

На правах рукописи



ВЕРБИЦКИЙ Юрий Григорьевич

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
В ЭЛЕМЕНТАХ ОБОРУДОВАНИЯ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК
ПРИ НИЗКИХ ПАРАМЕТРАХ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ**

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

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2011

Работа выполнена в ФГУП «Научно-исследовательский технологический институт им. А.П. Александрова» (г. Сосновый Бор Ленинградской области).

Научный руководитель

канд. техн. наук, ст. науч. сотр.

Мигров Юрий Андреевич

Официальные оппоненты:

доктор техн. наук, профессор

Федорович Евгений Данилович

канд. техн. наук, доцент

Митрюхин Андрей Геннадьевич

Ведущая организация – *ОАО Опытное конструкторское бюро «Гидропресс»*
(г. Подольск, Московской обл.).

Защита диссертации состоится «07» февраля 2012 г. в 16-00 на заседании диссертационного совета Д 212.229.04 в ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу:
195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, в ауд. 411 ПГК.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан «29» декабря 2011 г.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью учреждения, просим направить по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Факс: (812)552-6552

E-mail: kg1210@mail.ru

Ученый секретарь
диссертационного совета



К.А. Григорьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Современные концепции безопасности АЭС нового поколения предусматривают широкое использование пассивных систем расхолаживания реакторного оборудования, работающих при низких давлениях под действием гравитационных сил. Основные преимущества таких систем связаны с упрощением конструкции оборудования и независимостью их функционирования от наличия источников электроснабжения, а недостатком – реализующаяся при различных механизмах возбуждения колебаний гидродинамическая неустойчивость двухфазного водяного теплоносителя при низких давлениях. Многообразие видов неустойчивостей, проявляющихся в натуральных контурах естественной циркуляции (ЕЦ), не позволяет достоверно оценить границы неустойчивости на основе теоретических или полуэмпирических зависимостей. Поэтому обоснование теплогидравлических характеристик проектируемых пассивных систем безопасности, функционирующих в условиях ЕЦ теплоносителя, выполняется на основе крупномасштабных интегральных экспериментов и численного моделирования процессов с помощью расчётных кодов улучшенной оценки. Крупномасштабные эксперименты очень затратны по стоимости и времени реализации, поэтому в настоящее время основным инструментом, позволяющим решать задачи обоснования устойчивой работы пассивных систем безопасности, являются теплогидравлические расчётные коды (РК) улучшенной оценки, верифицированные в области параметров, характерных для работы этих систем.

Цели работы. Получение новых экспериментальных данных по устойчивости двухфазных потоков в контурах ЕЦ при низких параметрах теплоносителя. Верификация РК КОРСАР на основе полученных экспериментальных данных. Совершенствование функционального наполнения РК КОРСАР по результатам верификации. Численное моделирование теплогидравлических процессов в натурном контуре ЕЦ системы СПОТ ГО проекта АЭС с ВВЭР-640.

Основные результаты и их научная новизна. Впервые экспериментально получены пульсационные (гейзерные) режимы барботажа пара в длинных вертикальных каналах значительного диаметра при низких давлениях. Выполнен анализ механизма возбуждения гейзерных колебаний и определены границы области этого вида неустойчивости. Разработана аналитическая зависимость для границы устойчивости барботажа, обобщающая экспериментальные результаты. Получены новые экспериментальные данные по паросодержанию при барботаже в длинных каналах при низких давлениях.

На основе экспериментальных данных по устойчивости барботажных режимов выполнена верификация базовой версии РК КОРСАР, по результатам верификации разработаны и внедрены в РК КОРСАР уточнения замыкающих соотношений теплогидравлической модели.

Выполнено экспериментальное исследование неустойчивости вскипающих потоков на экспериментальном стенде "КЕДР", моделирующем контур аварийного охлаждения внешней поверхности корпуса реактора АЭС с ВВЭР-640, выявлен механизм возникновения низкочастотных колебаний потока в подъёмном участке контура. На основе полученных экспериментальных данных выполнена верификация РК КОРСАР.

При помощи РК КОРСАР выполнено численное моделирование теплогидравлических процессов в контуре ЕЦ системы СПОТ ГО проекта АЭС с ВВЭР-640. Продемонстрировано влияние степени детализации гидравлической схемы контура в расчётной модели на возможность выявления неустойчивости двухфазного потока.

Практическая значимость. Результаты экспериментальных исследований использованы для верификации и совершенствования функционального наполнения РК КОРСАР, который широко применяется в проектных расчётах при обосновании систем безопасности проектов российских АЭС нового поколения.

Достоверность результатов. Достоверность экспериментальных данных обеспечена применением проверенных методик подобных экспериментальных исследований, аттестованных методов измерения, неоднократным повторением каждого из экспериментов, автоматизацией выполнения экспериментов и обработки полученных результатов, расчётами погрешности измерений. Достоверность основных расчётных результатов обеспечена использованием апробированных расчётных методик РК КОРСАР. Полученные результаты согласуются с современными представлениями о теплогидравлических процессах в элементах оборудования систем пассивного расхолаживания АЭС.

Личный вклад автора в полученные результаты. Автор диссертационной работы принимал непосредственное участие в постановке задач экспериментальных исследований и в сооружении экспериментальных установок, разработке программ и методик экспериментов, проведении экспериментов, обработке результатов исследований и выпуске научно-технических отчётов.

На основе полученных экспериментальных данных, представленных в диссертационной работе, автор выполнил верификационные расчёты и разработал методику коррекции замыкающих соотношений РК КОРСАР.

На защиту выносятся:

Результаты экспериментального исследования барботажа пара в длинных вертикальных каналах при низких давлениях (границы области гейзерной неустойчивости, механизм возбуждения гейзерных колебаний, аналитическая обобщающая зависимость для границы устойчивости, экспериментальные данные по паросодержанию).

Результаты применения статистического анализа влияния неопределённости параметров для уточнения замыкающих соотношений теплогидравлической модели РК КОРСАР. Разработка коррекции замыкающих соотношений РК КОРСАР для межфазного трения в пузырьковом и снарядном режимах.

Результаты экспериментального исследования неустойчивости вскипающих потоков в экспериментальной модели контура аварийного охлаждения внешней поверхности корпуса реактора АЭС с ВВЭР-640 (стенд "КЕДР"), механизм колебаний двухфазного потока в подъёмном участке контура. Результаты верификации РК КОРСАР на основе полученных на стенде "КЕДР" экспериментальных данных.

Результаты численного исследования устойчивости контура ЕЦ системы СПОТ ГО проекта АЭС с ВВЭР-640. Результаты исследования влияния степени детализации гидравлической схемы контура в расчётной модели на получение неустойчивых режимов двухфазной циркуляции.

Апробация материалов диссертации. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на: IX семинаре по проблемам физики реакторов (Москва, 1995), на отраслевом научно-техническом семинаре "Пассивные системы и безопасность АЭС" (Обнинск, 2002), на 7-й международной научно-технической конференции "Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР" (Подольск, 2011), на международной конференции ICONE11 (Токио, 2003). Всего по результатам исследований опубликовано семь печатных работ, включая статью в журнале, рекомендованном ВАК (Теплоэнергетика, 2005).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников из 65 наименований. Диссертация содержит 124 страницы, в том числе 63 рисунка, восемь таблиц и одно приложение.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана краткая характеристика современного состояния проблемы, обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы задачи исследования, отмечены научная новизна и практическая значимость полученных результатов и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе содержится обзор основных характеристик современных систем аварийного отвода остаточного тепловыделения, основанных на ЕЦ теплоносителя при низких давлениях. Поскольку теплогидравлическая

неустойчивость контура накладывает ограничения на допустимые пределы его тепловой мощности, в этой же главе представлен обзор экспериментальных и теоретических работ по исследованию устойчивости двухфазных потоков в контурах ЕЦ со свободным уровнем теплоносителя при низких давлениях. На основании данного обзора можно сделать вывод, что существующие критериальные и аналитические методы предсказания устойчивости могут дать достоверный результат только в относительно простых случаях. Оптимальным считается следующий порядок исследования устойчивости проектируемой системы: сначала с помощью подходящего критериального соотношения или номограммы приближённо оценивается область неустойчивости на плоскости режимных параметров, затем с помощью экспериментальных исследований на теплофизических стендах и численного анализа при помощи распределённой математической модели количественно уточняются её границы. Численный анализ динамических характеристик проектируемых теплогидравлических систем выполняется при помощи теплогидравлических расчётных кодов улучшенной оценки, таких, как КОРСАР (Россия) или RELAP5 (США), которые должны быть верифицированы в заданной области режимных параметров установки. Диссертационная работа посвящена получению новых верификационных экспериментальных данных на стендах различного масштаба и применению этих данных для верификации и уточнения РК КОРСАР в области низких давлений и движущих напоров теплоносителя.

Во второй главе представлен детальный анализ результатов экспериментального исследования неустойчивых гейзерных режимов барботажа водяного пара при низких давлениях в системе длинная вертикальная труба – верхний расширительный сосуд, т.е. в условиях, имитирующих адиабатический подъёмный участок и расширительный сосуд в контурах ЕЦ. При непосредственном участии автора был сооружён теплогидравлический стенд "Барботаж" (рис. 1), оборудованный автоматической системой измерений, которая обеспечивала измерение и регистрацию более 40 параметров (расход, давление, перепады давления, температура теплоносителя и металла) с частотой от 5 до 50 Гц. Методика экспериментов состояла в следующем: после заполнения контура дегазированной водой до середины расширительного сосуда, в нижнюю часть барботажной колонки (3, рис. 1) через парораспределительное устройство (2) подавался заданный расход пара от парогенератора (1). Пар барботировал вверх до парового объёма над уровнем жидкости расширительного сосуда (4), затем направлялся на утилизацию в конденсатор (5). Давление в расширительном сосуде поддерживалось на заданном уровне при помощи управления расходом пара, покидающего установку.

Каждый экспериментальный режим (всего было получено 140 режимов) задавался двумя параметрами, которые поддерживались постоянными: давлением в расширительном сосуде и массовой скоростью пара на входе в рабочий участок. Экспериментально установлено, что барботаж пара при каждом заданном давлении реализуется либо в неустойчивом ("гейзерном") режиме, либо в стабилизированном режиме, в зависимости от величины расхода пара на входе в колонку. При небольшом расходе пара наблюдались регулярные негармонические низкочастотные колебания параметров ("гейзерный режим"). При увеличении расхода пара период пульсаций уменьшался, и при достижении некоторого порогового значения расхода пара гейзерный режим сменялся стабилизированным режимом, переход к стабилизированному режиму выглядел как прекращение низкочастотных пульсаций (рис. 2).

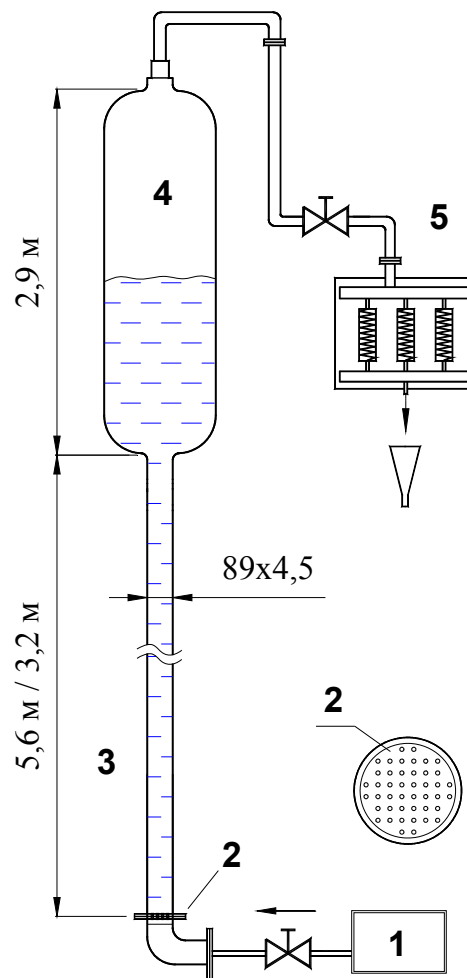


Рисунок 1 – Схема стенда "Барботаж"

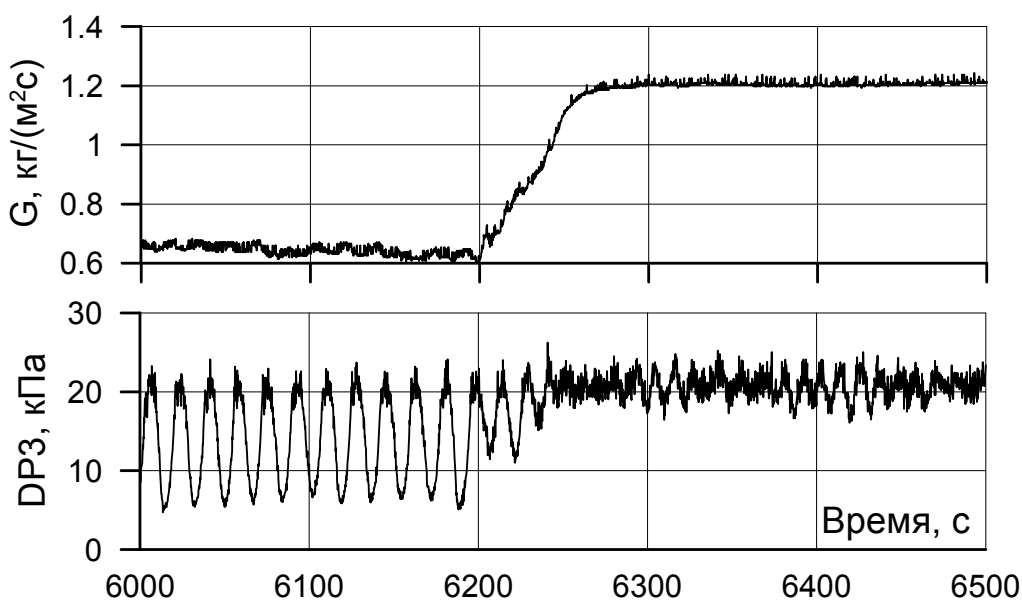


Рисунок 2 – Снижение пульсаций перепада давления на средней части колонки (DP3) при достижении критического расхода пара. Высота колонки 5,6 м, давление 417 кПа

Экспериментальные наблюдения позволили выявить механизм гейзерного режима, который характеризуется последовательными стадиями или фазами периодически повторяющегося процесса:

- Прогрев теплоносителя по всей высоте колонки паром, поступающим на её вход, до температуры насыщения. В нижней части колонки мелкие пузырьки объединяются в паровой пузырь, занимающий все её сечение.
- Объемное вскипание воды, начиная с нижнего конца колонки. Сопровождается ускоренным движением снизу вверх переднего фронта растущей паровой области, вытесняющей перед собой жидкость.
- Выброс пара под уровень воды расширительного сосуда. Противоточное течение в вертикальном канале: пар движется вверх, вода из расширительного сосуда – вниз. Постепенное заполнение всей колонки по высоте сравнительно холодным (недогретым до местного значения температуры насыщения) теплоносителем из расширительного сосуда.

Следует отметить, что гейзерный режим барботажа обеспечивается наличием фазовых превращений теплоносителя. При исследовании барботажа воздуха в воде на той же экспериментальной установке (приведенная скорость воздуха изменялась от 0 до 5 м/с, давление в расширительном сосуде от 0,1 до 0,3 МПа) наблюдались только стабилизированные режимы.

Каждому экспериментальному режиму барботажа на плоскости определяющих параметров давление – массовая скорость (P, G) соответствует одна точка, а совокупность всех экспериментальных точек определяет граничную кривую, разделяющую области устойчивых и гейзерных режимов (рис. 3).

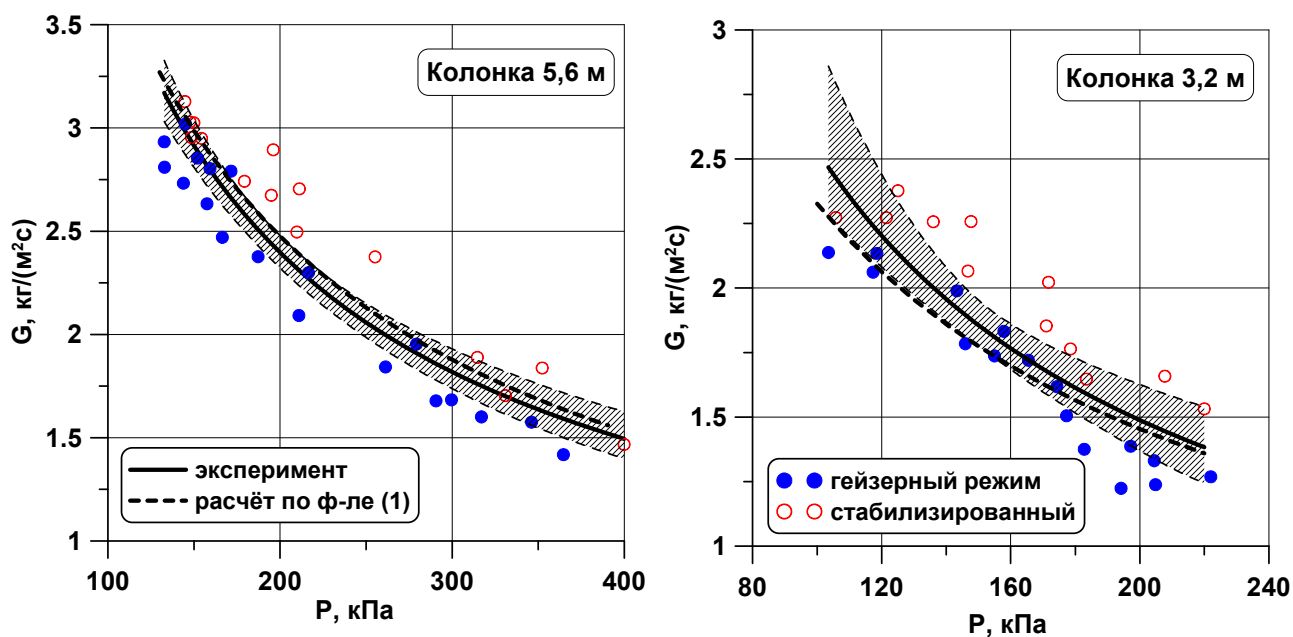


Рисунок 3 – Экспериментальные и расчётные границы устойчивости барботажа

Над граничной кривой реализуются устойчивые режимы, под ней – гейзерные режимы барботажа. Заштрихованные области показывают 98% доверительные интервалы для границ устойчивости, полученные методом наименьших квадратов.

Обобщение экспериментальных данных по определению границы устойчивости выполнено автором на основе выявленного механизма колебаний и представления о том, что гейзерный вид барботажной неустойчивости связан с термодинамической неравновесностью перегретой жидкости при её вытеснении из нижней части барботажной колонки вверх, в область более низкого статического давления. Полагая, что величина граничной массовой скорости пара на входе в колонку пропорциональна скорости парообразования за счёт объёмного кипения при снижении гидростатического давления, было получено следующее соотношение:

$$G_{cp} = CH\rho'^2 g \left| \frac{\partial i}{\partial p} \right| \frac{l}{r} w_{сн}, \quad w_{сн} = 0,35 \sqrt{gd(\rho' - \rho'') / \rho'}, \quad C = 0,6. \quad (1)$$

В этом соотношении $w_{сн}$ – скорость всплытия снаряда по формуле Уоллиса. Границы устойчивости, определяемые соотношениями (1), представлены на рис. 3 штриховыми линиями.

На стенде "Барботаж" были получены новые результаты по паросодержанию в исследованных вертикальных каналах при стабилизированных режимах барботажа пара в области небольших давлений. Поскольку большинство известных работ по исследованию барботажа были выполнены для относительно коротких труб, полученные экспериментальные данные обладают значительной ценностью для верификации моделей потока дрейфа для длинных труб достаточно большого диаметра. На стенде измерялись истинные объёмные паросодержания весовым методом по измерениям перепадов давления на трёх участках по высоте барботажной колонки. Среднеобъёмное паросодержание участка трубы, заключенного между штуцерами датчиков рассчитывалось без учёта потерь давления на трение и ускорение потока. Полученные данные были обобщены в терминах модели потока дрейфа и сопоставлены с известными зависимостями Катаока и Ишии, Лабунцова и Бартоломея. Показано, что экспериментальные данные, полученные в условиях стенда "Барботаж", описываются этими соотношениями с примерно одинаковой точностью $\pm 15\%$, приемлемой для весового метода измерения истинного объёмного паросодержания.

В третьей главе приведены результаты численного моделирования процессов барботажа, выполненного с целью верификации расчётного теплогидравлического кода КОРСАР. Расчётное моделирование выполненных на стенде "Барботаж" экспериментов позволяет верифицировать математические модели нескольких физических явлений: конденсации пара в

жидкости, вскипание перегретой жидкости, относительное движение фаз в поле силы тяжести, в том числе при их противоточном движении, "захлёбывание" двухфазного потока в выходном сечении барботажной колонки. Совместное действие всех этих явлений приводит, при определённых условиях, к гейзерной неустойчивости и определяет расположение границы устойчивости барботажа на плоскости режимных параметров (P, G).

Нодализационная схема расчётов барботажа, приведённая на рис. 4, была построена при помощи стандартных элементов РК КОРСАР. Основным параметром, который изменялся от расчёта к расчёту, являлось давление в граничной ячейке *BVOL_T1*, которое задавалось постоянным на протяжении всего расчёта, в то время как расход пара на вход в колонку увеличивался небольшими ступенями. Граничные кривые, полученные расчётом при помощи базовой версии РК КОРСАР, представленные на рис. 5, показывают, что эта

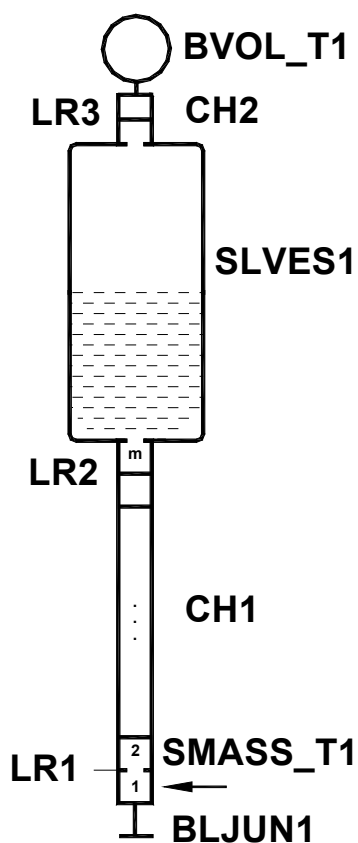


Рисунок 4 – Нодализационная схема расчёта

версия правильно предсказывает положение граничной кривой только при давлениях, близких к атмосферному, при больших давлениях имеет место существенное расхождение с экспериментальной границей устойчивости.

Для выбора конкретных соотношений, "ответственных" за положение расчётной границы устойчивости барботажа, был применён статистический метод анализа влияния неопределенностей параметров математических моделей на результаты расчета.

В качестве исследуемых параметров были выбраны все замыкающие соотношения, характеризующие взаимодействие фаз (трение и теплообмен) со стенкой канала и друг с другом в пузырьковом, снарядном и дисперсно-кольцевом режимах, всего 16 параметров. При помощи генератора случайных чисел были сформированы 100 наборов по 16 варьируемых параметров в каждом, причём значения каждого

параметра случайно выбирались в пределах заданных 20%. Число таких наборов, то есть количество необходимых расчетов, определяется известной формулой Уилкса и выбранными значениями достоверности и доверительной вероятности анализа (0,95). После выполнения 100 расчётов были рассчитаны коэффициенты ранговой корреляции Спирмана, характеризующие меру зависимости исследуемого параметра от каждого варьируемого. Анализ

распределения рассчитанных коэффициентов корреляции показал, что на положение расчётной границы устойчивости барботажа определяющее влияние оказывает коэффициент межфазного трения в пузырьковом и снарядном режимах.

Анализ этих замыкающих соотношений, выполненный автором, показал необходимость уточнения влияния диаметра канала на величину межфазного трения. Уточнение, основанное на анализе литературных данных, заключалось в изменении методики расчёта критического числа Бонда, которое привело к учёту влияния стенок канала на межфазное трение при значительно больших диаметрах канала, чем это было в базовой расчётной модели. Уточнения были внесены автором в замыкающие соотношения РК КОРСАР, оттестированы и верифицированы путём решения набора около 200 реперных задач, обычно применяющихся для экспресс-диагностики новых версий РК КОРСАР. С помощью уточнённой версии (КОРСАР_МОД) были выполнены расчёты границы устойчивости барботажа, которые показали (см. рис. 5) удовлетворительное согласие с экспериментом.

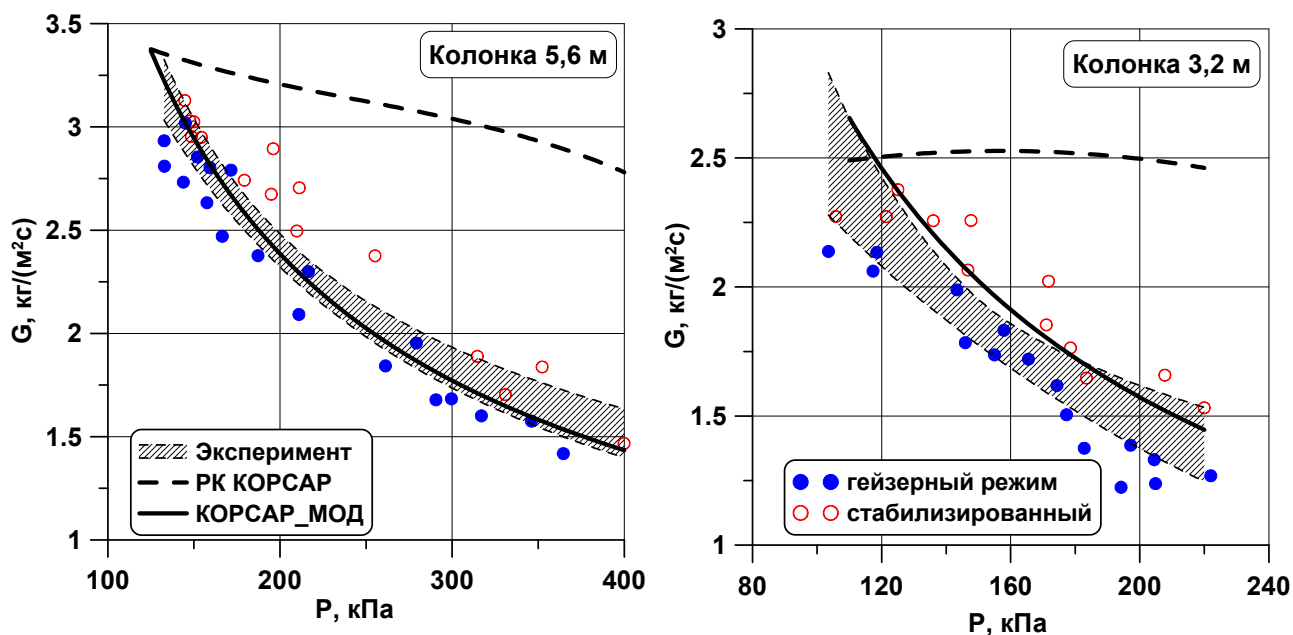


Рисунок 5 – Границы устойчивости барботажа, полученные в экспериментах и в расчётах при помощи базовой и уточнённой версий кода КОРСАР

В четвертой главе изложены результаты экспериментального исследования неустойчивости вскипающих потоков на экспериментальном стенде "КЕДР", моделирующем контур пассивного аварийного охлаждения внешней поверхности корпуса реактора ВВЭР-640. В случае тяжёлой аварии с расплавлением активной зоны, для предотвращения разрушения корпуса реактора, проектом предусматривается водяное охлаждение корпуса с внешней стороны при помощи контура естественной циркуляции в условиях докритического режима кипения. Поскольку величина критического теплового

потока может резко снижаться при потере устойчивости двухфазного течения теплоносителя, актуально исследование условий нарушения устойчивости натурального контура, выполненное на масштабной модели.

Стенд "КЕДР" был спроектирован и сооружен при непосредственном участии автора на основе объёмно-мощностного метода моделирования, при уменьшении в ≈ 300 раз объема и тепловой мощности модели и сохранении натуральных высотных размеров. На стенде (рис. 6) моделировались все основные структурные элементы натурального контура: днище и боковая стенка корпуса реактора (1, 2), пространство между корпусом и бетонной шахтой (3), зазор опорного узла (4), аварийный бассейн (5), опускные каналы (6).

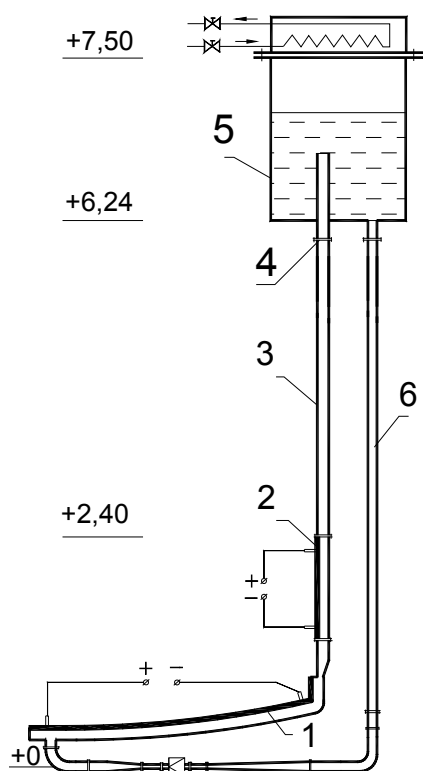


Рисунок 6 – Схема стенда КЕДР

В качестве модели днища корпуса реактора использована электрообогреваемая криволинейная пластина сечением 90×25 мм. Система экспериментальных измерений стенда состояла из нескольких десятков датчиков, измеряющих температуру теплоносителя и стенки обогреваемых участков, перепады давления и расход в контуре циркуляции, а также электрическую мощность имитаторов корпуса реактора.

Методика проведения экспериментов заключалась в следующем. Перед началом экспериментов Циркуляционный контур заполнялся дистиллированной водой до заданного уровня $\approx +6,5$ м. При помощи электрического тока, пропускаемого через имитаторы корпуса реактора, теплоноситель контура разогревался на естественной циркуляции до достижения заданной температуры.

Затем нагрев прекращался и производилась выдержка контура в течение необходимого времени до прекращения циркуляции, с целью достижения изотермического состояния. Далее мощность электрообогрева постепенно повышалась ступенями в соответствии с требуемым графиком нагрузки.

При небольшой мощности электрообогрева наблюдался устойчивый однофазный режим циркуляции. В этом режиме отсутствовало кипение теплоносителя в объеме теплоносителя над поверхностью обогреваемых участков. При более высоких уровнях мощности наблюдалось кипение теплоносителя на выходе из обогреваемых участков, сопровождавшееся высокоамплитудной неустойчивостью вскипающего потока теплоносителя.

Анализ экспериментальных данных позволил выявить механизм данного вида неустойчивости, который характеризуется последовательными стадиями периодически повторяющегося процесса:

- Повышение температуры теплоносителя в верхней части подъемного необогреваемого участка до местной температуры насыщения.
- Объемное закипание теплоносителя в подъемном участке, начиная с верхнего конца, распространение кипения вниз по каналу. Резкое увеличение скорости циркуляции в контуре за счёт снижения плотности в подъемном участке.
- Выброс пара под уровень воды модели аварийного бассейна. Заполнение подъемного участка сравнительно холодным теплоносителем снизу из опускного участка контура и сверху из модели аварийного бассейна. Прекращение кипения в подъемном необогреваемом участке вызывает резкое снижение скорости циркуляции.

Верификационные расчёты полученных на стенде "КЕДР" экспериментальных режимов с неустойчивыми режимами циркуляции были выполнены в режиме "посттеста", т.е. результаты экспериментальных тестов были использованы для настройки величин местных сопротивлений и тепловых потерь от металлоконструкций стенда в атмосферу. Нодализация схема стенда "КЕДР" приведена на рис. 7.

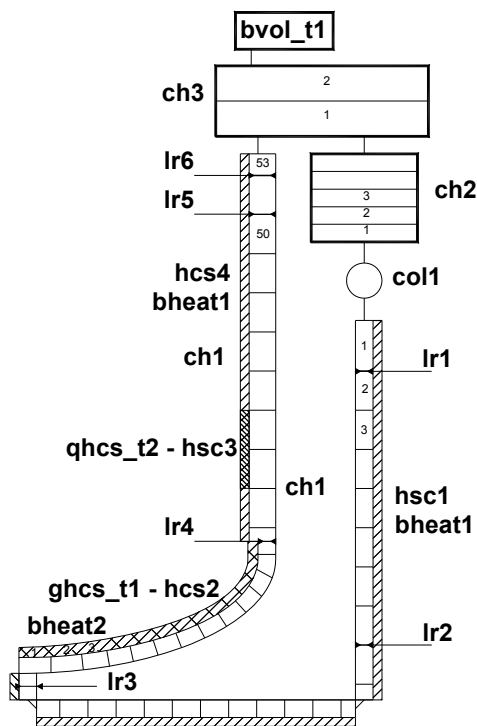


Рисунок 7 – Нодализация схема стенда

На рис. 8 приведены основные параметры, зарегистрированные в ходе одного из экспериментов: мощность тепловыделения N7202, расход в контуре G3001, истинное объемное паросодержание в верхней части необогреваемого подъемного участка fi2012. На правой части рисунка приведены соответствующие расчётные параметры, полученные при помощи РК КОРСАР. Сравнение поведения параметров показывает, что РК КОРСАР правильно моделирует основные физические процессы в контуре циркуляции стенда КЕДР: режим однофазной устойчивой циркуляции на минимальном уровне мощности и неустойчивый режим при объемном вскипании в необогреваемом подъемном участке.

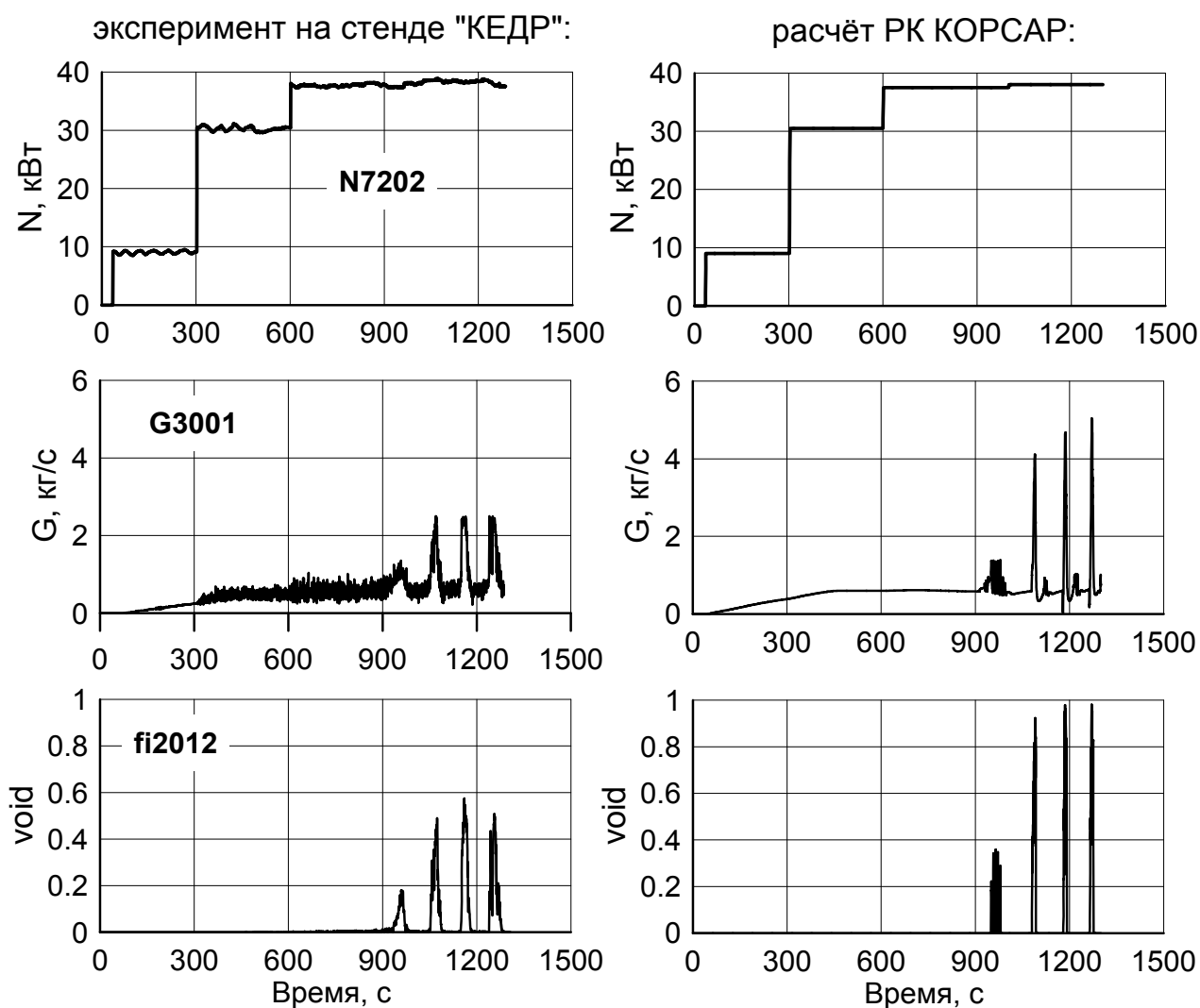


Рисунок 8 – Развитие естественной циркуляции в контуре стенда "КЕДР"

В пятой главе приведены результаты численного моделирования процессов в натурном контуре ЕЦ системы СПОТ ГО проекта АЭС с ВВЭР-640, выполненные при помощи РК КОРСАР.

В проектных расчётах сложных разветвлённых гидравлических контуров неизбежна некоторая степень снижения детализации задачи, вызванная технологическими возможностями кода и ограничениями на время счёта. В диссертационной работе выполнено исследование влияния степени детализации одного канала СПОТ ГО, состоящего из 16 теплообменников, подъёмного и опускного трубопроводов и одного бака БАОТ, на результаты расчёта устойчивости циркуляции теплоносителя в этой системе. Для этого были разработаны две нодализационные схемы (см. рис. 9): схема №1 моделирует натурный контур из восьми параллельных каналов, по два короба-охладителя в каждом, одним эквивалентным каналом, схема №2 полностью воспроизводит структуру одного канала СПОТ ГО, включая нижний и верхний коллекторы. Расчёты ЕЦ были выполнены для заключительной стадии аварийного расхолаживания, когда весь запас воды в баке БХОВ уже прогрелся почти до

температуры насыщения за счёт совместной работы контуров системы пассивного отвода тепла от парогенераторов (СПОТ ПГ) и СПОТ ГО. Граничные условия по теплообмену со стороны парогазового объёма контейнента задавались в виде условий третьего рода: на каждом шаге интегрирования по времени рассчитывался коэффициент теплообмена при конденсации пара на внутренней стороне защитной оболочки с учётом присутствия неконденсирующихся газов.

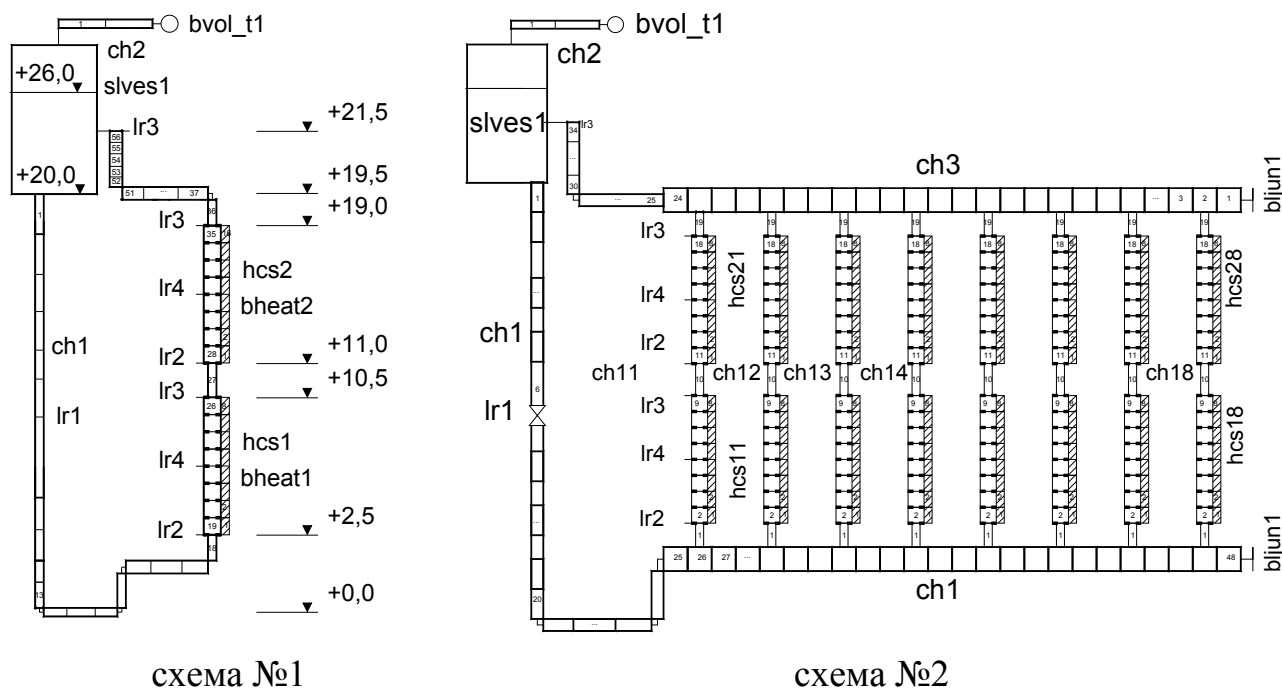


Рисунок 9 – Нодализационные схемы расчётов

Величина коэффициента теплообмена определялась давлением и температурой паровоздушной среды внутри ГО. В каждом расчёте последовательно задавались четыре ступени давления, которые могут реализоваться внутри защитной оболочки в процессе отвода тепловой энергии. В расчётах по обеим схемам циркуляция теплоносителя в контуре сначала развивалась в однофазном устойчивом режиме, затем происходило нарушение устойчивости потока при вскипании перегретого теплоносителя в необогреваемой части подъёмной ветви контура, начиная с верхней его части. Распространение объёмного кипения сверху вниз вызывалось снижением гидростатического давления в нижних ячейках при снижении плотности теплоносителя в верхних уже вскипевших ячейках. Затем устанавливался двухфазный режим ЕЦ с колебаниями основных параметров потока, характер которых зависел от степени детализации системы параллельных корбвов-охлаждителей в нодализационной схеме расчёта.

Для одноканального приближения (расчётная схема №1) механизм колебаний определяется наличием обратной связи между расходом

теплоносителя (G_k , рис. 10), поступающим на вход в обогреваемый канал и расходом пара, образующегося при кипении теплоносителя в этом канале.

В расчёте с восьмиканальной схемой (№2) механизм колебаний параметров определяется взаимодействием параллельных обогреваемых каналов, объединённых по входу и выходу соответствующими коллекторами. Несимметричность в гидравлике параллельных каналов вызывает различия в скоростях движения теплоносителя, мощности теплоотвода в разных каналах и интенсивности генерации пара. В результате в каждый момент времени часть каналов работает в режиме подъёма двухфазной смеси, в других жидкость движется вниз, периодически картина распределения направлений течения меняется.

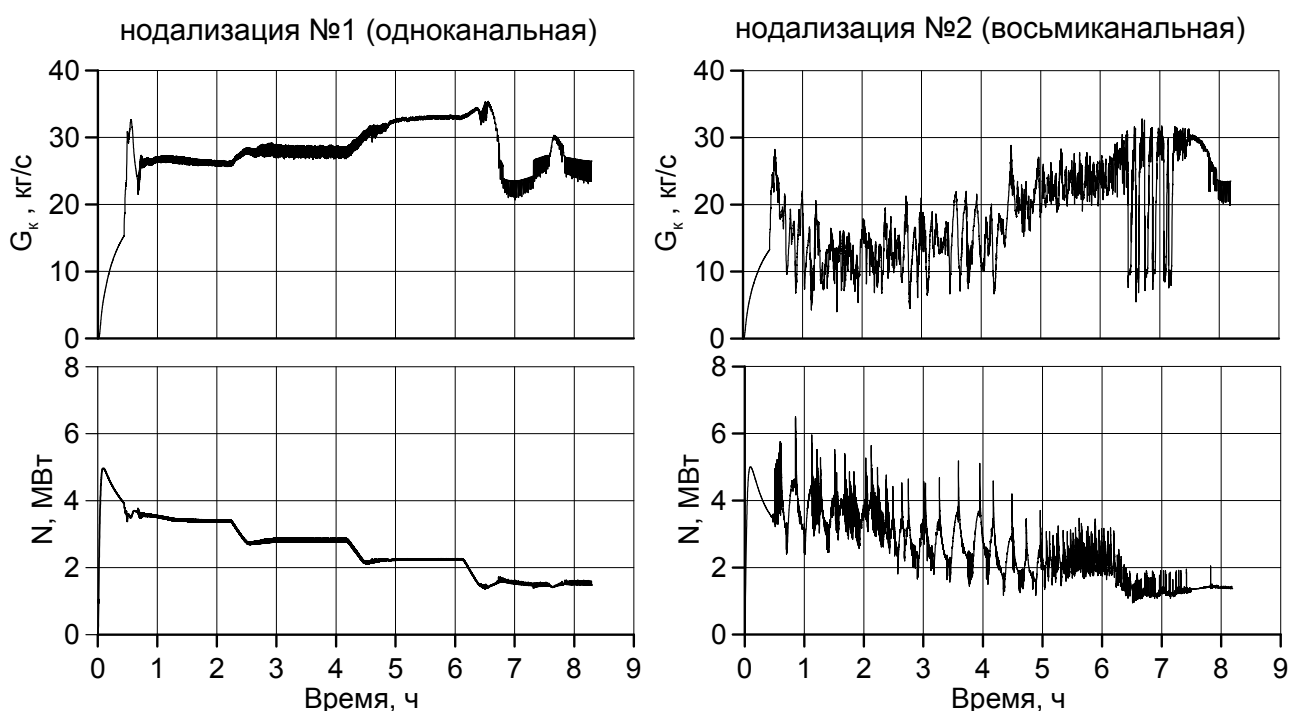


Рисунок 10 – Расход теплоносителя и мощность контура ЕЦ

Межканальная циркуляция теплоносителя сопровождается периодическим накоплением и последующим сбросом тепловой энергии в баки БАОТ, что инициирует значительные колебания параметров в контуре. В одноканальной схеме тепло, полученное теплоносителем на участке теплоподвода, передаётся потоком только вверх, в сторону баков БАОТ, причём увеличение притока энергии вызывает увеличение скорости её эвакуации. Расчёт по восьмиканальной схеме предсказывает сначала избыточное, по сравнению с одноканальной схемой, накопление энтальпии в системе (за счёт нагрева теплоносителя при опускном движении в части каналов), затем высвобождение её путём интенсивного парообразования, вызывающего сильные колебания контурного расхода и других параметров процесса.

Основные результаты

1. Выполнены расчётно-экспериментальные исследования двухфазных потоков в длинных вертикальных трубах большого диаметра при низких давлениях теплоносителя. В ходе этих исследований:
 - спроектирован и сооружён теплогидравлический стенд "Барботаж", создана система экспериментальных измерений, проведены эксперименты по исследованию устойчивости барботажа пара в вертикальных трубах;
 - впервые получены экспериментальные данные для гейзерного типа неустойчивости двухфазного потока, выявлен механизм возникновения низкочастотных колебаний параметров в этом режиме и предложена аналитическая обобщающая зависимость, описывающая границу устойчивости барботажа;
 - получены новые экспериментальные данные по истинному объёмному паросодержанию в длинных трубах значительного диаметра при низких давлениях;
 - с использованием экспериментальных данных, полученных на установке "Барботаж", выполнена верификация базовой версии. С использованием технологии статистического анализа неопределённости параметров математической модели выполнено уточнение замыкающих соотношений теплогидравлической модели РК КОРСАР по межфазному трению в пузырьковом и снарядном режимах.
2. Выполнены расчётно-экспериментальные исследования процессов естественной циркуляции теплоносителя в контуре аварийного охлаждения внешней поверхности корпуса реактора ВВЭР-640. В ходе этих исследований:
 - спроектирован и сооружен экспериментальный стенд "КЕДР", воспроизводящий теплогидравлические процессы в натурном контуре с объёмно-мощностным коэффициентом масштабирования 1:300;
 - получены экспериментальные данные по развитию неустойчивости вскипающих потоков в контуре аварийного охлаждения внешней поверхности корпуса реактора при низких давлениях, выявлен механизм возникновения низкочастотных колебаний параметров в этом режиме;
 - на основе экспериментальных данных, полученных на стенде "КЕДР", выполнена верификация РК КОРСАР и подтверждена способность кода моделировать теплогидравлику контура охлаждения днища корпуса реактора.
3. Выполнено численное моделирование теплогидравлических процессов в контуре ЕЦ системы СПОТ ГО проекта АЭС с ВВЭР-640 при помощи РК КОРСАР. При этом:

- установлена возможность наступления низкочастотной колебательной неустойчивости, вызванной объёмным вскипанием теплоносителя в необогреваемой части подъёмного участка контура ЕЦ;
- показана зависимость результатов численного анализа процессов в СПОТ ГО от степени детализации гидравлической схемы контура в расчётной модели.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Вербицкий Ю.Г. Экспериментальное исследование устойчивости барботажа пара в длинной вертикальной трубе при низких давлениях / Ю.Г. Вербицкий, В.К. Ефимов, Ю.А. Мигров // Теплоэнергетика. 2005. № 3. С. 56–61.

2. Verbitsky Yu.G. An experimental investigation of steam bubbling instability in a long vertical pipe at low pressures / Yu.G. Verbitsky, V.K. Efimov, Yu.A. Migrov // Proceedings of 11th International Conference on Nuclear Engineering. Tokyo, Japan. April 20–23, 2003. Rep. № 36151. CD.

3. Вербицкий Ю.Г. Численное моделирование пульсационных режимов барботажа пара в длинных трубах при низких давлениях при помощи РК КОРСАР / Ю.Г. Вербицкий, Ю.А. Мигров // Материалы 7-й международной научно-технической конференции "Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР". ОКБ "ГИДРОПРЕСС". Россия, Подольск, 17–20 мая 2011. CD.

4. Мигров Ю.А. Особенности расхолаживания реактора АЭС НП-500 на заключительной стадии аварий с разгерметизацией I контура / Ю.А. Мигров, В.К. Ефимов, Ю.Г. Вербицкий // Материалы IX семинара по проблемам безопасности ЯЭУ. М.: Изд-во МИФИ, 1995. С. 188–189.

5. Вербицкий Ю.Г. Исследование гейзерной неустойчивости двухфазных потоков / Ю.Г. Вербицкий, В.К. Ефимов, Ю.А. Мигров // Материалы отраслевого научно-технического семинара "Пассивные системы и безопасность АЭС". Обнинск: Изд-во ГНЦ ФЭИ РФ, 2002.

6. Вербицкий Ю.Г. Исследование гейзерной неустойчивости двухфазных потоков в контуре естественной циркуляции / Ю.Г. Вербицкий, В.К. Ефимов, О.В. Кувшинова [и др.] // Технология и системы обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок. Вып. 3. Конкурс научных и инженерных работ НИТИ им. А.П. Александрова 2004 года: Сборник научных трудов.– СПб.: Менделеев, 2005. С. 35–40.

7. Мигров Ю.А. Экспериментальные исследования процессов отвода остаточного тепла ВВЭР-640 через бассейн на интегральном стенде ИСТ(ЕЦ) / Ю.А. Мигров, В.К. Ефимов, Ю.Г. Вербицкий [и др.] // Процессы теплообмена и гидродинамики в системах безопасности АЭС с ВВЭР-640: Сборник трудов. СПб.: "Атомэнергопроект", 1997. С. 34–42.