

На правах рукописи

КУТЬИН
Владислав Васильевич

**ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ПАССИВНОМ
ОТВОДЕ ОСТАТОЧНОГО ТЕПЛА ВВЭР-640
В АВАРИЯХ С ПОТЕРЕЙ 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 — 2003

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

Научный руководитель
— канд. техн. наук *Мигров Юрий Андреевич*

Официальные оппоненты:
— доктор техн. наук, проф. *Федорович Евгений Данилович*;
— канд. техн. наук, с.н.с. *Иванов Виктор Константинович*.

Ведущее предприятие — ФГУП «Санкт-Петербургский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт «Атомэнергопроект».

Защита состоится 7 октября 2003 г. в 16-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.04 в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете по адресу:
195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
в ауд. 411 ПГК.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

Автореферат разослан "5" сентября 2003 г.

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

Факс: (812)5527684
E-mail: kg@kg1210.spb.edu

Ученый секретарь
диссертационного совета

К.А. Григорьев

Лицензия ЛР № 020593 от 7.08.97
Налоговая льгота — Общероссийский классификатор продукции
ОК 005-93, т. 2; 953004 — научная и производственная литература

Подписано в печать
Тираж 100 экз.

Объем в п.л. 1,75
Заказ №

Отпечатано с готового оригинал-макета,
предоставленного автором,
в типографии Издательства СПбГПУ
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

Отпечатано на ризографе RN-2000 FP
Поставщик оборудования — фирма “Р-ПРИНТ”
Телефон: (812) 110-65-09
Факс: (812) 315-23-04

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Современное развитие атомной энергетики требует дальнейшего повышения уровня ее безопасности. Один из основных путей реализации данного требования при создании АЭС нового поколения – широкое использование специальных систем безопасности, функционирование которых основано на пассивных принципах. Применительно к проекту АЭС с ВВЭР-640 в авариях с большими течами теплоносителя из I-го контура предусматривается гравитационный пролив воды из баков САОЗ через реактор с заполнением околореакторного пространства (аварийного бассейна) теплоносителем. Последующее длительное расхолаживание реактора основано на принципе естественной циркуляции (ЕЦ) в контуре, сформированном в системе реактор-бассейн, и сопровождается сложными теплогидравлическими процессами в элементах оборудования, которые до настоящего времени слабо изучены.

Для обоснования безопасности новых энергоблоков необходимо иметь надежный математический инструментарий – расчетные коды, которые должны адекватно воспроизводить, в частности, теплогидравлические процессы при пассивном отводе тепла реактора, характеризующиеся низкими параметрами теплоносителя (низкие давления и низкие массовые скорости) и значительными термической и механической неравновесностями двухфазного потока. Использование таких программных средств в расчетном анализе безопасности АЭС совместно с экспериментальными исследованиями на интегральных стендах позволит значительно повысить точность прогнозирования поведения объекта в аварийных режимах.

Цель работы. Целями диссертационной работы являются:

- экспериментальные исследования теплогидравлических процессов при пассивном отводе остаточного тепла ВВЭР-640 через бассейн на интегральных теплофизических стендах и последующий анализ результатов экспериментов;
- разработка математических моделей для расчета нестационарной теплогидравлики в отдельных элементах оборудования контура аварийного расхолаживания ВВЭР-640 и их программная реализация;
- экспериментально-расчетные исследования процессов нестационарного теплопереноса в бассейнах в условиях стратифицированного течения теплоносителя;
- верификация расчетных кодов по результатам экспериментов при имитации режимов длительного пассивного расхолаживания ВВЭР-640 через бассейн на интегральных стендах;
- расчетное обоснование безопасности ВВЭР-640 на стадии длительного расхолаживания реактора через бассейн в запроектных авариях с потерей теплоносителя.

Научная новизна. В процессе выполнения работы автором получены следующие научные результаты:

- Экспериментально обнаружена низкочастотная теплогидравлическая неустойчивость контура ЕЦ при охлаждении реактора недогретым до температуры насыщения теплоносителем бассейна.

На основе анализа экспериментальных данных, полученных на интегральных стендах ИСТ(ЕЦ) и РАСТЕЛ, а также в результате расчетных исследований вскрыт механизм теплогидравлической неустойчивости и выявлены факторы, оказывающие стабилизирующее и дестабилизирующее влияние на ЕЦ в контуре расхолаживания.

- Разработана и экспериментально обоснована методика расчета нестационарного теплопереноса в бассейнах в условиях термической стратификации при произвольном расположении источников и стоков теплоносителя.
- На основе обобщения экспериментальных данных предложена зависимость интенсивности вовлечения теплоносителя в факел затопленной плавучей струи.

Практическая ценность.

- Результаты диссертационной работы реализованы в программном комплексе PARNAS, прошедшем аттестацию в ГАН РФ в 1997 г. применительно к АЭС с ВВЭР-640, и в расчетном коде улучшенной оценки КОРСАР, первая базовая версия которого предъявлена к аттестации в ГАН РФ в 2001 г. применительно к АЭС с ВВЭР.
- Выполнен цикл расчетных анализов безопасности АЭС с ВВЭР-640 в части обоснования режимов пассивного отвода остаточного тепла реактора через бассейн.

Результаты расчетных анализов включены в предварительный отчет обоснования безопасности по проекту АЭС нового поколения с ВВЭР-640.

- Впервые показана принципиальная возможность надежного охлаждения а.з. при отводе остаточного тепла ВВЭР-640 через бассейн в запроектных авариях с потерей теплоносителя, когда вследствие дополнительных отказов оборудования не формируется контур аварийного расхолаживания и единственным каналом, связывающим реактор с бассейном, является разрыв трубопровода реакторной установки. С помощью РК КОРСАР определены предельные значения остаточной мощности реактора, при которых сохраняется затопленное состояние а.з. в рассматриваемых запроектных авариях.

Полученные в диссертационной работе методические результаты, а также непосредственно отверифицированный расчетный код КОРСАР могут быть использованы для обоснования безопасности других АЭС с ВВЭР (в частности, АЭС с ВВЭР-1000 с пассивными элементами безопасности).

Достоверность результатов и обоснованность выводов. Достоверность разработанных моделей, методик и зависимостей подтверждена экспериментально и в процессе верификации программных комплексов PARNAS и КОРСАР.

Апробация работы. Результаты диссертации докладывались: на Первой Российской Национальной конференции по теплообмену - Москва, 1994; на международных конференциях: «Теплофизические аспекты безопасности ВВЭР» - Обнинск, 1998, ICONE9 – Ницца, Франция, 2001; на отраслевых конференциях "Проблемы теплообмена при тяжелых авариях и безопасность ВВЭР" – Обнинск, 1993, «Теплогидравлические коды для энергетических реакторов (разработка и верификация)» – Обнинск, 2001; на отраслевых семинарах по динамике ЯЭУ - Сосновый Бор, 1994 и 2000.

Публикации. Всего по теме диссертации опубликовано 10 работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников и двенадцати приложений. Работа представлена на 178 стр., в том числе: основного текста 139 стр., библиографии 5 стр. (55 наименований), 79 рисунков и 8 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

Первая глава диссертации состоит из двух частей. Первая часть представляет собой краткую характеристику основных физических принципов, лежащих в основе систем пассивного отвода остаточного тепла реакторов нового поколения, а вторая посвящена обзору выполненных экспериментально-теоретических исследований теплогидравлических процессов при пассивном отводе остаточного тепла реактора с использованием естественной циркуляции теплоносителя.

Использование пассивных систем безопасности, не требующих вмешательства эксплуатирующего персонала и функционирующих в условиях отсутствия подачи энергии извне, является принципиальным концептуальным моментом повышения уровня безопасности АЭС нового поколения.

Основными физическими принципами, лежащими в основе концепций разрабатываемых и проектируемых в настоящее время систем пассивного отвода тепла (СПОТ), являются следующие:

- гравитационная подача теплоносителя, используемого для непосредственного охлаждения элементов оборудования;
- естественная конвекция теплоносителя;
- фазовые переходы в теплоносителе (кипение или испарение жидкой фазы, пленочная конденсация пара и/или конденсация при прямом контакте фаз);
- энергия сжатого газа.

Продолжительность работы систем, действие которых основано на гравитационной подаче теплоносителя и энергии сжатого газа, зависит непосредственно от предварительно запасенного потенциала (массы или энергии). При использовании естественной конвекции теплоносителя и фазовых переходов в нем продолжительность эффективной работы пассивных систем (при условии организации надежного стока тепла к конечному поглотителю) практически не ограничена.

Естественная конвекция в системах отвода тепла реализуется в двух основных вариантах:

- естественная конвекция со свободной границей в большом объеме теплоносителя (например, на внешней поверхности теплообменника, погруженного в резервуар с водой или находящегося в воздушном пространстве);
- естественная конвекция в контуре, называемая естественной циркуляцией теплоносителя (ЕЦТ).

Реализация варианта со свободной границей требует лишь обеспечения на поверхности теплообмена необходимых граничных условий. Второй же вариант предполагает свое конструкционное воплощение в виде соответствующего кон-

тура естественной циркуляции, проектирование которого требует достаточно тщательной и глубокой проработки принимаемых технических решений.

В первой главе подробно рассмотрены принципиальные конструкции отдельных систем пассивного отвода остаточного тепла таких проектов «пассивных» АЭС, как AP600 (реактор типа PWR концерна Westinghouse Electric, США), ESBWR-1200 (европейская версия SBWR-670 от General Electric, США), SWR-1000 (Siemens), ВВЭР-640 (Россия).

Из представленного обзора следует, что большинство технических решений при создании СПОТ используют в своей основе контура естественной циркуляции теплоносителя, которые можно разделить на два основных типа:

Первый - сток остаточного тепла из контура осуществляется через поверхность теплообменника: СПОТ активной зоны (AP600), аварийный конденсатор (SWR-1000), изолированный конденсатор (ESBWR-1200), СПОТ парогенераторов (ВВЭР-640).

Второй – остаточное тепло отводится непосредственно к включенному в состав контура большому объему теплоносителя со свободным уровнем: СПОТ гермооболочки (ВВЭР-640), контур аварийного расхолаживания через приямок или бассейн (AP600, ВВЭР-640).

Второй тип контура ЕЦТ, как правило, используется для продолжительного расхолаживания при авариях с потерей теплоносителя I-го контура, когда в нижней части контейнента, после завершения гравитационного пролива всех запасов теплоносителя, формируется бассейн и организуется возможность поступления теплоносителя в корпус реактора для обеспечения затопленного состояния активной зоны и естественной циркуляции через нее.

Несмотря на относительно короткий срок с момента начала работ над проектами «пассивных» АЭС, к настоящему времени уже выполнен достаточно большой объем экспериментальных исследований в обоснование конструкторских решений, закладываемых в эти проекты, результаты которых позволили выявить характерные особенности процессов:

- низкие параметры теплоносителя (низкие массовые скорости течения и низкое давление в системе);
- сложность конфигурации циркуляционных трасс и их разветвленность;
- наличие в составе контура элементов, обладающих большой тепловой инерцией, таких как бассейны, определяющие общий темп процессов в системе;
- наличие сжимаемого парогазового объема над уровнем теплоносителя (под крышкой реактора);
- отвод пара из реактора по длинным горизонтальным трубопроводам через гидрозатворы, возникающие в контурах ЕЦ.

Представленный в диссертации обзор выполненных экспериментально-теоретических исследований демонстрирует большой интерес, проявляемый в различных странах к дальнейшему изучению процессов и явлений, возникающих в задачах отвода остаточного тепла реакторов, основанного на пассивных принципах.

На основании имеющихся данных, свидетельствующих о чрезвычайной сложности исследуемых процессов и отражающих многообразие конструктор-

ских решений, реализованных в проектах АЭС нового поколения с пассивными системами безопасности, сделаны следующие общие выводы:

- 1) Естественная циркуляция теплоносителя, в том или ином варианте технической реализации, в настоящее время является наиболее широко используемым принципом пассивного отвода остаточного тепла реактора в проектах АЭС нового поколения.
- 2) Обоснование безопасности пассивного отвода остаточного тепла реактора включает в себя необходимость решения следующих задач:
 - обоснование гарантированного запуска и последующего надежного функционирования пассивной системы;
 - подтверждение надежности охлаждения ТВС активной зоны, т.е. обеспечение поступления охлаждающей жидкости в реактор и эвакуации генерируемой в нем паровой фазы при сохранении затопленного состояния активной зоны;
 - обоснование эффективности теплопередачи при появлении и концентрировании неконденсирующихся газов в области теплообменных поверхностей пассивных систем.
- 3) Теплогидравлические процессы, реализующиеся в пассивных системах отвода остаточного тепла реактора, характеризуются:
 - низкими движущими напорами и, как следствие, малыми скоростями циркуляции теплоносителя;
 - температурной и кинематической неравновесностями двухфазного потока;
 - вероятным возникновением теплогидравлической неустойчивости потока в контурах ЕЦ при разнообразных механизмах возбуждения колебательных режимов.

Все эти процессы до настоящего времени слабо изучены экспериментально, а расчетные коды, предназначенные для прогнозирования теплогидравлических характеристик реальных пассивных систем энергоблоков АЭС нового поколения, до сих пор в рассматриваемой области параметров не верифицированы. Все сказанное в равной степени относится к российскому проекту АЭС с ВВЭР-640, в котором реализованы принципиально новые технические решения по пассивному отводу остаточного тепла реактора к конечному поглотителю.

Во второй главе приведены результаты экспериментальных исследований, выполненных на интегральных теплофизических стендах ИСТ(ЕЦ) и РАСТЕЛ и представлен детальный анализ полученных результатов.

Стенд ИСТ(ЕЦ) был спроектирован и сооружен под научным руководством НИТИ в НПО ЦКТИ в начале 90-х годов. На нем в течение 1993-96 г.г. был выполнен комплекс экспериментальных исследований по моделированию теплогидравлических процессов длительного расхолаживания реактора через бассейн. Интегральный стенд ИСТ(ЕЦ) представляет собой контур естественной циркуляции, структурно состоящий из трех сообщающихся сосудов (моделей реактора, топливного бассейна, аварийного бассейна), соединенных между собой трубопроводами согласно схеме отвода остаточного тепла ВВЭР-640 на заключительной стадии аварий с потерей теплоносителя. Компонировочная схема стенда представлена на рис.1.

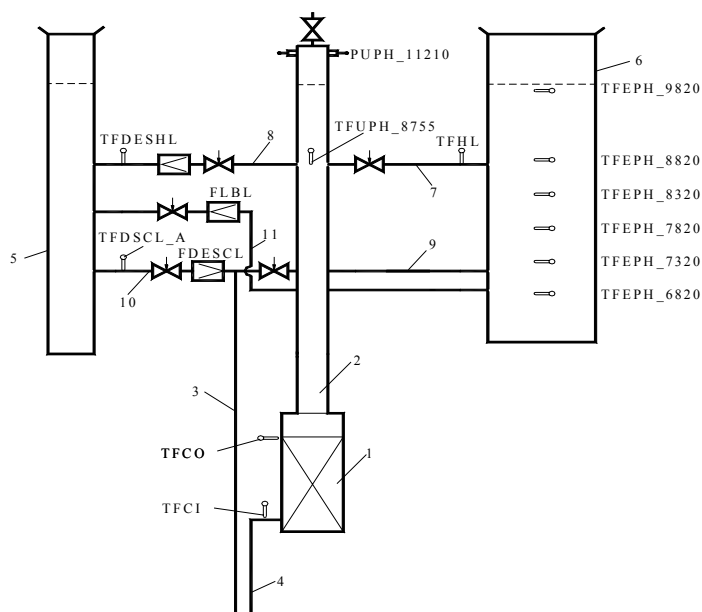


Рис. 1. Компоновочная схема стенда ИСТ (ЕЦ): 1 – сборка имитаторов твэл; 2 – верхняя камера смешения (ВКС); 3 – опускной участок; 4 – входной коллектор; 5 – модель топливного бассейна; 6 – модель аварийного бассейна; 7 – трубопровод горячей нитки ГЦК; 8 – трубопровод горячей нитки системы АБР; 9 – трубопровод холодной нитки ГЦК; 10 – трубопровод холодной нитки системы АБР; 11 – переливной трубопровод системы АБР

цессы. Методически эксперименты на обоих стендах представляли собой разогрев модели контура из изотермического состояния на ЕЦТ.

В экспериментах №1 и №2 (перечень экспериментов представлен в табл. 1) в зависимости от мощности теплоподвода, недогрева теплоносителя до температуры насыщения и гидравлического сопротивления горячих ниток циркуляционного контура было установлено существование трех различных режимов естественной циркуляции:

- «выпарной» режим с блокированием естественной циркуляции теплоносителя в контуре;
- колебательный режим естественной циркуляции с низкочастотными колебаниями основных теплогидравлических параметров контура;
- режим устойчивой естественной циркуляции.

При высоком значении мощности теплоподвода и значительном дросселировании горячих ниток контура (эксперимент № 1, см. табл. 1) реализуется «выпарной» режим отвода тепла, что соответствует предельному состоянию работы контура ЕЦ на спадающей ветви его статической характеристики (расход-мощность), когда с увеличением мощности теплоподвода рост гидравлического сопротивления тракта истечения пара превосходит увеличение движущего на-

В течение 1999-2000 годов в рамках российско-финского сотрудничества в Лаппеенрантском технологическом университете были проведены аналогичные эксперименты на известном интегральном стенде РАСТЕЛ, который был соответствующим образом модернизирован. Модель реактора модернизации не подвергалась. Компоновочная схема модернизированного стенда РАСТЕЛ приведена на рис. 2.

Стенды ИСТ(ЕЦ) и РАСТЕЛ структурно идентичны (у них одинаковые состав и компоновка оборудования), однако они отличаются масштабным фактором и конструкцией отдельных элементов оборудования, которые, как показано в диссертации, оказывают влияние на исследуемые теплогидравлические процессы.

ра. При этом расход теплоносителя в контуре становится практически равным нулю (только компенсируется выпаривание).

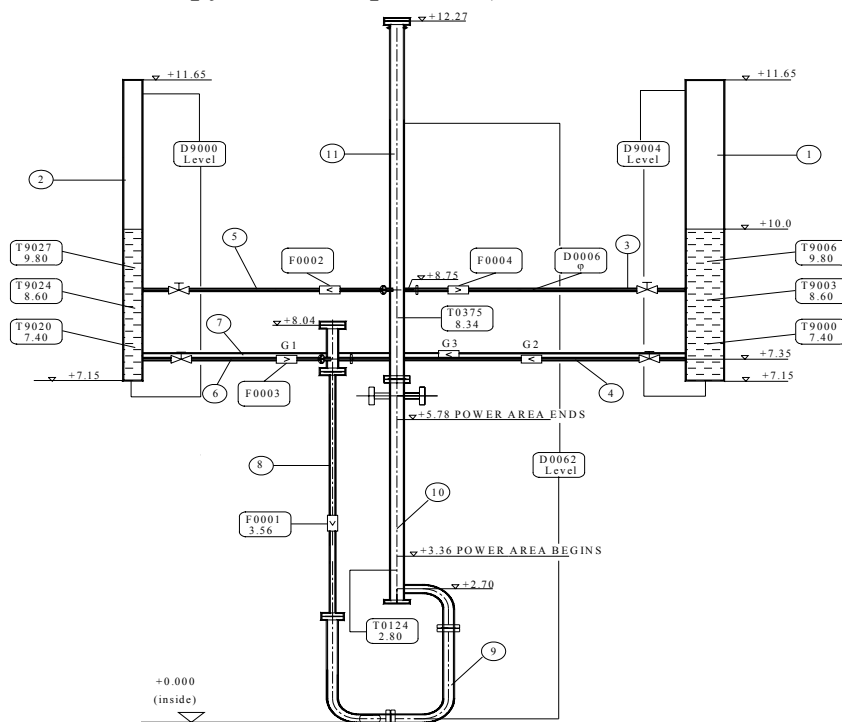


Рис. 2. Компоновочная схема стенда PASTEL:

1 - аварийный бассейн; 2 - топливный бассейн; 3 - горячая нитка с разрывом; 4 - холодная нитка с разрывом; 5 - горячая нитка системы АБР; 6 - холодная нитка системы АБР; 7 - переливная труба; 8 – опускной участок; 9 - нижняя камера смешения; 10 – модель активной зоны; 11 - верхняя камера смешения

При снижении гидравлического сопротивления горячих ниток циркуляционного контура (эксперимент № 2, см. табл. 1) на стенде ИСТ(ЕЦ) была получена другая картина естественно-конвективного отвода остаточного тепла. В этом эксперименте выход теплоносителя из ВКС был организован по двум трубопроводам (как в топливный, так и в аварийный бассейны) в соответствии со схемой длительного расхолаживания реактора в авариях с разрывом трубопровода горячей нитки ГЦК. Изменение контурного расхода представлено на рис. 3 (нижний график).

Таблица 1. Перечень основных экспериментов, проведенных на стенде ИСТ (ЕЦ)

№	Тип эксперимента	$N_{\text{тепл}}$, кВт	Начальная температура, °С	Длительность эксперимента, час
1	Разрыв холодной нитки	35.8	21	2
2	Разрыв горячей нитки	36.3	19	4
3	Разрыв горячей нитки, отказ перелив. трубы	36.7	22	1.5
4	Разрыв горячей нитки, отказ аварийного клапана холодной нитки	37.7	20	1
5	Разрыв горячей нитки, отказ баков САОЗ	36.8	18	2.5

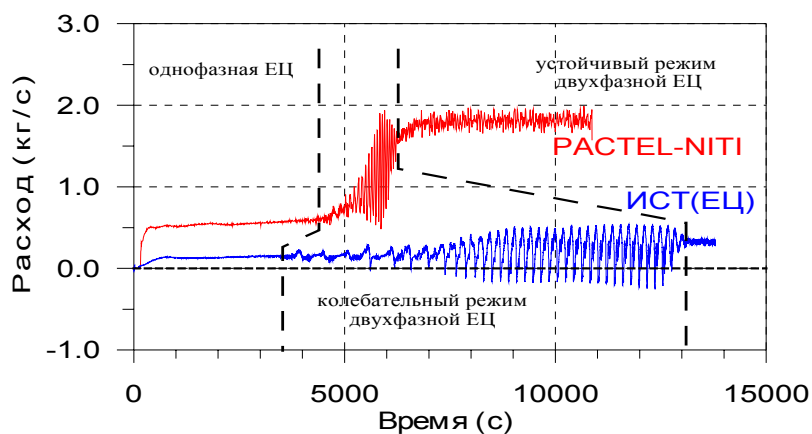


Рис. 3. Массовый расход теплоносителя в контурах ЕЦ в сопоставительных экспериментах на стендах ИСТ(ЕЦ) и РАСТЕЛ

Начальная стадия переходного процесса характеризуется устойчивой ЕЦ однофазного теплоносителя. При возникновении кипения в модели активной зоны режим ЕЦ в этом эксперименте принимает колебательный характер с большой амплитудой изменения всех измеряемых параметров. При этом частота колебаний, которая постепенно возрастает со временем, достаточно низкая (период колебаний \sim от 5,0 до 3,0 мин). После прогрева основного объема аварийного бассейна до значений температуры, близких к температуре насыщения, наблюдается устойчивый режим кипения теплоносителя в имитаторе активной зоны с постоянным отводом пара через выходные горизонтальные трубопроводы и с достаточно высоким расходом теплоносителя в контуре ($\tau > 13000$ с, см. рис. 3).

В данной работе вскрыт механизм теплогидравлической неустойчивости, зафиксированной в контуре на стадии прогрева аварийного бассейна. В силу чрезвычайной сложности и взаимного влияния физических явлений в рассматриваемом механизме условно можно выделить два основных фактора, действующих одновременно.

Первый – недогрев теплоносителя в аварийном бассейне до температуры насыщения. Неоднородное поле температуры теплоносителя и взаимодействие паровой фазы с недогретой жидкостью оказывают дестабилизирующее влияние на теплогидравлические характеристики контура.

Второй – сепарация фаз в ВКС и жесткая взаимосвязь между расходом пара в выходных трубопроводах и положением физического уровня в ВКС, приводящие к изменению интенсивности эвакуации пара из реактора и поступления в него жидкости.

При кипении в имитаторе зоны пар выходит в замкнутый объем под крышкой реактора, накапливается в нем, повышая давление в паровом объеме ВКС. Уровень отдавливается ниже сечения горячих патрубков и открывает выход пару в бассейн. Уменьшение давления в ВКС и соответствующее увеличение расхода относительно холодного теплоносителя через имитатор зоны приводит к смыву в ней кипения. По мере выхода пара давление в ВКС (с учетом инерции контура) понижается настолько, что становится ниже давления в бассейнах. Это приводит к реверсу потока в выходных трубопроводах. Более холодная вода из бассейна начинает заливать ВКС. При этом процесс конденсации в ВКС усиливает эффект снижения давления. С момента наполнения моделей ВКС и активной зоны отно-

сительно холодным теплоносителем начинается стадия их разогрева и цикл повторяется. Все вышеизложенное подтверждают изменения зарегистрированных в эксперименте параметров, фрагмент которых на стадии установившихся в контуре колебаний представлен на рис. 4.

В свете рассмотренного механизма неустойчивости становится понятной причина стабилизации ЕЦ в контуре при температурах теплоносителя в бассейнах, близких к температуре насыщения, так как в этом случае исчезает один из основных факторов неустойчивости – неоднородное поле температур в циркуляционном контуре.

Экспериментальные исследования показали, что рассмотренный выше характер ЕЦ в контуре стенда ИСТ(ЕЦ) сохраняется и при более низких уровнях мощности теплоподвода, включая режимы с имитацией пассивного отвода тепла реактора через бассейн в авариях с разрывом холодной нитки ГЦК. При этом лишь изменяются длительность выявленных стадий процесса разогрева циркуляционного контура, а также период колебаний параметров на стадии теплогидравлической неустойчивости. Принципиальная зависимость характера естественной циркуляции в рассматриваемом контуре от недогрева теплоносителя требует тщательного изучения процесса аккумуляции тепла в бассейнах.

Как показывают кривые изменения температур по высоте аварийного бассейна (рис. 5), зарегистрированные в эксперименте № 2, в объеме теплоносителя существует устойчивая термическая стратификация. Температурный фронт, медленно перемещающийся сверху вниз, предопределяет значение температуры на входе в имитатор активной зоны и, соответственно, длительность существования теплогидравлической неустойчивости в контуре естественной циркуляции, что необходимо учитывать при математическом моделировании процессов пассивного отвода остаточного тепла реактора через бассейн.

В экспериментальных исследованиях на стенде ИСТ(ЕЦ) также продемонстрировано влияние дополнительных отказов оборудования на процесс аварийного расхолаживания реактора в специальной серии экспериментов (эксперименты № 3,4;5) в режимах имитации разрыва трубопровода горячей нитки ГЦК.

Эти эксперименты включали в себя имитацию отказа открытия клапана на переливной трубе (между бассейнами), отказа открытия клапана в трубопроводе блока разгерметизации реактора по холодной нитке и отказа в проливе двух баков САОЗ из четырех имеющихся, т.е. в условиях относительно низкого уровня теплоносителя в бассейнах.

Выполненный анализ экспериментальных данных показал, что в запроектных авариях дополнительные отказы одного или нескольких клапанов в системе пассивного расхолаживания реактора через бассейн могут привести в некоторых ситуациях к тяжелым последствиям, когда происходит постепенное осушение активной зоны, в то время как аварийный бассейн наполнен теплоносителем.

На установке РАСТЕЛ была реализована менее обширная, чем на стенде ИСТ(ЕЦ), программа экспериментальных исследований. Однако, важно отметить, что на стенде РАСТЕЛ был выполнен эксперимент, сопоставительный с экспериментальным режимом стенда ИСТ(ЕЦ), в котором в условиях недогрева теплоносителя была также получена обобщенная неустойчивость ЕЦ (рис.3, верхняя кривая).

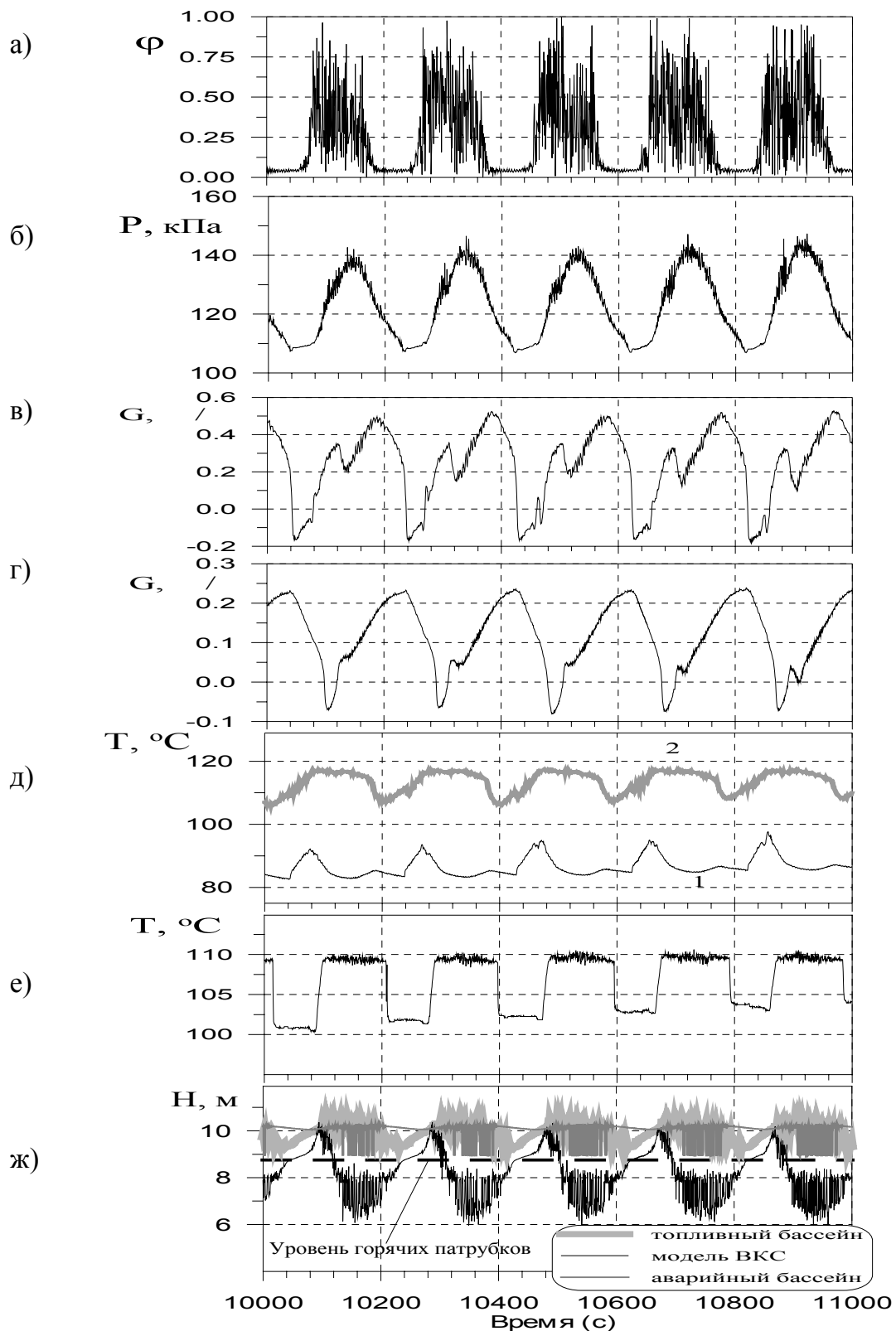


Рис. 4. Изменение параметров в эксперименте № 2 на стенде ИСТ(ЕЦ):
 а) – паросодержание на выходе модели а.з.; б) – давление в модели ВКС (PUPH_11210);
 в) – расход теплоносителя через модель а.з. (FDECL); г) – расход теплоносителя в переливном трубопроводе (FLBL); д) – температура теплоносителя на входе (1) (TFCI) и выходе (2) (TFCO) модели а.з.; е) – температура теплоносителя в аварийном трубопроводе горячей нитки (TFHL); ж) – весовые уровни в моделях ВКС, топливного и аварийного бассейнов

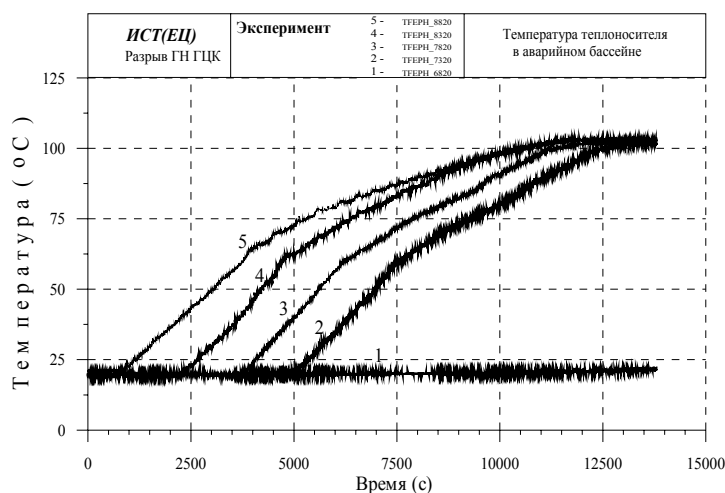


Рис. 5. Изменение во времени температур по высоте модели аварийного бассейна стенда ИСТ(ЕЦ)

Различия в характере теплогидравлических процессов установок РАСТЕЛ и ИСТ(ЕЦ) являются следствием отличий в конструкции их элементов оборудования. Доминирующее влияние на динамику рассматриваемого контура ЕЦ, как показали численные эксперименты, оказывает гидравлическое сопротивление выходных трубопроводов. Чем больше суммарный коэффициент гидравлического сопротивления выходных трубопроводов, тем выше амплитуда колебаний параметров в области теплогидравлической неустойчивости рассматриваемого контура естественной циркуляции. Поскольку на стенде ИСТ(ЕЦ) этот коэффициент гидравлического сопротивления более чем на порядок выше, чем на стенде РАСТЕЛ, то прежде всего именно это обстоятельство является причиной того, что на стенде ИСТ(ЕЦ) наблюдался реверс потока на отдельных участках контура на стадии теплогидравлической неустойчивости. В свою очередь, при реверсе потока теплоносителя в выходных трубопроводах и в ВКС становятся возможными конденсационные явления, которые приводят к существенному изменению динамики поля давления и характера теплогидравлической неустойчивости в контуре этого стенда.

На стенде ИСТ(ЕЦ) существуют еще два взаимосвязанных и обусловленных особенностями конструкции фактора, которые оказывают дестабилизирующее влияние на естественную циркуляцию теплоносителя.

Во-первых, реализованное на стенде ИСТ(ЕЦ) соотношение длин обогреваемого (имитатор активной зоны) и необогреваемого (ВКС) участков обеспечивает большую амплитуду изменения движущего напора ЕЦ, чем на стенде РАСТЕЛ при прочих равных условиях.

Во-вторых, верхняя камера смешения стенда ИСТ(ЕЦ), имеющая значительную высоту, является аккумулятором энергии, которая высвобождается на отдельных отрезках времени колебательного процесса в виде сгенерированного пара, усиливая таким образом динамику давления и уровня теплоносителя в модели реактора.

В отличие от модели а.з. стенда ИСТ(ЕЦ), представленной одной сборкой, модель а.з. стенда РАСТЕЛ состоит из трех параллельных секций с независимым обогревом. Это отличие конструкции позволило изучить влияние пространственных процессов в активной зоне на характер естественной циркуляции в контуре аварийного расхолаживания. На стенде РАСТЕЛ были выполнены два эксперимента, отличающиеся лишь радиальным профилем тепловыделения в имитаторе активной зоны. В первом - суммарная мощность была равномерно распределена между тремя секциями ТВС, а во втором - обогрев одной из секций

был отключен с сохранением суммарной мощности на двух других. Как видно из рис. 6, на котором представлены экспериментальные кривые изменения расхода теплоносителя в контуре для двух вариантов теплоподвода, неравномерность

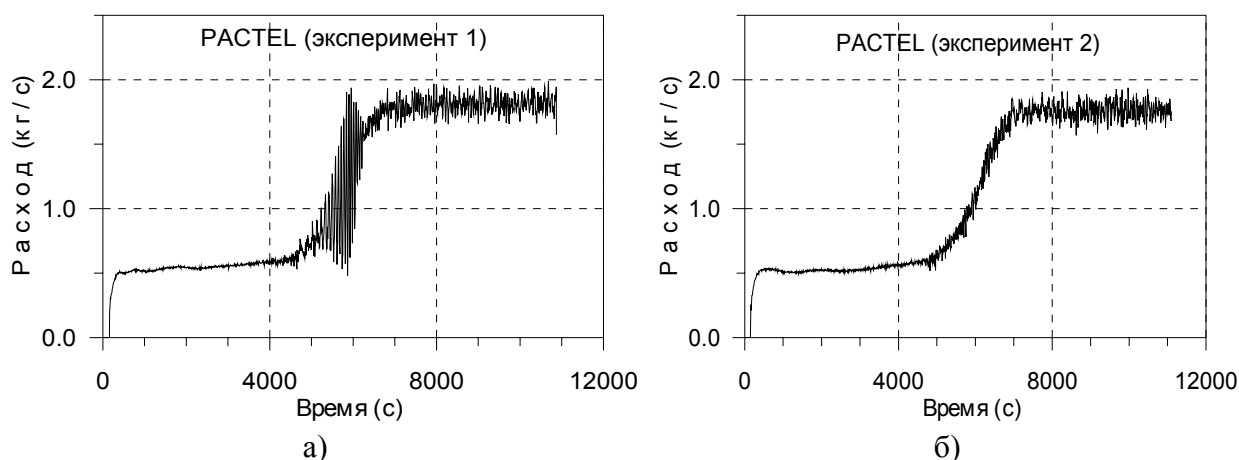


Рис. 6. Изменение общеконтурного расхода теплоносителя на стенде РАСТЕЛ в экспериментах с равномерным (а) и неравномерным (б) энерговыделением в модели а.з.

обогрева является фактором, стабилизирующим ЕЦ в рассматриваемом контуре пассивного отвода остаточного тепла реактора. Рециркуляция теплоносителя, возникающая в имитаторе активной зоны при наличии необогреваемой секции ТВС, приводит к снижению колебаний входной температуры, движущего напора и, соответственно, к стабилизации естественной циркуляции на стадии отвода тепла недогретым до температуры насыщения теплоносителем.

В третьей главе подробно изложены разработанные автором методики математического моделирования процессов нестационарной теплогидравлики в отдельных элементах контура аварийного расхолаживания:

- нестационарный теплоперенос в объеме аварийного бассейна;
- динамика теплогидравлических процессов в верхней камере смешения.

На их основе созданы программные модули, реализованные в составе комплексных расчетных кодов PARNAS и КОРСАР.

Разработанная автором диссертации одномерная методика нестационарного теплопереноса в большом объеме жидкости с произвольным расположением источников и стоков теплоносителя основана на анализе результатов экспериментальных исследований на модельных стендах. Основные экспериментальные факты, подтверждающие правомерность одномерного описания, заключаются в следующем:

- во всем исследованном диапазоне чисел Фруда для затопленной плавучей струи ($Fr = 0,05 \div 10$) и при различном взаимном расположении источника и стока теплоноситель в основном объеме бассейна устойчиво стратифицирован;
- гидродинамические и тепловые возмущения, вносимые вводом и выводом теплоносителя, локализованы областью факела струи, в которой преобладает механизм турбулентного переноса;

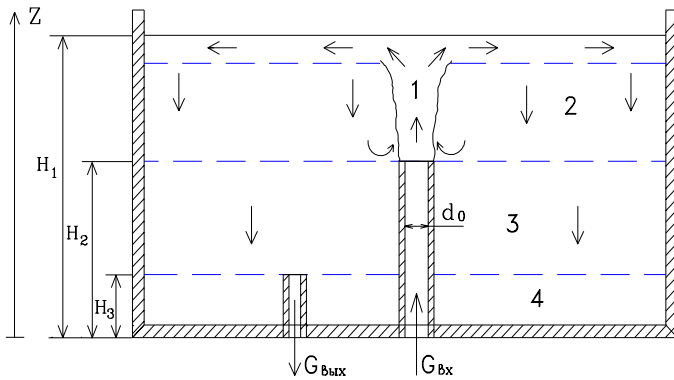


Рис. 7. Схема теплопереноса в объеме бассейна

Изменение расхода жидкости по высоте струи описывается следующей зависимостью:

$$G_{ж}(z) = G_{ж}|_{z=0} + \sigma z, \quad (1)$$

где σ - расход (интенсивность) вовлечения на единицу длины, кг/(с·м), а координата $z = 0$ - сечение ввода теплоносителя.

В соответствии с выявленным экспериментально механизмом теплопереноса методика одномерного расчета бассейна включает в себя описание 4-х характерных зон (рис.7).

1) Зона затопленной неизолированной струи (область 1):

уравнение неразрывности:

$$\frac{dG_1}{dz} = \sigma; \quad (2)$$

уравнение энергии:

$$\frac{\partial i_1}{\partial \tau} + W_1(z) \frac{\partial i_1}{\partial z} = \frac{\sigma \cdot i_2}{\rho_1 F_1(z)}, \quad (3)$$

где i_1 , $W_1(z)$, ρ_1 - энтальпия, скорость движения и плотность жидкости, соответственно; $F_1(z)$ - площадь поперечного сечения струи; i_2 - энтальпия окружающей струю теплоносителя (область 2); τ - время.

2) Зоны основного объема бассейна (области 2...4). Для расчета теплопереноса в этих зонах используется следующее уравнение энергии:

$$\frac{\partial t_i}{\partial \tau} + W_i(z) \frac{\partial t_i}{\partial z} = \left(\frac{\lambda}{c\rho} \right)_i \frac{\partial^2 t_i}{\partial z^2}, \quad i = 2 \div 4, \quad (4)$$

а уравнение неразрывности может быть записано в виде:

- в областях бассейна, расположенных выше сечения ввода струи, скорость вертикального перемещения температурного фронта (вне струи) выше скорости циркуляции.

Последнее обстоятельство обусловлено возникновением вторичных течений из-за вовлечения более холодного теплоносителя из бассейна в факел вынужденной плавучей струи. Приращение расхода жидкости по высоте струи описывается следующей зависимостью:

$$W_i(z) = \begin{cases} -G_1(z) + \rho_2 F_B(z) \frac{dH_1}{dt} \\ \rho_2 [F_B(z) - F_1(z)] \end{cases}, \text{ при } H_2 < z < H_1 \text{ (зона 2);} \\ -\frac{G_{\text{ВЫХ}}}{\rho_3 F_3(z)} \end{cases}, \text{ при } H_3 < z < H_2 \text{ (зона 3);} \\ 0 \end{cases}, \text{ при } 0 < z < H_3 \text{ (зона 4).} \quad (5)$$

где c, λ - удельная теплоемкость и коэффициент теплопроводности жидкости, соответственно; $F_B(z)$ - площадь проходного сечения бассейна.

Граничные и начальные условия:

Непрерывность значений температуры на границе зон теплопереноса:

$$\frac{\partial t_i}{\partial z} \Big|_{z=H_i+0} = \frac{\partial t_{i+1}}{\partial z} \Big|_{z=H_i-0} \quad ; \quad t_i \Big|_{z=H_i+0} = t_{i+1} \Big|_{z=H_i-0}, i = 2 \div 3. \quad (6)$$

$$\text{На дне бассейна: } \frac{\partial t_4}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0.$$

При программной реализации модели предусмотрена возможность описания процессов при произвольном взаимном положении источников и стоков. Вертикальные размеры каждой из зон при этом могут варьироваться в широких пределах: от охвата всего бассейна до полного их вырождения. Численное решение полученной системы уравнений (за исключением уравнений энергии (4) для областей 2...4) осуществляется методом Рунге-Кутты 4-го порядка с автоматическим выбором шага интегрирования по времени.

При пространственной дискретизации объема теплоносителя по высоте бассейна использован метод контрольных объемов с аппроксимацией конвективных членов по схеме против потока. Конечно-разностная аппроксимация уравнения энергии для областей 2...4 выполнена по полностью неявной схеме. Численное решение полученной системы уравнений осуществляется методом прогонки.

Для замыкания системы уравнений необходимы данные по интенсивности вовлечения теплоносителя в факел затопленной струи - σ ($[\sigma] = \text{кг/с}\cdot\text{м}$). Учитывая, что в литературе отсутствуют надежные рекомендации по расчету интенсивности вовлечения теплоносителя в факел затопленной плавучей струи, втекающей в объем устойчиво стратифицированной жидкости при рассматриваемых особенностях течения, для ее определения были выполнены специальные эксперименты на локальном теплофизическом стенде «Бассейн», сооруженном в НИТИ (рис.8).

Для обобщения полученных экспериментальных данных по интенсивности вовлечения теплоносителя был предложен следующий безразмерный комплекс:

$$K_\sigma = \frac{\sigma d_0}{G_0}, \quad (7)$$

где d_0 — диаметр трубы ввода, м; G_0 — расход в сечении ввода, кг/с.

Полученные методом решения обратной задачи экспериментальные данные аппроксимированы зависимостью, представленной на рис. 9:

$$K_{\sigma} = 0,75 \cdot Fr^{-0,25}, \text{ где } Fr = \frac{W_0^2}{gd_0 \left(1 - \frac{\rho_B}{\rho_0}\right)}. \quad (8)$$

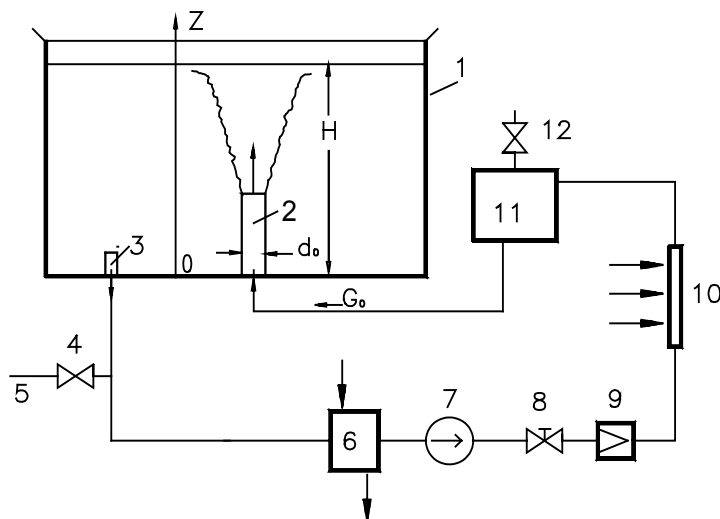


Рис. 8. Технологическая схема теплофизического стенда «Бассейн»:

- 1 - модель аварийного бассейна; 2 - труба для ввода воды; 3 - выходная труба; 4, 8, 12 - вентили;
- 5 - магистраль заполнения и слива; 6 - теплообменник; 7 - насос; 9 - расходомер; 10 - участок теплоподвода; 11 - буферная емкость

Для обоснования приближенной методики расчета стратифицированного течения теплоносителя в бассейне и верификации построенного на ее основе расчетного блока на стенде «Бассейн» была проведена специальная серия тестовых экспериментов. Представленное в диссертации сопоставление экспериментальных (специальная серия тестовых экспериментов) и расчетных кривых изменения температур по высоте бассейна, демонстрирует их хорошее совпадение.

Математическая модель верхней смесительной камеры в рассматриваемом типе задач представлена двумя расчетными областями (рис.11). Нижняя область I, заполненная жидкостью с барботирующим через нее паром, имеет свободный уровень, высотное положение которого изменяется во времени. Верхняя область II занята паром. К сосуду, в общем случае, может быть подключено несколько каналов в различных точках по его высоте, в том числе и ко дну сосуда снизу (поток входящий в ВКС из а.з. реактора).

Методика расчета параметров в смесительной камере базируется на известных моделях компенсаторов объема с учетом следующих основных допущений:

- 1) Теплогидравлические процессы в областях I и II моделируются в сосредоточенных параметрах.

На рис.10, в качестве иллюстрации, приведено сравнение с экспериментом изменения температур в бассейне для двух вариантов расчета, в одном из которых используется предложенная автором эмпирическая зависимость для интенсивности вовлечения (8), а во втором - эффектом вовлечения пренебрегается. Как видно из представленных результатов, неучет эффекта вовлечения существенно замедляет (по сравнению с экспериментом) скорость опускного движения температурного фронта в основном объеме бассейна.

Для обоснования приближенной методики расчета стратифицированного течения теплоносителя в бассейне и верификации построенного на ее основе расчетного блока на стенде «Бассейн» была проведена специальная серия тестовых экспериментов.

2) Предполагается отсутствие захвата пара жидкостью в горизонтальный трубопровод, когда уровень теплоносителя выше верхней образующей горячих патрубков.

Верификация методики расчета динамических процессов в ВКС, программно реализованной в составе расчетных кодов PARNAS и КОРСАР, выполнена на основе сопоставления с экспериментальными данными, полученными на интегральных стендах ИСТ(ЕЦ) и РАСТЕЛ.

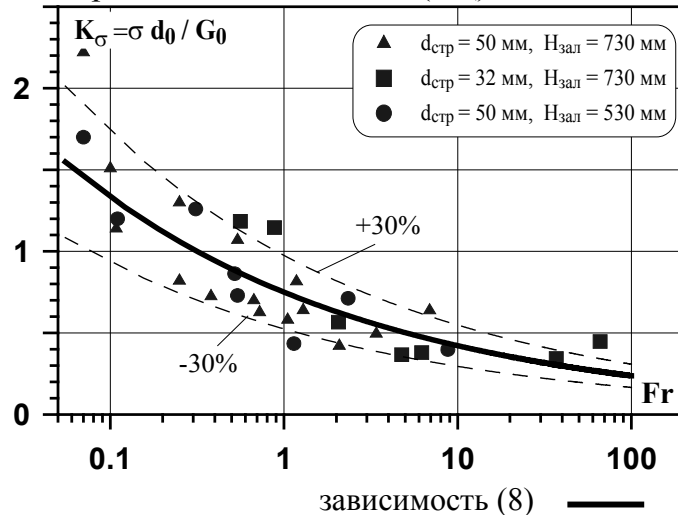


Рис. 9. Зависимость критерия вовлечения от числа Фруда

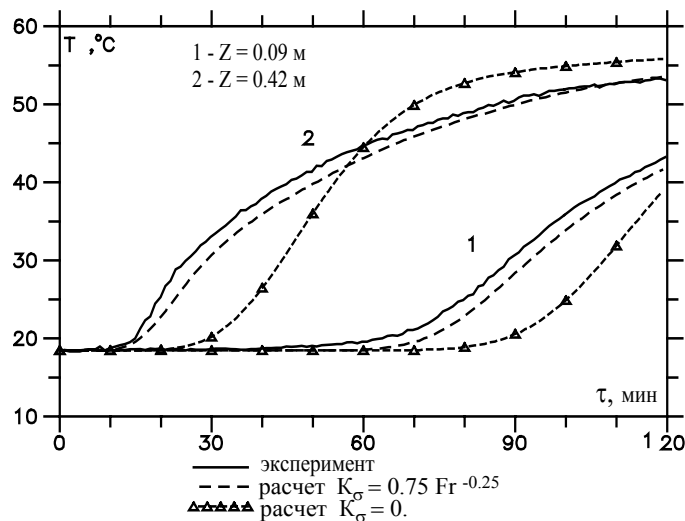


Рис. 10. Иллюстрация влияния эффекта вовлечения на процесс теплопередачи в объеме бассейна

В качестве тестовой рассмотрена также задача выпаривания воды из емкости при размещении в ней нагревателя конечной длины, расположенного вертикально. Получено хорошее совпадение расчетных параметров с точным аналитическим решением.

Программные модули, разработанные автором на основе предложенных выше методик расчета, включены в состав двух программных комплексов: PARNAS и КОРСАР.

В четвертой главе представлены основные результаты верификации РК КОРСАР в области моделирования длительного пассивного отвода остаточного тепла реактора.

В настоящее время можно считать общепризнанным, что реальным инструментом для прогнозирования характеристик аварийных режимов являются компьютерные расчетные коды и, в первую очередь, так называемые коды улучшенной оценки («best estimate»), а экспериментальные исследования на

модельных установках предназначены для их верификации.

Как показано в первой главе, особенностью теплогидравлических процессов, реализующихся в пассивных системах безопасности АЭС, является склонность к неустойчивости структуры двухфазного потока. Поэтому убедительным доказательством способности РК КОРСАР адекватно воспроизводить физические процессы и явления при низких параметрах теплоносителя является его способность моделировать сложные колебательные процессы общеконтурной

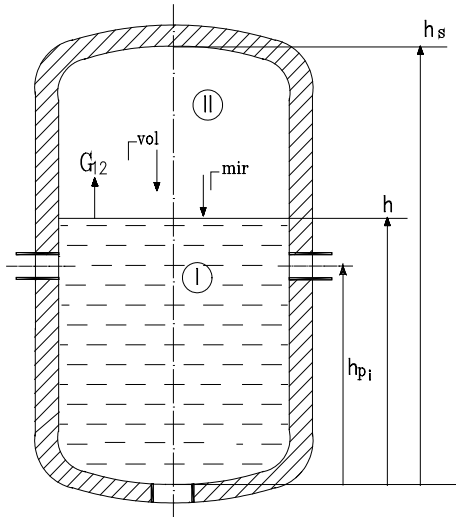


Рис. 11. Расчетная схема паро-водяного сосуда

неустойчивости ЕЦТ, при которой целый ряд отдельных локальных процессов и явлений выражен через интегральные параметры, такие как расход теплоносителя в контуре и распределение температур по тракту циркуляционного контура, регистрируемые в экспериментах достаточно надежно и достоверно.

В рамках данной диссертационной работы, для сопоставления выбраны наиболее важные с точки зрения воспроизведения теплогидравлических процессов при длительном пассивном отводе остаточного тепла реактора эксперименты, выполненные на стендах ИСТ(ЕЦ) и РАСТЕЛ.

Расчетные нодализационные схемы контуров ЕЦ обоих стендов составлены из типовых элементов расчетного кода КОРСАР, в котором реализована двухжидкостная модель нестационарной контурной теплогидравлики. Элементы оборудования, процессы теплопереноса в которых существенно отличаются от внутриконтурных – верхняя смешивательная камера и бассейны – в расчетной модели представлены специализированными программными модулями, разработанными автором диссертации.

Как свидетельствуют результаты верификации, РК КОРСАР достаточно адекватно описывает характерные для экспериментальных режимов с неустойчивостью ЕЦ (например, в эксперименте № 2 на стенде ИСТ(ЕЦ)) явления. При этом в расчете, также как и в эксперименте, воспроизведены все характерные стадии в развитии естественной циркуляции теплоносителя в контуре.

На рис. 12, в качестве примера, представлено сопоставление экспериментально измеренного изменения во времени расхода в контуре с результатами расчета, свидетельствующее о качественном и даже количественном согласовании с экспериментом.

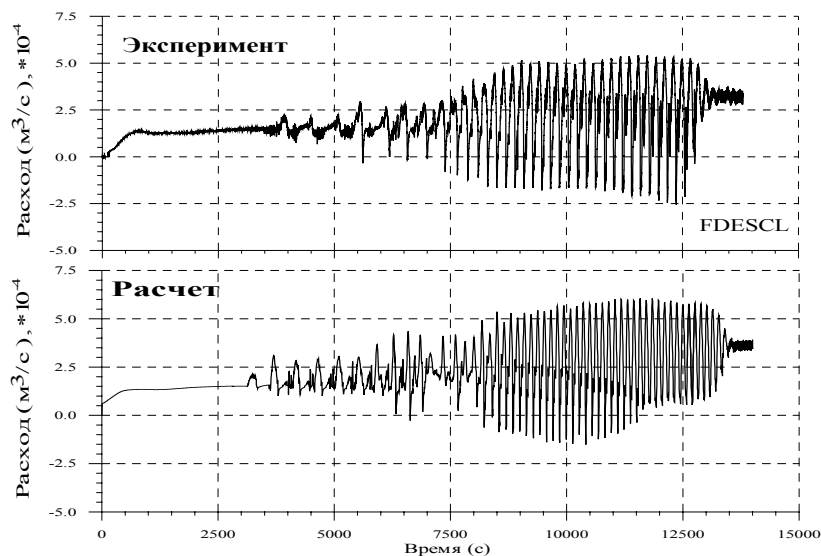


Рис. 12. Расход теплоносителя на входе в модель активной зоны (эксперимент № 2 на стенде ИСТ(ЕЦ))

В посттестовом расчете экспериментальных режимов на модернизированном стенде PACTEL также воспроизводятся все характерные стадии процесса. Достаточно адекватно воспроизведено изменение расхода теплоносителя при разогреве контура на естественной циркуляции (рис. 13а) и предсказано время начала кипения теплоносителя в модели активной зоны.

Следует также отметить, что распределение температур по высоте бассейна и по длине циркуляционного контура в течение всего процесса расчетным кодом прогнозируется достаточно точно.

Особенно следует отметить тот факт, что в расчете по коду КОРСАР, в полном соответствии с экспериментом, воспроизведено демпфирующее воздействие рециркуляции теплоносителя в модели активной зоны на развитие общеконтурной неустойчивости (рис.13б).

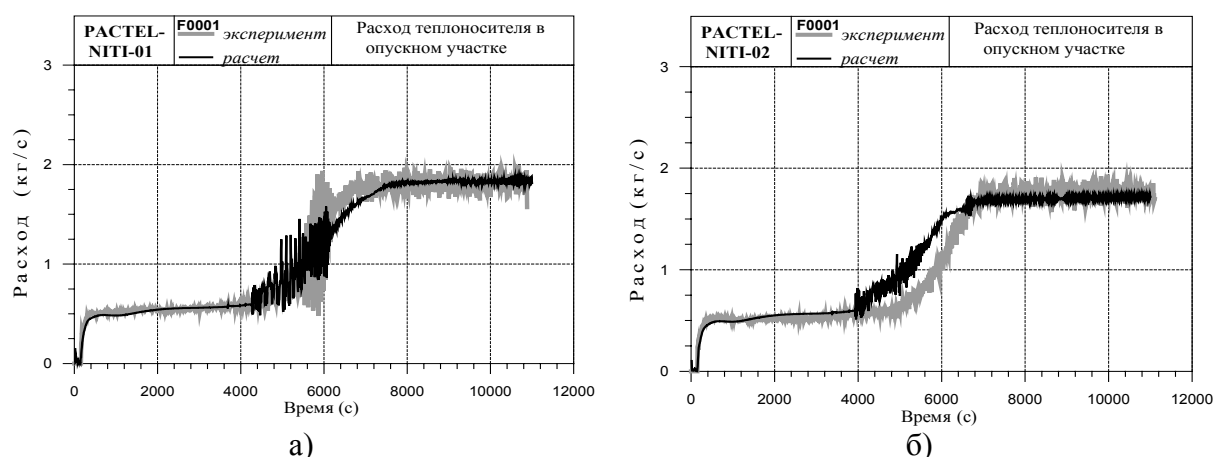


Рис. 13. Сопоставление расчета и эксперимента для экспериментальных режимов с равномерным (а) и неравномерным (б) энерговыделением в модели а.з. стенда PACTEL

Адекватное воспроизведение кодом КОРСАР теплогидравлики контура ЕЦ зафиксировано также в «выпарных» экспериментальных режимах, характеризующихся блокированием общеконтурной циркуляции вследствие значительного дросселирования потока в выходной части контура (рис.14а). Основное отличие расчета и эксперимента в рассматриваемых режимах состоит в том, что в расчете получены более регулярные колебания контролируемых параметров, чем это наблюдалось в эксперименте, где изменения параметров имели преимущественно стохастический характер. Следует отметить, что в рассматриваемых режимах основной объем аварийного бассейна практически не прогревается (что хорошо воспроизведено в расчете, рис. 14б), и бассейн в данном случае не выполняет своей основной роли по аккумулярованию тепла при расхолаживании реактора.

Таким образом, на основе экспериментов, проведенных на интегральных стендах ИСТ(ЕЦ) и PACTEL, выполнена верификация расчетного кода нового поколения КОРСАР. При этом показано адекватное воспроизведение кодом КОРСАР доминирующих в рассматриваемых экспериментальных режимах следующих физических явлений:

- термическая и механическая неравновесности двухфазного потока в контуре естественной циркуляции;

- сепарация фаз теплоносителя в модели реактора и ее влияние на процесс эвакуации паровой фазы;
- теплогидравлическое взаимодействие параллельных каналов в модели а.з. и его влияние на общеконтурную циркуляцию теплоносителя;
- реверс потока и возникновение противоточного течения воды и пара в горизонтальных трубопроводах;
- стратификационные явления в бассейнах аварийного расхолаживания.

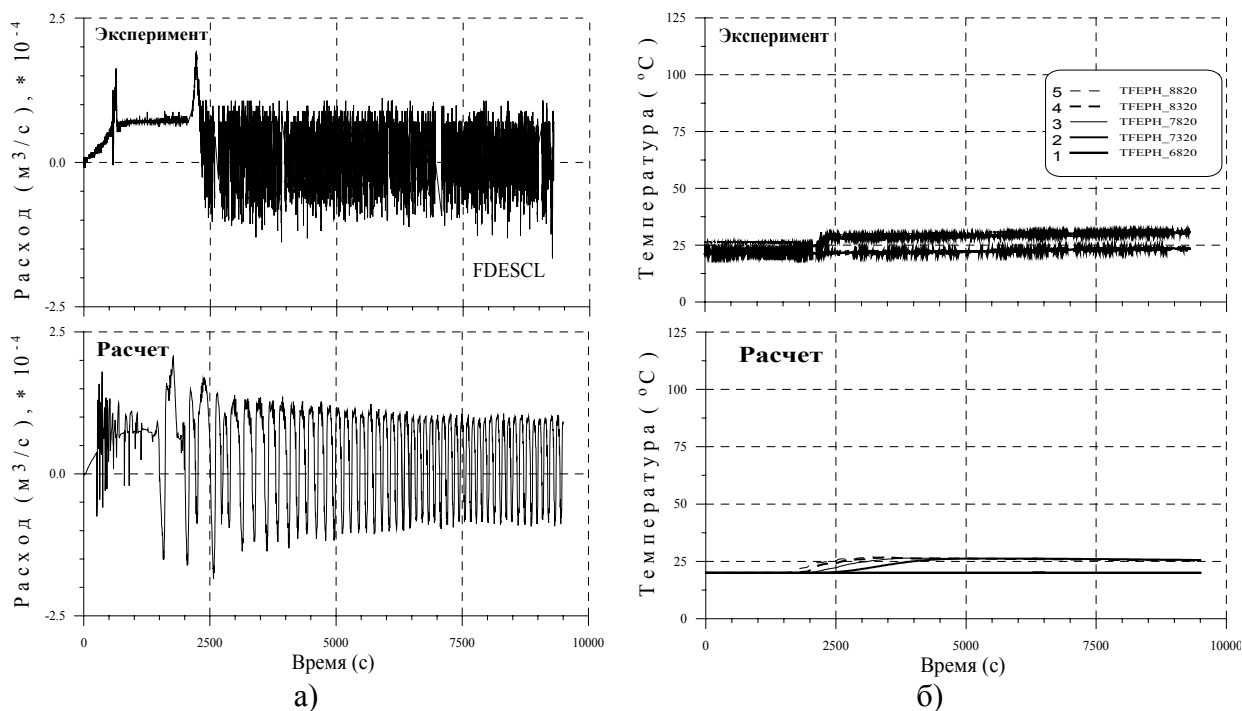


Рис. 14. Сопоставление расчетных и экспериментальных значений расхода теплоносителя на входе в модель активной зоны (а) и распределения температур по высоте аварийного бассейна (б) в «выпарном» режиме (эксперимент № 1 на стенде ИСТ(ЕЦ))

В пятой, заключительной главе диссертации, представлены результаты расчетных исследований по обоснованию безопасных условий в развитии запроектных аварий на стадии длительного расхолаживания реактора через бассейн применительно к РУ ВВЭР-640 с использованием РК КОРСАР.

В запроектных авариях при дополнительных отказах оборудования (например, при отсутствии стока тепла через ПГ и отказе клапанов арматурного блока разгерметизации) возможна ситуация, когда предусмотренный контур естественной циркуляции не формируется и единственным каналом выхода энергии из реактора и поступления в него теплоносителя из бассейна является разрыв аварийного трубопровода. В этой запроектной аварии при выпаривании воды из реактора может наступить плавление активной зоны. Поэтому чрезвычайно важно определить те предельные уровни мощности, ниже которых сохраняется затопленное состояние а.з. и обеспечивается ее надежное охлаждение.

В диссертации представлена аналитическая оценка предельного значения отводимой мощности на основе критерия Кутателадзе, характеризующего устойчивость двухфазной структуры, и известного соотношения Уоллиса. При этом показано, что для оценки предельных значений расходов противоточного движения фаз в горизонтальных трубах большого диаметра можно воспользо-

ваться следующим известным соотношением:

$$K_{\text{п}}^{0.5} + K_{\text{ж}}^{0.5} = K_{\text{кр}}^{0.5}, \quad (9)$$

где $K_{\text{п}}$, $K_{\text{ж}}$ – критерий Кутателадзе для паровой и жидкой фазы, соответственно, выраженные через мощность остаточного тепловыделения $Q_{\text{а.з.}}$:

$$K_{\text{п}} = \frac{4\Psi Q_{\text{а.з.}}}{\pi d^2 r \sqrt{g \rho_{\text{п}} (\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{п}})} \Lambda}; \quad K_{\text{ж}} = \sqrt{\frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{ж}}}} \frac{4\Psi Q_{\text{а.з.}}}{\pi d^2 r \sqrt{g \rho_{\text{п}} (\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{п}})} \Lambda};$$

Ψ - доля пара, выходящего через аварийный трубопровод; g - ускорение свободного падения, м/с²; $\rho_{\text{ж}}$, $\rho_{\text{п}}$ - плотность жидкой и паровой фаз, соответственно, кг/м³; $\Lambda = \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{п}})}}$ - постоянная капиллярно-гравитационного взаимодействия; σ - коэффициент поверхностного натяжения жидкости; Н/м; r – удельная теплота парообразования, Дж/кг;

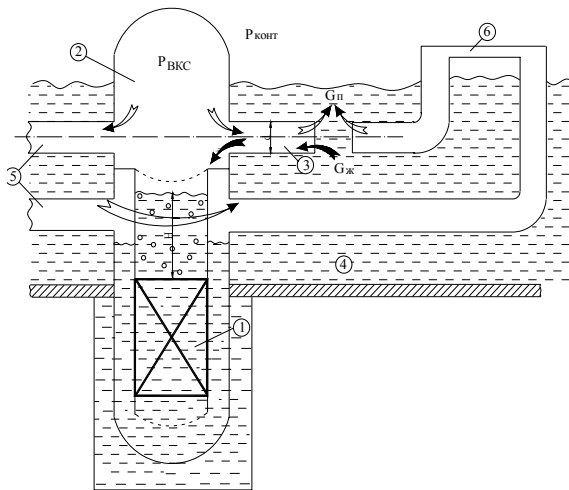
$$K_{\text{кр}} = N_{\mu}^{-0.2} = Ar_*^{0.1}, \quad \text{где } Ar_* = \frac{\rho_{\text{п}} \sigma^{3/2}}{\mu_{\text{ж}}^2 \sqrt{g(\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{п}})}} - \text{модифицированный критерий}$$

Архимеда.

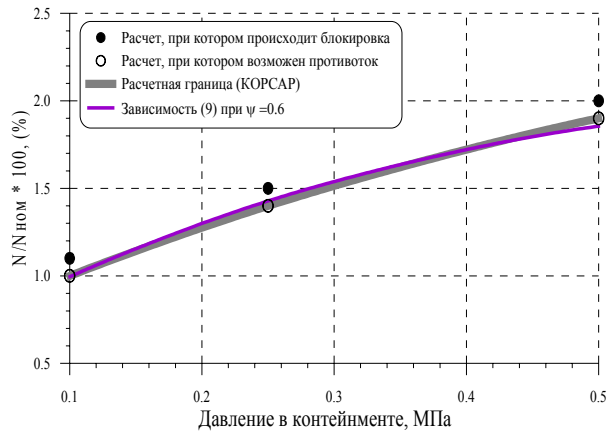
Согласно соотношению (9) в самом консервативном случае, когда весь пар ($\Psi=1$) выходит через аварийный трубопровод горячей нитки, предельное значение отводимой мощности, при котором сохраняется затопленное состояние а.з., составляет примерно 0.6% от номинальной мощности ВВЭР-640 при атмосферном давлении, и увеличивается почти в два раза при предельном проектном давлении в контейнменте (0.5 МПа).

Расчеты процессов отвода остаточного тепла реактора с использованием кода КОРСАР осуществлялись в консервативной постановке, т.е. не учитывался сток тепла через паргенераторы. При этом давление в контейнменте рассматривалось как параметр решаемой задачи и задавалось как граничное условие. Рассмотрен «гильотинный» двухсторонний разрыв трубопровода ($D_v = 620$ мм) как горячей, так и холодной ниток ГЦК. Отвод остаточного тепла моделировался с учетом всех 4-х петель, тем самым проиллюстрирована роль работоспособных петель в процессе расхолаживания а.з.

При разрыве горячей нитки пар, генерируемый в а.з., может эвакуироваться из реактора двумя путями (рис. 15а). Первый - по горизонтальному трубопроводу аварийной горячей нитки (3) через сечение разрыва под уровень теплоносителя в аварийный бассейн, а жидкость при этом в режиме противотока - из аварийного бассейна в реактор. Второй путь – через работоспособные петли (5), холодный трубопровод и парогенератор аварийной петли (6), выходя в бассейн через сечение разрыва со стороны ПГ. Жидкость данным путем не может поступать в реактор, поскольку ПГ расположен более чем на 3 метра выше сечения разрыва и выше уровня теплоносителя в аварийном бассейне. Поэтому данный путь только увеличивает возможность эвакуации пара. Таким образом, горизонтальный участок аварийного трубопровода, от ВКС до сечения разрыва, является единственным путем для поступления воды в корпус реактора. При этом может установиться равновесие, когда масса уходящего пара будет компенсироваться поступающей в реактор жидкостью. Хотя данный процесс носит неустойчивый,



а)

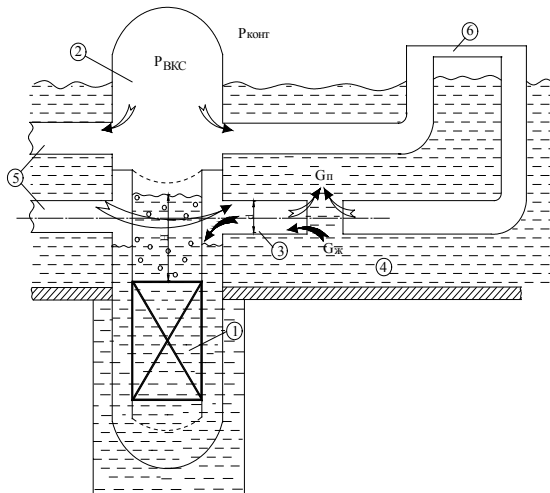


б)

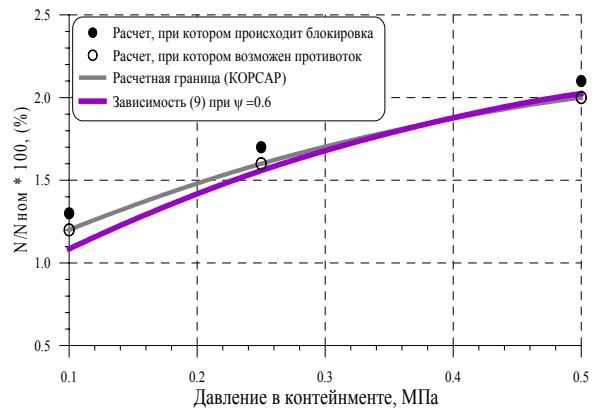
Рис. 15. Схема охлаждения реактора ВВЭР-640 при двухстороннем разрыве трубопровода горячей нитки ГЦК и отказе всех клапанов АБР (а) и зависимость предельной отводимой мощности реактора от давления в контейнменте (б) для данной аварии:

1 – активная зона; 2 – верхняя камера смешения (ВКС); 3 – аварийный трубопровод; 4 – бассейн; 5 – работоспособные петли; 6 – трубчатка парогенератора

колебательный характер, состояние затопленной а.з., как показали результаты расчетов, может в этом случае сохраняться сколь угодно долго. Однако, при определенном соотношении параметров в горизонтальном трубопроводе может возникнуть явление захлебывания, когда поступление жидкости в трубопровод из бассейна становится невозможным. В этом случае уровень теплоносителя в ВКС, вследствие его выпаривания, начинает снижаться и со временем может достигнуть верхнего среза активной зоны.



а)



б)

Рис. 16. Схема охлаждения реактора ВВЭР-640 при двухстороннем разрыве трубопровода холодной нитки ГЦК и отказе всех клапанов АБР (а) и зависимость предельной отводимой мощности реактора от давления в контейнменте (б) для данной аварии

На рис. 15б представлены конечные результаты серии расчетных исследований по определению предельной отводимой мощности реактора в зависимости

от величины давления в контейменте. На этом же графике представлена аналитическая оценка предельного значения мощности для данного диапазона давления, рассчитанная по уравнению (9) при $\psi = 0,6$.

При разрыве холодной нитки ГЦК гидравлическая схема охлаждения активной зоны реактора изменяется (рис. 16а). Как видно из рисунка, блокировать поступление жидкости в корпус реактора может только пар, выходящий через работоспособные петли.

На рис. 16б представлены конечные результаты серии расчетных исследований по определению предельной отводимой мощности реактора в зависимости от величины давления в контейменте. На этом же графике представлена аналитическая оценка предельного значения мощности для данного диапазона давления.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

В представленной диссертации обобщены результаты работ, выполненных автором в течение последних 11 лет в процессе обоснования безопасности АЭС нового поколения с пассивными системами отвода остаточного тепла реактора. Основными из полученных результатов являются:

- 1) Экспериментальными исследованиями на установках ИСТ(ЕЦ) и РАСТЕЛ установлены следующие характерные режимы естественной циркуляции в контуре аварийного расхолаживания реактора через бассейн:
 - «выпарной» режим с блокированием общеконтурной циркуляции теплоносителя, реализующийся при высоких уровнях остаточного тепловыделения и значительном дросселировании потока в выходных трубопроводах;
 - режим низкочастотной теплогидравлической неустойчивости контура естественной циркуляции, реализующийся в условиях недогретого до температуры насыщения теплоносителя в аварийном бассейне;
 - режим устойчивой естественной циркуляции в контуре расхолаживания в условиях насыщенного теплоносителя в аварийном бассейне.
- 2) Экспериментально (на моделях) обнаружена теплогидравлическая неустойчивость контура естественной циркуляции при охлаждении реактора недогретым до температуры насыщения теплоносителем бассейна.

На основе анализа экспериментальных данных вскрыт механизм неустойчивости и выявлены факторы, оказывающие стабилизирующее и дестабилизирующее влияние на характер ЕЦ в контуре расхолаживания реактора. В частности, показано, что рециркуляция в активной зоне, возникающая вследствие особенностей конструкции и неравномерности энерговыделения в ТВС, является стабилизирующим общеконтурную циркуляцию фактором.

- 3) Разработана оригинальная методика моделирования нестационарного теплопереноса в бассейнах в условиях термической стратификации при произвольном расположении источников и стоков теплоносителя.

На основе выполненных экспериментальных исследований предложена обобщенная зависимость интенсивности вовлечения теплоносителя в факел затопленной плавучей струи.

- 4) Разработана методика моделирования теплогидравлических процессов в верхней камере смешения реактора в условиях сепарации фаз теплоносителя.

- 5) На основе предложенных методик расчета разработаны программные модули, адаптированные в состав программных комплексов PARNAS и КОРСАР.
- 6) На основе экспериментов, проведенных на интегральных стендах ИСТ(ЕЦ) и РАСТЕЛ, выполнена верификация расчетного кода нового поколения КОРСАР в области моделирования пассивного отвода остаточного тепла реактора.

Показано адекватное воспроизведение кодом КОРСАР доминирующих в рассматриваемых экспериментальных режимах физических явлений:

- термическая и механическая неравновесности двухфазного потока в контуре естественной циркуляции;
 - сепарация фаз теплоносителя в модели реактора и ее влияние на процесс эвакуации паровой фазы;
 - теплогидравлическое взаимодействие параллельных каналов в модели а.з. и его влияние на общеконтурную циркуляцию теплоносителя;
 - реверс потока и возникновение противоточного течения воды и пара в горизонтальных трубопроводах;
 - стратификационные явления в бассейнах аварийного расхолаживания.
- 7) Впервые показана принципиальная возможность надежного охлаждения а.з. при отводе остаточного тепла ВВЭР-640 через бассейн в запроектных авариях с потерей теплоносителя, когда вследствие дополнительных отказов оборудования не формируется контур аварийного расхолаживания и единственным каналом, связывающим реактор с бассейном, является разрыв трубопровода реакторной установки.

С помощью РК КОРСАР определены предельные значения остаточной мощности реактора, при которых гарантированно сохраняется затопленное состояние а.з. в рассматриваемых запроектных авариях.

Полученные результаты имеют принципиальное значение, так как уменьшают перечень запроектных аварий, сопровождающихся переходом в тяжелую стадию с плавлением ТВС активной зоны.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Мигров Ю.А., Волкова С.Н., Кутьин В.В. и др. Одномерная модель стратифицированного течения в больших объемах жидкости с произвольным расположением источника и стока // Тр. Первой Рос. нац. конф. по теплообмену. М.: Изд-во МЭИ. 1994. Т.2, С. 72-77.
2. Мигров Ю.А., Волкова С.Н., Кутьин В.В. и др. Расчетно-экспериментальные исследования процессов отвода остаточного тепла реактора АЭС НП-640 при его расхолаживании через бассейн в авариях с разгерметизацией I контура // Тезисы докл. сем. по динамике ЯЭУ "Динамика энергоблоков нового поколения" Сосновый Бор – 1994, С. 24-27.
3. Мигров Ю.А., Волкова С.Н., Кутьин В.В. и др. Опыт создания и верификация программы PARNAS по расчету процессов расхолаживания ВВЭР-640 через бассейн в авариях с потерей теплоносителя 1-го контура // Процессы теплообмена и гидродинамики в системах безопасности АЭС с ВВЭР-640: Сб. трудов. С.-Петербург, 1997, С. 23-34.
4. Мигров Ю.А., Волкова С.Н., Кутьин В.В. и др. Особенности теплогидравлических процессов в контуре аварийного расхолаживания реактора ВВЭР-640 через бассейн на заключительной стадии аварий с потерей теплоносителя I контура. // Труды меж-

- дународной конференции «Теплофизика-98» «Теплофизические аспекты безопасности ВВЭР», 26-29 мая 1998, Обнинск, с. 248-256
5. Мигров Ю.А., Волкова С.Н., Кутьин В.В. и др. Аварийное расхолаживание ВВЭВ-640 через бассейн на заключительной стадии аварий с потерей теплоносителя I контура // Теплоэнергетика № 3, 1999, С.28-32.
 6. Мигров Ю.А., Волкова С.Н., Кутьин В.В. и др. Аннотация программы PARNAS // Вопросы атомной науки и техники серия: Физика ядерных реакторов, 1999, выпуск 1, С. 97- 99.
 7. Мигров Ю.А., Волкова С.Н., Кутьин В.В. и др. Верификация РК КОРСАР на интегральных теплогидравлических стендах и на АЭС с ВВЭР-1000 // Тезисы докладов отраслевой конференции «Теплофизика 2001» «Теплогидравлические коды для энергетических реакторов», 29-31 мая 2001, Обнинск, С.137-139.
 8. Мигров Ю.А., Волкова С.Н., Кутьин В.В. и др. Расчетно-экспериментальные исследования процессов отвода остаточного тепла ВВЭР-640 через бассейн на стендах ИСТ(ЕЦ) и РАСТЕЛ // Тез. докл. отраслевой конф. «Теплофизика 2001» «Теплогидравлические коды для энергетических реакторов», 29-31 мая 2001, Обнинск, С. 77-78.
 9. Migrov Yu.A., Yudov Yu.V., Kutysin V.V. and et. al. KORSAR: A new generation computer code for numerically modeling dynamic behavior of nuclear power installation // ICON-9, Nice, France, April 8-12 2001. Rep. № 545.
 10. Мигров Ю.А., Волкова С.Н., Кутьин В.В. и др. Моделирование теплофизических процессов при пассивном отводе остаточного тепла ВВЭВ-640 в проектных авариях с разгерметизацией I контура // Теплоэнергетика № 12, 2002, С. 49-54.