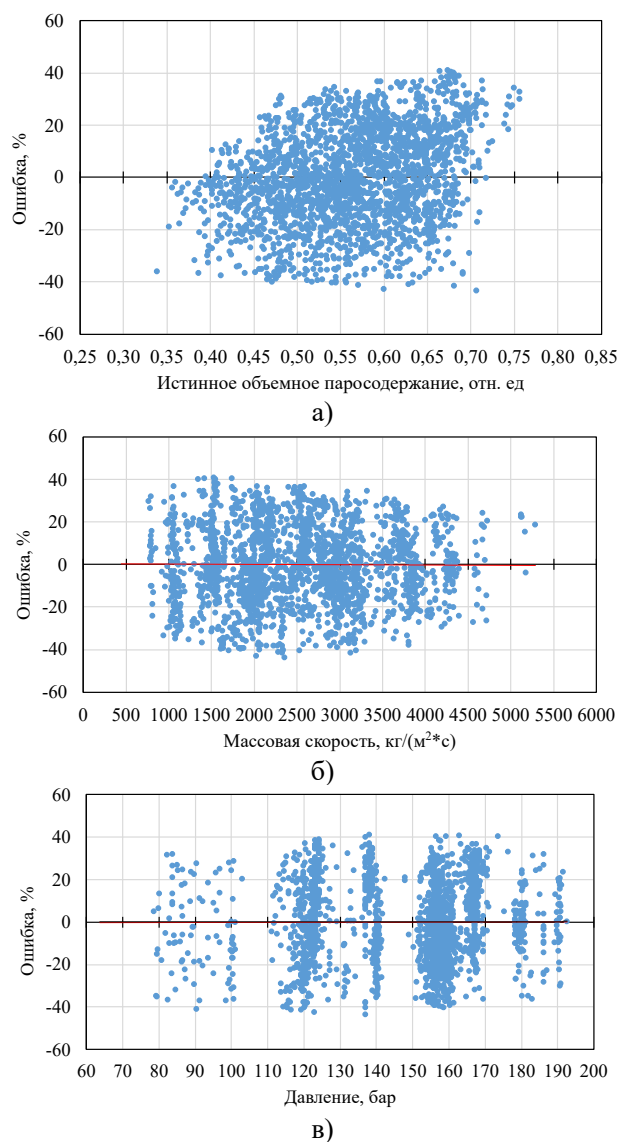
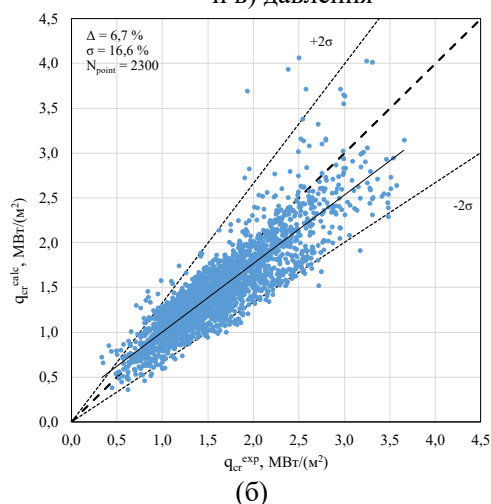


Рис. 12. Зависимости ошибки определения КТП по модернизированной МКП от а) объемного паросодержания, б) массовой скорости и в) давления



Диапазоны применения предложенной методики: массовая скорость $G = 354 \div 5288$ кг/(м² · с), давление $p = 1.03 \div 19.2$ МПа, относительная энтальпия $x = -0.15 \div 0.81$, массовое паросодержание $x_r = 0.08 \div 0.81$, объемное паросодержание $\varphi = 0.29 \div 0.95$.

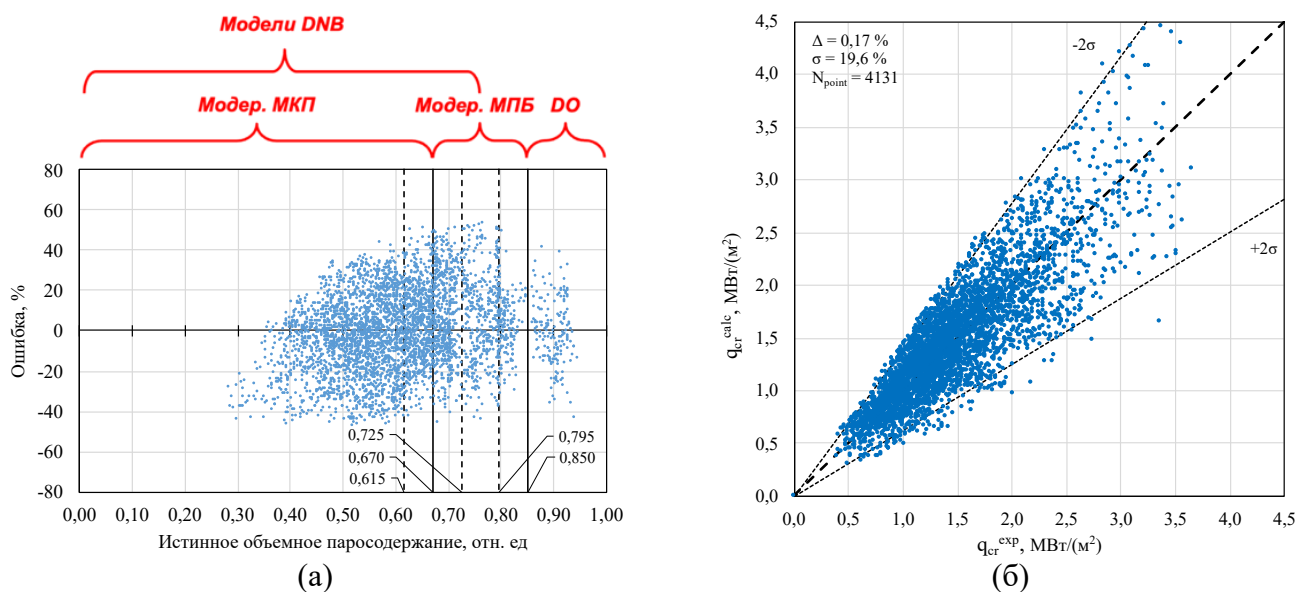


Рис.14. а) Зависимость ошибки предложенной методике определения КТП от φ . Сплошными черными вертикальными линиями указаны границы работы различных моделей, пунктирными – границы интерполяции между ними, б) сопоставление экспериментального значения величины КТП с расчетным по предложенной методике.

Сравнение предложенной методики КТП проводилось с корреляциями Безрукова Ю.А., Смолина В.Н., Осмачкина В.С. и Олексюка Д.А. на наборе из 4131 точек. Значения полученных погрешностей представлены в табл. 2.

Таблица 2. Погрешности определения величины КТП по предложенной методике и «классическим» корреляциями для определения КТП в пучках стержней

| Методика | Статистические параметры | | |
|---------------|--------------------------|--------------|------------------------|
| | Δ , % | σ , % | $\Delta + 3\sigma$, % |
| Зубков А.Г. | 0,17 | 19,62 | 58,86 |
| Безруков Ю.А. | 4,19 | 24,21 | 72,62 |
| Смолин В.Н. | -4,03 | 28,58 | 85,73 |
| Осмачкин В.С. | -6,87 | 27,51 | 82,54 |
| Олексюк Д.А. | -0,51 | 24,24 | 72,73 |

В пятой главе показан результат применения предложенной методики к определению величины запаса до кризиса теплоотдачи в тепловыделяющей сборке для реактора ВВЭР со значительно измененными относительно штатной конструктивными параметрами – шагом расположения твэл, количеством и диаметром направляющих каналов. Приведено краткое описание способов расчета DNBR при обосновании ТТН АЗ реакторов типа ВВЭР и PWR – консервативный детерминистский и статистические.

В выполненном расчете, величина DNBR определялась в консервативном приближении для двух вариантов режимных параметров и полей энерговыделения. Для сравнения, значение DNBR определялось также с использованием корреляций Безрукова Ю.А. и Олексюка Д.А. (RNC-SUB). Получены близкие значения минимальных величин запаса $DNBR_{det}^{min}$. Запас, определенный с использованием предложенной методики КТП оказался больше (2,02 и 2,33 соответственно), чем при использовании корреляции Безрукова (1,37 и 1,59) и RNC-SUB (1,40 и 1,59).

Распределение величины DNBR по сечению рассматриваемой ТВС представлены на рис. 15. На рис. 15в) обращают на себя внимание области с величиной DNBR выше 4,5, где для остальных расчетных вариантов (рис. 15а) и б)), величина DNBR ниже. В данных подканалах отсутствует кипение теплоносителя, вследствие чего методика, основанная в общем на физических принципах возникновения кризиса, а в частности на параметрах двухфазного потока теплоносителя (массовое паросодержание, отрывные диаметры пузырей пара и т.д.) не определяет для таких подканалов величину КТП.

Заключение

1. Выполнен анализ феноменологии возникновения кризиса теплоотдачи как при кипении в большом объеме, так и при течении двухфазной смеси в каналах. Показана сложная структура возникновения кризиса типа DNB; Выполнен анализ «классических» способов определения величины КТП при анализе ТТН АЗ реакторов с водой под давлением – корреляций, а также табличных методов. Сравнение показывает, что корреляции имеют значительную разницу в зависимости от режимных параметров, не отражают характерных явлений, таких как инверсия кризиса теплоотдачи в зависимости от массовой скорости; различаются диапазонами своего применения и заявленной погрешностью. В случае изменения конструкции ТВС или режимных параметров ее эксплуатации, применение таких корреляций не может быть обосновано. Применение скелетных таблиц в таком случае позволяет получить только качественную оценку ввиду значительного количества поправок к базовой величине КТП. Выходом в подобной ситуации может быть применение для определения величины КТП при DNB модели, основанной на феноменологии возникновения этого явления. Для этого выполнен анализ трех наиболее актуальных механистических моделей DNB – МКП, МПБ и модель высыхания жидкого подслоя;

2. Была разработана и внедрена в код SC-INT методика определения КТП в широком диапазоне режимных параметров, прежде всего – объемного паросодержания, основанная на механистических моделях DNB и корреляции для описания DO, вместе с замыкающими соотношениями. Был описан алгоритм предложенной методики. Методика основана на феноменологической модели DNB МКП, с поддерживающей моделью МПБ для расширения области описания DNB. Методика вместе с замыкающими соотношениями и моделями паросодержания внедрена в субканальный код SC-INT. Для устранения параметрических трендов и корректного описания явления инверсии, была предложена модернизация МКП, направленная на корректировку коэффициента a , отвечающего за влияние турбулентности в двухфазной области на коэффициент интенсивности поперечных турбулентных пульсаций i_b . Был выполнен анализ методик расчетного определения таких ключевых параметров двухфазного потока, как массовое и объемное паросодержание. Для объемного паросодержания была выбрана модель потока дрейфа Zuber&Findley в модификации Dix, учитывающая форму профиля объемного паросодержания в зависимости от режимных параметров, которая является определяющей при определении типа возникающего кризиса теплоотдачи.

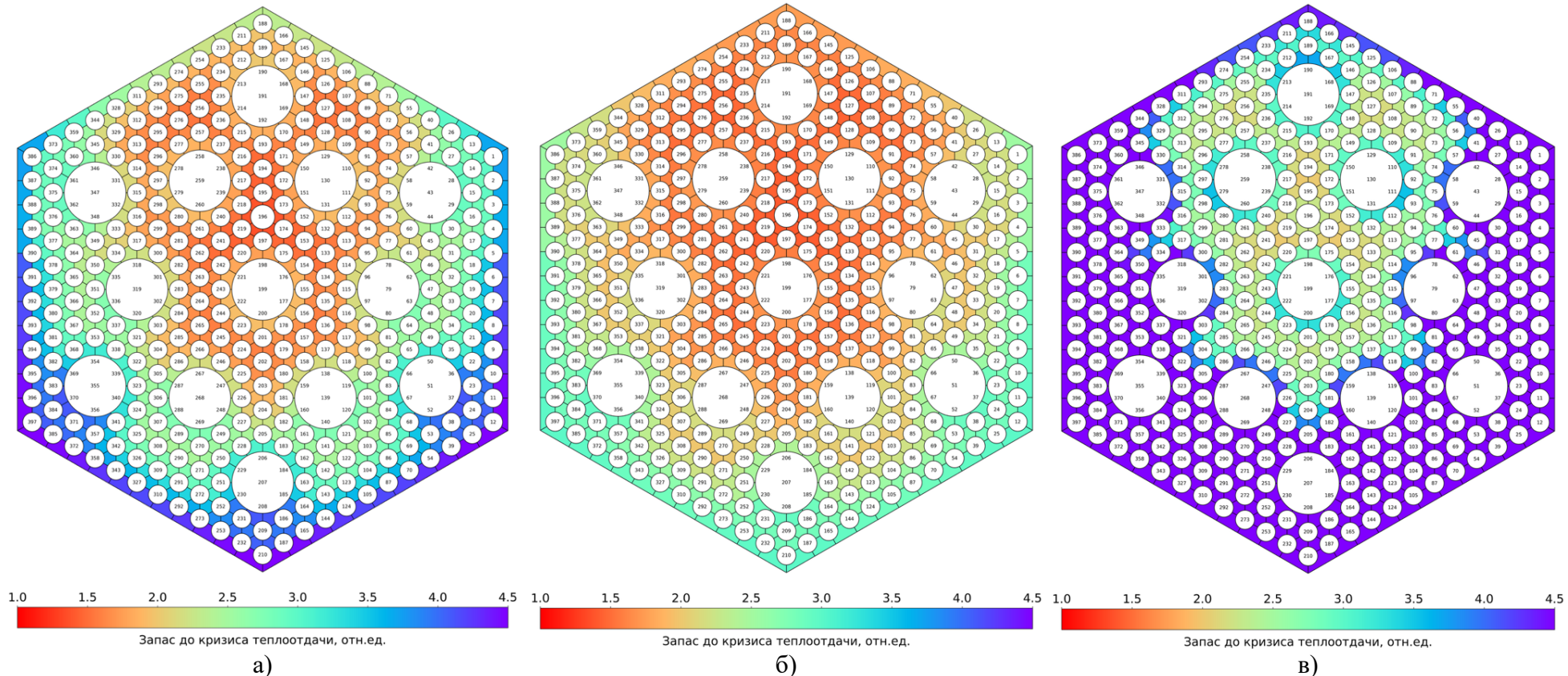


Рис 15. Распределение коэффициента запаса до кризиса теплоотдачи, определенное в консервативном приближении, в ТВС реактора ВВЭР новой конструкции, для первого расчетного варианта, определённого по а) корреляции Безрукова, б) корреляции RNC-SUB, в) предложенной методике КТП

3. Выполнен анализ способов экспериментального исследования локальных параметров потока теплоносителя применительно к условиям проведения эксперимента на многостержневых электрообогреваемых моделях ТВС на теплофизическом стенде КС НИЦ «Курчатовский институт». Для измерения локальной скорости были выбраны зонды отбора полного давления – трубками Пито; для измерения температуры теплоносителя – установка термодатчиков высокой точности. Для проведения экспериментов было разработано и собрано устройство, осуществляющее разведение и позиционирование датчиков, и смонтировано на моделях ТВС-2006, исследованных на стенде КС, разработана процедура тарировки датчиков и первичной обработки экспериментальных данных;

4. Проведен цикл экспериментов по исследованию локальных параметров потока теплоносителя – температуры и скорости – в ячейках экспериментальных многостержневых моделей ТВС-2006 реактора ВВЭР. Исследования были проведены в широком диапазоне режимных параметров – как в области нормальной эксплуатации РУ ВВЭР, так и в диапазонах параметров при нарушении нормальной эксплуатации и аварийных режимах.

5. Проведен цикл экспериментов по исследованию КТП на многостержневых моделях ТВС-2006 реакторов ВВЭР с различной конфигурацией радиального энерговыделения;

6. На основе полученных экспериментальных данных была произведена настройка замыкающих соотношений для определения гидравлических характеристик исследованных моделей, а также массообменных процессов. Из анализа перепадов давления были получены КГС фрагментов ДР, а также настроены соотношения для коэффициента трения на гладкой части пучка; из анализа скоростей были скорректированы распределение местных КГС по подканалам, а также фактор неподобия канала круглой трубе. Из анализа распределения температур были получены коэффициенты для корреляции поперечного турбулентного обмена. После выполнения указанной настройки был выполнен анализ величины КТП на исследованных моделях ТВС, его зависимости от средней и локальной относительной энтальпии;

7. Банк данных по КТП и локальным параметрам дополнен моделями ТВС-2006 реактора ВВЭР-1200, входные файлы кода SC-INT для которых предварительно настроены по результатам сравнения с экспериментальными величинами локальных параметров. На основе банка путем расчета по коду SC-INT создана база данных по локальным параметрам в экспериментальных состояниях с достижением КТП;

8. Предложенная методика определения КТП вместе с замыкающими соотношениями и моделями паросодержания адаптирована и внедрена в субканальный код SC-INT. Для расчета характеристик двухфазного потока в координате начала отрыва

паровых пузырей был создан отдельный модуль программы SC-INT. На созданной базе данных выполнена оптимизация коэффициентов предложенной методики определения КТП, получены диапазоны переключения моделей DNB и DO, диапазоны интерполяции. Получена погрешность предложенной методики определения КТП, составившая при описании 4131 точек стандартное отклонение $\sigma = 19,6\%$ при полной погрешности $\Delta + 3\sigma = 59,0\%$, определен диапазон режимных параметров ее применимости; выполнено ее сравнение с корреляциями Безрукова Ю.А, Смолина В.Н., Осмачкина В.С. и Олексюка Д.А.; Методика обладает меньшей максимальной погрешностью в сравнении с корреляцией Безрукова (используемой в проектных расчетах) в области параметров эксплуатации РУ ВВЭР, сопоставимой точностью на всем рассмотренном массиве экспериментальных данных, но значительно лучше описывает данные при высоком объемном паросодержании. При этом, методика основана на феноменологических представлениях о возникновении кризиса типа DNB и имеет в своей основе физически обоснованные расчетные методики для определения параметров двухфазного потока, что наделяет ее предсказательной способностью.

9. С помощью предложенной методики определения КТП получена величина $DNBR$ в кассете реактора ВВЭР, обладающей значительными конструктивными изменениями в сравнении с классическими конструкциями ТВС для реакторов ВВЭР. Анализ величины $DNBR$ проводился в консервативном приближении с применением консервативного распределения аксиального и радиального энерговыделения. Полученная по предложенной методике величина $DNBR_{det}^{min}$ сравнивалась с аналогичными величинами, полученными по корреляции Безрукова (применяемой для проектных расчетов РУ ВВЭР) и специальной корреляцией RNC-SUB, предназначенной для проведения КТП при проведении субканальных расчетов. Показано хорошее соответствие величин $DNBR_{det}^{min}$, определенных по различным методикам – предложенной и с использованием классических корреляций. Предложенная методика, как и следует из предпосылок ее создания, не определяет величину КТП в подканалах, в которых отсутствует кипение (величина массового/объемного паросодержания равна нулю).

Список литературы

1. J. Weisman and B. S. Pei. Prediction of critical heat flux in flow boiling at low qualities //International Journal of Heat and Mass Transfer. 1983. – Т. 26. – №. 10. – С. 1463-1477.
2. H. Lee and I. Mudawwar, A mechanistic critical heat flux model for subcooled flow boiling based on local bulk conditions. Int. J. Multiphase Flow, 1988, 14(6): 711-728.
3. Захаров С. В. Модель кризиса теплоотдачи при пузырьковом кипении жидкостей в каналах при высоких приведенных давлениях: дис. – Московский энергетический институт, 2003.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

1. **Зубков А.Г.**, Олексюк Д.А., Вертиков Е.А., Носков А.С., Щербинин А.А., Морозкин О.Н., Шишкин А.А. Экспериментальные исследования локальных параметров теплоносителя в пучках стержней на стенде КС НИЦ «Курчатовский институт» и их расчетный анализ, Вопросы атомной науки и техники (ВАНТ). Серия: Ядерно-реакторные константы, №2. – 2025, – С. 246 – 259. EDN: LMLULB.
2. **А.Г. Зубков**, Д.А. Олексюк, Е.А. Вертиков, А.С. Носков. Методики расчета величины КТП в реакторах с водой под давлением и оценка возможности ее определения с помощью механистических моделей кризиса теплоотдачи, Вопросы атомной науки и техники (ВАНТ). Серия: Ядерно-реакторные константы, №2. – 2025, – С. 317 – 353. EDN: WLPLCW.
3. Вертиков Е.А., Олексюк Д.А., **Зубков А.Г.**, Малютин М.А. К вопросу о валидации поячейковых кодов для расчета активных зон реакторов типа ВВЭР. Вопросы атомной науки и техники (ВАНТ). Серия: Ядерно-реакторные константы, 2025, № 1, с. 232—244. EDN: MSMICP.
4. Е.А. Вертиков, Д.А. Олексюк, А.С. Носков, М.А. Малютин, К.В. Запоржин, **А.Г. Зубков**. Оценка представительности экспериментальных данных по критическому тепловому потоку с использованием субканального теплогидравлического кода SC-Core. Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок. – 2025. – № 1 (39) – С. 27–42. EDN: SCEYHK.