Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом» АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ – ФИЗИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМЕНИ А.И. ЛЕЙПУНСКОГО» (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»)

На правах рукописи

Шлепкин Александр Сергеевич

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕПЛОМАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ОБОРУДОВАНИИ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ И ЗАЩИТНОЙ ОБОЛОЧКЕ НА РАБОТУ ПАССИВНЫХ СИСТЕМ БЕЗОПАСНОСТИ ВВЭР

Специальность: 2.4.9 – Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность (технические науки)

ДИССЕРТАЦИЯ на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель – доктор технических наук Морозов А.В.

Обнинск 2024

оглавление

ВВЕДЕНИЕ			5
ГЛАВА 1. ЭКСПЕ	РИМЕНТАЛЬНЫЕ КРУПНОМ	АСШТАБНЫЕ СТ	енды для
ОБОСНОВАНИЯ	РАБОТОСПОСОБНОСТИ	ПАССИВНЫХ	СИСТЕМ
БЕЗОПАСНОСТИ А	АЭС		14
1.1 Реакторная уст	гановка АР-1000		19
1.1.1 Стенд АРЕ	EX		22
1.1.2 Стенд ROS	SA		24
1.1.3 Выводы по	о параграфу 1.1		25
1.2 Реакторная уст	гановка KERENA		
1.2.1 Стенд NOF	ΚΟ		
1.2.2 Стенд РАМ	JDA		
1.2.3 Выводы по	о параграфу 1.2		
1.3 Реактор ВВЭР	-640		
1.3.1 Стенд РАС	CTEL		
1.3.2 Выводы по	о параграфу 1.3		
1.4 ВВЭР-1200 с р	еакторной установкой В-491		
1.4.1 Стенд СПС	ЭТ ПГ		
1.4.2 Стенд КМ	C		41
1.4.3 Стенд СПС	DT 30		
1.4.4 Выводы по	о параграфу 1.4		43
1.5 ВВЭР-1200 с ј	реакторной установкой В-392М		
1.5.1 Стенд ИСН	Б-ВВЭР		
1.5.2 Стенд ПСН	Б-ВВЭР		50
1.5.3 Стенд ГЕ-2	2M		51
1.5.4 Стенд СПС	DT		53
1.5.5 Выводы по	о параграфу 1.5		54
1.6 Выводы по гла	аве 1		55

ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ГЕ-2М С МОДЕЛЬЮ
ПАРОГЕНЕРАТОРА
2.1 Состав и основные системы экспериментальной установки ГЕ-2М с моделью
парогенератора
2.2 Вспомогательные системы экспериментальной установки ГЕ-2М61
2.3 Система измерения основных параметров стенда
2.4 Соответствие процессов, происходящих на стенде, натурным
2.5 Методика выполнения экспериментов
2.6 Выводы по главе 2
ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЕ
ГАЗОГЕНЕРАЦИИ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ НА РАБОТУ ПАРОГЕНЕРАТОРА В
КОДЕНСАЦИОННОМ РЕЖИМЕ
3.1 Анализ влияния неконденсирующихся газов, поступающих из реактора, на
работоспособность парогенератора в конденсационном режиме
3.2 Исследование работы парогенератора при работе в конденсационном режиме в
расширенном диапазоне параметров
3.3 Анализ процессов влияющих на работоспособность парогенератора в
аварийном режиме
3.4 Исследование работоспособности парогенератора в конденсационном режиме
при отсутствии сдувки неконденсирующихся газов из холодного коллектора87
3.5 Выводы по главе 396
ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ГЕ-2М С РАБОЧИМ
УЧАСТКОМ РУ-ЗО И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ
4.1 Состав и основные системы экспериментальной установки ГЕ-2М
4.2 Контрольно-измерительные приборы и система сбора данных стенда 103
4.3 Методика проведения экспериментов на стенде108
4.4 Выводы по главе 4112
ГЛАВА 5. АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ МЕЖДУ
ЗАЩИТНОЙ ОБОЛОЧКОЙ И РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКОЙ НА
КОНЛЕНСАЦИОННУЮ МОШНОСТЬ ПАРОГЕНЕРАТОРА

5.1 Исследование работоспособности парогенератора ВВЭР при параметрах,
характерных для аварийного режима113
5.2 Анализ движения сред через сечение разгерметизации реакторной установки
ВВЭР-1200
5.3. Анализ процессов поступления парогазовой среды в объем модели РУ 127
5.4. Исследование возможности продления работы парогенератора после
окончания первых суток аварии137
5.5 Выводы по главе 5145
ЗАКЛЮЧЕНИЕ
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

введение

Актуальность темы исследования

Мировое производство электроэнергии с 2010 по 2024 гг. росло в среднем на 2,4 %. Даже в 2020 году, несмотря на возникновение пандемии COVID-19 и введение противодействующих ей мер, приведших к массовому останову производства по всему миру, потребление электроэнергии практически не сократилось [1]. Увеличивается и скорость роста производства электричества. Так, согласно прогнозам [2], к концу 2024 года суммарная мировая генерация вырастет на 4 %, а в течение 2025 на 4,2 %.

При этом прогнозируется, что наибольший спрос возникнет на экологически чистую энергию. За 2022 год выработка электроэнергии на угольных электростанциях (36 % от общемирового производства по всем источникам энергии в 2022 году) выросла на 1,8 %, а на газовых электростанциях уменьшилась на 0,2 %. В то же время, рост выработки электрической энергии из ядерного топлива, ветра и солнечного излучения показывает значительно большие цифры [3]. Так, ожидается, что в 2025 году выработка электроэнергии на атомных станциях (AC) обновит исторический рекорд [4].

На современном этапе научно-технического прогресса только атомная энергетика одновременно является «чистой», в достаточной мере экономичной и обладает способностью к масштабированию [5]. Однако, у нее есть значимые недостатки, без преодоления которых невозможно продолжение устойчивого развития. Одним из них является то, что в случае крупномасштабной аварии существует риск нанесения значительного вреда населению и окружающей среде в значительном радиусе вокруг станции.

Хотя крупнейшие аварии атомной отрасли по последствиям уступают самым крупным техногенным катастрофам в некоторых других отраслях, исторически сложилось так, что именно последствия ядерной аварии вызывают наибольший страх. При сложившемся восприятии рисков, связанных с атомной энергетикой, и возникших из-за последствий крупных аварий на АЭС, уровень обеспечения безопасности здесь должен быть гораздо выше, чем на любом другом производстве. Поэтому, планы по сооружению новых энергоблоков могут иметь право на жизнь только в одном случае: при безоговорочном обеспечении достаточной безопасности АС [6].

Есть несколько путей повышения уровня безопасности атомных станции, включающих в себя различные мероприятия для достижения требуемого эффекта. Наиболее предпочтительны те из них, которые не допускают саму возможность аварии. Однако, если таковая произойдет, основной задачей является недопущение выброса радиоактивных веществ за пределы защитной оболочки (3O) [7].

В истории случались тяжелые техногенные аварии, вызванные исключительно форс-мажорными силами, как, например, прорыв плотины Баньцяо, вызванный тем, что за несколько дней выпало две годовых нормы осадков. Тем не менее, в подавляющей доле больших и малых аварий вина лежит полностью или преимущественно на человеческом факторе. Полностью верно это для атомной отрасли. Поэтому, во все современные проекты АЭС, И разработанные или разрабатываемые после аварии на Чернобыльской АЭС, включены системы безопасности, не требующие наличия внешнего источника энергии и управления со стороны персонала или автоматических электронных систем управления. Такие системы называются пассивными системами безопасности (ПСБ) [8].

Эти системы включены в каждый проект атомной станции поколения 3+, включая и самую современную действующую отечественную Нововоронежскую АЭС-2, на которой сооружены два энергоблока с реакторной установкой (РУ) В-392М. Данные системы делятся на несколько типов. К основным относятся: система пассивного залива активной зоны и система отвода тепла от реактора. В первую категорию в проекте РУ В-392М входят системы пассивного залива из гидроемкостей первой и второй ступени (ГЕ-1 и ГЕ-2 соответственно). Ко второй относится система пассивного отвода тепла (СПОТ).

Функция систем ГЕ-1 и ГЕ-2 заключается в обеспечении повторного залива и поддержании уровня теплоносителя в активной зоне в течение не менее 24 часов при аварии с большой течью теплоносителя первого контура с полным отказом активной части системы аварийного охлаждения активной зоны (САОЗ).

В силу особенностей физики процессов в ядерном реакторе, даже после его полной остановки топливо продолжает длительное время производить тепловую энергию в результате наличия остаточного тепловыделения. Несмотря на то, что функция уменьшения тепловой мощности «заглушенного реактора» имеет характер экспоненты, даже к концу первых суток ее значение будет достигать десятков мегаватт. Этого достаточно, чтобы осушить активную зону за короткий срок. Для предотвращения такого сценария аварийной ситуации в проект НВАЭС-2 (РУ В-392М) включена система пассивного отвода тепла. Важнейшей особенностью СПОТ является то, что для ее функционирования не нужны какиелибо источники внешней энергии (включая электроэнергию) и не требуется управление со стороны персонала или электронных автоматических средств управления.

За счет того, что тепло отводится в атмосферу с помощью специальных воздухоохлаждаемых теплообменных аппаратов через промежуточный контур, срок работы СПОТ не ограничен. Также, в её конструкцию внесен значительный запас прочности, поэтому даже при потере одного канала из четырех, система будет отводить необходимое количества тепла от активной зоны [10].

Отвод тепла от реактора при работе системы осуществляется через парогенератор (ПГ). В случае аварии, после прохождения определённого переходного периода, СПОТ переводит ПГ в режим конденсации пара первого контура. Но вместе с паром в трубный пучок поступают газы, произведенные в ходе газогенерации, а также, теоретически, воздух из защитной оболочки через разрыв главного циркуляционного трубопровода (ГЦТ).

Поступая вместе с паром из реактора в трубный пучок парогенератора, неконденсирующиеся газы могут значительно уменьшить интенсивность

процесса конденсации [11]. Следовательно, для обоснования проектной функции СПОТ необходимо показать, что поступление этих газов не снизит мощность парогенератора ниже допустимых параметров.

Все движения сред, возникающие при работе ПСБ ВВЭР, являются полностью естественными, движущей силой является гравитация и конвекция. Для таких процессов характерна возможность возникновения сложных обратных связей, которые могут в значительной мере влиять на работоспособность систем безопасности. Эти связи могут оказывать как положительное, так и отрицательное воздействие. Соответственно требуется выявить их наличие и определить степень влияния на процессы, происходящие при работе СПОТ.

Проектная длительность эффективной совместной работы пассивных систем безопасности для случая запроектной аварии с разрывом ГЦТ с одновременной потерей источников электроснабжения ограничена в НВАЭС-2 (РУ В-392М) одними сутками. Однако, для прогнозирования протекания аварийных процессов, при подобных авариях, необходимо исследование динамики снижения мощности парогенератора ВВЭР после 24 часов работы системы пассивного отвода тепла, что также является актуальной задачей [12].

Степень разработанности темы диссертации

В процессе диссертационного исследования были проанализированы экспериментальные и расчетные работы, относящиеся к пассивным системам безопасности современных и перспективных ядерных реакторов с водой в качестве теплоносителя.

Значительный вклад в разработку данной темы внесли специалисты АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»: Калякин С.Г., Ремизов О.В., Цыганок А.А., Морозов А.В., Калякин Д.С. и др.; ученые и инженеры ведущих проектных, эксплуатационных и научных организаций атомной отрасли: Беркович В.М., Таранов Г.С. и др.

Процессы, возникающие при преодолении аварии силами пассивных систем безопасности, были исследованы в ходе расчетных и экспериментальных работ в АО «ОКБ «Гидропресс», НИЦ «Курчатовский институт», АО «ЭНИЦ»,

АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» и ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», а также благодаря работе сотрудников АО «Атомэнергопроект».

Анализ проведенных ранее исследований показал, что существующие работы рассматривают в основном вопросы влияния параметров парогазовой среды на процессы конденсации на твердой «холодной» поверхности. При этом в этих исследованиях не рассматривались обратные связи, образующиеся в ходе взаимодействия между теплообменником СПОТ, парогенератором, защитной оболочкой и объемом первого контура. Также, значительной В доле анализируемых работ диапазон параметров проводимых экспериментов не включал те, что характерны для функционирования оборудования BBЭP-1200 в аварийном режиме.

Важнейшим параметром, определяющим характер процесса теплообмена в парогенераторе, работающем в конденсационном режиме, является концентрация неконденсирующихся газов в паре на входе в трубный пучок ПГ. Существующие исследования учитывают только наличие газогенерации в активной зоне и возможное поступления азота из объема гидроемкостей первой ступени. Ни в одной ИЗ анализируемых работ не проводилось определение влияния теоретически возможного перетока паровоздушной смеси из объема защитной оболочки реакторную В установку через сечение разрыва главного циркуляционного трубопровода. Также выяснено, что не проводился анализ процессов при работе пассивных систем, происходящих после окончания отвода парогазовой смеси из «холодного» коллектора парогенератора.

Цели и задачи

<u>Цель</u> диссертационной работы заключалась в обосновании комплексной работоспособности пассивных систем безопасности ВВЭР-1200 (РУ В-392М). Исследования были направлены на изучение процессов тепло- и массообмена, происходящих в элементах реакторной установки в случае аварийной ситуации с разрывом главного циркуляционного контура (ГЦК) и выявление взаимосвязей между ними.

Объектом исследования являются тепло и массообменные процессы, характерные для функционирования ПСБ НВАЭС-2 (РУ В-392М) в процессе аварии, связанной с гильотинным разрывом главного циркуляционного трубопровода и одновременной потерей источников электроснабжения.

Предмет исследования – влияние неконденсирующихся газов на работоспособность парогенератора ВВЭР в аварийном режиме с учетом наличия обратных связей между ним и теплообменником СПОТ, а также присутствия массообменных процессов между объемами защитной оболочки и реакторной установки.

Задачи диссертационного исследования:

1. Разработка методики проведения экспериментов по определению параметров работы парогенератора в аварийном конденсационном режиме при наличии всех источников неконденсирующихся газов, включая массоперенос паровоздушной смеси между защитной оболочкой и реакторной установкой на работу пассивных систем безопасности ВВЭР.

2. Проведение опытов и обработка экспериментальных данных

3. Обоснование работоспособности парогенератора ВВЭР-1200 (РУ В-392М) в аварийном конденсационном режиме.

4. Определение влияния поступающей из защитной оболочки в объем первого контура паровоздушной смеси на работу парогенератора в конденсационном режиме.

5. Определение длительности работы парогенератора ВВЭР-1200 в аварийном конденсационном режиме до достижения пороговых значений мощности.

Научная новизна:

1. Впервые экспериментально установлено наличие отрицательных обратных связей между теплообменным оборудованием атомной станции с реакторной установкой В-392М, используемом при работе пассивных систем безопасности. Определено их влияние на процессы передачи тепла между первым и вторым контурами реакторной установки ВВЭР в аварийном режиме.

2. Получены экспериментальные данные о процессах, происходящих в трубном парогенератора BB3P-1200 (B-392M), работающего пучке в конденсационном режиме, после прекращения отвода парогазовой смеси из его Обнаружена нелинейная «холодного» коллектора. зависимость мощности парогенератора от скорости накопления неконденсирующихся газов.

3. Получены полуэмперические формулы, которые можно использовать для расчета основных параметров парогенератора, работающего в описанном выше режиме.

4. Впервые экспериментально установлено наличие массообменных процессов между объемами защитной оболочки и реакторной установки в случае аварии с разрывом главного циркуляционного трубопровода. Определены условия поступления паровоздушной смеси в первый контур.

5. Выявлено влияние местоположения разрыва ГЦТ на работоспособность парогенератора ВВЭР в конденсационном режиме.

Теоретическая и практическая значимость работы

Полученный в ходе экспериментов массив данных предназначен для использования при проведении расчетного моделирования аварийных процессов в ВВЭР-1200 при работе пассивных систем безопасности, а также при разработке перспективных проектов АЭС с ВВЭР.

Выявлено наличие обратных связей между теплообменным оборудованием, используемым при работе пассивных систем безопасности, и определена степень их влияния на тепломассообменные процессы, происходящие в случае аварии с разрывом ГЦТ полным сечением и одновременной потерей источников электроснабжения.

Результаты, полученные в ходе проведения экспериментального исследования работоспособности пассивных систем безопасности ВВЭР-1200 (В-392М), позволили снять замечания НТЦ ЯРБ к проекту НВАЭС-2 в части влияния неконденсирующихся газов и получить лицензию Ростехнадзора на физический пуск и эксплуатацию шестого энергоблока Нововоронежской АЭС.

Методология и методы исследования

Проведение экспериментальных исследований, обработка и анализ полученных опытных данных.

Положения, выносимые на защиту

1. Экспериментальные результаты исследования влияния различных факторов на работу парогенератора ВВЭР в аварийном конденсационном режиме, включая выявленные обратные связи между парогенератором и теплообменником системы пассивного отвода тепла.

2. Экспериментально измеренная динамика изменения мощности модели парогенератора ВВЭР при работе в конденсационном режиме после окончания первых суток аварии для различных условий протекания аварии.

3. Полученные полуэмпирические зависимости, позволяющие рассчитать основные параметры работы парогенератора ВВЭР в аварийном конденсационном режиме при отсутствии отвода парогазовой смеси из его «холодного» коллектора.

4. Выявленные закономерности поступления паровоздушной смеси в реакторную установку через разрыв главного циркуляционного трубопровода.

5. Экспериментально измеренные параметры работы модели парогенератора ВВЭР в конденсационном режиме при поступлении паровоздушной смеси из защитной оболочки в трубный пучок ПГ.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность экспериментальных данных обеспечивается тщательно проработанной методикой проведения исследований и обработки результатов измерений, применением надежных измерительных приборов и датчиков, предварительно прошедших тарировку и метрологическую поверку.

Эксперименты были проведены в две серии, с различной конфигурацией оборудования. Полученные результаты сопоставимы между собой.

Основные положения и результаты работы представлялись и получили одобрение на: Научно-технических конференциях «Теплофизика реакторов нового поколения – 2015, 2016; 2018, 2022» (АО «ГНЦ РФ-ФЭИ», Обнинск, 2015-

2022), 14-й и 15-й международных конференциях «Безопасность АЭС и подготовка кадров» (ИАТЭ НИЯУ МИФИ, Обнинск, 2015, 2018), 18-22-й научнотехнических конференциях молодых специалистов (АО ОКБ «Гидропресс», 2016-2019, 2022), Подольск, IV-й международной научно-технической конференции «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики» (НИКИЭТ, Москва, 2016), 10-й и 11-й международных научно-технических конференциях «Безопасность, экономика и эффективность атомной энергетики», (АО «ВНИИАЭС», Москва, 2016, 2018), 10-й международной научно-технической конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР» (АО ОКБ «Гидропресс», Подольск, 2017), XXII Школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках» (МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 2019), Всероссийских конференциях «XXXV, XXXVI Сибирский теплофизический семинар» (ИТ СО РАН, Новосибирск, 2019, 2020).

Публикации

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 10 печатных изданиях: 6 публикаций в журналах, входящих в список ВАК, 4 – в других изданиях (в т.ч. индексируемых в РИНЦ и международных базах данных).

Личный вклад автора

Личный вклад автора в получении результатов, изложенных в диссертации, заключается в том, что он, как непосредственный исполнитель, принимал участие в модернизации и пуско-наладке экспериментального стенда ГЕ-2М и проводил эксперименты. Автор также участвовал в разработке методики проведения экспериментов, выполнил анализ полученного массива экспериментальных данных и подготовил полученные материалы для публикации в рецензируемых статьях и докладах.

Отдельную благодарность автор выражает д.т.н. Морозову А.В. за помощь в организации и проведении работ по экспериментальному обоснованию пассивных систем безопасности ВВЭР-1200 (В-392М), которые легли в основу данной диссертации.

ГЛАВА 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ КРУПНОМАСШТАБНЫЕ СТЕНДЫ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ПАССИВНЫХ СИСТЕМ БЕЗОПАСНОСТИ АЭС

Первые пассивные системы безопасности появились уже в 70-х годах прошлого века. Длительное время они были предназначены, в основном, для преодоления начального этапа аварии [13]. Однако события на Чернобыльской необходимость совершенствования АЭС показали безопасности атомных станций, в том числе путем более широкого внедрения защитных систем, работа которых основана использовании принципа естественного на движения охлаждающей среды [14]. В вышедшем в 1988 г. докладе МАГАТЭ INSAG-3 [15] были подробно изложены основные принципы безопасности, которые необходимо учитывать при проектировании АЭС.

В дальнейшем эти принципы получили развитие в 1994 г., в докладе МАГАТЭ INSAG-5 [16]. В нем постулировалась возможность дальнейшего повышения уровня безопасности атомных электростанций за счет включения в их проекты новых проектных решений, в том числе новых систем, функционирующих на пассивном принципе.

В большинстве новых или получивших дальнейшее развитие постчернобыльских проектов, таких как АР-600 (США) или АЭС-92 (СССР) была реализована возможность охлаждения аварийной зоны в случае аварии с разрывом ГЦТ и полным обесточиванием в течение минимум суток [17].

Катастрофа на АЭС «Фукусима» в 2011 г. еще больше повысила необходимость обеспечения безопасности объектов ядерной энергетики. Согласно требованиям EUR, современный проект атомной станции должен быть способен сохранять целостность активной зоны и не допустить выброса продуктов деления в течение не менее трех суток без подачи электроэнергии и вмешательства персонала в случае возникновения серьезной аварии, связанной, например, с гильотинным разрывом главного циркуляционного контура [18]. Для устойчивого развития атомной энергетики недопустима сама возможность возникновения новой аварии с выходом радиоактивных веществ за пределы герметичной оболочки энергоблока [19, 20]. Таким образом, важно обсновать работоспособность систем безопасности в аварийной ситуации.

При работе пассивных систем безопасности ВВЭР-1200 с реакторной установкой В-392М существует ряд важных особенностей. В частности, в качестве движущей силы в них используется только конвекция и давление, вызванное гидростатическим напором. Это приводит к тому, что между оборудованием систем пассивной безопасности могут возникнуть обратные связи, которые теоретически способны в значительной мере повлиять на их работоспособность.

Вследствие различных процессов, происходящих в аварийном реакторе ВВЭР-1200, также возможно возникновение массообмена между реакторной установкой и объемом защитной оболочки. При этом в первый контур могут поступать неконденсирующиеся газы, которые будут снижать эффективность отвода тепла от реактора через аварийные теплообменники [21].

Автором был проведен обзор работ в области конденсации водяного пара в присутствии неконденсирующихся газов. Далее отражены результаты наиболее актуальных и релевантных исследований.

В работе [22] представлено моделирование конденсации водяного пара в присутствии неконденсирующегося газа при турбулентном течении В вертикальном цилиндрическом трубном конденсаторе. В расчетах температура стенки И поток охлаждающего воздуха не были постоянными. Также предполагалось, что пленка конденсата занимает незначительный объем и ее влияние на конденсацию водяного пара было учтено заданием ряда граничных условий. В результате проведенного исследования определено, что зависимость тепловой мощности от условий протекания процесса конденсации различается для различных частей диапазона исследованных параметров. В статьях [23, 24] также отображены результаты расчётных исследований конденсации пара в присутствии неконденсирующихся газов. В опытах варьировались давление пара,

перепад температур между парогазовой смесью и «холодной» поверхностью, а также концентрации газов. В экспериментах определено наличие существенного влияния скорости движения парогазовой смеси в осевой проекции по отношению к горизонтальной теплообменной трубе на процесс конденсации пара.

В работе [25] представлены данные о теплопередаче при пленочной конденсации парогазовых смесей в горизонтальной трубе при принудительной конвекции. В работе проанализировано влияние давления (4–124 кПа), массовой доли газа (0,02–32 %), скорости пара (0,3–26 м/с) и теплового потока (12–455 кВт/м²) на теплопередачу. Получены зависимости снижения мощности от концентрации при различных условиях протекания теплообменного процесса.

В работе [26] исследовали испарение и конденсацию паровоздушных смесей на стенке трубы. В результате была получена зависимость коэффициента теплоотдачи от массового соотношения пара и воздуха. В работах [27, 28] анализировалось влияние большого количества углекислого газа на конденсацию пара на горизонтальной трубе [29] и плоской поверхности в диапазоне массовой доли CO₂ от 11,2 до 95 %. В работе [30] авторы исследовали влияние смачиваемости поверхности на конденсационный теплообмен парогазовой смеси на горизонтальных плоских и оребренных трубах. В перечисленных работах получены зависимости снижения теплового потока для разных диапазонов параметров парогазовой смеси, включая массовый расход, давление, температуру, массовую концентрацию неконденсирующихся газов и их состав.

Результаты экспериментального исследования процессов конденсации пара при свободной конвекции приведены в [31]. Конденсация происходила в медной трубе диаметром 62,4 мм. В работе была определена зависимость коэффициента теплоотдачи при горизонтальном расположении теплообменных труб от концентрации неконденсирующихся газов и теплофизических параметров среды в исследуемом диапазоне. Эксперименты проводились в условиях свободной конвекции при конденсации пара на горизонтальной трубе при различных комбинациях давлений и температур. Было проведено несколько серий экспериментов с разными неконденсирующимися газами, подмешиваемыми в пар: гелий, аргон, неон, а также смеси азота и кислорода.

Применительно к изучаемой области представляет интерес также статья [32]. В ней представлены результаты экспериментов, которые проводились в широком диапазоне (10–60 %) массового содержания Не, N₂ и CO₂. Определена зависимость коэффициента теплопередачи от типа теплообменной поверхности и таких параметров парогазовой смеси, как температура, давление и массовая концентрация газов.

В работе [33] исследовался процесс конденсации пара на поверхности защитной оболочки АЭС в аварийной ситуации, связанной с разрывом трубопровода. Эксперименты проводились на масштабном стенде в диапазоне мольных долей воздуха от 30 до 65 % и давлениях от 0,248 до 0,455 МПа. В результате экспериментов были получены зависимости коэффициента теплопередачи от параметров пара, выходящего из имитатора реактора, подготовлен перечень рекомендаций для проведения дальнейших экспериментов, а также выяснено, что конструкция теплообменного аппарата в условиях естественной циркуляции парогазовой смеси оказывает существенное влияние на процесс конденсации пара на его поверхности.

Анализ имеющихся публикаций в исследуемой области показал, что явление конденсации парогазовой смеси на горизонтальных поверхностях (в том числе и на внутренних поверхностях труб) к настоящему времени раскрыто достаточно обширно. Однако, процессы тепломассообмена в трубном пучке парогенератора BBЭP-1200 в случае аварии имеют ряд важных особенностей.

Во-первых, движение всех сред происходит строго под действием гравитации или конвекции и является полностью естественным. Это означает, что изменение параметров в одном элементе системы пассивного отвода тепла само по себе способно вызвать изменение иных параметров в других элементах. Такие взаимосвязи между оборудованием могут оказывать значительное воздействие на процессы тепломассообмена. Во-вторых, в случае аварии в трубном пучке парогенератора (вследствие естественного характера движения сред) будут иметь место низкие тепловые потоки. Для парогенератора AC с реакторной установкой В-392М это значение не превысит 1500 Вт/м². Только относительно небольшое количество работ описывает эксперименты с похожими параметрами.

Кроме того, один из важнейших параметров исследуемого процесса – концентрация неконденсирующихся газов в паре является нестабильным. С одной стороны, в замкнутый объем трубного пучка ПГ в течение всего действия пассивных систем безопасности поступают новые порции газов из активной зоны, с другой стороны происходит также и постоянное удаление этих газов из «холодного» коллектора парогенератора в объем сосудов гидроемкостей второй ступени [34, 35].

Все вышеперечисленные особенности в литературе подробно не описаны. Комплексное влияние ЭТИХ факторов не исследовалось. Более того, В рассмотренных работах показано, что степень влияния неконденсирующихся газов на тепломассообменные процессы зависит даже от формы трубного пучка конденсационной установки [33]. Это означает, обоснование что невозможно работоспособности ПСБ без проведения целого комплекса экспериментальных исследований.

В частности, необходимо показать, что переходные процессы, происходящие в реакторной установке после начала аварии, не помешают запуску систем безопасности в целом и не смогут повлиять в недопустимой степени на параметры работы элементов этих систем [35-38]. Требуется определить баланс тепловой энергии для оборудования систем безопасности, а также их способность сброса ее во вне. Кроме того, необходимо определить степень влияния неконденсирующихся газов на эффективность функционирования теплообменных аппаратов пассивных систем безопасности и обосновать их работоспособность в проектном диапазоне параметров.

Все это полностью верно и для ВВЭР-1200 (с РУ В-392М). Системы, включенные в этот проект, должны в случае аварии решить две задачи: во-

первых, необходимо обеспечить поддержание уровня теплоносителя в активной зоне как минимум на высоте верхних концевиков ТВС; во-вторых, необходимо отвести выделяющееся в активной зоне тепло за пределы защитной оболочки, при этом гарантировав полное отсутствие выхода радиоактивных веществ. В дополнение к этому длительность автономной работы ПСБ не может быть ниже двадцати четырех часов с момента возникновения аварии с разрывом ГЦТ и полным обесточиванием [39].

Возникновение серьезной аварии может нанести такой ущерб отечественной атомной отрасли, что это способно серьёзно остановить её развитие [40]. Таким образом, необходимо обосновать способность включенных в проект реакторной установки В-392М пассивных систем безопасности решать указанные ранее задачи.

Автором диссертационной работы был осуществлен обзор существующих экспериментальных исследований в области обоснования проектных характеристик пассивных систем безопасности зарубежных и отечественных проектов реакторных установок для определения наличия или отсутствия результатов работ, которые могут быть применимы для обоснования работы ПСБ HBAЭC-2 (с РУ В-392М). Также целью обзора было выявление основных используемых подходов и методик для изучения исследуемой проблемы.

1.1 Реакторная установка АР-1000

Первым из современных проектов АЭС с полноценным комплексом пассивных систем безопасности, рассчитанных на автономное функционирование в течение не менее чем суток, был проект АР-600. На его технических решениях базируется действующий реактор с водой под давлением АР-1000, мощностью 1117 МВт, разработанный компанией Westinghouse [41].

В состав AP-1000 (рисунок 1.1) входит ряд пассивных систем безопасности. Кроме конвекции и гидростатического давления, в них также применяется энергия сжатого газа. Для их функционирования не требуется электроэнергия или какие-либо иные источники внешней энергии, а также управление со стороны персонала или электронных автоматических систем управления [42].

В случае аварии с разгерметизацией первого контура пассивная система подпитки активной зоны используется для устранения негативных последствий истечения теплоносителя [43].



1 – реактор; 2 – активная зона; 3 – питательная линия от СМТ и АСС;
4 – парогенератор; 5 – компенсатор давления; 6 – внутриконтейнментный бассейн перегрузки топлива (IRWST); 7 – теплообменник пассивного отвода остаточных энерговыделений (PRHR HX); 8 – автоматическая система снижения давления; 9 – воздушный тракт охлаждения стальной оболочки; 10 – емкость запаса воды для охлаждения стальной оболочки; 11 – бак подпитки активной зоны (CMT);
12 – гидроаккумулятор (ACC); 13 – питательная линия от IRWST Рисунок 1.1 – Схема пассивных систем охлаждения активной зоны реактора АР-1000

В данную систему включены следующие элементы [44]:

– Внутриконтейнментный бассейн перегрузки топлива (IRWST), объёмом 2092,6 м³, расположен под защитной оболочкой на отметке выше уровня реактора.

– Два бака подпитки активной зоны (СМТ), объёмом 70,8 м³ каждый, которые обеспечивают расход охлаждающей жидкости в объем активной зоне вне зависимости от давления в ней. Для обеспечения впрыска в корпус реактора используется принцип естественной циркуляции.

 Два гидроаккумулятора (ACC), объёмом 58,6 м³ каждый, которые подают в реактор раствор борной кислоты, если давление в первом контуре снижается до 4,83 МПа.

– Теплообменник пассивного отвода остаточных энерговыделений (PRHR HX). Он представляет собой пучок дугообразных труб без внешнего корпуса. Эти трубы погружены в объем бассейна хранения и перегрузки топлива. Его конструкция предусматривает отвод тепла при любом давлении в первом контуре.

– Система автоматического снижения давления. Она включает в себя несколько трубопроводов, имеющих линии связи между собой, и ряд обратных клапанов. Последние располагаются в объёме компенсатора давления. Они связаны через указанные выше трубопроводы с выходной частью главного циркуляционного трубопровода. Последовательное открытие этих клапанов обеспечивает контролируемое снижение давления в первом контуре. Семьдесят пять процентов избыточного пара барботирует через IRWST, отдавая часть своей тепловой энергии в его воду и конденсируясь. Двадцать пять процентов сбрасывается в объем контеймента напрямую.

– Рециркуляционный приямок — это устройство, выполняющее функцию сбора конденсата, стекающего по поверхности стального контеймента. За счет наличия гидростатического давления охлаждающая жидкость подается непосредственно в объем реактора.

Для обоснования работоспособности вышеописанных систем и соответствия их требованиям комиссии по ядерному регулированию США (NRC) были проведены несколько серий интегральных экспериментов. В них определялась теплообменных ПСБ, эффективность установок, включенных В И активной Результаты производительность систем залива 30НЫ. опытов использовались для верификации расчетных кодов [47].

1.1.1 Стенд АРЕХ

Одной из исследовательских установок, на которой проводилось изучение работоспособности пассивных систем безопасности проекта AP-1000, является стенд APEX. Он представляет собой крупномасштабную интегральную установку, способную работать при высоком давлении. Коэффициенты масштабирования приведены в таблице 1.2 [41].

Таблица 1.1 – Основные показатели масштабирования стенда АРЕХ

Высота	1:4
Площадь сечения труб	1:48
Объем	1:192
Мощность	1:96

В состав установки (рисунок 1.2) были включены: имитатор реакторной установки, модели пассивных систем безопасности система охлаждения реактора, две «горячие» и четыре «холодные» ветки главного циркуляционного трубопровода ветки, два парогенератора с 133 U-трубными трубками, герметизирующие устройства, четыре реакторных циркуляционных насоса [42]. Активная зона стенда представляет собой сорок восемь электрообогреваемых имитаторов твэл, максимальная мощность составила 1000 кВт.

В состав пассивных систем безопасности входили: два бака с запасами охлаждающей жидкости для восполнения её уровня в активной зоне; два гидроаккумулятора с охлаждающей жидкостью; четырехступенчатая автоматическая система снижения давления; теплообменник пассивного отвода

остаточных энерговыделений; внутриконтейнментный бассейн перегрузки топлива и приямок [43].

Действие пассивных систем защиты стенда полностью имитирует работу пассивных систем безопасности натурного реактора AP-1000.

На стенде АРЕХ проводились эксперименты для определения поведения пассивных систем безопасности в различных ситуациях: ложного срабатывания одной из четырех систем понижения давления, разрыва (0,5 дюймов) в холодной ветке, разрыва (2 дюйма) в холодной ветке и двухстороннего разрыва одной из двух восьмидюймовых труб. Всего было проведено 11 серий экспериментов [44].



1 – модель реактора; 2 – модели гидроаккумуляторов (ACC); 3 – модели баков подпитки активной зоны (CMT); 4 – модель парогенератора; 5 – имитатор автоматической системы снижения давления; 6 – сепаратор; 7 – модель внутриконтейнментного бассейна перегрузки топлива (IRWST);
8 – модель компенсатора давления; 9 – модель теплообменника пассивного отвода остаточных энерговыделений (PRHR HX) Рисунок 1.2 – Схема экспериментальной установки АРЕХ

После окончания основной серии экспериментов, комиссия по ядерному регулированию США потребовала проведения дополнительных исследований. Эти испытания моделировали ситуации за пределами проектных аварий и сценарии с множественными отказами оборудования.

По итогу проведенных экспериментов исследователями было заявлено о соответствии исследуемого оборудования своим проектным функциям [45].

1.1.2 Стенд ROSA

Испытания пассивных систем безопасности AP-1000 проводили и на полновысотном интегральном стенде ROSA, рассчитанном на высокое давление. Для проведения исследований установка была дооснащена всеми пассивными системами безопасности реактора AP-1000. Схема стенда изображена на рисунке 1.3 [46].



 1 – модель реактора; 2 – модель активной зоны; 3 – модель внутриконтейнментного бассейна перегрузки топлива (IRWST); 4 – модель теплообменника пассивного отвода остаточных энерговыделений (PRHR HX);
5 – имитатор автоматической системы снижения давления; 6 – модели баков подпитки активной зоны (CMT); 7 – модель парогенератора; 8 – модели гидроаккумуляторов (ACC); 9 – модель компенсатора давления Рисунок 1.3 – Схема стенда ROSA

Основными его достоинствами являются высота (около 30 метров) и способность работать при полном давлении (16 МПа). Активная зона выполнена из 1008 электронагреваемых стержней, совокупная мощность которых достигает 10 МВт.

Стенд полностью моделирует пассивные системы защиты реактора. Все емкости уменьшены в масштабе 1:48. Высотные отметки соответствуют натурным. Для получения опытных данных в ходе испытаний использовалось около двух с половиной тысяч датчиков давления, температуры и других режимных параметров. Всего было проведено 24 эксперимента при различных режимных условиях [47].

В результате проведения опытов было выяснено, что системы безопасности способны отводить больше предварительного рассчитанного количества тепла. Отсутствие работы ПСБ вызывало опорожнение первого контура, кипение и переход оставшейся охлаждающей жидкости в пар.

Таким образом, тесты показали, что рассмотренные системы пассивной безопасности AP-600/AP-1000 полностью гарантируют защиту реактора от осушения в течение трех суток до подключения активных систем [47].

1.1.3 Выводы по параграфу 1.1

На стендах APEX и ROSA было выполнено большое количество опытов по обоснованию проектных функций пассивных систем безопасности AP-1000.

Полученные в ходе вышеописанных исследований результаты неприменимы прямо или косвенно для обоснования работоспособности ПСБ ВВЭР с РУ В-392М в силу значительных различий конструкции реакторных установок. Однако, в ходе анализа этих исследований были выявлены примененные принципы и подходы, которые имеет смысл рассмотреть отдельно.

Во-первых, это высотные характеристики стендов. Первые серии опытов были проведены на стенде АРЕХ – крупномасштабном интегральном стенде с мощностью имитатора активной зоны 1 МВт. В результате испытаний был получен большой массив экспериментальных данных и продемонстрирована работоспособность ПСБ реакторной установки. Однако, проведенный американским ядерным регулятором анализ экспериментов показал недостаточность полученных результатов. Причиной было, главным образом, то, силой при работе ПСБ является гравитация, что основной движущей

конвективное движение жидких и газообразных сред. Было определено, что при размещении оборудования ниже натурных отметок никакие средства и методики перерасчета не дадут достаточно точные результаты, чтобы их можно было использовать для обоснования проектных функций исследуемых систем.

Для устранения этих пробелов был сооружен стенд ROSA. В нем масштабные коэффициенты были увеличены по сравнению с APEX, в частности, коэффициент масштаба по высоте вырос с 1:4 до 1:1.

Во-вторых, можно отметить стремление к увеличению размеров экспериментального оборудования. В частности, объемный масштаб установки ROSA вырос в 4,1 раза по сравнению со стендом APEX. Также было поднято и максимальное рабочее давление с 2,75 до 16 МПа, а мощность увеличена до 10 МВт.

В-третьих, при проведении исследований всегда соблюдался комплексный подход. Реакторная установка и оборудование первого контура воспроизводились с максимально возможной точностью. В экспериментах даже при исследовании отдельных процессов в определенных элементах ПСБ задействовалось все связанное с ними оборудование.

В-четвертых, исследовалось значительное количество сценариев аварии, включающих в себя различные, в том числе маловероятные, сочетания событий.

Все эти подходы имеет смысл учесть при подготовке и проведении исследований в отношении систем безопасности перспективных проектов ВВЭР.

1.2 Реакторная установка KERENA

Реактор KERENA является разработкой компании FRAMATOME. Это одноконтурный реактор с кипящей водой. Одной из важнейших особенностей данного проекта является наличие в нем ряда пассивных систем безопасности с проектным сроком автономной работы семьдесят два часа [49, 50].

Пассивные системы защиты РУ используют основные физические законы, такие как гравитация, что позволяет данным системам работать без

электроснабжения, систем управляющих сигналов и связанных с этим рисков несрабатывания. Схема ПСБ KERENA изображена на рисунке 1.4 [51].

В этом реакторе, в отличие от большинства других проектов, пассивные системы не дублируют, а частично замещают активные системы безопасности. Такое техническое решение было принято для удешевления стоимости сооружения блока АЭС. К перечню основного оборудования ПСБ КЕRENA относятся набор аварийных конденсаторов, пассивный импульсный передатчик давления (ИПД) и система пассивного залива активной зоны (СПЗАЗ).



1 – активная зона; 2 – реактор; 3 – линия заполнения сухих боксов; 4 – линия сдувки водорода; 5 – трубопровод системы пассивного залива активной зоны; 6 – аварийный конденсатор; 7 – импульсный передатчик давления;
8 – теплообменник системы расхолаживания контейнмента; 9 – емкость запаса воды системы расхолаживания контейнмента; 10 – главный паропровод; 11 – линия питательной воды; 12 – линия очистки теплоносителя;
13 – 16 труб с вентилями; 14 – камера снижения давления; 15 – активные системы безопасности

Рисунок 1.4 – Схема пассивных систем безопасности реактора KERENA

Система залива активной зоны включает в себя одну большую емкость (бассейн СПЗАЗ) и линии связи между ней и реакторной установкой. Система

активируется при достижении уставки давления путем открытия обратных клапанов, размещенных на ее трубопроводах [52].

Аварийные конденсаторы размещены в объеме бассейна СПЗАЗ и представляют собой водоохлаждаемые теплообменники. После начала аварии в их объем начинает поступать пар, который конденсируется, проходя через трубный пучок, и под действием гидростатического давления возвращается обратно в активную зону. Таким образом, осуществляется отвод остаточных энерговыделений.

Использование двенадцати пассивных импульсных передатчиков давления представляет новую конструктивную особенность реактора KERENA. Данное устройство является абсолютно пассивным переключающим устройством, используемым для прямого инициирования следующих функций (причем без необходимости использовать внешние источники энергии или управляющие сигналы): быстрый останов реактора, отсечение защитной оболочки в случае разрушения главного циркуляционного паропровода и автоматическое снижение давления в реакторе [53].

Утверждается, что пассивные системы безопасности реактора KERENA обеспечивают полностью пассивное охлаждение активной зоны в течение нескольких дней после аварии. В силу этого, европейскими регулирующими учреждениями было постулирована необходимость обоснования проектных функций указанных выше систем экспериментально на крупномасштабных интегральных установках.

1.2.1 Стенд NOKO

Испытательный стенд NOKO построен в рамках совместного проекта Forschungszentrum Jülich GmbH и Siemens AG [49] для исследования процессов, происходящих в оборудовании ПСБ KERENA. Его спонсировало Федеральное министерство образования, науки и исследований Германии и несколько немецких коммунальных предприятий. Схема испытательного стенда NOKO для проведения экспериментов с теплообменником-конденсатором защитной оболочки (ТКЗО) изображена на рисунке 1.5 [51]. ТКЗО, используемый в стенде NOKO, состоит из 11 трубок, расположенных в два ряда. Все геометрические размеры и материал пучка оребренных труб соответствуют натурным значениям [50]. Масштабный коэффициент по объему составляет 1:48.



 имитатор защитной оболочки; 2 – имитатор теплообменника системы расхолаживания контейнмента; 3 – подача неконденсирующихся газов;
электрический нагреватель; 5 – сепаратор; 6 – циркуляционный насос;
толодильник; 8 – насос линии охлаждения; 9 – вспомогательный бак;
насос линии охлаждающей воды; 11 – насос линии питательной воды Рисунок 1.5 – Техническая схема стенда NOKO

Основные размеры имитатора контейнмента следующие - длина 6 м, диаметр купола 2 м, объем 20 м³. Среда в резервуаре состояла из насыщенного пара и определенного количества смеси кислорода и гелия.

Эксперименты на стенде NOKO проводились в условиях принудительной циркуляции охлаждающей жидкости. Основная причина этого заключается в том, что на стенде исследовались преимущественно стационарные состояния. Вода перекачивалась разгрузочного бака теплообменник-охладитель ИЗ В испытательной установки, далее через конденсатор защитной оболочки поступала обратно в бак. Разгрузочный бак охлаждался с помощью внешнего контура. Для получения был данных стенд оснащен десятью измерительными ста устройствами. Большая их часть была установлена на поверхности или в объёме зашитной оболочки.

Суммарно было осуществлено пятьдесят три опыта. В них варьировались давление, массовые содержания неконденсирующихся газов и массовые расходы воды через ТКЗО [52]. В результате анализа полученных экспериментальных данных выяснено, что качественные и количественные характеристики систем совпали с проектными в пределах допустимой погрешности. На основе полученных данных была выполнена верификация расчетного кода RALOC [51].

1.2.2 Стенд PANDA

На рисунке 1.6 показана схема испытательного стенда PANDA [54].

Испытательный стенд представляет собой крупномасштабную конструкцию с объемным коэффициентом 1:25, при этом все высоты имитатора контейнмента соответствуют натурным [53].

Модель реактора оснащена электрическими нагревателями и элементами управления для имитации остаточного тепловыделения и тепловой емкости корпуса реактора и его внутренних устройств [54]. Все высотные отметки соответствуют натурным.

Конфигурация оборудования стенда с максимально возможной точностью повторяет таковую у натурного реактора.

Начальные параметры опытов равны натурным в момент протекания первых тысячи секунд от начала возникновения аварийного процесса. Эксперименты длились до двадцати часов.



имитатор камеры снижения давления; 2 – имитатор активной зоны;
имитатор корпуса реактора; 4 – имитатор сухих боксов; 5 – подвод неконденсирующихся газов; 6 – имитатор конденсатора пассивной системы расхолаживания контейнмента № 1; 7 – имитаторы конденсаторов пассивной системы расхолаживания контейнмента № 2 и № 3; 8 – емкость охлаждающей воды; 9 – имитатор объема системы пассивного залива активной зоны; Рисунок 1.6 – Техническая схема стенда РАNDA

Проведенные экспериментальные исследования продемонстрировали выполнение проектных функций исследуемых систем при различных условиях. Были получены данные о работе пассивных систем безопасности при запуске, длительной работе, а также исследовалось взаимное влияние различных систем [55].

1.2.3 Выводы по параграфу 1.2

Как и в отношении РУ АР-1000, для обоснования проектных функций реакторной установки KERENA был проведено большое количество экспериментов на крупномасштабных интегральных стендах.

Вследствие того, что конструкция анализируемой реакторной установки, и в частности ее пассивные системы безопасности, отличаются от ВВЭР-1200 еще

больше, чем у AP-1000, то полученные результаты исследования также неприменимы для обоснования пассивных систем ВВЭР.

Однако, имеет смысл обратить внимание на ряд ключевых подходов. Вопервых, как и в случае с AP-1000, большое внимание уделено соответствию высотных характеристик прототипа и модели.

Во-вторых, оба стенда являются интегральными и способны полностью воспроизводить работу ПСБ реакторной установки.

В-третьих, в отличие от исследований в отношении AP-1000 на стендах NOKO и PANDA не стремились воспроизвести реакторное оборудование в абсолютно точном виде. Главным образом разработчиков обоих установок интересовала точность воспроизведения процессов, характерных для ПСБ. Так, например, имитатор защитной оболочки представлял собой вертикально ориентированную железную емкость, но при этом все исследуемые процессы охлаждения парогазовой смеси были воспроизведены с удовлетворительной точностью.

В-четвертых, в экспериментах не использовалась электрообогреваемая активная зона. Подача пара была внешней. Особенностью физики ядерного реактора является то, что после его полной остановки на величину парогенерации не влияют никакие внешние факторы, поэтому, если нет задачи исследования массопереноса в активной зоне, то нет разницы между внешней подачей пара и использованием электронагревателей.

В-пятых, в отличие от исследований в отношении ПСБ АР-1000, на стендах NOKO и PANDA проводились эксперименты с отдельными элементами ПСБ, отсеченными от основного стенда, для более детального изучения некоторых процессов.

Эти подходы также имеет смысл учитывать при разработке и проведении исследований в отношении пассивных систем реакторов с РУ ВВЭР.

Общим местом в анализируемых ранее работах является то, что работоспособность пассивных систем безопасности всех рассмотренных зарубежных проектов реакторов была обоснована на крупномасштабных, полновысотных экспериментальных установках. Несмотря на затратность такого метода, в рассмотренных работах утверждается, что только так возможно достаточно качественно обосновать эффективность и надежность работы ПСБ.

На сегодняшний день существует ряд отечественных проектов РУ, предусматривающих включение в свой состав пассивных систем. К основным из них необходимо отнести ВВЭР-640 и ВВЭР-1200 (с РУ В-491 и В-392М).

1.3 Реактор ВВЭР-640

ВВЭР-640 (РУ В-407) относится к ядерным реакторам средней мощности. Одной из важнейших его особенностей является включение в состав оборудования блока пассивных систем безопасности [59]. На рисунке 1.7 изображена принципиальная схема ПСБ ВВЭР-640.



1 – активная зона; 2 – реактор; 3 – уравнительная линия – АБР; 4 – топливный бассейн; 5 – система охлаждения ЗО, 6 – парогенератор, 7 –бак САОЗ;
8 – гидроемкость САОЗ; 9 – теплообменник СПОТ ГО; 10 – бак СПОТ;
11 – аварийный бассейн

Рисунок 1.7 – Схема пассивных систем охлаждения активной зоны РУ с ВВЭР-640

Проект является развитием технических решений, заложенных в конструкции реакторной установки ВВЭР-440 [57]. Важной задачей при разработке являлось гарантирование выполнения требований регулирующих органов в Российской Федерации и в странах – потенциальных заказчиках, по безопасности [58].

Проектный срок функционирования этих систем в случае аварии с разрывом ГЦТ и потерей всех источников электроснабжения составляет двадцать четыре часа. В их задачи входит поддержание необходимого уровня теплоносителя в активной зоне и удаление из-под объема защитной оболочки тепла, произведенного активной зоной. В этих системах для организации движения сред используется только конвекция и гидростатический напор [60].

В состав системы аварийного охлаждения активной зоны входят две группы по четыре емкости. В первую входят баки низкого давления, во вторую гидроемкости высокого давления.

Клапаны на линии, связывающей гидроемкости и реакторный объем автоматически, без управляющего сигнала, открываются после того как давление в ГЦТ снизится ниже 4 МПа [61].

Их главным элементом являются автономные клапана, функция которых состоит в разъединении первого контура реактора и элементов систем пассивной безопасности в течение нормальной эксплуатации [62].

После того как эти клапана откроются, пар начинает барботировать через бассейн отработанного топлива. Удаление части пара из объема первого контура влечет снижение давления в нем и после того как оно достигнет значения 300 кПа в действие вступают баки низкого давления. За счет гидростатического давления, из них начинает поступать борный раствор непосредственно в объем реактора. Суммарный объем раствора борной кислоты в воде с концентрацией 16 г/кг - 1440 м³.

Слив половины объема охлаждающей жидкости из баков САОЗ приведет к тому, что уровень теплоносителя превысит высотную отметку расположения «холодной» ветки главного циркуляционного трубопровода.

После того как гидроемкости и баки системы аварийного охлаждения реактора будут полностью осушены, уровень теплоносителя должен достичь высотной отметки размещения «горячей» ветки главного циркуляционного трубопровода. [58].

Для удаления тепла, выделенного в активной зоне из-за остаточных энерговыделений, используется пассивная система отвода тепла. В ее состав входят восемь баков с водой и восемь теплообменных аппаратов, размещенных внутри этих емкостей. Каждые два бака подсоединены к одному из четырех парогенераторов. В случае аварии система переводит ПГ в режим конденсации пара.

Тепловая энергия поступает из активной зоны и передается через трубный пучок среде второго контура. По промежуточной линии получившийся пар поступает в теплообменник системы, где отдает свою тепловую энергию воде, запас которой рассчитан на работу системы в течении одних суток.

В проекте также предусмотрена система пассивного отвода тепла от защитной оболочки (СПОТ ЗО). Она представляет собой короба, в которых размещены водохлаждаемые теплообменники. Эти короба размещены снаружи стального контеймента и их задача заключается в охлаждении защитной оболочки. Пар, частично поступающий через разрыв ГЦТ и барботирующий через аварийный бассейн конденсируется на поверхности контеймента и стекает вниз, обратно в аварийный бассейн. Система способна расхолаживать реактор в течение 24 часов, даже в отсутствии работы СПОТ ЗО [59].

Большая длительность аварийного процесса (до 24 ч) и высокая сложность теплогидравлических процессов, происходящих в оборудовании реакторной установки, также потребовала проведение экспериментальных исследований.

1.3.1 Стенд РАСТЕЬ

Установка PACTEL является полновысотной, объемно уменьшенной моделью отечественного реактора ВВЭР-440, с масштабным коэффициентом 1:305 [56]. Этот интегральный стенд предназначен для моделирования

теплогидравлических процессов, протекающих в случае возникновения аварийной ситуации, связной с утечкой теплоносителя. Все высотные отметки соответствуют натурным.

Принципиальная схема стенда изображена на рисунке 1.8.



- 1 имитатор реактора; 2 имитатор разрыва «горячей» ветки ГЦК; 3 имитатор аварийного бассейна; 4 уравнительная линия; 5 имитатор топливного бассейна; 6 «функционирующая» «горячая» ветка ГЦК;
- 7 «функционирующая» холодная ветка ГЦК; 8 имитатор разрыва «холодной» ветки ГЦК

Рисунок 1.8 – Схема исследовательской установки PACTEL

После определенной модернизации на стенде проводились эксперименты по моделированию аварийных процессов на ВВЭР-640. Основное различие между проектом данного реактора и стендом PACTEL заключаются в том, что парогенераторы ВВЭР-640 должны быть расположены выше по отношению к «горячей» ветке ГЦК [57, 58].

Активная зона стенда PACTEL состоит из 144 электрически нагреваемых стержней. Распределение этих стержней в объеме реактора очень близко к распределению твэлов в реакторе BBЭP-640 [59].
На данном стенде было проведено пять экспериментов с разрывами входного и выходного участка ГЦК [60, 61]. В результате опытов были определены такие параметры естественной циркуляции, как частота и амплитуда колебаний сред первого и второго контуров, вызванных фазовыми переходами при конденсации или испарении теплоносителя [63]. С теплогидравлической точки зрения оказалось, что процессы, происходящие в гидроаккумуляторах, важны для безопасности [64, 65].

По результатам двух экспериментов (один с разрывом «холодной» и один с разрывом «горячей» ветки ГЦК) был апробирован расчетный код [62]. Результаты сравнения экспериментальных и расчетных данных были признаны удовлетворительными [66].

1.3.2 Выводы по параграфу 1.3

ВВЭР-640 — это реактор отечественного дизайна, разработанный на базе тех же принципов, что и исследуемый в рамках настоящей работы ВВЭР-1200. Его устройство ближе к В-392М, чем у анализируемых ранее AP-1000 и КЕRENA. Несмотря на это, различия между этими реакторными установками достаточно большие, чтобы сделать невозможным использование данных, полученных в ходе экспериментов, для обоснования ПСБ ВВЭР-1200.

Анализ проведённых исследований позволил сделать следующие выводы. Во-первых, как и в рассмотренных ранее работах, высотные отметки использованных для моделирования аварийных процессов стендов соответствуют натурным.

Во-вторых, необходимо отметить, что стенд PACTEL имеет относительно малый масштаб (1:305), в несколько раз меньше, чем у других зарубежных установок.

В-третьих, хотя стенд является интегральным, на нем не воспроизведены все элементы ПСБ ВВЭР-640.

В-четвертых, в исследованиях большое внимание уделялось гидродинамике движения сред в оборудовании пассивных систем безопасности.

1.4 ВВЭР-1200 с реакторной установкой В-491

Реактор ВВЭР-1200 с реакторной установкой В-491 является продуктом эволюционного развития ВВЭР-1000. Действующие на настоящий момент блоки AC с этой реакторной установкой находятся на площадке Ленинградской АЭС-2 (ЛАЭС-2). Кроме улучшения технико-экономических характеристик, важной особенностью проекта AC с этой РУ является внедрение в него систем безопасности, работающих на пассивном принципе [68]. Их принципиальная схема отражена на рисунке 1.9. В таблице 1.5 представлены основные характеристики реакторной установки [69].



1 – активная зона; 2 – реактор; 3 – устройство локализации расплава;
 4 – парогенератор; 5 – бак аварийного отвода тепла; 6 – теплообменник аварийного расхолаживания, 7 – теплообменник СПОТ ЗО; 8 – гидроемкость;
 9 – бак запаса борированной воды; 10 – аварийная арматура на линии связи устройства локализации расплава и бака запаса борированной воды
 Рисунок 1.9 – Схема пассивных систем охлаждения активной зоны РУ с ВВЭР-1200 проекта В-491

В АС с РУ В-491 предусматриваются, так же как в реакторе ВВЭР-640, пассивные системы, используемые для отвода остаточных тепловыделений реактора (система отвода остаточного тепла от парогенераторов СПОТ ПГ) и охлаждения контейнмента (система отвода тепла от защитной оболочки СПОТ ЗО) [69].

В состав СПОТ ПГ входят четыре бака аварийного отвода тепла (БАОТ) и шестнадцать теплообменников аварийного расхолаживания (ТОАР). Последний представляет собой многорядный пучок труб без внешнего корпуса. Баки размещены снаружи защитной оболочки, их высотная отметка размещения больше чем у парогенератора.

Благодаря такому расположению, в случае необходимости продления срока работы СПОТ ПГ возможна подпитка баков из внешних источников [70].

Второй системой безопасности этого проекта является система защитной оболочки. СПОТ ЗО состоит расхолаживания ИЗ нескольких теплообменников. Эти теплообменники многорядных связаны с баками аварийного отвода тепла и располагаются в верхней части защитной оболочки.

В случае аварии с поступлением пара в контейнмент и ростом температуры в нем, осуществляется отвод тепла к теплообменникам-конденсаторам за счет процессов естественной конвекции и конденсации. При этом возникает естественная циркуляция теплоносителя в контуре СПОТ 3О и отвод тепла к БАОТ [71].

Как и в случае зарубежных проектов АЭС, подход отечественных ядерных регуляторов исключал возможность обоснования проектных функций пассивных систем безопасности без проведения комплексных экспериментов на крупномасштабных стендах.

1.4.1 Стенд СПОТ ПГ

Экспериментальная установка «СПОТ ПГ» относится к крупномасштабным, она была размещена на площадке ОАО «НПО ЦКТИ» [69]. Основные элементы установки и линии связи между ним отображены на рисунке 1.10 [68].

Стенд моделирует работу системы пассивного отвода тепла от парогенератора. Высотные отметки соответствовали натурным, масштабный

39

коэффициент составил 1:100. В результате работы были определены характеристики исследуемой системы, обоснована стабильность ее функционирования для различных условий аварии [69].



1 – электрический насос; 2 – внешние нагреватели; 3 – имитатор парогенератора;
 4 – имитатор теплообменника аварийного расхолаживания; 5 – имитатор бака аварийного отвода тепла
 Рисунок 1.10 – Принципиальная схема стенда СПОТ ПГ

Кроме того, был исследован ряд локальных теплогидравлических процессов, включая: особенности процесса парообразования на поверхности труб теплообменного аппарата СПОТ; процессы перемешивания в баке при отводе тепла от теплообменника, связанные со свободной конвекцией и кипением; конденсация пара в трубном пучке теплообменника.

Анализ полученных экспериментальных результатов показал, что после выхода на штатный режим осуществляется эффективное расхолаживание установки. Тепловая мощность, отводимая ТОАР на стадии разогрева водяного объема БАОТ имеет максимальное значение, а после закипания воды в баке плавно снижается за счет уменьшения подводимой мощности [70]. Результаты экспериментов обосновывают работоспособность и эффективность натурной установки СПОТ ПГ. Кроме того, анализ результатов стационарных экспериментов с моделированием процессов расхолаживания через «малый» и «большой» сбросные клапаны показывает, что заявленные проектные мощностные характеристики натурной СПОТ ПГ выполняются [71].

1.4.2 Стенд КМС

Крупномасштабный стенд КМС, размещенный на площадке НИТИ им. А. П. Александрова, использовался в программе обоснования пассивных систем ЛАЭС-2, и был задействован с целью исследования особенностей процессов массопереноса в защитной оболочке при работе СПОТ ЗО [72]. Высотные отметки соответствовали натурным значениям, масштабный коэффициент составил 1:14. Схема стенда изображена на рисунке 1.11.



1 – линия подачи гелия; 2 – теплообменник СПОТ ЗО; 3 – имитатор БАОТ; 4 – имитатор стальной защитной оболочки; 5 – имитатор бетонного контейнмента;
 6 – линия подачи пара
 Рисунок 1.11 – Общий вид стенда КМС

Геометрические характеристики позволили проводить эксперименты в условиях, максимально приближенных к натурным. Максимально допустимое давление при проведении экспериментов составляло 0,5 МПа, а максимальная температура среды внутри 30 – 150 °C [73].

Модели теплообменников-конденсаторов, входящих в состав стенда, представляют собой восемь конденсаторов, которые размещаются в районе сферической части модели оболочки на высоте 4,3 м над перекрытием, которое в свою очередь находится на высоте 20,1 м от пола [74].

Экспериментальные исследования, проведенные на стенде КМС с моделями теплообменников – конденсаторов СПОТ 3О, позволили определить тепловую мощность модели СПОТ 3О в широком диапазоне изменения термодинамических параметров внутри 3О и обеспечить верификацию сопряженных внутриконтурных и контейнментных кодов [75].

1.4.3 Стенд СПОТ ЗО

Объектом испытаний на стенде СПОТ ЗО в ОКБМ Африкантов являлся контур охлаждения СПОТ ЗО [73]. Схема экспериментальной установки изображена на рисунке 1.12.

Стенд в масштабе 1:1 имитирует натурный контур ЛАЭС-2: теплообменник, конденсатор, трубопроводы и паровыпускное устройство, расположенное в баке аварийного отвода тепла.

В ходе исследований была реализована обширная программа экспериментов, позволившая определить параметры работы СПОТ ЗО в широком диапазоне сценариев аварии [75].

Эксперименты показали, что во всех режимах функционирования контура охлаждения на мощности от исходного холодного состояния до разогрева бакаиспарителя наблюдалась устойчивая работа контура естественной циркуляции; отсутствовали гидроудары и значительные вибрации трубопроводов и конструкций [75].



 имитатор теплообменника СПОТ ПГ; 2 – имитатор ЗО;
 - конденсатосборник; 4 – доохладитель; 5 – питательный насос; 6 – сепаратор;
 7 – электропарогенератор; 8 – подвод неконденсирующихся газов;
 9 – пароприемное устройство; 10 – холодильник бака; 11 – имитатор БАОТ Рисунок 1.12 – Схема экспериментального стенда СПОТ ЗО

1.4.4 Выводы по параграфу 1.4

АС с РУ В-491 имеет конструкцию максимально близкую к таковой у АС с РУ В-392М. Тем не менее, применить полученные в ходе экспериментов результаты для обоснования ПСБ НВАЭС-2 невозможно, так как различия в конструкции этих систем слишком велики. В частности, в АС с РУ В-491 отсутствует система гидроёмкостей второй ступени, но есть система пассивного отвода тепла от защитной оболочки, которой нет в НВАЭС-2.

Из особенностей реализованных подходов к проведению экспериментов можно выделить следующее. Во-первых, как уже было отмечено ранее, высотные отметки размещения основного оборудования на экспериментальных установках соответствуют натурным.

Во-вторых, на всех трех стендах были применены разные масштабные коэффициенты, от 1:100 до 1:1.

В-третьих, на двух из трех стендов системы исследовались по отдельности, а не в комплексе. Тем не менее, полученных в итоге в ходе экспериментов данных оказалось достаточно для осуществления верификации расчетных кодов и обоснования работоспособности исследуемых пассивных систем безопасности [76].

В-четвертых, отдельное внимание было уделено экспериментам по изучению возможности продления времени работы этих систем.

1.5 ВВЭР-1200 с реакторной установкой В-392М

АЭС Одним проектов BB₃P. ИЗ первых отечественных с предусматривающих наличие пассивных систем безопасности, способных к автономному обеспечению отвода остаточных тепловыделений активной зоны реактора в течение суток в случае аварии с большой течью теплоносителя первого контура и полным отказом активной части САОЗ, стал проект АЭС-92. На его базе были разработаны проекты реакторов ВВЭР-1000 с РУ В-412 и ВВЭР-1200 с РУ В-392М, также включающие в себя пассивные системы безопасности. Они были сооружены и запущены в эксплуатацию на АЭС «Куданкулам» и Нововоронежской АЭС-2 соответственно. Основные характеристики реактора ВВЭР-1200 с РУ В-392М представлены в таблице 1.6 [77].

Название	Величина
Тепловая мощность реактора	3200 МВт
Номинальная электрическая мощность	1195 МВт
Номинальное давление первого контура	16,2 МПа
Температура теплоносителя на входе в активную зону	298,2 °C
Температура теплоносителя на выходе из активной зоны	328,6 °C
Средний подогрев в активной зоне	30,4°C
Количество циркуляционных петель	4
Срок эксплуатации, лет	60

Таблица 1.6 – Основные характеристики ВВЭР-1200 с РУ В-392М

Таким образом, реактор ВВЭР-1200 с РУ В-392М является одним из двух новых и действующих реакторных установок отечественных водо-водяных реакторов. Он по своему конструктивному исполнению является эволюционным по отношению к реакторам ВВЭР-1000 [78]. Схема размещения ПСБ реактора ВВЭР-1200 с реакторной установкой В-392М изображена на рисунке 1.13.



1 – активная зона; 2 – корпус реактора; 3 – разрыв ГЦК; 4 – парогенератор;
 5 – теплообменник системы СПОТ; 6 – система гидроемкостей второй ступени;
 7 – система гидроемкостей первой ступени
 Рисунок 1.13 – Пассивные системы безопасности ВВЭР – 1200 с реакторной установкой В-392М

Система гидроемкостей первой ступени (ГЕ САОЗ) состоит из четырех баков. Содержащийся в них суммарный запас раствора борной кислоты с концентрацией не менее 16 г/дм³ равен 200 м³. При этом, 10 м³ в верхней части каждого гидроаккумулятора заполнено азотом, который создает в емкости давление 5,9 МПа.

Принцип действия ГЕ САОЗ заключается в следующем. При снижении давления в первом контуре ниже порогового открываются два последовательно установленных обратных клапана, установленных на каждом трубопроводе, соединяющем гидроаккумуляторы САОЗ и реактор. Благодаря их открытию происходит поступление раствора борной кислоты в объем первого контура. После опорожнения, две быстродействующих запорных задвижки, также установленных на каждой сливной линии, отсекают систему от реактора, не позволяя азоту попадать в него [79].

В конструкции системы ГЕ САОЗ применен консервативный подход в отношении резервирования объема борной кислоты. Её запасено на двадцать пять процентов больше, чем требуется согласно проектным расчетам. Это означает, что полный отказ одного из гидроаккумуляторов не приведет к негативным последствиям, и система полностью выполнит свою функцию охлаждения активной зоны.

Задача системы гидроемкостей второй ступени (ГЕ СПЗАЗ) заключается в обеспечении восполнения потерь теплоносителя первого контура в течение первых суток после аварии.

В состав системы входят восемь гидроемкостей, сгруппированных в четыре группы по две в каждой. [80]. Суммарный объем раствора борной кислоты с концентрацией не менее 16 г/дм³ во всех емкостях 960 м³, при этом для обеспечения безопасности реактора в течении заданного времени необходимо только 720 м³. Таким образом, система полностью выполнит все свои проектные функции даже при отказе одной из групп емкостей.

Главная функция системы ГЕ-2 – это поддержание уровня теплоносителя в активной зоне при авариях с потерей теплоносителя. Благодаря этому система способна в течение до 8 часов осуществлять отвод остаточного энерговыделения с помощью с испарительного охлаждения активной зоны. При этом, система пассивного залива активной зоны из гидроемкостей второй ступени разработана для совместного функционирования с СПОТ. При условии штатной работы обеих систем длительность отвода тепловой энергии от а.з. и ее залива будет составлять двадцать четыре часа.

Система вступает в действие после падения давления в первом контуре ниже 1,5 МПа, обеспечивая подачу борного раствора в объем реактора. На

46

трубопроводах подвода пара в ГЕ СПАЗ размещены двойные обратные клапана, обеспечивающие автоматическое пассивное открытие трубопроводов в момент приведения системы в действие. В результате из «холодного» коллектора парогенератора в гидроемкости начинает поступать пар первого контура. Он оказывает давление на жидкость в сосудах практически равное таковому в реакторе. Так как баки ГЕ-2 расположены значительно выше активной зоны, то это создаёт гидростатический напор достаточный для того, чтобы обеспечить необходимый расход борной кислоты из баков СПЗАЗ в объем реактора [9].

В ходе функционирования ГЕ-2, расход из гидроемкостей снижается дискретно, в четыре этапа, благодаря отбору жидкости из ёмкостей по нескольким параллельным трубопроводам с дроссельными шайбами, расположенных на разных высотных отметках внутри баков.

Ступенчатая расходная характеристика выбрана для увеличения длительности работы системы ГЕ-2. Кривая снижения мощности остаточных энерговыделений имеет экспоненциальный вид. Иными словами, максимальный расход охлаждающей жидкости нужен только в самом начале аварии. Профилирование расходной характеристики ГЕ СПЗАЗ реализовано так, что позволяет обеспечить одновременно высокий расход в первый час аварии и достаточно большую общую длительность работы [81].

Кроме двух систем пассивного залива активной зоны, в проект АЭС с РУ В-392М также включена система пассивного отвода тепла.

В состав СПОТ входят четыре идентичных независимых канала. В каждый из них включены два воздухоохлаждаемых теплообменника, предназначенные для конденсации поступающего в них пара. Каждый из этих теплообменных аппаратов подсоединен к одному из парогенераторов с помощью паропровода и конденсатного тракта [39].

Принцип действия СПОТ заключается в следующем. В случае аварии парогенераторы переводятся в режим конденсации пара, поступающего в трубный пучок из активной зоны реактора. Образовавшийся в результате конденсат сливается обратно в реактор за счет разницы в высотном расположении

47

ПГ и активной зоны. Благодаря передачи тепла от первого контура происходит кипение среды второго контура.

Сгенерированный в результате описанного выше процесса пар поступает во вспомогательный контур, соединяющий теплообменник СПОТ и парогенератор. В теплообменном аппарате пар отдает свою энергию атмосферному воздуху и конденсируется. После этого, под действием гравитации он возвращается обратно во второй контур.

Воздух в теплообменник поступает за счет естественной конвекции. Нагревшись, воздух проходит через тяговые шахты и выходит в атмосферу через общий коллектор, оснащенный дефлектором [80].

Процессы, происходящие в объемах оборудования пассивных систем безопасности реактора ВВЭР-1200 с РУ-392М, исследовались в ходе значительного количества различных экспериментов на нескольких стендах [83-92].

1.5.1 Стенд ИСБ-ВВЭР

Одним из стендов, на которых исследовалось процессы, связанные с работой пассивных систем безопасности, является ИСБ-ВВЭР в АО «ЭНИЦ». Схема стенда показана на рисунке 1.14.

Экспериментальная установка является моделью реактора ВВЭР-1000 с объемно-мощностным масштабом 1:3000. Она оснащена двумя петлями первого контура, а также всем соответствующим оборудованием, которое размещено на натурных высотных отметках. [81]. Стенд предназначен для экспериментальных исследований комплекса теплогидравлических процессов при переходных и аварийных режимах, включая аварии с малой и средней течами теплоносителя, разрывом трубок ПГ, резким повышением мощности энерговыделения.

Одна петля с парогенератором моделирует аварийную петлю РУ. Другая петля стенда с тремя парогенераторами моделирует три исправные петли РУ. В обеих петлях установлены циркуляционные насосы.



1– имитатор реактора; 2 – опускная линия; 3 – циркуляционный насос;
 4 – имитатор парогенератора; 5 – верхняя камера смешения; 6 – имитатор компенсатора давления; 7 – подпитка от САОЗ; 8 – подпитка от ГЕ-1 Рисунок 1.14 – Схема стенда ИСБ-ВВЭР

В состав модели реактора включена электрообогреваемая модель активной зоны. Она состоит из девятнадцати имитаторов тепловыделяющих элементов. Предельная тепловая мощность – 1800 кВт [82].

В модель реактора ВВЭР-1000 также включены модели компенсатора давления, активных и пассивных систем безопасности.

На стенде был выполнен ряд исследований теплогидравлических процессов, происходящих в случае возникновения малой течи при различной ее локализации. В число основных процессов, изучаемых в ходе экспериментов, вошли: изменение давления первого контура, кризис теплоотдачи и разогрев имитаторов твэлов. Главным результатом стало верификация ряда расчетных отечественных и зарубежных кодов, включая HYDRA-IBRAE/H₂O (РФ) и ATHLET (Германия) [83].

1.5.2 Стенд ПСБ-ВВЭР

ПСБ-ВВЭР – это крупномасштабная интегральная модель ВВЭР, созданная в АО «ЭНИЦ», способная имитировать работу как реакторной установки В-320 (ВВЭР -1000), так и В-392М (ВВЭР-1200) [84]. Схема стенда представлена на рисунке 1.15.



1- имитатор реактора; 2 – опускной участок; 3 – байпасная линия; 4 – имитаторы ГЦН №1 и №2; 5 – имитаторы ГЕ-2 №1 и №2; 6 – имитаторы СПОТ №1 и №2; 7 – имитаторы парогенераторов №1 и №2; 8 – имитаторы парогенераторов
№3 и №4; 9 – имитаторы СПОТ №3 и №4; 10 – имитатор компенсатора давления; 11 – ГЕ-2 №1 и №2№3 и №4; 12 – имитаторы ГЦН №3 и №4 Рисунок 1.15 – Схема стенда ПСБ-ВВЭР

Масштаб установки по объему и мощности теплогенерации – 1:300. Все оборудование размещено на натурных высотных отметках.

Реакторная установка стенда оснащена электрообогреваемой моделью активной зоны с максимальной мощностью 10 МВт. В ее состав входят сто шестьдесят восемь имитаторов тепловыделяющих элементов [85].

В состав стенда входят пассивные и активные системы безопасности.

Стенд ПСБ-ВВЭР оснащен специальными системами, позволяющими увеличивать реалистичность моделируемых процессов, имеющих место в РУ ВВЭР при переходных и аварийных режимах, а также исследовать режимы с управлением авариями.

Для исследования максимальных проектных аварий (МПА) смонтирована система организации двухсторонней течи из «горячего» и «холодного» трубопроводов с системой измерения расхода вытекающего теплоносителя [85].

На ПСБ-ВВЭР проведено значительное количество экспериментов, направленных на моделирование различных сценариев аварий, возможных в ВВЭР-1200. Кроме того, было проведено девять экспериментов с моделированием аварий трех разных типов при работе пассивных систем безопасности и наложении полной потери источников переменного тока для обоснования работоспособности ПСБ ВВЭР-ТОИ.

Проведенные эксперименты на стенде ПСБ и расчетный анализ полученных результатов показали, что пассивные системы ГЕ-2 и СПОТ при одновременной работе обеспечивают длительный (не менее суток) отвод тепла при кипящем режиме охлаждения реактора [84].

1.5.3 Стенд ГЕ-2М

Стенд ГЕ-2М, сооруженный в АО «ГНЦ РФ-ФЭИ», предназначен для исследования процессов, влияющих на проектные характеристики системы ГЕ СПЗАЗ [86]. На рисунке 1.16 представлена технологическая схема стенда.

Масштаб стенда по высотным отметкам составляет 1:1, объем гидроемкостей СПЗАЗ был в 12 раз меньше натурных.

Для обеспечения проектного ступенчатого изменения расхода в напорные баки на разных уровнях введены четыре трубопровода диаметром 57х3,5 мм с запорной арматурой и дроссельными шайбами. Кроме того, гидроемкости были оснащены внутрикорпусными устройствами: паровым коллектором и дырчатым листом с пористостью 7 % [9].



Рисунок 1.16 – Технологическая схема стенда ГЕ-2М

Ключевой измеряемой величиной были расходы воды как в каждом отдельном профилирующем трубопроводе, так общий расход из моделей гидроемкостей. Измерение выполнялось с помощью приборов Метран-100-ДД, относящихся датчикам дифференциального давления, путём к контроля перепадов давления на дроссельных шайбах, установленных В каждом трубопроводе. Предельная погрешность измерения расхода жидкости не превысила 4%. Также с помощью контрольно-измерительных приборов стенда измеряли давление в моделях гидроемкостей и температуры в их объемах.

Эксперименты проводились при параметрах, полностью равных натурным. Давление насыщенного пара, подаваемого в верхнюю часть моделей гидроемкостей, было равно 1,5 МПа. Результаты опытов показали, что расходные характеристики истечения жидкости из гидроёмкостей соответствуют проектным с необходимым запасом. [87].

1.5.4 Стенд СПОТ

Стенд СПОТ сооружен в АО ОКБ «Гидропресс» [88]. В его состав входит половина (от натурного, симметричного по конструкции) теплообменника – конденсатора СПОТ, регулирующее устройство и воздушные (выходной и входной) затворы. Схема стенда изображена на рисунке 1.17.



1 – входной участок; 2 – входной воздушный затвор; 3 – короб имитатора теплообменника СПОТ; 4 – имитатор теплообменника СПОТ; 5 – верхний воздушный затвор; 6 – выходной участок
 Рисунок 1.17 – Технологическая схема стенда СПОТ

Тепловые испытания были проведены при летних и зимних условиях работы стенда и соответствующих метеорологических факторах атмосферного воздуха: пылесодержании и влажности. Был охвачен диапазон температуры воздуха от плюс 30,4 до минус 17,3 °C.

Результаты стендовых испытаний подтвердили проектные тепловые характеристики теплообменников системы. Определено, что разработанное оборудование обеспечивает проектную работу и мощность СПОТ при максимальной расчетной температуре 50 °C. Разработанное регулирующее устройство работает проектным образом и не вызывает параметрической неустойчивости в системе. Динамические характеристики СПОТ удовлетворяют значениям, заложенным в проектные расчеты [88].

Выяснено, что количество неконденсирующегося газа, способного накопиться в трубчатке теплообменника при водно-химическом режиме второго контура РУ и длительной работе СПОТ в режиме горячего ожидания, не может оказать заметного влияния на тепловую мощность системы при включении СПОТ в работу [89].

1.5.5 Выводы по параграфу 1.5

На описанных выше стендах в результате проведенных исследований был получен значительный массив данных. Тем не менее, проведенных исследований недостаточно для обоснования работоспособности пассивных систем. На интегральных стендах ПСБ-ВВЭР и ИСБ-ВВЭР исследовалась в основном гидравлика первого контура в аварийной ситуации, процесс истечения теплоносителя через сечения разрыва, изменение температуры имитаторов твэл и т.д. На стенде СПОТ показана работоспособность воздушного теплообменника, что недостаточно для обоснования проектных характеристик данной системы в целом. На стенде ГЕ-2М обоснована работоспособность только одной системы пассивного залива ГЕ СПЗАЗ.

Таким образом, все вышеописанные стенды служили для исследования отдельных процессов в конкретном оборудовании реакторной установки. Однако мировой опыт показывает необходимость проведения комплексных исследований на крупномасштабном стенде. Для решения этой задачи стенд ГЕ-2М в АО «ГНЦ РФ - ФЭИ» был поэтапно модернизирован, путем добавления в его состав сначала модели парогенератора, а затем имитатора защитной оболочки. После каждого из этапов модернизаций, на стенде были проведены несколько серий экспериментов.

54

1.4 Выводы по главе 1

1. Одним из важнейших элементов оборудования, связанного с системой пассивного отвода тепла АС с РУ В-392М, является парогенератор. В случае аварии с потерей теплоносителя в его трубный пучок будут поступать неконденсирующиеся газы. Проведенный обзор литературных источников позволил установить следующее: даже незначительное количество газов в паре может значительно снизить эффективность работы ПГ. В настоящий момент эта проблема достаточно широко изучена, но в существующих работах отсутствует учет ряда критических особенностей работы парогенератора ВВЭР в аварийном режиме, что ставит задачу о проведении экспериментальных исследований.

2. Каждая из рассмотренных реакторных установок поколения 3+ имеет в своем составе пассивные системы безопасности. Все они прошли процедуру обоснования своих проектных характеристик на крупномасштабных интегральных стендах.

3. Обзор исследований выполненных для других проектов АЭС показал, что полученные в их ходе данные не применимы для обоснования работоспособности ПСБ атомной станции с реакторной установкой В-392М. Однако, в то же время были выявлены подходы, общие для всех проведенных работ. В частности, отмечено, что за единственным исключением, на всех исследовательских установках высотные отметки размещения оборудования соответствуют натурным. Также выявлено, что в мировой практике принято проведение комплексных испытаний систем безопасности, а не их элементов поотдельности.

4. Определено, что в отношении пассивных систем безопасности HBAЭC-2 (BBЭP-1200 с B-392M) были проведены исследования, в которых был получен большой массив релевантных данных. Однако, анализ данных экспериментов показал их недостаточность для определения влияния неконденсирующихся газов на работу парогенератора BBЭP в аварийном конденсационном режиме и подтверждения эффективности отвода от него тепла с помощью СПОТ, что ставит задачу по проведению дополнительных экспериментальных исследований.

ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ГЕ-2M С МОДЕЛЬЮ ПАРОГЕНЕРАТОРА

2.1 Состав и основные системы экспериментальной установки ГЕ-2М с моделью парогенератора

Стенд ГЕ-2М - это сооружённая в АО «ГНЦ РФ-ФЭИ» экспериментальная установка, предназначенная для исследования теплофизических процессов, характерных для работы парогенератора ВВЭР и системы гидроемкостей второй ступени в случае аварии [90]. В ходе экспериментов на ней последовательно изучались различные аспекты работы пассивных систем безопасности. Сначала была изучена работа ГЕ СПЗАЗ ВВЭР-1200 с РУ В-392М. После завершения данных экспериментов стенд был модернизирован. В его состав были добавлены модель парогенератора и имитатор теплообменника СПОТ. Благодаря этому он стал крупномасштабной установкой, имеющей в своем составе основные элементы ПСБ [12].

Стенд ГЕ-2М предназначен для функционирования при следующих параметрах: максимальное рабочее давление, ($P_{\text{макс}}$) – 0,5 МПа; в перечень рабочих тел вошли вода, пар и смесь пара и неконденсирующихся газов; диапазон температур составляет от 20 °C до 152 °C. На рисунке 2.1 изображена схема исследовательской установки. На рисунке 2.2. показан общий вид главных элементов стенда и связующих трубопроводов [91].

Ключевые характеристики основного оборудования:

- объём модели $\Pi\Gamma$ – 7 м³;

- объём бака-аккумулятора пара Б₃ 16 м³;
- максимальная мощность модели ПГ 0,195 МВт;
- мощность теплообменника имитатора СПОТ 50-195 кВт.





смеси; 5 – имитатор теплообменника СПОТ; 6 – система подачи неконденсирующихся газов; 7 – система поддержания 1 – бак – аккумулятор пара; 2 – система сбора конденсата; 3 – модель парогенератора; 4 – система отвода парогазовой



Рисунок 2.2 – Общий вид стенда ГЕ-2М

На рисунке 2.3 показана модель парогенератора, размещенная на стенде. Технические характеристики модели ПГ:

- диаметр 1,4 м;
- объем межтрубного пространства 6,92 м³;
- количество теплообменных труб 248 шт.;
- диаметр теплообменных труб 16,0х1,5 мм;
- длина теплообменной трубки 10,19 м;
- рабочее давление 0,5 МПа;
- рабочая температура до 152 °C;
- мощность до 0,195 MBт.



1 – «горячий» коллектор; 2 – трубный пучок; 3 – крышка; 4 – корпус; 5 – «холодный» коллектор; 6 – линии отвода ПГС Рисунок 2.3 – Модель парогенератора стенда

На рисунке 2.4 изображен бак – аккумулятор пара Б₃ объемом 16 м³, предназначенный для приема жидкости, образовавшейся в результате конденсации пара в ПГ.



Рисунок 2.4 – Бак-аккумулятор пара Б₃

Имитатор теплообменного аппарата СПОТ показан на рисунке 2.5.



Рисунок 2.5 – Имитатор теплообменника СПОТ

В имитаторе теплообменника СПОТ поступающая вместе с паром из парогенератора тепловая энергия передается технической воде и отводится за пределы исследовательской установки.

Технические характеристики модели:

- диаметр 0,159 м;
- − рабочее давление 2,5 МПа;
- рабочая температура 220 °C.

2.2 Вспомогательные системы экспериментальной установки ГЕ-2М

Как указано выше, в состав стенда был включен ряд вспомогательных систем, задача которых заключалась в поддержании в основном оборудовании необходимых параметров.

Так как в ходе экспериментов на стенде движение рабочих сред в контурах осуществлялось за счет естественной циркуляции, то изменение параметров среды в одном контуре оказывало влияние на второй. Поэтому для поддержания постоянства параметров на экспериментальной установке непосредственно регулировалось только давление первого контура. Основным компонентом подсистемы поддержания давления являлся теплообменник, конденсирующий часть пара, поступающего от ТЭЦ ФЭИ. В процессе эксплуатации стенда вентиля B40 и B43 на линии между «горячим» коллектором модели парогенератора и баком-аккумулятором остаются открытым, благодаря чему В основном оборудовании поддерживается равное давление. Часть пара, поступающего в бак Б₃, отводится в теплообменник-конденсатор системы поддержания давления. Регулировка расхода конденсирующегося пара И давления В контуре осуществляется изменением положения вентиля В75 на линии, соединяющей теплообменник бак-аккумулятор Положение И пара. этого вентиля устанавливается так, чтобы значение давления на входе в модель парогенератора в ходе всего опыта поддерживалось около заданного значения, установленного в методике эксперимента, с точностью ± 6 кПа.

Ключевым параметром парогенератора, работающего в аварийном режиме, является его мощность. Так как пар в трубный пучок поступает в состоянии насыщения, то эту величину можно измерять по количеству образовывающегося конденсата в единицу времени. Для этой цели «горячий» и «холодный» коллекторы модели ПГ были оснащены подсистемой измерения расхода конденсата. Она включала в себя два бака объемом 0,0068 и 0,008 м³, каждый из которых был оснащен уровнемером, соединительными трубопроводами и управляющей арматурой. Вторичной функцией системы было определение тепловых потерь стенда.

В ходе аварийной ситуации в натурной реакторной установке происходит генерация неконденсирующихся газов, которые вместе с паром поступают в объем парогенератора. На стенде ГЕ-2М этот процесс имитируется благодаря наличию система подачи неконденсирующихся газов (СПНГ). В паропровод, питающий экспериментальную установку паром, перед его соединением со стендом вварены два патрубка, по которым поступает два различных газа. Один из них легче пара (гелий), другой – тяжелее (азот). Газ подается из баллонов, соединённых с патрубком через редуктор. В ходе экспериментов через эти патрубки осуществляется подача газов в пар, где они смешиваются и в объем стенда поступает уже парогазовая смесь с заданной концентрацией газов в нем.

Расход газов определялся по скорости снижения показаний образцового манометра, установленного на линии подачи, а также за счет определения разницы давлений до и после протарированного игольчатого вентиля патрубка СПНГ с помощью измерительного прибора Метран-100-ДД.

После начала подачи газов в объем первого контура, они поступают в трубный пучок модели парогенератора, что вызывает снижение её мощности. Так как расход пара от ТЭЦ ФЭИ останется неизменным, то давление в первом контуре неизбежно начнет нарастать. Чтобы избежать этого, путем изменения положения вентиля В75 на отводном трубопроводе системы регулирования

62

давления увеличивается расход на конденсатор, и «избыточная» часть пара конденсируется в нем.

Этот способ позволяет сохранить массовую концентрацию газов в паре неизменной, так как их смешение происходит до участка, с которого осуществляется отбор системой поддержания давления.

В случае аварии мощность парогенератора поддерживается благодаря наличию линии связи между его «холодным» коллектором и емкостями системы ГЕ-2. При этом происходит отвод смеси пара и газов из ПГ по мере опустошения емкостей. На стенде ГЕ-2М с помощью подсистемы отвода парогазовой смеси также имитируется этот процесс. К «холодному» коллектору модели ПГ приварен патрубок, соединенный с конденсатором, который в свою очередь подключен к вспомогательной емкости. Перед входом конденсатор В установлена регулировочная арматура. До этого вентиля линия отвода ПГС обогревается электрообогревателями для гарантии отсутствия конденсации в ней паровой среды и тем самым внесения дополнительной погрешности в измерение Подсистема конденсационной мошности. также оснащена устройством жидкой и газовой фаз конденсата, разделения a также уровнемером, позволяющим измерять скорость заполнения вспомогательной емкости. Точка отбора ПГС расположена ниже уровня трубного пучка модели парогенератора.

2.3 Система измерения основных параметров стенда

Размещение элементов КИПиА на стенде показано на рисунке 2.6.

В ходе экспериментов измерялись следующие параметры:

– давление пара на входе на стенд и на входе в модель парогенератора, на выходе из модели ПГ во второй контур, на входе имитатора теплообменника СПОТ, а также давления сред во вспомогательных подсистемах. Измерение осуществлялось с помощью размещенных по стенду датчиков давления «Метран – 100 ДИ»;





– разница давлений между контурами, перед и после регулировочного вентиля подсистемы отвода ПГС из модели парогенератора, а также перепад давления на трубопроводе подсистемы ввода неконденсирующихся газов Измерение осуществлялось с помощью размещенных по стенду приборов «Метран – 100 ДД»;

– температуры в первом, втором и техническом контурах. Также термопары были размещены в объеме модели парогенератора на его трубном пучке, корпусе и коллекторах. В экспериментах применялись кабельные термопары из термопарного кабеля типа хромель-копель (КТМС), диаметром 1,0 – 1,5 мм. Диаметр спая дифференциальных термопар был равен 1,5 мм. Также измерялись перепады температур с помощью дифференциальных термопар;

 – расходы пара в первом контуре и воды промежуточном контуре. Измерение расходов пара осуществлялось с помощью вихревых счетчиков пара «Метран-332». Измерение расходов воды проводилось с использованием электромагнитных расходомеров «Метран-370»;

– уровень воды в модели парогенератора, вспомогательном баке, в горизонтальных участках трубопровода, по которым сливался конденсат из парогенератора, в мерных устройствах. Измерение осуществлялось гидростатическим методом с помощью дифманометра типа Метран-100 ДД.

В состав измерительной системы входят персональный компьютер, крейтовая система LTC фирмы LCARD, состоящая из крейта LTC-27, крейт-контроллера LC-014, модулей LC-227K, LC-026K и LC-111. Система LTC подключается к компьютеру через принтерный порт.

Как правило, погрешность измерения величин состоит из инструментальной и методических погрешности и погрешности метода [93]. Инструментальная погрешность зависит от точности средства измерения и погрешности отсчета. Последняя возникает из-за ошибок при снятии показаний датчиков. На стенде параметры регистрировались исключительно системой сбора данных, поэтому на погрешности отсчета влияла только точность модулей этой системы.

Для снижения влияния методической составляющей погрешности был предпринят ряд мер. Одним из них было дублирование измерение некоторых из наиболее важных параметров. В частности, расход пара осуществлялся одновременно с помощью вихревого счетчика пара и измерением расхода конденсата в мерный тарированный бак. Указанные ранее величины не отличались друг от друга более чем на 4%, что говорит об удовлетворительной точности проводимых измерений.

Основные элементы стенда оснащались блоком последовательно размещенных термопар, размещенных на относительно небольшом расстоянии друг от друга. В случае, если бы показания какой-либо термопары в заметной мере отличались от остальных, то можно было бы сделать вывод о неисправности измерительного прибора или некорректности методики проводимых измерений. Однако, ни в одном из опытов этого не наблюдалось.

Кроме того, все установленные на стенде средства измерения прошли метрологическую аттестацию или градуировку, выполняемую с помощью аттестованных средств измерения. Условия их эксплуатация полностью попадали в указанный в паспорте каждого из используемых средств измерений диапазон параметров окружающей среды.

В ходе экспериментов каждое сочетание параметров аварийного процесса исследовалось только один раз. Вследствие этого, численно оценить методическую составляющую погрешности измерения представляется достаточно сложной задачей. Тем не менее, сравнение результатов экспериментов со схожими начальными параметрами позволяет сделает вывод о воспроизводимости результатов.

Таким образом, оценка погрешности измерений должна основываться на точности датчиков и системы сбора данных. В таблице 2.1 отражена полная погрешность для используемых на стенде средств измерения.

Измерение времени осуществлялось встроенным приложением операционной системы персонального компьютера, включенного в состав системы сбора данных. Приведенная погрешность пренебрежимо мала и составляет 10⁻⁵ %. Кроме того, на стенде было проведено точное измерение диаметров мерных баков с использованием штангенциркуля ШЦ-3-500. Заявленная производителем погрешность измерения - 0,01 %. Доверительный интервал используемых на стенде датчиков равен 0,95.

		Погрешность	Полная
Датчик/ модуль	Погрешность	модуля системы	погрешность
системы измерения	датчика, %	сбора данных,	канала измерения,
		%	%
Датчики давления			
«Метран – 100 ДИ»	0,25	0,1	0,3
(давление, Па)/ LC111			
Дифманометр			
«Метран-100 ДД»	0,25	0,1	0,3
(давление, Па)/ LC111			
Вихревой счетчик			
пара «Метран-332»	15		15
(объемный расход,	1,3	-	1,3
м ³ /с)			
Электромагнитноый			
расходомер			
«Метран-370»	0.5	0.1	0.51
(объемный расход	0,5	0,1	0,31
жидкой среды, м ³ /с) /			
LC111			
Термопары ХК,			
термопарный кабель	0,1	0,8	0,81
типа КТМС / LC227			

Таблица 2.1 – Погрешности средств измерений стенда

Часть параметров измерялась напрямую. В их число вошли температуры и давления паровой, парогазовой и жидких сред на стенде. Погрешность их измерения равна погрешности датчиков, которыми эти величины измерялись.

Другая часть параметров определялась косвенным образом. К ним относятся уровень жидкости в вертикальном участке трубопровода стенда, массовый расход пара, определяемый с помощью вихревого расходомера, массовый расход пара, определяемый с помощью мерной емкости, массовый расход воды и концентрации неконденсирующихся газов в паре.

Уровень в вертикальном участке трубы определялось с помощью измерения давления столба жидкости. Как известно, гидростатическое давление можно рассчитать следующим образом:

$$P_{cm} = \rho \cdot g \cdot h_{cm},\tag{1}$$

где P_{ct} – гидростатическое давление столба жидкости, g – ускорение свободного падения, h_{ct} – высота столба жидкости, ρ – плотность среды. Следовательно, уровень воды в трубопроводах можно рассчитать по формуле:

$$h_{cm} = \frac{P_{cm}}{\rho \cdot g},\tag{2}$$

Погрешность косвенного измерения может быть определена благодаря следующему подходу [93]:

$$\Delta a = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\partial a}{\partial b} \cdot \Delta b_i\right)^2},\tag{3}$$

где *а* – измеряемая величина, *b*_i – параметр, используемый для расчета *а*.

Таким образом, погрешность h_{ct} может быть определена как:

$$\Delta h_{cm} = \sqrt{\left(\frac{\partial h_{cm}}{\partial P_{cm}} \cdot \Delta P_{cm}\right)^2 + \left(\frac{\partial h_{cm}}{\partial \rho} \cdot \Delta \rho\right)^2}.$$
(4)

Следовательно, $\Delta h_{\rm ct}$ можно вычислить как:

$$\Delta h_{cm} = \sqrt{\left(\frac{\Delta P_{cm}}{\rho \cdot g}\right)^2 + \left(-\frac{P_{cm} \cdot \Delta \rho}{\rho^2 \cdot g}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{\delta P_{cm} \cdot P_{cm}}{\rho \cdot g}\right)^2 + \left(-\frac{P_{cm} \cdot \delta \rho \cdot \rho}{\rho^2 \cdot g}\right)^2}$$

$$= \frac{P_{cm}}{\rho \cdot g} \sqrt{\delta P_{cm}^2 + \delta \rho^2}$$
(5)

Плотность воды определялась по таблице термодинамических свойств воды по значениям давления и температуры. Следовательно:

$$\Delta h_{cm} = \frac{P_{cm}}{\rho \cdot g} \sqrt{\delta P_{cm}^{2} + \sqrt{\left(\delta P^{2} + \delta t^{2}\right)}} = \frac{P_{cm}}{\rho \cdot g} \sqrt{\delta P_{cm}^{2} + \delta P^{2} + \delta t^{2}};$$

$$\Delta h_{cm} = h_{cm} \cdot \delta h_{cm} \Longrightarrow \delta h_{cm} = \sqrt{\delta P_{cm}^{2} + \delta P^{2} + \delta t^{2}}.$$
(6)

Измерения массового расхода воды и пара определялись по одинаковым формулам:

$$\mathbf{G} = \mathbf{Q} \cdot \boldsymbol{\rho},\tag{7}$$

где *G* – массовый расход среды, *Q* – объемный расход среды. Пользуясь подходом, изложенным выше, получим:

$$\Delta G = \sqrt{\left(\frac{\partial G}{\partial Q} \cdot \Delta Q\right)^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial \rho} \cdot \Delta \rho\right)^2} = Q \cdot \rho \cdot \sqrt{\delta Q^2 + \delta P^2 + \delta t^2},$$

$$\delta G = \sqrt{\delta Q^2 + \delta P^2 + \delta t^2}.$$
(8)

Измерение массовой концентрации газа в паре осуществлялось следующим образом:

$$C = \frac{G_2}{G_n}; G_2 = \frac{\rho_2 \cdot V}{\tau}, \tag{9}$$

где С - массовая концентрация газов в паре, G_{Γ} – массовый расход газов, G_{Π} – массовый расход пара, ρ_{Γ} – плотность газов в баллоне, объем баллона с газом, τ – время. Опираясь на ранее изложенный подход, можно определить погрешность измерения концентрации газа в паре как:

$$\Delta C = \sqrt{\left(\frac{\partial C}{\partial G_n} \cdot \Delta G_n\right)^2 + \left(\frac{\partial C}{\partial \rho_z} \cdot \Delta \rho_z\right)^2 + \left(\frac{\partial C}{\partial \tau} \cdot \Delta \tau\right)^2} = \sqrt{\left(-\frac{V \cdot \Delta G_n}{\tau \cdot G_n^2}\right)^2 + \left(\frac{V \cdot \Delta \rho_z}{\tau \cdot G_n}\right)^2 + \left(-\frac{V \cdot \Delta \tau}{\tau^2 \cdot G_n}\right)^2} \quad (10)$$
$$= \frac{P_z \cdot V}{Gn \cdot V} \cdot \sqrt{\delta Q^2 + \delta P^2 + \delta t^2 + \delta \tau^2}; \quad \delta C = \sqrt{\delta Q^2 + \delta P^2 + \delta t^2 + \delta \tau^2}.$$

Также на стенде осуществлялось дублирование измерения некоторых расходов с помощью определения скорости заполнения мерных баков. Величина массового расхода определялась по формуле:

$$G_m = \frac{\rho \cdot V_3}{\tau} = \frac{\rho \cdot \pi \cdot d^2 \cdot \Delta h_3}{4 \cdot \tau} = \frac{\rho \cdot \pi \cdot d^2 \cdot \Delta P}{\rho \cdot 4 \cdot \tau \cdot g},$$
(11)

где $G_{\rm m}$ – массовый расход, определяемый по скорости заполнения мерного бака, d – диаметр бака, ΔP – показания дифнамометра, Δh_3 – высота столба жидкости бака, V_3 – заполненный объем бака. Погрешность измерения $G_{\rm m}$ может быть определена с помощью формулы (3):

$$\Delta G_m = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot \Delta P}{4 \cdot \tau \cdot g} \cdot \sqrt{\delta (\Delta P)^2 + \delta \tau^2 + 4\delta d^2}$$

$$\delta G_m = \sqrt{\delta (\Delta P)^2 + \delta \tau^2 + 4\delta d^2}.$$
(12)

В таблице 2.2 представлены погрешности измерений величин, определяемых косвенным образом, рассчитанных по формулам 6, 8, 10, 12.

Величина	Рассчитанная погрешность, %	Номер формулы,
Уровень жидкости в		
вертикальном участке	0,91	6
трубопровода		
Расход пара	1,72	8
Расход, определяемый		
с помощью мерных	0,39	12
баков		
Расход воды	1,01	8
Массовая		
концентрация газов в	1,73	10
паре		

Таблица 2.2 – Погрешности величин, измеряемых косвенным образом

2.4 Соответствие процессов, происходящих на стенде, натурным

Высотные отметки размещения оборудования на стенде ГЕ-2М соответствовали проектным. Длина труб парогенератора, их диаметр, высота и

геометрические характеристики трубного пучка соответствуют натурным величинам.

Массовое содержание неконденсирующихся газов в первом контуре было определено на основании проведенных в АО ОКБ «Гидропресс» теоретическорасчетных исследований аварии, связанной с разрывом ГЦК.

Параметры, не зависящие от происходящих в оборудовании первого контура и систем пассивной безопасности процессов (такие как расходы пара на стенд и парогазовой смеси в системе отвода ПГС), соответствовали натурным, с учетом масштабного коэффициента стенда.

Отклонение значений мощности имитатора теплообменника СПОТ стенда не превысило пяти процентов от мощности натурного теплообменного аппарата в рабочем диапазоне параметров.

2.5 Методика выполнения экспериментов

Проведенные эксперименты были разбиты на три серии, в каждой из которых исследовались процессы конденсации пара в присутствии неконденсирующихся газов при различных (в том числе консервативных) сценариях аварии.

В первой серии опытов исследовалась работа парогенератора в аварийном конденсационном режиме при параметрах, равных натурным для различных моментов аварии. Во второй серии экспериментов изучалась роль обратных отрицательных связей между парогенератором и теплообменником СПОТ. В третьей серии анализировалась возможность продления работоспособности ПГ после прекращения сдувки неконденсирующихся газов из «холодного» коллектора.

На степень снижения мощности парогенератора вследствие «отравления» его трубного пучка влияет объем накопленных неконденсирующихся газов. В то же время, в ходе экспериментов выдерживалась заданная массовая доля газов в паре. Так как плотность у азота и гелия отличаются, то проводить прямой

сравнительный анализ экспериментов с разными сочетаниями концентраций этих газов достаточно затруднительно. Для устранения этой проблемы был введен параметр C_3 , который получил название «эквивалентная» концентрация. Она определяется как сумма концентраций азота и гелия, умноженная на безразмерную константу ($C_3 = C_{N_2} + c \cdot C_{He}$). Последняя учитывает мольное соотношение используемых в опытах газов и равна семи.

Методика осуществленных на стенде экспериментов была следующей. Прежде всего, элементы оборудования исследовательской установки прогревались чистым паром до выхода на заданные параметры. После установления стационарного состояния и достижения, заданных методикой проведения опытов параметров прогрев прекращался. В итоге, перед началом проведения эксперимента, должно было установиться следующее состояние стенда: давление среды первого контура P_1 выше, чем второго (P_2); температура пара в объеме стенда строго равна температуре насыщения; отсутствие скольколибо значимой стратификации температур в объеме ПГ. Кроме того, должна отсутствовать неустойчивость параметров сред первого и второго контуров, все показания измерительной аппаратуры должны были быть стабильными.

В процессе выполнения процедуры прогрева стенда также осуществлялся отвод воздуха из объема трубопроводов и оборудования установки.

После окончания подготовительных мероприятий с помошью регулирования технической воды устанавливалась необходимая расхода имитатора теплообменника СПОТ мощность И, следовательно, модели парогенератора.

В этот момент начиналась запись измеряемых параметров на электронный носитель (жесткий диск компьютера).

В первой серии опытов исследовалось изменение конденсационной мощности парогенератора при различных комбинациях массовых концентраций неконденсирующихся газов. Для этого в пар, поступающий от ТЭЦ ФЭИ, подмешивалась смесь азота и гелия. Газы, поступившие в трубный пучок ПГ, вызывали снижение его мощности. Одновременно открывался вентиль в системе
удаления парогазовой смеси из объема трубного пучка для установления заданного методикой расхода сдувки. Путем регулирования запорной арматуры в системе поддержания давления, часть пара перенаправлялась во вспомогательной конденсатор. Вследствие этих мероприятий стенд переходил в новый стационарный режим работы на парогазовой смеси.

Концентрация неконденсирующихся газов в паре, поступающем в «горячий» коллектор парогенератора и расход отвода ПГС из «холодного» коллектора, были равны натурным с учетом масштабного коэффициента на разных стадиях аварии в зависимости от методики эксперимента. Наиболее консервативным был опыт, в котором исследовались последствия гипотетического попадания азота из гидроемкостей САОЗ.

Во второй серии экспериментов осуществлялось выявление обратных связей между различными процессами и степень их влияния на работу парогенератора. Для этого реализовывались четыре стационарных состояния стенда. Вначале определялась мощность парогенератора при подаче в него пара без неконденсирующихся газов. Затем, путем выполнения тех же действий, что и в первой серии опытов, реализовывался режим конденсации парогазовой смеси. Стенд выдерживался в этом состоянии некоторое время.

Далее, путем регулирования расхода технической воды снижалась мощность имитатора теплообменника СПОТ. Вследствие этого уменьшалось и давление второго контура. Это действие продолжалось до момента, когда разница давлений между контурами станет равной перепаду давлений при работе в режиме конденсации пара. В этом режиме мощность ПГ поддерживалась только за счет сдувки ПГС из «холодного» коллектора. После того как исследовательская установка функционировала в этом состоянии некоторое время, стенд переводился в последний режим.

Мощность имитатора теплообменника снова изменялась, в этот раз в сторону увеличения. В результате давление второго контура снижалось, вследствие чего росла разница давлений между контурами ΔP_{1-2} . Эта процедура длилась до того момента, пока конденсационная мощность

парогенератора не сравнивалась с таковой при режиме работы на чистом паре. Далее устанавливалось стационарное состояние. После того как стенд работал в этом режиме определённое время, эксперимент прекращался.

В третьей серии опытов стационарные режимы работы не устанавливались. После прогрева стенда и подачи в пар смеси неконденсирующихся газов система отвода ПГС из «холодного» коллектора не активировалась, вследствие чего происходило накопление газов в трубном пучке. Из-за этого в ходе каждого эксперимента конденсационная мощность ПГ постепенно снижалась Опыты прекращались после 7200 секунды от начала подачи газов в пар.

2.4 Выводы по главе 2

Для проведения экспериментального обоснования проектных характеристик модели парогенератора ВВЭР в аварийном конденсационном режиме и определению влияния на них процессов, характерных для работы пассивных систем безопасности в АО «ГНЦ РФ ФЭИ» был модернизирован стенд ГЕ-2М путем добавления к нему моделей парогенератора и имитатора теплообменника СПОТ. На стенде было проведено четырнадцать экспериментов, осуществленных в три серии.

ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГАЗОГЕНЕРАЦИИ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ НА РАБОТУ ПАРОГЕНЕРАТОРА В КОДЕНСАЦИОННОМ РЕЖИМЕ

Суммарно в ходе исследований было осуществлено четырнадцать экспериментов, разделенных на три серии. Задачей экспериментов было определение степени снижения конденсационной мощности вследствие «отравления» неконденсирующимися газами на разных этапах аварии, выявление особенностей процесса конденсации пара в трубном пучке ПГ и обнаружение взаимосвязей между работой оборудования пассивной системы безопасности. Основные параметры опытов представлены в таблице 3.1.

	,		71	
N⁰	Массовая концентрация газов, %			Расход ПГС,
эксперимента	Азот	Гелий	Эквив.	л/с
Первая серия опытов				
1	0,0435	0,003	0,645	0,208
2	0,0076	0,001	0,146	0,104
3	0,0046	0,0008	0,102	0,069
4	0,0046	0,0008	0,102	0,033
Вторая серия опытов				
5	0,21	0,004	0,24	0,208
6	0,012	0,0053	0,054	0,208
7	0,012	0,0041	0,045	0,208
8	0,011	0,0042	0,044	0,208
9	0,041	0	0,041	0,208
10	0,21	0,0043	0,24	0,163
Третья серия опытов				
11	0,21	0,005	0,24	-
12	0	0,03	0,21	-
13	0,002	0,00032	0,0046	-
14	0	0,1	0,7	-

Таблица 3.1 – Значения массовой концентрации неконденсирующихся газов в паре и расход отвода парогазовой смеси из «холодного» коллектора ПГ в опытах

Главной целью экспериментов было обоснование работоспособности парогенератора в аварийном режиме. В результате выполнения опытов был получен значительный массив данных. Автором был произведен анализ этих данных с целью определения особенностей, протекающих в оборудовании первого контура и СПОТ процессов.

В опытах неконденсирующиеся газы подавались на вход «горячего» коллектора при различных соотношениях концентраций азота и гелия. Для анализа полученных результатов экспериментов был применен показатель эквивалентной суммы расхода газов C_3 , учитывающий разницу плотности используемых сред. C_3 рассчитывается как $C_N+7 \cdot C_{He}$. Этот показатель позволяет проводить сравнительный анализ результатов экспериментов между собой [92].

3.1 Анализ влияния неконденсирующихся газов, поступающих из реактора, на работоспособность парогенератора в конденсационном режиме

Главной задачей исследования было определение конденсационной мощности парогенератора при различных параметрах аварии. Наибольшее влияние на работоспособность ПГ оказывают концентрация неконденсирующихся газов в паре на входе в парогенератор и расход отвода парогазовой смеси из «холодного» коллектора ПГ. По мере опустошения сосудов гидроемкостей второй ступени отвод ПГС уменьшается. Однако, в тоже время, из-за постепенного уменьшения мощности остаточных энерговыделений снижается и приток газов. Поэтому параметры первых четырех экспериментов подбирались так, чтобы соответствовать натурным (с учетом масштабного коэффициента) в интервале работы каждой из четырех расходных ступеней ГЕ-2. Номер опыта соответствует этапу работы системы гидроёмкостей второй ступени [94].

По различным причинам начальная конденсационная мощность могла отличаться в разных экспериментах. Поэтому, для определения влияния параметров аварии на эффективность конденсации пара первого контура анализировалось отношение средней мощности ПГ в режиме конденсации парогазовой смеси на стационарном участке к мощности работы на чистом паре (N/N_0) .

На рисунке 3.1 представлена зависимость относительной конденсационной мощности модели парогенератора от концентрации неконденсирующихся газов в паре и сдувки парогазовой смеси в экспериментах № 1 – 4 [95].

Как видно из графика (рисунок 3.1), ни в одном из опытов конденсационная мощность парогенератора не снизилась более, чем на 20%. Таким образом, было определено, что парогенератор в конденсационном режиме сохраняет работоспособность при параметрах, характерных для работы любой из расходных ступеней системы ГЕ-2 [95].



Рисунок 3.1 – Значения отношения стабилизированной конденсационной мощности парогенератора к начальной в экспериментах № 1 – 4.

Самое значительное снижение конденсационной мощности наблюдалось в опыте № 1. По сравнению с экспериментом № 2, в опыте № 1 значение расхода отвода парогазовой смеси из «холодного» коллектора ПГ больше в два раза, однако при этом и расход подачи неконденсирующихся газов выше в 4,41 раза. Таким образом, можно сделать вывод о том, что в течение работы первой расходной ступени системы ГЕ-2 соотношение между расходами газогенерации и отвода неконденсирующихся газов имеет наихудшее значение, что делает этот период наиболее опасным с точки зрения обеспечения охлаждения активной зоны [93].

3.2 Исследование работы парогенератора при работе в конденсационном режиме в расширенном диапазоне параметров

Ранее было определено, что между значениями конденсационной мощности, расходами подачи и отвода неконденсирующихся газов нет линейной корреляции и процессы, происходящие в трубном пучке парогенератора, достаточно сложны.

Для дальнейшего исследования работы системы пассивного отвода тепла была проведена вторая серия опытов. В ней рассматривался расширенный перечень сценариев аварийной ситуации. В частности, в двух экспериментах рассматривались наиболее консервативные варианты, связанные с гипотетической возможностью попадания азота в объем первого контура из гидроемкостей САОЗ. В остальных опытах варьировалась массовая доля азота и гелия [96].

Для улучшения возможности сравнения результатов экспериментов, в каждом из них, за исключением наиболее консервативного, величина расхода отвода парогазовой смеси была одинакова [95].

На рисунке 3.2 представлено изменение конденсационной мощности парогенератора в эксперименте с самыми консервативными условиями аварии, включая меньший расход отвода ПГС из «холодного» коллектора.

После подачи неконденсирующихся газов в объем «горячего» коллектора ПГ наблюдается резкое и быстрое снижение конденсационной мощности парогенератора до 77 % от начальной величины. Однако в определенный момент времени без видимых переходных процессов происходит стабилизация значения мощности на достигнутом уровне. Далее, в течение длительного времени отмечается колебание мощности вокруг этого стабильного значения, без появления тренда на повышение или понижение.

Анализ экспериментальных данных первой и второй серий экспериментов позволил определить, что из-за того, что движение сред в контурах вызвано естественной циркуляцией, то между парогенератором и теплообменником СПОТ возникают отрицательные обратные связи, приводящие к стабилизации мощности ПГ.



Рисунок 3.2 – Изменение конденсационной мощности модели парогенератора (Эксперимент № 10)

Эти отрицательные обратные связи могут быть описаны следующим образом: в результате попадания в трубный пучок парогенератора неконденсирующихся газов происходит снижение коэффициента теплопередачи, и, как следствие, снижается конденсационная мощность. Однако, мощность теплообменника СПОТ зависит от температуры окружающего воздуха и не снижается в ходе аварийного процесса.

Совокупность этих факторов приводит к тому, что теплообменник системы пассивного отвода тепла начинает расхолаживать второй контур. Вследствие этого повышается температурный перепад между первым и вторым контуром. Это приводит росту конденсационной В свою очередь К мощности парогенератора. Таким образом, благодаря наличию обратных отрицательных связей влияние неконденсирующихся газов на процесс теплообмена в трубном пучке парогенератора частично компенсируется, позволяя сохранить его мощность на достаточном для функционирования пассивных систем безопасности уровне [97].

На графике 3.3 продемонстрирована зависимость между отношением конденсационной мощности парогенератора в начале и конце эксперимента от параметров проведения опытов.

На рисунке 3.3а показано отношение средней мощности ПГ в режиме конденсации парогазовой смеси на стационарном участке к мощности при работе на чистом паре (N/N_0). На рисунке 3.36 отражена массовая концентрация азота и гелия в паре, подаваемом на вход в парогенератор [94].



a) – значение относительной конденсационной мощности парогенератора в опытах; б) – значения концентраций азота, гелия и их эквивалентной суммы на входе в модель ПГ

Рисунок 3.3 – Изменение относительной конденсационной мощности модели ПГ при изменении концентрации и состава неконденсирующихся газов

Анализ полученных экспериментальных данных показывает следующее. В опытах №8 и 9 эквивалентная сумма массовых концентраций газов различается на 7 %, в то время как, в эксперименте №9 полностью отсутствует гелий, а в опыте №8 азота почти в четыре раза меньше. Так как азот тяжелее пара, а гелий легче, то можно предположить, что из-за этого они будут по-разному распределяться в объеме трубного пучка парогенератора и, как следствие, оказывать разную степень воздействия на конденсацию пара первого контура. Тем не менее, этого не наблюдается. Разница относительной мощности в этих опытах не превышает 1 %. В то же время, если сравнить эксперименты с большей разницей эквивалентной суммы массовых концентраций газов, например, эксперименты №5 (2,5 г/кг) и №6 (0,47 г/кг), то разница относительных мощностей в этих опытах составила 10 % [94].

Таким образом, на основе анализа полученных результатов, можно утверждать, что конденсационная мощность парогенератора в первую очередь зависит от суммарной концентрации поступающих в модель ПГ неконденсируемых газов, в то время как их состав и физические свойства не оказывают заметного влияния на исследуемые процессы [94].

Как уже было отмечено выше, в случае аварийного процесса конденсационная мощность парогенератора поддерживается благодаря отводу парогазовой смеси из «холодного» коллектора парогенератора в объем опорожняющихся сосудов СПЗАЗ, а также из-за температурного эффекта. Для исследования влияния величины отвода ПГС на работоспособность ПГ на стенде был проведен дополнительный опыт № 10, в котором концентрация неконденсирующихся газов соответствовала ее значению в опыте № 5, а расход сдувки был уменьшен на 25%. На рисунке 3.4 представлена зависимость конденсационной мощности от расхода отвода ПГС из «холодного» коллектора парогенератора [95].

Как видно из рисунка, разница между относительными мощностями в опытах №5 и 10 составила 17 %. Более того, необходимо отметить, что такая разница возникла из-за изменения этого параметра всего на 25 %, в то время как

81



Рисунок 3.4 – Изменение относительной конденсационной мощности парогенератора при уменьшении отвода ПГС

рост эквивалентной суммы концентрации неконденсирующихся газов в пять раз привел к снижению мощности всего на 10 %. [95].

Таким образом, в рамках проведенного исследования была продемонстрирована работоспособность парогенератора в рассматриваемых сценариях аварии. Были выявлены отрицательные обратные связи между оборудованием ПСБ, определена степень их влияния на работоспособность ПГ.

Также выявлен эффект самовосстановления конденсационной мощности парогенератора, вызванный существованием отрицательных обратных связей между оборудованием пассивных систем безопасности.

3.3 Анализ процессов, влияющих на работоспособность парогенератора в аварийном режиме

В ходе выполнения предыдущих серий экспериментов, было выяснено, что в самом парогенераторе имеют место процессы, значительно влияющие на

конденсационную мощность ПГ. Рассчитать аналитическим путём влияние газов на теплопередачу между контурами при двойном фазовом переходе и конденсации пара в горизонтальном многорядном трубном пучке довольно сложно. Поэтому, в целях изучения этих процессов в экспериментах № 1-4 исследовался температурный перепад Δt между средами первого и второго контуров. Данный показатель был выбран для анализа исходя из следующих соображений. В результате накопления неконденсирующихся газов уменьшается коэффициент теплоотдачи, вызывая снижение расхода пара в трубчатку парогенератора, что приводит к уменьшению величины теплового потока от первого ко второму контуру. По этой причине температура второго контура снижается (за счет работы СПОТ), тем самым увеличивается температурный перепад между средами первого и второго контуров реакторной установки. Это приводит к увеличению расхода пара, поступающего в парогенератор из реактора, из чего можно сделать вывод, что уменьшение коэффициента теплоотдачи вследствие накопления неконденсирующихся газов частично компенсируется за счет увеличения Δt между контурами. Таким образом, чем выше разница температуры между контурами, тем большее влияние газовая смесь оказывает на процессы теплообмена в трубном пучке ПГ [93].

Значение перепада температур зависит от концентрации газов в паре на входе в «горячий» коллектор ПГ и от мощности теплообменника СПОТ. Особенности конструкции стенда позволяют регулировать величину последней. На рисунке 3.5 продемонстрирована динамика изменения мощности ПГ в опыте №5.

После того как парогенератор проработал в конденсационном режиме в течение некоторого времени, осуществлялось снижение мощности имитатора теплообменника системы пассивного отвода тепла. Вследствие этого, второй контур переставал расхолаживаться. Величина Δt_{1-2} начинала снижаться. Эта процедура длилась до момента, когда перепад температур не сравнивался с таковым на первом этапе. Таким способом полностью устранялось влияние отрицательных обратных связей между оборудованием СПОТ.

83



 1 – режим конденсации «чистого» пара; 2 – стационарный режим; 3 – режим поддержания мощности только с помощью отвода ПГС; 4 – режим компенсации падения мощности с помощью температурного напора Рисунок 3.5 - Конденсационная мощность модели парогенератора в эксперименте №5 при различных условиях его работы

После того как ПГ находился в этом состоянии некоторое время, осуществлялось увеличение расхода технической воды на имитатор теплообменника СПОТ. Происходило расхолаживание среды второго контура и из-за этого росла разница температур Δt_{1-2} . Это выполнялось до того момента, пока конденсационная мощность не сравнивалась с таковой при работе на «чистом» паре [95].

Зависимость изменения средней мощности парогенератора от разных условий работы показана на рисунке 3.6.

Как видно из рисунка 3.6, при отсутствии описанных выше отрицательных обратных связей мощность парогенератора снижается до уровня менее чем 20 % от начальной несмотря на то, что при этом расход удаления парогазовой смеси из трубного пучка не уменьшался. При этом в нормальном режиме конденсационная мощность парогенератора не опускалась ниже уровня в 82% [95].



Рисунок 3.6 – Конденсационная мощность парогенератора в экспериментах №1-4 при различных стационарных состояниях

Как было показано выше, параметры первых четырех экспериментов соответствовали натурным (с учетом масштабного коэффициента) для периода действия расходной ступени системы ГЕ-2, номер которой соответствует номеру опыта. Во второй серии экспериментов, снижение расхода отвода ПГС на 25 % приводит к уменьшению мощности на 17 %, в то время как увеличение доли газов в паре в пять раз приводит к ее снижению на 10 % при тех же параметрах эксперимента.

В то же время, при сравнении опытов №1 и №2 мы видим отличающуюся картину. В первом эксперименте эквивалентная сумма концентраций газов почти в пять раз больше, чем во втором, в то время как расход отвода ПГС больше в два раза. И, тем не менее, степень снижения мощности в опыте №2 заметно ниже. Это можно объяснить тем, что на работу парогенератора не оказывают прямого воздействия ни массовая доля газов на выходе из реактора, ни расход удаления ПГС из «холодного» коллектора ПГ. Единственным ключевым параметром является массовая доля неконденсирующихся газов в паре в объеме трубного пучка. Она, в свою очередь, как раз является результатом баланса указанных выше величин. Следовательно, именно при параметрах первой расходной ступени

ГЕ-2 этот баланс смещен в сторону большего накопления газов в объеме ПГ. Подтвердить этот тезис можно сравнив результаты четвертого режима различных экспериментов [95].

На рисунке 3.7 показаны значения Δt_{1-2} , необходимые для полной компенсации «отравления», вызванного поступившими в парогенератор газами.



Рисунок 3.7 – Температурный перепад между первым и вторым контурами в экспериментах №1-4 при стационарных состояниях №1 и №4

Как указано ранее, чем больше перепад температур Δt_{1-2} , тем значительнее негативное влияние неконденсирующихся газов на процесс конденсации пара. Следовательно, результаты, изображенные на рисунке 3.7, подтверждают тезис о том, что наибольшее накопление газов в трубном пучке парогенератора наблюдается при параметрах, характерных для работы первой расходной ступени системы ГЕ-2.

Для анализа возможности продления эффективной работы СПОТ более чем в течение 24 часов после начала аварии была проведена третья серия экспериментов. В ней полностью был прекращен расход отвода парогазовой смеси из объема трубного пучка парогенератора. Это давало возможность с высокой точностью рассчитать скорость накопления газов и определить их общую поступившую массу.

3.4 Исследование работоспособности парогенератора в конденсационном режиме при отсутствии отвода неконденсирующихся газов из «холодного» коллектора

К проектам перспективных АЭС с ВВЭР предъявляются требования продления автономной работы пассивных систем безопасности до 72 часов. Однако прекращение отвода парогазовой смеси из «холодного» коллектора парогенератора из-за опорожнения гидроемкостей СПЗАЗ через 24 часа после начала аварии может серьезно повлиять на возможность охлаждения активной зоны с помощью пассивных систем. В связи с этим возникает необходимость исследования работы парогенератора В конденсационном режиме после окончания первых суток аварии. Для решения этой задачи, а также для более детального исследования процессов конденсации пара присутствии В неконденсирующихся газов была проведена третья серия экспериментов без отвода парогазовой смеси [97].

Диапазон концентраций неконденсирующихся газов, поступающих в парогенератор, был расширен за счет добавления величин концентраций, характерных для окончания первых суток аварийного процесса (эксперименты № 12 и 13), а также концентраций, соответствующих возникновению возможной локальной пароциркониевой реакции в активной зоне (эксперимент № 14).

Длительность проведения экспериментов № 11 – 14 была выбрана одинаковой – 7200 с. В эксперименте № 13 конденсационная мощность модели парогенератора снизилась ниже предела измерения расходомера пара к 4200 секунде, что привело к сокращению продолжительности опыта.

Как было показано выше, чем большее негативное влияние оказывают неконденсирующиеся газы на теплообменные процессы в парогенераторе, тем больше увеличивается значение перепада температур Δt_{1-2} вследствие существования обратных связей между парогенератором и теплообменником СПОТ [98].

Для обобщения результатов исследования был введен параметр относительного температурного перепада $\Delta t/\Delta t_0$. На рисунке 3.8 показана динамика роста этой характеристики во всех опытах по мере накопления неконденсирующихся газов в трубном пучке парогенератора.



Рисунок 3.8 – Зависимость $\Delta t / \Delta t_o$ от накопленной в трубном пучке массы неконденсирующихся газов для опытов № 11 – 14

Это объясняется тем, что на теплообменные процессы, происходящие в парогенераторе, оказывает влияние не только масса накопленных в трубном пучке неконденсирующихся газов, но и скорость их накопления. Причина этого заключается в том, что при подаче неконденсирующихся газов, наряду со снижением коэффициента теплообмена за счет «отравления», происходит рост перепада температуры между контурами. Увеличение Δt , с одной стороны, частично компенсирует эффект «отравления» ПГ, но одновременно с этим приводит к уменьшению мощности СПОТ (за счет снижения параметров второго контура). Это, в свою очередь, вызывает повышение температуры в межтрубном пространстве ПГ и снижение температурного перепада между контурами. При

этом, исходя из анализа экспериментальных данных, чем выше скорость накопления неконденсирующихся газов, тем сильнее снижается мощность СПОТ, и тем самым, сильнее уменьшается температурный перепад.

Описанная выше связь имеет однозначно отрицательный эффект с точки зрения поддержания мощности парогенератора в аварийном режиме, так как при уменьшении коэффициента теплоотдачи, вследствие накопления неконденсирующихся газов, именно разница температуры между средами парогенератора является фактором, способствующим увеличению продолжительности работы ПГ [98].

Из выше сказанного следует, что величина температурного перепада между средами первого и второго контуров зависит как от совокупной массы накопленных в трубном пучке неконденсирующихся газов, так и от скорости их накопления, определяемой мощностью парогенератора и концентрацией газов на входе в ПГ. Таким образом, для использования Δt в качестве показателя эффективности процессов теплообмена в парогенераторе, необходимо установить связь между перепадом температуры между контурами, мощностью парогенератора и концентрацией неконденсирующихся газов.

В связи с этим, в качестве величины, характеризующей процессы в трубном пучке ПГ, был принят показатель относительного температурного прироста $\Delta t' = (\Delta t/\Delta t_0) \cdot a$, где $a = [1 + (M/\tau)]^{-1}$ – поправочный коэффициент, учитывающий скорость накопления неконденсирующихся газов в трубчатке ПГ (M/τ). На рисунке 3.9 изображена зависимость изменения показатель относительного температурного прироста $\Delta t'$ от времени в экспериментах [97].

Из рисунка 3.9 видно, что наибольшая скорость роста значения $\Delta t'$ характерна для опыта № 14 (таблица 3.1), в котором конденсационная мощность ПГ уменьшалась наиболее быстро. И напротив, наименьшее изменение показателя теплообмена наблюдается в опыте № 13 с минимальным изменением мощности ПГ.

Из вышесказанного можно сделать вывод, что чем больше скорость роста значения величины $\Delta t'$, тем менее эффективен процесс тепломассообмена в ПГ.

89

Таким образом, скорость изменения данной величины позволяет качественно оценить эффективность процессов передачи тепла, происходящих в парогенераторе при работе в конденсационном режиме.

На рисунке 3.9 изображена зависимость изменения показателя $\Delta t'$ от времени в экспериментах [98].



Рисунок 3.9 – Зависимость изменения показателя относительного температурного перепада $\Delta t'$ от времени для опытов № 11 – 14

Из рисунка 3.9 видно, что чем больше в эксперименте градиент снижения мощности парогенератора, тем выше скорость роста относительного температурного перепада, и наоборот.

Таким образом, на основании динамики изменения величины $\Delta t'$ возможно качественной осуществление оценки изменения характеристик процесса конденсации пара В трубном пучке парогенератора, И, как следствие, эффективности отвода остаточных тепловыделений от а.з. за счет работы СПОТ.

Анализ полученных экспериментальных данных показал, что изменение относительного температурного перепада $\Delta t/\Delta t_0$ можно описать, используя зависимость следующего вида [35]:

$$\frac{\Delta t}{\Delta t_0} = 1 + \alpha_1^{-1} \cdot M^{1,44}$$
(13)

где M – накопленная к моменту времени τ суммарная масса газов (эквивалентная азоту), а a_1 – параметр, учитывающий влияние обратной положительной связи между парогенератором и теплообменником СПОТ:

$$a_1 = 1,27 \cdot 10^5 \left(\frac{M}{\tau}\right)^{1,44} + 535.$$
 (14)

определения этого коэффициента Зависимость для была получена эмпирически, в результате обработки полученных данных. Таким образом, то, что величина a_1 зависит только от скорости накопления газов, дополнительно подтверждает правильность описания физических процессов, происходящих в В аварийном режиме парогенераторе В случае прекращения удаления неконденсирующихся газов из его «холодного» коллектора.

Суммарная масса газов, поступившая в парогенератор, может быть рассчитана с использованием величины массовой концентрации газов в паре и мощности парогенератора:

$$M = G \cdot c \cdot \tau = \frac{N}{r} \cdot c \cdot \tau, \tag{15}$$

где N – конденсационная мощность ПГ, Вт; r – теплота парообразования, Дж/кг; c – концентрация неконденсирующихся газов в парогазовой смеси, поступающей на вход в парогенератор, кг/кг.

Выразив (14) через (15), получим зависимость для определения изменения перепада температуры между контурами от мощности ПГ и массовой доли газов в паре:

$$\frac{\Delta t}{\Delta t_0} = 1 + \left[1,27 \cdot 10^5 \left(\frac{N \cdot c}{r} \right)^{1,44} + 535 \right]^{-1} \left(\frac{N \cdot c \cdot \tau}{r} \right)^{1,44}$$
(16)

На рисунке 3.10 показаны два графика изменения значений $\Delta t/\Delta t_0$, полученных в опыте №12 и в результате расчета, проведенном по формуле (16) с параметрами, соответствующими этому же эксперименту [35]. На рисунке 3.11 показано усредненное отклонение результатов расчетов от результатов, полученных опытным путем для всех экспериментов.



Рисунок 3.10 – Сравнение изменения относительных перепадов температур между контурами, полученных экспериментальным и расчетным путями в опыте № 12

Первая точка на графиках взята через 1500 секунд после подачи неконденсирующихся газов, остальные с шагом в 1000 секунд.



Рисунок 3.11 – Сравнение расчетных и экспериментальных значений относительных перепадов температур между контурами для опытов № 11 – 14

Анализ полученных результатов показал, что отклонение рассчитываемых параметров от полученных в ходе опытов не превышает 11 % в среднем и 20 % максимально.

Тем не менее, у зависимости (16) есть серьёзный недостаток. Расчет изменения перепада температур между контурами невозможен без знания зависимости мощности парогенератора от времени. Следовательно, это делает невозможным расчет этого параметра для всего диапазона сценариев аварии, которые не были исследованы экспериментально. Для устранения этого пробела полученный в ходе опытов массив данных был дополнительно дообработан.

В результате была получена зависимость конденсационной мощности парогенератора от времени и концентрации неконденсирующихся газов:

$$N = N_0 + a_2 \cdot \tau^{0,27} \tag{17}$$

где N_0 – конденсационная мощность ПГ в начальный момент времени, Вт; a_2 – коэффициент, учитывающий влияние накопленной массы неконденсирующихся газов и скорость их поступления [39]. При этом коэффициент a_2 имеет следующий вид:

$$a_2 = -0,75 - 0,18N_0 \cdot c \tag{18}$$

На рисунке 3.12 показаны два графика изменения значений $\Delta t/\Delta t_0$, полученных в опыте №10 и в результате расчета, проведенного по формуле (17) с параметрами, соответствующими этому же эксперименту [97].

На рисунке 3.13 показано отклонение расчетных значений N от экспериментальных во всех четырех опытах. Анализ полученных результатов показал, что отклонение рассчитанной величины мощности от измеренной в ходе экспериментов не превышает 10 % в среднем и 15 % максимально [35].

Как известно, конденсационная мощность парогенератора может быть выражена через следующее соотношение: $N=k \cdot F \cdot \Delta t$, где k – коэффициент теплопередачи Вт/м²·К; а F – площадь теплообменной поверхности, м. Так как в ходе работы F не изменяется (кроме определенных аварийных ситуаций, выходящих за рамки описываемых исследований), то сопоставив зависимости (16) и (17) возможно рассчитать коэффициент теплопередачи с достаточной точностью [98].



Рисунок 3.12 – Сравнение расчетных и экспериментальных значений конденсационной мощности модели парогенератора в опыте № 10 (таблица 3.1)



Рисунок 3.13 – Сравнение расчетных и экспериментальных значений конденсационной мощности модели парогенератора в опытах № 11 – 14

На рисунке 3.14 показано сравнение коэффициентов теплопередачи, полученных экспериментально в опыте № 10, и в результате расчета, выполненного с параметрами, соответствующими тому же эксперименту. На рисунке 3.15 представлены результаты сравнения опытных данных с расчетными величинами для всех четырех экспериментов [98].

Анализ полученных результатов показал, что отклонение рассчитываемых параметров от полученных в ходе опытов не превышает 15 % в среднем и 20 % максимально [98].



Рисунок 3.14 – Сравнение расчетных и экспериментальных значений коэффициента теплопередачи модели парогенератора в опыте №10



Рисунок 3.15 – Сравнение расчетных и экспериментальных значений коэффициента теплопередачи в опытах

3.5 Выводы по главе 3

1. На стенде ГЕ-2М был проведен цикл экспериментальных исследований работы парогенератора в аварийном режиме. Автором был обработан и проанализирован полученный в ходе выполнения опытов массив данных.

2. Главной задачей экспериментов было определение мощности модели парогенератора ВВЭР, работающего в конденсационном режиме в присутствии неконденсирующихся газов при различных сценариях аварии.

Показано, что даже в самом консервативном опыте мощность парогенератора не снизилась более чем на 20 %. В среднем, снижение мощности, вызванное неконденсирующимися газами, составило 9,5 %.

3. В результате анализа экспериментальных данных был сделан вывод о наличии обратных отрицательных связей между парогенератором и теплообменником системы пассивного отвода тепла. Определена степень их влияния на работоспособность ПГ.

4. Определено, что вследствие наличия активного массопереноса в объеме трубного пучка ПГ состав неконденсирующихся газов практически не оказывает влияния на характеристики работы парогенератора в данном режиме.

5. Для улучшения понимания процессов конденсации пара в парогенераторе в аварийном режиме работы, были проведены эксперименты, в которых отсутствовало удаление парогазовой смеси объема трубного ИЗ пучка парогенератора. В результате было выявлено наличие положительных обратных связей, характерных для этого режима работы ПГ. Также были получены полуэмперические формулы, позволяющие рассчитать изменение мощности, температурного перепада между контурами и коэффициента теплопередачи в парогенераторе. Кроме того, результаты третей серии опытов позволили оценить время эффективного функционирования парогенератора после окончания первых суток аварии.

6. Показано, что на всех этапах аварийного процесса ключевую роль в снижении эффективности отвода тепла через парогенератор играет концентрация

неконденсирующихся газов в паре на входе в «горячий» коллектор ПГ. В рамках выполненных исследований моделировались три источника поступления газов в контур: газогенерация в активной зоне (во всех опытах), попадание азота из гидроемкостей САОЗ в реакторный объем (в двух опытах) и генерация водорода вследствие пароциркониевой реакции (в одном эксперименте). Тем не менее, существует теоретическая возможность поступления воздуха из-под защитной оболочки через сечение разрыва ГЦТ в объем первого контура в ходе аварии. Для исследования данных процессов стенд ГЕ-2М был модернизирован.

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ГЕ-2М С РАБОЧИМ УЧАСТКОМ РУ-30 И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

4.1 Состав и основные системы экспериментальной установки ГЕ-2М

В течение аварии с разрывом главного циркуляционного контура возможно поступление парогазовой смеси из объема защитной оболочки в реактор. Для определения степени влияния массопереноса парогазовой смеси из объема ЗО в первый контур к стенду ГЕ-2М, при непосредственном участии автора, было добавлено новое оборудование [100].

На рисунке 4.1 представлена принципиальная гидравлическая схема модернизированного стенда. На рисунке 4.2 показан общий вид исследовательской установки.

Стенд ГЕ-2М с рабочим участком РУ-ЗО имеет следующие технические характеристики и рабочие параметры:

- рабочая среда – вода, пар, парогазовая смесь;

- расход пара, поступающего от ТЭЦ АО «ГНЦ РФ ФЭИ» до 2,5 кг/с;
- давление 0,1 0,5 МПа; температура 100 152 °C;
- максимальная мощность модели ПГ в экспериментах 195 кВт;
- максимальный массовый расход пара 0,22 кг/с;
- диапазон мощности имитатора теплообменника СПОТ 50-195 кВт;

предельная мощность вспомогательных теплообменников защитной оболочки – 450 кВт.

Технологическое оборудование стенда ГЕ-2М включает в себя:

- защитная оболочка стенда (объём 79 м³);
- рабочий участок имитатор реактора с паровым обогревом (масштаб 1:144);

конденсатор, расположенный в объеме ЗО стенда, охлаждаемый технической водой;





Рисунок 4.2 – Общий вид стенда ГЕ-2М с рабочим участком РУ-ЗО

 паровые теплообменники для подогрева воды, поступающей в патрубки подачи воды от системы ГЕ-2 на рабочем участке;

– центробежный насос HC1 для подачи технической воды на имитатор СПОТ, теплообменник-конденсатор пара и заполнения модели ПГ;

– центробежный насос HC2 для подачи воды в конденсаторы защитной оболочки, имитации расхода из сосудов системы ГЕ-2 в реактор.

Рабочий участок состоит из двух труб диаметром 325 и 377 мм. Меньшая из них размещена коаксиально внутри большей. Внешняя труба оснащена имитаторами гильотинного разрыва «холодной» и «горячей» веток трубопроводов главного циркуляционного контуров. Высота имитатора разрыва равна натурной (850 мм), ширина варьировалась в зависимости от эксперимента.

Основные элементы рабочего участка РУ-ЗО показаны на рисунке 4.3. На рисунке 4.4 показан общий вид рабочего участка и защитной оболочки



а) – защитная оболочка; б) –имитатор реактора;
1 – корпус; 2 – имитатор разрыва «горячей» ветки; 3 – линии подачи воды из ГЕ-2; 4 – имитатор разрыва «холодной» ветки; 5 – линии подачи воды из ГЕ-2; 6 – гидрозатвор; 7 – выходной паропровод.
Рисунок 4.3 – Основные элементы рабочего участка РУ-ЗО



Рисунок 4.4 – Общий вид рабочего участка РУ-ЗО стенда ГЕ-2М

Отвод пара из объема имитатора реактора осуществляется из его верхней части. Вышедшая рабочая среда поступает непосредственно на вход «горячего» коллектора парогенератора. Также, р.у. оснащен двумя патрубками, по которым в его напорную и сборную камеру поступает вода от имитатора емкостей ГЕ-2. Кроме того внутри корпуса имитатора реактора общей высотой 7,5 м устанавливается дырчатый лист на отметке, соответствующей верхней границе натурной активной зоны. Защитная оболочка стенда состоит из трех элементов: сферического дна, цилиндрической стенки и плоской крышки.

Для корректности осуществляемых экспериментов важным является контроль конденсации пара на внешних стенках ЗО стенда. Для этой цели она с внешней стороны была покрыта теплоизолирующими матами из базальтового волокна. Внутри защитной оболочки установлены три вспомогательных конденсатора.

В объеме защитной оболочки расположен конденсатор, охлаждаемый технической водой. В состав конденсатора входят три теплообменных модуля. Каждый состоит из входного и выходного горизонтальных коллекторов, соединенных 21 трубкой. Трубки имеют три участка – наклонный вертикальный, горизонтальный и вертикальный.

Основные характеристики защитной оболочки стенда:

- диаметр корпуса 3,05 м;
- общая высота 12,0 м;
- объем -79 м³;
- материал сталь марки 20К, 22К + ЭИ 898;
- рабочее давление − 0,5 МПа;
- рабочая температура 155°С.

4.2 Контрольно-измерительные приборы и система сбора данных стенда

Система КИПиА предназначена для регистрации и записи параметров оборудования и рабочих сред при работе стенда. Также ее задачей является информационное обеспечения процесса управления исследовательской установкой.

Установленные на стенде датчики регистрировали следующие параметры:

– Давление (*P*) измерялось в первом контуре на входе в «горячий» коллектор ПГ, на выходе из «холодного» коллектора парогенератора, в объеме имитатора реакторной установки, в объеме защитной оболочки стенда, в баке – аккумуляторе пара, на линиях подачи газа.

– Уровень воды (*h*) измерялся в объеме межтрубного пространства парогенератора, в объеме защитной оболочки стенда и рабочего участка, в баке – аккумуляторе пара, а также во вспомогательном оборудовании (мерные баки, гидрозатворы) и в опускных участках, по которым двигался конденсат;

 Температура (*t*) измерялась в более чем 250 точках, расположенных на всем основном и вспомогательном оборудовании стенда. В особо важных локациях размещались блоки из нескольких термопар;

– Расход (G) измерялся на входе во все теплообменники, охлаждаемые водой (имитатор СПОТ, конденсаторы ЗО и системы удаления ПГС из «холодного» коллектора), на входе в имитатор реакторной установки, на паропроводе р.у. – ПГ, на трубопроводе слива конденсата из ПГ, в линиях подачи воды (имитация работы системы ГЕ-2).

– Также измерялся перепад давлений и температур между контурами и «холодным» и «горячим» коллекторами парогенератора.

В состав системы контроля и автоматизации включены различные приборы для измерения и контроля параметров работы стенда. Среди них есть термоэлектрические преобразователи, уровнемеры, преобразователи давления и расходомеры.

Система контроля и автоматизации стенда была централизованной. Иными словами, вся собираемая информация поступала на один пульт управления и контроля. С помощью установленной там системы автоматизированного сбора научной информации (АСНИ) она могла поступать на один или несколько персональных компьютеров.

АСНИ не только собирала показания приборов КИПиА в ходе работы исследовательской установки, но также она вела их запись в удобном для извлечения и обработки формате.

Работу системы контрольно-измерительного оборудования обеспечивала система электроснабжения стенда.

АСНИ основана на сетевом интерфейсе ETHERNET и разделена на три уровня. К третьему (глубинному) уровню относятся датчики и приборы, которые в ходе своего функционирования генерируют сигнал, характеристики которого изменяются по определенной зависимости от значений измеряемой величины. Логические контролеры WAGO среднего уровня (серия 750) принимают сигнал и преобразовывают его в показания измеряемых величин. Верхний уровень АСНИ является одним или несколькими ПК, на которых возможно представление измеряемой информации в числовом или графическом виде и ее архивирование.

Протокол обмена между устройствами – TCP/IP. Использование единой сети позволяет синхронизировать все данные, получаемые от разных подсистем и архивировать их в едином массиве.

Вся система управления функционирует под контролем интерактивной программы оператора, разработанной с использованием программного пакета LabView. Реализация программ контроллеров осуществляется через среду разработки WAGO-I/O-PRO32 (МЭК 16131-3).

Подготовка системы автоматического сбора и накопления информации к работе и взаимодействие с компонентами, входящими в ее состав, осуществляются в соответствии с подготовленной методикой. Запись данных производится либо автоматически, либо по запросу оператора, в зависимости от поставленных в эксперименте задач.

Частота опроса измерительных каналов АСНИ составляет 1 Гц.

Устойчивость циркуляции пара в контуре ПГ - СПОТ - ПГ в экспериментах контролируется по показаниям уровнемера, установленного в опускном участке на выходе из имитатора теплообменника СПОТ, а также по характеру изменения давления в парогенераторе и величины подогрева в теплообменнике СПОТ. Используемая методика позволяет определить наличие как низкочастотных, так и высокочастотных колебаний, которые могут возникнуть в контуре (с частотой не выше частоты опроса системы сбора).

В верхней и нижней частях имитаторов разрывов ГЦТ на рабочем участке установлены 12 термопар (по три в каждой области). Термопары в каждой группе находятся на одной оси таким образом, что спай одной термопары находится в объеме рабочего участка, второй – в плоскости разрыва, третьей – в объеме модели ЗО. Это позволяет регистрировать начало и продолжительность времени поступления среды из ЗО в рабочий участок. Таким образом, в ходе экспериментов возможно определить, при каких параметрах возникает приток

паровоздушной смеси в первый контур из объема защитной оболочки, а при каких он отсутствует.

Параметры, измеряемые в защитной оболочке стенда:

- давление;

- уровень конденсата внутри защитной оболочки;
- температура среды по высоте (на половине внутреннего радиуса);
- температура по высоте внутренней поверхности;
- температура по высоте внешней поверхности;
- расход пара, подаваемого для обогрева.

Как показано в разделе 2.3, погрешность измерения параметров состоит из инструментальной составляющей погрешности измерений; погрешности отсчета и погрешности метода.

Так как проведенные в первой и второй серии опытов не отличались принципиальным образом, то подход оценки влияния методической погрешности, отраженный в разделе 2.3, применим также и для второй серии экспериментов.

Таким образом, сделанный ранее вывод о том, что методическая погрешность не оказала значительное воздействие на точность проводимых экспериментов остается корректным. В таблице 4.1 отражена полная погрешность для используемых на стенде средств измерения.

Датчик/ модуль системы измерения	Погрешность датчика, %	Погрешность модуля системы сбора данных, %	Полная погрешность канала измерения, %
1	2	3	4
Датчики давления «Метран – 100 ДИ» (давление, Па) / WAGO 750-466	0,25	0,2	0,38
Дифманометр «Метран-100 ДД» (давление, Па) / WAGO 750-466	0,25	0,2	0,38

Таблица 4.1 – Погрешности средств измерений стенда

1	2	3	4
Вихревой счетчик пара «Метран-332» (объемный расход, м ³ /с)	1,5	-	1,5
Электромагнитный расходомер «Метран-370» (объемный расход жидкой среды, м ³ /с) / WAGO 750-466	0,5	0,2	0,51
Термопары ХК, термопарный кабель типа КТМС / WAGO 750-469	0,1	0,8	0,81

Измерение времени осуществлялось встроенным приложением операционной системы персонального компьютера, включенного в состав системы сбора данных. Приведенная погрешность пренебрежимо мала и составляет 10⁻⁵ %. Доверительный интервал используемых на стенде датчиков равен 0,95.

В ходе экспериментов косвенным образом определялся ряд параметров, включая уровень жидкости в вертикальном участке трубопровода, массовых расходов пара и воды, а также массовых концентраций газов.

В разделе 2.3 настоящей работой были определены формулы для расчета погрешностей этих величин. В таблице 4.2 представлены результаты проведенных вычислений.

	Расчитанная	
Величина	погрешность,	Номер формулы,
	%	
1	2	3
Уровень жидкости в		
вертикальном участке	0,91	6
трубопровода		
Расход пара	1,72	8

Таблица 4.2 – Погрешности величин, измеряемых косвенным образом

Продолжение таблицы 4.1

1	2	3
Расход, определяемый		
с помощью мерных	0,39	12
баков		
Расход воды	1,01	8
Массовая		
концентрация газов в	1,73	10
паре		

Продолжение таблицы 4.2

4.3 Методика проведения экспериментов на стенде

Для проведения исследований на модернизированном стенде автором была разработана оригинальная методика осуществления экспериментов.

На исследовательской установке моделировались сценарии аварийной ситуации, при которой происходил гильотинный разрыв одной из веток главного циркуляционного трубопровода и полностью прекращалось электроснабжение. В опытах исследования начинались с момента, когда происходила активация систем пассивной безопасности – СПОТ и ГЕ-2. Это происходило после того, как открытия вследствие автоматического заслонок на воздушной линии промежуточного контура начиналось расхолаживание среды второго контура. Как только его давление, а, следовательно, и температура опускалась ниже, чем у среды первого контура, парогенератор начинал работать в конденсационном режиме. В рамках ЭТОГО сценария преодоление аварии осуществлялось исключительно силами пассивных систем безопасности.

Начальные параметры сред первого и второго контуров, а также парогазовой смеси в защитной оболочке полностью соответствовали натурным.

Основной задачей опытов было определение динамики изменения мощности ПГ и определения степени влияния на нее возможного поступления парогазовой среды из объема модели защитной оболочки.

Эксперименты были проведены в четыре серии. Все параметры, кроме места расположения и геометрических размеров имитаторов разрыва в них были
одинаковы. Два раза исследовался сценарий с разрывом главного циркуляционного контура на входе в реактор и два на выходе из реактора.

Между сценариями аварии с разрывом «горячей» и «холодной» веток главного циркуляционного контура есть важное отличие. В случае последнего, в трубный пучок ПГ через разрыв напрямую поступает среда из объема защитной оболочки.

Система удаления ПГС из «холодного» коллектора парогенератора заведомо не способна справиться с таким притоком газов, и это означает, что его трубный пучок будет очень быстро «отравлен». Таким образом, в этом сценарии авария будет преодолеваться без участия одного из каналов системы пассивного отвода тепла.

Для корректного моделирования этого различия в экспериментах с разной локализацией разрыва имело место разная конфигурация рабочего участка. При проведении опытов с разрывом «горячего» патрубка реактора имитатор разрыва «холодной» ветки ГЦК был закрыт. В другом же случае имитатор разрыва «горячей» ветки был соединен с объемом модели защитной оболочки через гидравлический затвор высотой 3,5 метра.

Ширина щелевых патрубков в опытах составила 14 мм и 28 мм соответственно при их одинаковой высоте.

В экспериментах моделировалось снижение мощности остаточных энерговыделений активной зоны путем ступенчатого уменьшения расхода пара, поступающего на вход рабочего участка.

В таблице 4.3 показаны значения массового расхода пара на каждом из этапов.

				5	
Время от начала	0-6480	64	80 - 17280	17280 - 38880	38880 - 86400
эксперимента, с					
Расход пара в					
рабочий участок,	184		157,3	134,4	103,4
г/с					

Таблица 4.3 – Изменения расхода пара в рабочий участок стенда ГЕ-2М

В ходе экспериментов для моделирования процесса газогенерации в а.з. в поток пара подавали неконденсирующиеся газы (азот и гелий) перед входом в р.у. Таким образом, после прохождения рабочего участка на вход парогенератора поступала смесь газов с заранее известными параметрами.

Зависимость изменения концентрации неконденсирующихся газов в ПГС, поступающей на вход модели РУ в эксперименте приведена в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Зависимость изменения концентрации неконденсирующихся газов в ПГС, поступающей на вход модели реактора стенда ГЕ-2М

Время от начала	0-6480	6480 – 17280	17280 - 38880	38880 - 86400	
эксперимента, с		1/200	30000	00400	
Концентрация азота г/кг	0,144	0,1	0,07	0,058	
Концентрация гелия, г/кг	0,028	0,02	0,02	0,012	

С целью обеспечения безопасности, водород и кислород был заменены на гелий и азот, соответственно.

Управление мощностью имитатора конденсатора СПОТ осуществлялась изменением расхода воды через него. Регулирование осуществлялось так, чтобы мощность теплообменника соответствовала натурной (с учетом масштабного коэффициента) при таком же давлении второго контура. Максимальное несоответствие этой характеристики в экспериментах от таковой у натурного теплообменника, охлаждаемого воздухом, не превысило 5 %.

В таблице 4.5 показаны основные опорные точки мощностной характеристики имитатора конденсатора системы пассивного отвода тепла как функции давления второго контура.

Таблица 4.5 –Зависимость мощности имитатора теплообменника системы пассивного отвода тепла от давления во втором контуре

Давление пара в модели ПГ, МПа	0,1	0,2	0,3	0,5
Мощность модели СПОТ, кВт	86,5	132,2	159,3	195,2

В опытах моделировалась работа гидроемкостей СПЗАЗ. Для этого через патрубки, подключенные к сборному и опускному участку р.у. подавалась вода с заданным расходом. Его величина соответствовала натурному расходу из системы ГЕ-2 с учетом масштабного коэффициента стенда. За исключением первой ступени расходной характеристики СПЗАЗ, длительность функционирования остальных также соответствует натурной. Изменение расхода воды для одного канала системы ГЕ-2 на стенде приведено в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Изменение расхода воды для одного канала системы ГЕ-2 на стенде ГЕ-2М

Длительность ступени, с	0-1008	1008-6444	6444-24588	24588- 86400
Расход воды, кг/с	0,208	0,104	0,069	0,033

Температура воды, подаваемой от имитатора системы ГЕ-2, поддерживалась паровыми подогревателями на минимальном значении, при котором отсутствуют конденсационные гидроудары в модели РУ.

Объемный расход удаления ПГС из трубного пучка модели парогенератора был равен натурному для одного канала системы гидроемкостей второй ступени с учетом масштабного коэффициента.

Эксперименты начинались с вывода стенда на стационарный режим, соответствующий параметрам начала конденсационного режима ПГ в натурной реакторной установке. При этом в рабочий участок подавался пар с расходом 220 г/с. Это обеспечивалось поступлением необходимого расхода воды на конденсатор в защитной оболочке стенда и поступлением пара в модель ПГ (за счет работы теплообменника СПОТ).

После достижения стационарного состояния начиналось подмешивание гелия и азота в требуемых соотношениях в пар, поступающий на вход в «горячий» коллектор парогенератора.

Основные величины, которые измерялись при проведении экспериментов: параметры среды в рабочем участке и защитной оболочке стенда; параметры пара на

входе в модель ПГ (давление, температура, расход); скорость образования конденсата в трубчатке парогенератора; параметры пара во втором контуре (давление, температура); температура сред первого и второго контуров ПГ; расход воды от системы ГЕ-2; расход и подогрев воды в теплообменнике СПОТ стенда.

Опыт завершался после достижения 86400 с от момента подачи газов в пар. После этого происходила некоторая выдержка до момента полной конденсации паровой среды. Далее все внутренние объемы стенда дренировались.

4.4 Выводы по главе 4

1. Для определения наличия или отсутствия движения парогазовой среды через разрыв главного циркуляционного трубопровода и определения степени ее влияния на работу парогенератора в конденсационном режиме в АО «ГНЦ РФ ФЭИ», при непосредственном участии автора, был модернизирован стенд ГЕ-2М путем добавления к нему рабочего участка, включающего в себя имитатор реактора и модель защитной оболочки.

2. Температура сред, давление, расходы пара, неконденсирующихся газов и охлаждающей жидкости из системы ГЕ-2 в экспериментах соответствуют натурным, с учетом масштабного коэффициента стенда. Высотные отметки размещения оборудования также соответствуют натурным. Выбор величин масштабных коэффициентов основного оборудования установки соответствует зарубежному и отечественному опыту.

3. Для проведения экспериментов на данном стенде с участием автора была разработана оригинальная программа-методика. Всего на стенде ГЕ-2М с рабочим участком РУ-ЗО были выполнены четыре суточных эксперимента с различными сценариями развития аварийного процесса.

112

ГЛАВА 5. АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ МЕЖДУ ЗАЩИТНОЙ ОБОЛОЧКОЙ И РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКОЙ НА КОНДЕНСАЦИОННУЮ МОЩНОСТЬ ПАРОГЕНЕРАТОРА

После проведения модернизации исследовательской установки ГЕ-2М на нём был проведен ряд экспериментов по разработанной автором методике и при его непосредственном участии.

Главная цель экспериментов была в определении влияния процессов тепломассообмена в оборудовании реакторной установки на мощность парогенератора, работающего в аварийном конденсационном режиме. Также особое внимание было уделено процессу движения парогазовой смеси в разрыве главного циркуляционного контура.

Суммарно было осуществлено четыре суточных эксперимента. В нечетных экспериментах (№ 1 и №3) имитировался разрыв «холодной» ветки первого контура, а в четных опытах (№2 и №4) «горячего» трубопровода. Площадь сечения разрыва в первых двух экспериментах была в два раза меньше, чем в последних [100].

В ходе опытов с помощью 280 датчиков, измерявших температуру, давление и расходы сред, был получен массив экспериментальных данных, который был проанализирован автором. Результаты выполненного анализа представлены в данной главе.

5.1 Исследование работоспособности парогенератора ВВЭР при параметрах, характерных для аварийного режима

Как было сказано ранее, первая и вторая пары экспериментов отличались размером площади сечения. В экспериментах № 1 и № 2 она была равна натурной, с учетом масштабного коэффициента рабочего участка (1:144). В рамках этих двух экспериментов все основные параметры, включая расход пара на вход

стенда, параметры рабочих сред, концентрации неконденсирующихся газов в паре и расход отвода ПГС из объема трубного пучка парогенератора были одинаковые, за исключением размещения места разрыва.

Ключевым критерием эффективности работы системы пассивного отвода тепла, а, следовательно, и всего комплекса пассивных систем безопасности реактора BBЭP-1200 с РУ B-392M, является конденсационная мощность парогенератора. Динамика ее изменения в ходе экспериментов №1 и №2 отражена на рисунке 5.1. Из анализа графика можно отметить, что в первом опыте конденсационная мощность ($N_{\text{кон}}$) к концу эксперимента уменьшилась на 15 % от начальной. В то же время во втором эксперименте N_{кон} снизилось на 23 %, что на 53 % больше, чем в первом. Как было сказано ранее, единственным отличием в этих экспериментах была локализация места разрыва ГЦТ. В первом опыте он был расположен на входе в реакторную установку, во втором выходе из нее. При значений конденсационной мощности ЭТОМ разница В них достаточно значительна, как в абсолютном, так и относительном выражении [101]. Главным образом на мощность парогенератора в аварийном режиме влияет разница давлений сред первого и второго контура и концентрация неконденсирующихся газов на входе в «горячий» коллектор ПГ. Анализ протекающих на стенде процессов и полученных экспериментальных данных не выявил прямого влияния места локализации разрыва на давление первого и/или второго контуров. Следовательно, имеет смысл предположить, что разница в степени снижения конденсационной мощности парогенератора вызвана тем, что во втором эксперименте в трубный пучок ПГ поступило больше неконденсирующихся газов. А это, в свою очередь, говорит о существовании двух вариантов протекания процессов тепломассообмена. Либо в опыте №2 существовал подвод парогазовой смеси из объема защитной оболочки в объем первого контура, а в эксперименте №1 поступление воздуха отсутствовало, либо движение ПГС было в обоих опытах, но во втором эксперименте расход был больше.

На рисунке 5.2 изображено изменение конденсационной мощности парогенератора в эксперименте № 3 (разрыв «холодной» ветки) и № 4 (разрыв «горячей» ветки). Площадь сечения разрыва была увеличена вдвое по сравнению с экспериментами № 1 и № 2, соответственно [102].



Рисунок 5.1 – Изменение конденсационной мощности модели парогенератора стенда в экспериментах № 1 и № 2

Из рисунка видно, что в опыте № 3 мощность снизилась до 82 % от начальной (на 18 %), что не отличается в значимой степени от результатов эксперимента №1. В тоже время в эксперименте № 4 конденсационная мощность снизилась до 59 % от начальной (на 41 %), что на 16 % меньше, чем в эксперименте № 2.



Рисунок 5.2 – Изменение конденсационной мощности модели парогенератора стенда в экспериментах № 3 и № 4

Как видно, результаты, отраженные на рисунках 5.1 и 5.2 в целом, качественно не отличаются, изменяется только значение перепада между начальной и конечной мощностью. Также обращает на себя внимание, что во всех экспериментах при переходе на последнюю степень расхода пара на РУ происходит резкое заметное снижение конденсационной мощности парогенератора, что говорит о возможном поступлении воздуха из защитной оболочки.

Можно отметить, ЧТО В случае разрыва «холодной» ветки, после $\Pi\Gamma$ примерно первоначального снижения значение мощности за час увеличивается почти до исходной величины, и общая динамика уменьшения конденсационной мощности может быть определена линейным законом. В то же время в опытах с разрывом «горячей» ветки восстановления мощности не происходит. Это может свидетельствовать о наличии постоянного поступления воздуха в парогенератор в этом случае [103].

На рисунке 5.3 показана динамика изменения мощности в экспериментах с одинаковым местоположением и разной площадью сечений имитатора разрыва трубопровода ГЦК (ширина щели δ равна 14 мм и 28 мм соответственно). Из рисунка 5.3 видно, что до перехода на последнюю ступень мощностной характеристики РУ ее среднее значение практически не отличалось для обеих пар экспериментов. Также можно заметить, что колебания средней конденсационной мощности после перехода на последнюю ступень расхода пара на РУ больше для второй пары экспериментов.

Для объяснения этих фактов необходимо проанализировать физические принципы движение сред в разрыве ГЦТ [102]. В случае аварии с разрывом «холодной» ветки главного циркуляционного трубопровода поступающему из защитной оболочки объему воздуха необходимо преодолеть шахту реактора и барботировать через активную зону для того, чтобы попасть в пространство первого контура и, далее, в трубный пучок парогенератора. В то же время, в случае разрыва «горячей» ветки, среда защитной оболочки поступает в объем первого контура напрямую. Таким образом, в последнем случае паровоздушной смеси приходится преодолевать меньшее сопротивление и необходимый для движения среды ЗО перепад давления между средами защитной оболочки и первого контура будет меньше.



Рисунок 5.3 – Изменение относительной конденсационной мощности модели ПГ стенда ГЕ-2М в экспериментах.

На рисунках 5.4–5.7 показана динамика изменения давления сред первого и второго контуров, а также паровоздушной смеси, находящейся в защитной оболочке.



Р2 – давление в имитаторе защитной оболочки, МПа; Р3 – давление во 2 контуре, МПа; Р10 – давление в «горячем» коллекторе ПГ, МПа Рисунок 5.4 – Изменение давлений в модели парогенератора в эксперименте № 1



Р2 – давление в имитаторе защитной оболочки, МПа; Р3 – давление во 2 контуре, МПа; Р10 – давление в «горячем» коллекторе ПГ, МПа
 Рисунок 5.5 – Изменение давлений в модели парогенератора в эксперименте № 2



 Р2 – давление в имитаторе защитной оболочки, МПа; Р4 – давление во 2 контуре, МПа; Р10 – давление в «горячем» коллекторе ПГ, МПа
 Рисунок 5.6 – Изменение давлений в модели парогенератора в эксперименте № 3



Р2 – давление в имитаторе защитной оболочки, МПа; Р4 – давление во 2 контуре, МПа; Р10 – давление в «горячем» коллекторе ПГ, МПа Рисунок 5.7 – Изменение давлений в модели парогенератора в эксперименте № 4

Давление в «горячем» коллекторе парогенератора заведомо ниже, чем в РУ и при этом невозможно достоверно определить его потерю при движении через паропровод. Однако возможен качественный анализ соотношения давлений в ЗО и на входе в ПГ в различных опытах, так как для этих целей допустимо считать, что условия проведения экспериментов одинаковы. Из рисунков 5.4 – 5.7 видно, что давление в «горячем» коллекторе всегда выше, чем в ЗО, в экспериментах с разрывом «холодной» ветки, в то время как в опытах с разрывом «горячей» ветки – наоборот. Из этого можно сделать вывод, что в случае расположения разрыва на выходе из реактора разница давлений сред в РУ и ЗО будет заведомо меньше, чем в случае разрыва на входе в реактор. Чем меньше значение этого перепада давлений, тем больше вероятность возникновения условий, при которых будет возможен приток паровоздушной смеси в реакторную установку через разрыв трубопровода первого контура [103].

На рисунке 5.8 отражена динамика изменения ΔP_{1-2} (разница давлений сред первого и второго контуров) в экспериментах.



Рисунок 5.8 – Перепад давления между контурами стенда ГЕ-2М в различных экспериментах

Из рисунка 5.8 видно, что в каждом из опытов динамика изменения ΔP_{1-2} в значительной степени отличается от таковой в других экспериментах. Учитывая, что мощность РУ в ходе опытов изменялась только при переходе с одной ступени мощностной характеристики на другую, единственным фактором, который мог повлиять на величину перепада давления, является поступление неконденсирующихся газов. Как видно из рисунка 5.8, наибольшее количество неконденсирующихся газов поступило в объем первого контура в экспериментах с разрывом «горячей» ветки. Это объясняется тем, что, как показано выше, разница давлений между РУ и ЗО, препятствующая поступлению воздуха в объем рабочего участка, при моделировании разрыва на выходе из реактора, меньше, чем при разрыве «холодной» ветки ГЦК.

Обращает на себя внимание тенденция снижения перепада давления между контурами после перехода на последнюю ступень мощностной характеристики РУ. Это говорит о том, что хотя расход парогазовой смеси в ГЕ-2 в этот момент является минимальным, происходит процесс очистки ПГ от неконденсирующихся газов.

5.2 Анализ движения сред через сечение разгерметизации реакторной установки ВВЭР–1200

В случае аварии с разрывом главного циркуляционного трубопровода реактора ВВЭР–1200 с РУ В-392М теплоноситель первого контура из-за наличия остаточного тепловыделения кипит и пар через сечение разгерметизации поступает в ЗО. Расчеты показывают, что в результате этого процесса вскоре после начала аварии давление в гермообъеме возрастает до 0,43 МПа. После достижения своего максимального значения давление начинает снижаться. Это происходит в силу ряда причин: из-за уменьшения мощности реакторной установки, вследствие конденсации пара на «холодных» поверхностях

строительных конструкций и оборудования, также после запуска теплообменников СПОТ [104].

Теоретически возможно, что в силу сложных обратных связей между оборудованием СПОТ мощность парогенератора будет снижаться медленнее, чем мощность реактора. Тогда может наступить момент, когда поступающий в разрыв ГЦК пар уже не способен препятствовать подсосу воздуха из контейнмента через сечение разгерметизации в реактор. Определим условия возникновения такой ситуации.

Расход пара G_{BLX} в объем ЗО может быть определен как:

$$G_{\rm Bbix} = N_{\rm Bbix} / r, \tag{19}$$

где; *N*_{вых} – расход тепловой энергии, связанный с потоком пара, уходящим через сечение разгерметизации; *r* – теплота парообразования.

После окончания переходного периода и выхода систем ГЕ-2 и СПОТ на проектные параметры, баланс движения сред между объемом защитной оболочки и реакторной установки может быть определен по следующему соотношению [102]:

$$N_{\rm Bbix} = N_{\rm a3} - N_{\rm III} - G_{\Gamma E} (i' - i_{\Gamma E}), \tag{20}$$

где N_{a3} – мощность активной зоны; $N_{\Pi\Gamma}$ – совокупная мощность парогенераторов, работающих в конденсационном режиме; $G_{\Gamma E}$ – расход подпитки из системы ГЕ-2; $i_{\Gamma E}$ – энтальпия воды, поступающей в реактор из ГЕ-2.

Расход энергии на нагревании теплоносителя из ГЕ-2 настолько мал по отношению к другим составлявшим уравнения баланса, что им можно пренебречь.

Следовательно, наличие или отсутствие движения сред через сечение разрыва определяется балансом между генерацией пара в реакторе и мощностью парогенератора.

Для корректного описания процесса поступления воздуха в объем реактора необходимо учесть движение сред вследствие разных плотностей пара первого контура и парогазовой смеси, находящейся в объеме защитной оболочки, используя метод, предложенный в [105].

Обозначим давления в верхней и нижней частях сечения разгерметизации P_1 - P_4 , где P_1 , P_2 – давление в верхней части щели со стороны реакторной установки и защитной оболочки, соответственно; P_3 , P_4 – давление в нижней части щели со стороны РУ и ЗО. Если в ходе аварийного процесса мощность остаточных энерговыделений снижается быстрее, чем суммарная конденсационная мощность парогенераторов, то в определенный момент времени давление в первом контуре и в защитной оболочке сравняются ($P_3 = P_4$). Давление же сред с обеих сторон сечения разрыва вдоль его оси z будут равны:

$$P_1 = P_3 - \rho'' \cdot g \cdot z, \tag{21}$$

$$P_2 = P_4 - \rho_{CM} \cdot g \cdot z, \tag{22}$$

где ρ_{cM} – плотность паровоздушной смеси в 3O; ρ " – плотность пара в первом контуре.

Так как плотность паровоздушной смеси больше плотности пара, то давление внутри первого контура в верхней части разрыва оказывается выше, чем давление со стороны защитной оболочки на той же высоте. В результате этого возникает перепад давлений между средами первого контура и гермооболочки, равный:

$$\Delta P = P_1 - P_2 = g \cdot z \cdot (\rho_{cM} - \rho''). \tag{23}$$

. . . .

Различие давлений приведет к истечению пара через сечение разрыва, а его расход будет определяться гидравлическим сопротивлением щели:

$$\Delta P_{\rm con} = \frac{\xi \cdot (\rho'' \cdot v''^2)}{2}.$$
(24)

где ξ – местный коэффициент сопротивления сечения разрыва, v["] – скорость пара, истекающего через разрыв в ЗО. Приравняв (23) и (24) получим соотношение для расчета скорости пара:

$$v'' = \left[\frac{2 \cdot (\rho_{cM} - \rho'') \cdot z \cdot g}{\xi \cdot \rho''}\right]^{1/2}.$$
(25)

Итак, для того чтобы началось поступление воздуха из защитной оболочки через разрыв, необходимо, чтобы разница давлений между ЗО и реактором имела

большее значение, чем перепад давлений (23), возникающий вследствие разницы плотностей сред:

$$G_{\Delta P} = \rho'' \cdot b \cdot \int_{0}^{h} v''(z) \cdot dz, \qquad (26)$$

где *b* – ширина сечения разгерметизации. В случае гильотинного разрыва сечение будет иметь форму круга, и ширина щели будет равна:

$$b = 2 \cdot \left[z \cdot (D - z) \right]^2, \tag{27}$$

где *D* – диаметр разрыва.

Проинтегрировав уравнение (18), получим зависимость массы теплоносителя, теряемой через сечение разгерметизации, от величины разрыва и разницы плотностей сред ЗО и первого контура [105]:

$$G_{\Delta P} = D^{2,5} \left[g \cdot \rho'' \cdot (\rho_{cM} - \rho'') \right]^{0,5}.$$
 (28)

Так как тепловая энергия $N_{\Delta\rho}$, уносимая с потоком пара в гермооболочку в результате разницы плотностей сред, равна:

$$N_{\Delta P} = G_{\Delta P} \cdot r \tag{29}$$

то уравнение баланса (18) может быть записано в виде:

$$N_{\text{Bbix}} = N_{\Delta P} + N_{\Delta \rho} = N_{a3} - N_{\Pi\Gamma} - G_{\Gamma E}(i' - i_{\Gamma E}),$$

$$N_{\Delta P} = N_{a3} - N_{\Delta \rho} - N_{\Pi\Gamma} - G_{\Gamma E}(i' - i_{\Gamma E}),$$
(30)

где $N_{\Delta P}$ – тепловая энергия, уносимая через разрыв в результате разницы давлений первого контура и защитной оболочки [106].

Таким образом, для начала процесса массопереноса из защитной оболочки в реактор необходимо, чтобы разница между N_{a3} и $N_{\Pi\Gamma}$ превысила значение $N_{\Delta\rho}$.

На рисунке 5.9 изображено изменение температуры, по показаниям термопар, установленных в имитаторе разрыва при кратковременном прекращении подачи пара в рабочий участок.



Т253–Т255 – термопары, установленные верхней части щели;
 Т256–Т258 – термопары, установленные в нижней части щели
 Рисунок 5.9 – Изменение температуры во времени в различных точках имитатора разрыва ГЦК в тестовом опыте

Снижение давления в РУ за счет прекращения расхода пара привело к появлению перепада давлений между средами в моделях ЗО и реактора и, соответственно, движению парогазовой смеси через разрыв в объем реакторной установки. Как видно из рисунка 5.9 термопары, установленные в верхней и нижней частях имитатора разрыва, последовательно зафиксировали снижение температуры среды. После возобновления подачи пара в рабочий участок показания термопар стали расти, что свидетельствует о прекращении поступления воздуха.

Из рисунка 5.9 можно увидеть, что первыми на движение парогазовой смеси из 30 в реактор отреагировали термопары, установленные в нижней части имитатора разрыва, в то время как датчики температуры, установленные в верхней части щели, отреагировали с некоторым запаздыванием во времени.

Это может быть объяснено тем, что, согласно (23), чем больше расстояние от нижнего края щели, тем больше перепад давления, который необходимо преодолевать потоку паровоздушной смеси. Поэтому первоначально воздух начинает поступать через нижнюю часть щели, а затем, по мере роста перепада давления, эта область расширяется до нижней образующей разрыва [104].

5.3 Анализ процессов поступления парогазовой среды в объем модели РУ

На рисунках 5.10–5.13 представлено изменение температуры среды в имитаторе разрыва.



Т253 – Т255 – термопары, установленные в верхней части щели;
 Т256 – Т258 – термопары, установленные в нижней части щели
 Рисунок 5.10 – Изменение температуры во времени в разных точках имитатора разрыва ГЦК в эксперименте № 1



Т247 – Т249 – термопары, установленные верхней части щели;
 Т250 – Т252 – термопары, установленные в нижней части щели
 Рисунок 5.11 – Изменение температуры во времени в разных точках имитатора разрыва ГЦК в эксперименте № 2



Т253 – Т255 – термопары, установленные верхней части щели;
 Т256 – Т258 – термопары, установленные в нижней части щели
 Рисунок 5.12 – Изменение температуры во времени в разных точках имитатора разрыва ГЦК в эксперименте № 3



Т247 – Т249 – термопары, установленные верхней части щели;
 Т250 – Т252 – термопары, установленные в нижней части щели
 Рисунок 5.13 – Изменение температуры во времени в разных точках имитатора разрыва ГЦК в эксперименте № 4

Как видно из рисунков 5.10-5.13, наблюдаются значительные колебания показаний термопар. Это свидетельствует об активном движении сред в этой зоне. При этом, большая амплитуда значений наблюдается для датчиков температуры,

установленных в нижнем краю разрыва, что может быть объяснено с помощью подхода, изложенного выше.

Из сравнения рисунков 5.10 и 5.11 видно, что разница амплитуд между показаниями термопар, установленными в нижней и верхней частях сечения разрыва меньше в случае экспериментов с «горячей» веткой ГЦК. Это дополнительно подтверждает то, что авария на выходе из реактора приведет к большему поступлению паровоздушной смеси из защитной оболочки в объем первого контура.

Анализ графика изменения мощности показал, что наибольшая амплитуда снижения ее значений наблюдалась в моменты изменения расходов пара, подаваемого на вход на стенд. Следовательно, разумно предположить, что имеет смысл проанализировать динамику изменения показаний термопар, установленных в разрыве ГЦТ, применительно именно к этим периодам времени [104].

На рисунке 5.14 изображено изменение температуры в верхней и нижней частях имитатора сечения разгерметизации при переходе с первой на вторую ступень мощностной характеристики рабочего участка в различных экспериментах.

В опыте с разрывом ГЦТ на входе в реактор наблюдалось эпизодическое снижение температуры в объеме имитатора разрыва (рисунок 5.14). Это однозначно говорит о том, что в эти периоды времени в объем первого контура поступала парогазовая смесь, которая в силу своих свойств заведомо более холодная чем «чистый» пар. Таких эпизодов было немного и их длительность составляет не более нескольких десятков секунд.

Прекращение движения парогазовой смеси через разрыв связано с тем, что в парогенератор поступает дополнительная масса неконденсирующихся газов, что усиливает его «отравление» и снижает конденсационную мощность. Из-за этого давление в модели реактора растет и в определенный момент превышает давление в ЗО, что приводит к прекращению поступления воздуха в объем первого контура [103]. Имеет смысл отметить, что малая продолжительность движения парогазовой смеси через разрыв говорит о том, что описанный выше процесс протекает достаточно быстро.

131

Кроме того, обращает на себя внимание тот факт, что на поступление воздуха в р.у. сильнее отреагировали нижние термопары, в то время как показания верхних изменились незначительно. Это дополнительно подтверждает выдвинутый ранее тезис о том, что движение воздуха начинается в нижней часть щели, а затем, по мере роста перепада давления, зона движения парогазвовой смеси расширяется вверх [104].



Рисунок 5.14 – Изменение температуры во времени в разных точках имитатора разрыва ГЦК при переходе с первой на вторую расходную ступень подачи пара в рабочий участок

Иная картина наблюдается в эксперименте № 2. Как видно из рисунка 5.14, невозможно точно определить момент начала поступления воздуха в имитатор ЗО. Однако температура в верхней части разрыва больше, чем в нижней, даже со стороны РУ, что говорит о наличии движения в этой области более холодной среды, чем пар первого контура. При этом амплитуда колебаний температуры превышает таковую в опыте № 1, за исключением момента поступления воздуха. Это позволяет утверждать, что воздух из модели гермоооболочки постоянно поступает в первый контур стенда малыми порциями. Таким образом, можно предположить, что описанный выше процесс «поступление воздуха – снижение конденсационной мощности – повышение давления в р.у. – прекращение движения среды ЗО в реакторную установку» приобретает в этом случае постоянный характер [106].

На рисунке 5.15 представлены показания термопар, установленных в имитаторах сечения разгерметизации, в момент перехода к третей ступени мощностной характеристики р.у.

Как можно увидеть из рисунка 5.15, характер изменения показаний термопар в экспериментах № 1 и № 2 в момент перехода на третью расходную ступень аналогичен. В обоих случаях наблюдаются значительные колебания температуры в нижней части щели. Тем не менее, имеется и ряд различий. Вопервых, в опыте № 2 амплитуда и, особенно, частота колебаний заметно выше чем в опыте № 1, что говорит о большей интенсивности процессов движения среды из ЗО в РУ. Во-вторых, в эксперименте с разрывом «горячей» ветки ГЦК отсутствует выраженный пик падения температуры в нижней части щели, в отличие от эксперимента с разрывом «холодной» ветки [106].

Это можно объяснить следующим образом: в случае экспериментов с разрывом ГЦК на входе в реактор поступление паровоздушной смеси через разрыв из ЗО в объем первого контура в момент перехода на новую расходную ступень рабочего участка было незначительным и мощность парогенератора не снизилась. При этом, расход пара, поступающего в рабочий участок от ТЭЦ ФЭИ, снизился. Вследствие этого начинается снижение давления в первом контуре, перепад давлений между рабочим участком и защитной оболочкой стенда снижается и неконденсирующимся газам становится проще проходить через разрыв.

133



Рисунок 5.15 – Изменение температуры во времени в разных точках имитатора разрыва ГЦК при переходе со второй на третью расходную ступень

И, напротив, в случае опытов с «горячей» веткой в момент перехода на новую расходную ступень в первый контур поступает некоторый объем паровоздушной смеси из защитной оболочки, и, за счет этого, мощность ПГ снижается. Вследствие этого растет давление в первом контуре и перепад давления между рабочим участком и защитной оболочкой возрастает. Движение пара в объем защитной оболочки возобновляется, что приводит к повышению показаний термопар, установленных в разрыве.

На рисунке 5.16 показано изменение температуры в различных точках сечения имитатора разгерметизации при переходе на последнюю ступень мощностной характеристики РУ [100].



Рисунок 5.16 – Изменение температуры во времени в разных точках имитатора разрыва ГЦК при переходе с третей на четвертую ступень мощностной характеристики рабочего участка

Как можно увидеть из рисунка 5.16, процессы при переходе на последнюю расходную ступень, имеют тот же характер, что и при первом уменьшении расхода пара на входе в РУ. Однако снижение температуры в эксперименте №1 имеет значительно большую длительность, а колебания температуры в нижней части имитатора разрыва в опыте №2 обладают заметно большей амплитудой. Таким образом, именно на этом этапе происходит наибольший подсос воздуха из ЗО. Данное предположение подтверждается тем, что при переходе на последнюю расходную ступень конденсационная мощность ПГ снижается наиболее сильно.

Как видно из рисунков 5.14-5.16 характер процессов, протекающих при переходе с одной ступени мощностной характеристики рабочего участка на другую в экспериментах с разрывом «холодной» и «горячей» веток ГЦК достаточно сильно различается. В первом случае наблюдаются локальные, ограниченные по времени поступления воздуха в РУ, в то время как во втором эксперименте имеет место значительно более интенсивное движение среды из ЗО в объем первого контура.

На рисунке 5.17 показано изменение во времени перепада давления между средами первого контура и защитной оболочки в опытах с разрывом «горячей» и «холодной» веток.



 2 – опыты с разрывом «холодной» и «горячей» веток, соответственно Рисунок 5.17 – Перепад давления между средами гермооболочки и первого контура

Как видно из рисунка 5.17, перепад давления в опыте № 1 значительно превышает таковой в опыте № 2. Как было указано ранее, в случае разрыва на выходе из реактора движение паровоздушной среды из-под защитной оболочки в парогенератор при ее «подсосе» происходит без каких-либо дополнительных помех. В случае же аварии с разрывом «холодного» трубопровода паровоздушная смесь из защитной оболочки вынуждена барботировать через весь объем среды в реакторе для того, чтобы попасть в трубный пучок ПГ. Следовательно, во втором опыте требовался меньший перепад давления для начала поступления паровоздушной смеси в объем РУ, чем первом опыте [101].

5.4 Исследование возможности продления работы парогенератора после окончания первых суток аварии

Для исследования принципиальной возможности продления работоспособности парогенератора длительность опыта № 3 была увеличена до того момента, когда мощность ПГ опустится ниже 20 % от начальной. Общая продолжительность опыта составила более 50,5 ч. Опыт был разделен на два этапа. Первая стадия продолжалась в течение 24 часов. После этого начинался второй этап, в начале которого был прекращен отвод парогазовой смеси из трубного пучка парогенератора.

Основным измеряемым параметром в экспериментах являлась конденсационная мощность парогенератора. На рисунке 5.18 показано изменение мощности модели парогенератора в течение всего эксперимента [103].

Из рисунка 5.18 видно, что конденсационная мощность модели парогенератора в первые 24 часа опыта снизилась со 140 до 110 кВт. В ходе второго этапа опыта после прекращения отвода газов конденсационная мощность упала за 26,5 часов до 25 кВт, т.е. примерно в 4,5 раза.



Рисунок 5.18 – Зависимость изменения конденсационной мощности парогенератора от времени в опыте № 3

На рисунке 5.19 изображено изменение абсолютного давления сред первого и второго контуров в защитной оболочке стенда.



1 – в защитной оболочке стенда (паровоздушная смесь); 2 – на входе в модель парогенератора (среда первого контура); 3 – на входе в имитатор СПОТ (среда второго контура)

Рисунок 5.19 – Изменение давления во времени на стенде ГЕ-2М в опыте № 3

Как видно из рисунка 5.19, давление в защитной оболочке в ходе всего эксперимента практически соответствовало давлению среды первого контура в рабочем участке. Его значение снизилось с максимальной величины 0,385 МПа до 0,214 МПа к концу первого этапа эксперимента. Затем давление в модели защитной оболочки стабилизировалось на отметке 0,235 МПа и более не изменялось. Давление во втором контуре стенда понизилось в ходе эксперимента до уровня ниже атмосферного и составило к концу опыта 0,055 МПа. Причиной этого являлась значительная конденсация пара в контуре «модель парогенератора – имитатор СПОТ» при уменьшившейся перегенерации по причине ухудшения теплообмена в трубном пучке [100].

В течение первых суток градиент динамики значения разницы давлений сред первого и второго контуров был отрицателен. К моменту окончания первого этапа — это значение снизилось до 5,1 кПа.

На втором этапе опыта удаление ПГС из объема трубного пучка парогенератора был полностью прекращено, неконденсирующиеся газы начали накапливаться в нем. Вследствие этого коэффициент теплопередачи начал снижаться. Это привело к тому, что градиент динамики разницы давлений сред первого и второго контуров стал положителен. На момент прекращения эксперимента, его значение составило 0,018 МПа.

На рисунке 5.20 изображено изменение показаний термопар, установленных в имитаторе разрыва.

Как видно из рисунка 5.20, наибольшие пульсации температуры отмечались термопарами *T*255 и *T*258, установленными со стороны защитной оболочки, что связано с порционным поступлением пара из рабочего участка и циркуляцией среды внутри модели контейнмента [100].

Так как давление в рабочем участке и защитной оболочке стенда практически равны (рисунок 5.19), а среда в защитной оболочке представляет собой паровоздушную смесь с высокой концентрацией воздуха, то её температура значительно ниже, чем температура среды в первом контуре. Таким образом, движение среды по направлению из гермооболочки в первый контур стенда можно регистрировать по одновременному уменьшению показаний всех трех термопар, установленных в сечениях имитатора разрыва.

140



 а) – в верхнем сечении; б) – в нижнем сечении
 Рисунок 5.20 – Изменение температуры среды в имитаторе разрыва ГЦК в опыте № 3.

Как видно из графика на рисунке 5.20, изменение показаний температур в имитаторе разрыва движение парогазовой смеси в объем имитатора реакторной установки наблюдалось только в течение первого этапа опыта. Также, стоит отметить, что какого-либо значимого влияния этих эпизодов на мощности ПГ не обнаружено.

На рисунке 5.21 изображено изменение во времени среднего коэффициента теплопередачи *k* при конденсации пара из парогазовой смеси в трубном пучке модели парогенератора.

Из рисунка 5.21 видно, что в ходе первого этапа эксперимента коэффициент теплопередачи возрастал. К концу первых суток коэффициент теплопередачи вырос приблизительно на 15 % по сравнению с первоначальным значением.



Рисунок 5.21 – Зависимость среднего коэффициента теплопередачи во времени-в ходе эксперимента № 3

Следовательно, можно утверждать, что имеющегося расхода удаления парогазовой смеси из объема трубного пучка парогенератора достаточно для того, чтобы не происходил процесс накопления в нем неконденсирующихся газов.

Более того, материальный баланс в период действия последней расходной ступени ГЕ-2 смещен в сторону уменьшения массы этих газов [106]. Увеличение теплопередачи в конце первого этапа эксперимента может быть объяснено уменьшением расхода подаваемых на стенд неконденсирующихся газов. Это осуществлялось для имитации снижения газогенерации в реакторе из-за уменьшения мощности остаточного энерговыделения.

В то же время, в ходе второго этапа опыта, после прекращения сдувки парогазовой смеси из трубного пучка парогенератора теплопередача начала непрерывно снижаться. К моменту окончания эксперимента величина коэффициента теплопередачи составила только лишь 6 % от начального уровня. мощность ПГ снизилось примерно до 22 % Нужно отметить, что OT первоначальной величины (рисунок 5.18). Основной причиной этого явился рост температурного перепада между контурами из-за снижения давления второго контура, благодаря постоянной работе имитатора теплообменника СПОТ. [100].

На втором этапе эксперимента изменение коэффициента теплопередачи может быть описано следующей эмпирической зависимостью:

141

$$k = 4,933 + 57,38 \cdot e^{-5,2 \cdot 10^{-5} \cdot \tau}$$
(31)

где т – время, с.

Сравнение экспериментальных и расчетных значений коэффициента теплопередачи показано на рисунке 5.22. Как видно из рисунка, расчетные значения k не отличаются от экспериментальных более чем на 10 %.



Рисунок 5.22 – Сравнение экспериментальных и расчетных значений коэффициента теплопередачи

На рисунках 5.23 и 5.24 изображена усредненная скорость накопления газов в объеме трубного пучка и коллекторов модели парогенератора.

Данные графики были получены благодаря использованию корреляции между отношением коэффициентов теплоотдачи при конденсации чистого пара и ПГС, а также отношением масс пара и воздуха [106]:

$$\omega = -0.44 \sqrt{\frac{\alpha}{0,388 \cdot \alpha_0}}$$
(32)

где ω – процентное соотношение масс пара и воздуха; α – коэффициент теплоотдачи при конденсации парогазовой смеси; α₀ – коэффициент теплоотдачи чистого пара.





Рисунок 5.23 - Изменение отношения массы газов к массе ПГС в объеме трубного пучка и коллекторов модели парогенератора в течение первого этапа опыта





Рисунок. 5.24 - Изменение отношения массы газов к массе ПГС в объеме трубного пучка и коллекторов модели парогенератора в течение второго этапа опыта

Преобразовав широко известные формулы расчета коэффициента теплопередачи, можно вывести соотношение α/α₀ следующим образом:

$$\frac{\alpha}{\alpha_0} = \frac{N \cdot \Delta t_0 \cdot (\lambda \cdot F^2 \cdot \Delta t_0 \cdot \Delta t - N_0 \cdot \delta \cdot N)}{\Delta t \cdot (\lambda \cdot F^2 \cdot \Delta t_0 \cdot N_0 - N_0^2 \cdot N \cdot \delta)}$$
(33)

где N – мощность парогенератора; N_0 – мощность ПГ при работе на чистом паре, Δt – температурный перепад; Δt_0 – температурный перепад при конденсации чистого пара; F - площадь теплообменной поверхности; λ – коэффициент теплопроводности; δ – толщина стенок труб.

Как видно из рисунка 5.23, на первом этапе опыта, за счет наличия сдувки было накоплено только 0,7 % от совокупной массы парогазовой среды в трубном пучке и коллекторе парогенератора или 1,73 г. Это означает, что в среднем, в течение часа в трубный пучок поступало 0,072 г, в то время как на вход РУ подавалось, в среднем, 41 г/ч. Таким образом, большая часть неконденсирующихся газов, либо уходила в объем 30, либо отводилась из «холодного» коллектора ПГ посредством сдувки.

В то же время, на втором этапе эксперимента в объеме трубного пучка и коллекторов было накоплено значительно больше газов. Отношение массы поступивших неконденсирующихся газов к суммарной массе среды внутри трубного пучка и коллекторов ПГ составило 77 %. Это означает, что средняя скорость накопления газов в трубном пучке ПГ равнялась 7,4 г/ч, что более чем в 10 раз выше, чем при наличии сдувки. Однако скорость поступления газов на вход в рабочий участок в этот период составила 25,9 г/ч, т.е. в трубный пучок и коллектора парогенератора поступало не более чем 28,5 % от подаваемой на стенд массы газов. Остальная часть уходила в объем 30 через имитатор разрыва [105].
5.5 Выводы по главе 5

1. При непосредственном участии автора на стенде ГЕ-2М с рабочим участком РУ-ЗО были проведены четыре суточных эксперимента для исследования работоспособности системы пассивного отвода тепла с учетом наличия различных источников поступления неконденсирующихся газов.

2. В результате было определено, что мощность парогенератора, работающего в конденсационном режиме, не снижается более чем на 41 % при наихудших сценариях протекания аварии.

3. Выявлена степень влияния на работоспособность парогенератора местоположения разрыва ГЦТ. Показано, что в случае разрыва ГЦТ на входе в реактор мощность ПГ снижается на 9,5% меньше, чем при разрыве ГЦТ на выходе из реактора. Выявлено, что поступление паровоздушной смеси из-под защитной оболочки в той или иной степени происходит при всех сценариях аварии.

4. Проведен анализ условий возникновения перетока парогазовой смеси из объема защитной оболочки в реакторную установку.

5. Изучена динамика изменения температурного поля в имитаторах разрыва ГЦТ. На ее основании дана оценка процессу поступления неконденсирующихся газов из объема защитной оболочки в реакторную установку. Определено влияние на этот процесс локализации и геометрических характеристик разрыва, проанализировано распределение парогазовой смеси в имитаторе разрыва.

6. Для исследования возможности увеличения длительности времени работоспособности парогенератора эксперимент № 3 был продлен до момента, когда мощность ПГ снизится ниже, чем 20% от номинальной. Общая продолжительность эксперимента составила около 50,5 ч.

7. Была получена эмпирическая зависимость для расчета коэффициента теплопередачи при конденсации пара из парогазовой смеси в трубном пучке модели парогенератора, работающего в режиме отсутствия отвода ПГС из «холодного» коллектора ПГ.

8. Проведена расчётная оценка массы накопленных неконденсирующихся газов в трубном пучке и коллекторах парогенератора при его работе в режиме отсутствия отвода ПГС из «холодного» коллектора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Автором диссертации проведена комплексная экспериментальная работа по определению влияния тепломассообменных процессов в оборудовании реакторной установки на работу пассивных систем безопасности НВАЭС-2 с РУ В-392М. Заявленная цель диссертационной работы полностью выполнена. Все поставленные при этом задачи были решены, а именно:

1. Осуществлен обзор актуальных исследований ПО обоснованию функций пассивных безопасности проектных систем отечественных И зарубежных проектов реакторов. Показано, что различия в конструкциях рассматриваемых установок не позволяют использовать полученные в ходе исследований результаты напрямую для обоснования работоспособности пассивных систем безопасности реактора ВВЭР-1200 с РУ В-392М. При этом был изучен мировой опыт по решению исследуемой в данной работе проблемы, были выявлены ключевые подходы и основные методы по проведению экспериментов и изучаемой области.

2. Разработана методика проведения экспериментов по обоснованию проектной функции парогенератора в аварийном режиме при наличии процессов массопереноса паровоздушной смеси между защитной оболочкой и реакторной установкой.

3. В соответствии с разработанной методикой была осуществлена серия суточных экспериментов на крупномасштабном стенде ГЕ-2М.

4. Обоснована работоспособность парогенератора ВВЭР в аварийном режиме. Выявлено наличие отрицательных обратных связей между парогенератором, работающим в конденсационном режиме, и теплообменником СПОТ. Показана степень их влияния на поддержание эффективности работы системы пассивного отвода тепла.

5. В результате анализа полученных данных было определено влияние поступающей из защитной оболочки в объем первого контура паровоздушной смеси на работу парогенератора ВВЭР в конденсационном режиме.

Показано, что переток среды из защитной оболочки в реакторную установку возникает в той или иной степени при различных условиях протекания аварии. Изучена динамика изменения температурных полей в сечениях разрыва, выявлена степень локализации места разрыва главного циркуляционного влияния геометрических трубопровода И его размеров на работоспособность парогенератора.

6. Определена длительность работы парогенератора ВВЭР-1200 в аварийном конденсационном режиме до достижения пороговых значений мощности. Показано, что после окончания первых суток аварии и прекращения отвода парогазовой смеси из «холодного» коллектора парогенератора его мощность в течение 26,5 часов снижается до уровня в 20% от значения при работе на чистом паре.

Также были исследованы процессы, характерные для данного режима. Получены полуэмпирические формулы, позволяющие с удовлетворительной точностью рассчитать динамику изменения мощности парогенератора, перепада температур между контурами и коэффициент теплопередачи.

7. Результаты проведенного исследования позволили снять замечания НТЦ ЯРБ к проекту НВАЭС-2 в части влияния неконденсирующихся газов и получить лицензию Ростехнадзора на физический пуск и эксплуатацию шестого энергоблока Нововоронежской АЭС.

Полученный в ходе выполнения данной работы массив данных может быть использован для расчетного моделирования аварийных процессов в реакторной установке ВВЭР при работе пассивных систем безопасности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. EES EAEC Мировая энергетика. [Электронный ресурс]. — <u>https://www.eeseaec.org/</u> (Дата обращения 09.11.2021).

2. Рост потребления электроэнергии в мире будет покрыт низкоуглеродными источниками — МЭА. [Электронный ресурс]. — <u>https://renen.ru/rost-potrebleniya-elektroenergii-v-mire-budet-pokryt-nizkouglerodnymi-istochnikami-mea./</u> (Дата обращения 10.05.2024).

3. Бразовская, В.В. Возобновляемая энергетика как фактор достижения устойчивого развития стран мира / В.В. Бразовская, С.С. Гутман // Сборник трудов Национальной (Всероссийской) научно-практической конференции с зарубежным участием. — Санкт-Петербург. — 2021. — С.34-45

4. Electricity 2024. Executive summary. [Электронный ресурс]. — https://www.iea.org/reports/electricity-2024/executive-summary/ (Дата обращения 10.05.2024).

5. Бертелеми М. Полные затраты на производство электроэнергии / Бертелеми М., Измаил А., Крозат М. и другие// АЯЭ. — № 7298. — 2018. — С. 111

Поваров В.П. Системы безопасности АЭС-2006 / В. П. Поваров,
 В.Ф. Украинцев, Д.Б. Стацура, И.Н. Гусев, П.Д. Платонов, М.Ю. Тучков
 // — Воронеж: Издательство «Воронежская областная типография - издательство им.
 Е. А. Болховитинова». — 2020. — 540 с.

Андреев, В.В. Разработка моделей, алгоритмов и программного комплекса для решения задач оценки риска на АЭС при запроектных авариях / В.В. Андреев, М.А. Берберова, О.В. Золотарев, В.В. Чуенко, Е.В. Карпушин, Д.В. Дьячков, А.В. Суворов // Вестник Брянского государственного технического университета. — № 4 (89). — 2020. — С. 43-51.

8. Калякин, С.Г. Экспериментальные исследования теплофизических процессов в обоснование безопасности ВВЭР нового поколения / С.Г. Калякин, А.П. Сорокин, В.А. Пивоваров, Р.С. Пометько, Ю.Ф. Селиванов,

А.В. Морозов, О.В. Ремизов // Атомная энергия. — Т. 116. — Вып. 4. — 2014. — С. 241-246.

 Калякин, С.Г. Обоснование проектных функций системы пассивного залива ГЕ-2 усовершенствованного проекта АЭС с реактором ВВЭР / С.Г. Калякин, О.В. Ремизов, А.В. Морозов, Ю.С. Юрьев, Ю.В. Климанова // Известия вузов. Ядерная энергетика. — № 2. — 2003. — С. 94-101.

 Kopytov, I.I. Experimental investigation of non-condensable gases effect on Novovoronezh NPP-2 steam generator condensation power under the condition of passive safety systems operation / I.I. Kopytov, S.G. Kalyakin, V.M. Berkovich, A.V. Morozov, O.V. Remizov // Proceedings of the 17th International Conference on Nuclear Engineering. ICONE17. — Brussels. Belgium — 2009. — P. 735-743.

 Othmer, D.F. The Condensation of Steam / D.F. Othmer // Industrial and Engineering Chemistry. — Vol. 21. — Iss. 6. — 1929. — P. 577-583.

 Шлепкин А.С.. Анализ влияния режимных факторов на работу модели парогенератора ВВЭР в режиме конденсации пара / А.В. Морозов, А.С. Шлепкин // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. — Вып. 3. — 2016.— С. 91-99 (авторство не разделено).

 Fullwood, R.R. Probabilistic Safety Assessment in the Chemical and Nuclear Industries. — Butterworth-Heinemann, Boston, Oxford, 2000. — 545 p. — ISBN: 0-7506-7208-0.

14. Alamgir, M.D. ESBWR – Robust design for natural circulation and stability performance effectiveness / M.D. Alamgir, W. Marquino, J. Yang, P. Saha, L. Fennern, M. Colby // International Congress on Advances in Nuclear Power Plants 2012. ICAPP 2012. — Vol. 1. — 2012. — P. 45-54.

15. International Nuclear Safety Advisory Group, Basic Safety Principles for Nuclear Power Plants 75-INSAG-3. — IAEA, Vienna, 1988. — P.6-54

16. International Nuclear Safety Advisory Group, Basic Safety Principles for Nuclear Power Plants 75-INSAG-3 Rev. 1, INSAG Series No. 12. — IAEA, Vienna, 1999. — 97 p.

17. Морозов, А.В. Теплогидравлическое обоснование работоспособности системы пассивного залива активной зоны реактора ВВЭР: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.03 / Морозов Андрей Владимирович. — Обнинск, 2003. — 159 с.

 Altshuller, A.M. Main features of modern Russian design of NPP with high power VVER reactors (AES-2006 design) / A.M. Altshuller, S.V. Svetlov, A.V. Molchanov, A.M. Kazarin // International Congress on Advances in Nuclear Power Plants 2009. ICAPP 2009. — 2009. — P. 103-113.

 Haskin, F. Perspectives on Reactor Safety / F. Haskin, A. Camp, S. Hodge — The Commission, 1997. — P. 56-67.

20. The World Nuclear Industry Status Report 2016. [Электронный ресурс]. — <u>https://www.worldnuclearreport.org/The-World-Nuclear-Industry-Status-Report-2016-</u> <u>HTML.html</u> (Дата обращения 09.11.2021).

21. Никитин, М.Н. Численное моделирование поверхностного теплообмена и конвективного переноса / М.Н. Никитин. — Санкт-Петербург: Издательство «Политехника», 2019. — 278 с.

22. Alshehriab, A. Numerical modeling of vapor condensation over a wide range of non-condensable gas concentrations / A. Alshehriab, S. Andaliba, H.P. Kavehpour // International Journal of Heat and Mass Transfer. — No. 151. — 2020. — Article No. 119405. — 9 p.

23. Li, J.-D. CFD simulation of water vapour condensation in the presence of non-condensable gas in vertical cylindrical condensers / Jun-De Li // International Journal of Heat and Mass Transfer. — No. 57. — Iss. 2. — 2013. — P. 708-721.

24. Dehbia, A. Prediction of steam condensation in the presence of noncondensable gases using a CFD-based approach / A. Dehbia, F. Janasza, B. Bell // Nuclear Engineering and Design. — No. 258. — 2013. — P. 199-210.

25. Chen, C.-K. Turbulent film condensation in the presence of non-condensable gases over a horizontal tube. / C.-K. Chen, Y.-T. Lin // International Journal of Thermal Sciences. — No. 48. — Iss. 9. — 2009. — P. 1777-1785.

26. Lee, W.C. Forced convection film condensation on a horizontal tube with and without non-condensing gases / W.C. Lee, J.W. Rose // International Journal of Heat and Mass Transfer. — Vol. 27. — No. 4. — 1984. — P. 519-528.

27. Murase, M. Evaporation and condensation heat transfer with a noncondensable gas present / M. Murase, Y. Kataoka, T. Fujii // Nuclear Engineering and Design. — Vol. 141 (1-2). — 1993. — P. 135-143.

28. Ge, M. Experimental investigation of steam condensation with high concentration CO_2 on a horizontal tube / M. Ge, J. Zhao, S. Wang // Applied Thermal Engineering. — Vol. 61. — No. 2. — 2013. — P. 334-343.

29. Ge, M. Effects of extended surface and surface gold plating on condensation characteristics of steam with large amount of CO_2 / M. Ge, S. Wang, J. Zhao, Y. Zhao, L. Liu // Experimental Thermal and Fluid Science. — No. 92. — 2018. — P. 13-19.

30. Hu, H.W. Experimental investigation of condensation heat transfer on hybrid wettability finned tube with large amount of noncondensable gas / H.W. Hu, G.H. Tang, D. Niu // International Journal of Heat and Mass Transfer. — No. 85. — 2015. — P. 513-523.

31. Al-Diwany, H.K. Free convection film condensation of steam in the presence of non-condensing gases / H.K. Al-Diwany, J.W. Rose // International Journal of Heat and Mass Transfer. — Vol. 16. — Iss.7. — 1973. — P. 1359-1369.

32. Lu, J. Condensation heat and mass transfer of steam with non-condensable gases outside a horizontal tube under free convection / J. Lu, H. Cao, J. Li // International Journal of Heat and Mass Transfer. — Vol. 139. — 2019. — P. 564-576.

33. Liu, H. An experimental investigation of a passive cooling unit for nuclear plant containment / H. Liu, N.E. Todreas, M.J. Driscoll // Nuclear Engineering and Design.
— Vol. 199. — Iss.3. — 2000. — P. 243-255.

34. Морозов, А.В. Экспериментальное исследование работы модели парогенератора ВВЭР в конденсационном режиме / А.В. Морозов, О.В. Ремизов // Теплоэнергетика. — №5. — 2012. — С. 16-21.

35. Шлепкин А.С. Экспериментальное исследование тепломассообменных процессов при работе парогенератора ВВЭР в аварийном конденсационном режиме / А.С. Шлепкин, А.В. Морозов, Д.С. Калякин, А.С. Сошкина // Известия высших

учебных заведений. Ядерная энергетика. — № 1. — 2017. — С. 29-41 (авторство не разделено).

36. Ремизов, О.В. Теплопередача между конденсирующимся паром и кипящей водой в многорядном горизонтальном трубном пучке при естественной конвекции / О.В. Ремизов, А.В. Морозов, А.А. Цыганок // Известия Академии Наук. Энергетика. — № 2. — 2010. — С. 152-158.

37. Bryk, R. Experimental investigation of PWR accident scenarios at the PKL test facility / R. Bryk, L. Dennhardt, S. Schollenberger // E3S Web of Conferences. — 137.
— 2019. — Article No. 01016. — 11 p.

38. Шлепкин, A. C. Анализ экспериментальных данных по тепломассообменным процессам в трубном пучке модели парогенератора ВВЭР в конденсационном режиме / А.В. Морозов, А.С. // Труды 20-й Международной конференции молодых специалистов по ядерным энергетическим установкам (КМС-ОКБ 2018). Подольск. AO «Гидропресс». 2018. С. 274-281 (авторство не разделено).

Денисов, В.П. Реакторные установки ВВЭР для атомных станций / В.П.
 Денисов, Е.Г. Драгунов. — М.: ИздАТ, 2002. — 480 с.

40. Нигматулин Б.И. Электроэнергетика России. Мифы и реальность // [Электронный ресурс]. — http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file =article&sid=3011 (Дата обращения 09.11.2021).

41. Wright, R.F. Characterization of liquid entrainment in the AP1000 automatic depressurization system from APEX / R.F. Wright, T.L. Schulz // Proceedings of the 11th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics (NURETH-11). — Avignon, France. — October 2-6, 2005. — Paper: 381.

42. Wright, R.F. AP1000 Design Basis Event Simulation at the APEX-1000 Test Facility / R.F. Wright, J. Groome // Proceedings of the 2004 International Congress on Advances in Nuclear Power Plants, ICAPP-04. — Pittsburgh, Pennsylvania. — June 13-17, 2004. — P. 279-283.

43. Welter, K.B. Confirmatory testing investigating advanced passive plant thermal-hydraulics / K.B. Welter, S.M. Bajorek, B. Woods, J. Groome, J.N. Reyes //

Proceedings of 13th International Conference on Nuclear Engineering. ICONE13. — Beijing, China. — May 16-20, 2005. — P. 256-264.

44. Reyes, J.N. Oregon State University's Advanced Plant Experiment (APEX) AP1000 Integral Facility Test Program (Draft) / J.N. Reyes, J.T. Groome, B.G. Woods, J. DeNoma, E. Young, K. Abel // Proceedings of 13th International Conference on Nuclear Engineering. ICONE13. — Beijing, China. — May 16-20, 2005. — 83 p.

45. Wright, R.F. AP1000 passive residual heat removal heat exchanger confirmatory analysis / R.F. Wright, R.J. Schwall, C. Taylor, N.U. Karim, J.G. Thakkar, T. Schulz // Proceedings of ICONE14 International Conference on Nuclear Engineering. — Miami, Florida, USA. — July 17-20, 2006. — 7 p.

46. Cummins, W.E. AP1000 status overview / W.E. Cummins, R.F. Wright, T.L.
Schulz // Proceedings of 9th International Conference on Nuclear Engineering. ICONE 9.
— Nice, France. — April 8-12, 2001. — 33 p.

47. Mitsuhiro, S. Effects of secondary depressurization on core cooling in PWR vessel bottom small break LOCA experiments with HPI failure and gas inflow / S. Mitsuhiro, T. Takeshi, A. Hideaki, N. Hideo / Journal of Nuclear Science and Technology. — Vol. 43. — Iss. 1. — 2006. — P. 55-64.

48. Tasaka, K. ROSA-IV Large Scale Test Facility (LSTF) Test Program and First Look of Test Results / K. Tasaka, Y. Koizumi // Nippon Genshiryoku Gakkai-Shi— Vol. 29. — Iss. 1. — 1987. — P. 18-30.

49. Fethke, M. First experiments of the passive safety system building condenser in the NOKO test facility and post-test calculations using the RALOC code / H.Jaegers, E.
F. Hicken // Proceedings of ICONE6 6th International Conference on Nuclear Engineering. ICONE-6506. — San Diego, California. — May 10-14, 1998. — P. 345-365.

50. Fethke, M. Modification of the NOKO test rig facility for the experimental investigation of the building condenser. Report No. 3440. / M. Fethke, H. Jaegers // Berichte der Forschungszentrum Jülich GmbH. — 1997. — 78 p.

51. Gamble, R.E. Pressure scaling analysis of the SBWR and integral test facilities post test review / R.E. Gamble, A. Hunsbedt, B.S. Shiralkar, G. Yadigaroglu //

Proceedings of ICONE5 5th International Conference on Nuclear Engineering. ICONE5-2073. — Nice, France. — May 26-30, 1997.

52. Hart, J. TEPSS – Technology enhancement for passive safety systems / J. Hart, W.J.M. Slegers, S.L. de Boer, M. Huggenberger, J.L. Jimenez, J.L. Munoz-Cobo Gonzalez, F. Reventos Puigjaner // Nuclear Engineering and Design. — Vol. 209. — Iss. 1–3. — 2001. — P. 243-252.

53. Moonesi Shabestary, A. Modelling of passive heat removal systems: A review with reference to the Framatome KERENA BWR reactor: Part I / A. Moonesi Shabestary, F. Zedler, Y. Zhang, R. Manthey, D. Lucas, C. Schuster, S. Leyer, A. Hurtado, U. Hampel // Energies. — Vol.13. — No. 1. — 2019. — 34 p.

54. Bandurski, T. Influence of the distribution of noncondensibles on passive containment condenser performance in PANDA / T. Bandurski, M. Huggenberger, J. Dreier, C. Aubert, F. Putz, R.E. Gamble, G. Yadigaroglu // Nuclear Engineering and Design. — Vol. 204. — Iss. 1-3. — 2001. — P. 285-298.

55. Francois, P. Simulation of the PANDA isolation condenser using CATHARE code / P. Jean-Francois, A. Yannick // Proceedings of 9th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-9). — San Francisco, California, USA. — October 3-8, 1999. — P. 122-124

56. Huggenberger, M. New passive decay heat removal tests in PANDA / M. Huggenberger, C. Aubert, J. Dreier, O. Fischer, H.J. Strassberger // Proceedings of 6th International Conference on Nuclear Engineering. ICONE-6264. — San Diego, California. — May 10-14, 1998. — P. 301- 310

57. Молчанов, А.В. Сооружение атомных электростанций нового поколения. Энергоблок АЭС с ВВЭР-640 / А.В. Молчанов — Санкт-Петербург: Институт «Атомэнергопроект», 2002. — 18 с.

58. Bezlepkin, V.V. Passive heat removal system for reactor plant of new generation VVER-640 / V.V. Bezlepkin, S.V. Svetlov, S. B. Alexeev // Proceedings of International Congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP 2003). — Cordoba, Spain. — 2003.

59. Пантюшин, С.И. Разработка системы удержания расплава и охлаждения корпуса реактора при тяжелых запроектных авариях для АЭС с РУ ВВЭР-600 и РУ ВВЭР ТОИ / С.И. Пантюшин, М.А. Быков, В.А. Мохов, А.М. Волчек, Ю.А. Звонарев, В.Ф. Стрижов, А.Е.Киселев, А.С. Филиппов, Н.И. Дробышевский, К.С. Долганов, Е.В. Моисеенко // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Обеспечение безопасности АЭС. — №. 30. — 2011. — С. 45-59.

60. Bánáti, J. Experimental and numerical study of long-term cooling of VVER640 reactor in the PACTEL facility using thermal hydraulic codes / J. Bánáti, E. Virtanen,
H. Purhonen, S. Alexandrine, S.N. Volkova // Proceedings of 9th International Conference
on Nuclear Engineering (ICONE-9). — Nice, France. — April 8-12, 2001.

61. Alexeev, A. RELAP5 and CATHARE analyses of the PACTEL experiments on the long-term cooling of the VVER-640 power plant after a large break LOCA /A. Alexeev, J. Bánáti, E. Virtanen // Proceedings of International Youth Nuclear Congress. — Bratislava, Slovakia. — April 11-16, 2000. — 8 p.

62. Migrov, Y.A. Investigating decay heat removal processes for the emergency cooling and fuel storage pools in the VVER-640 using the PACTEL / Y.A. Migrov — Technical Report, Sosnovy Bor, NITI. — 1999.

63. Sviridenko, I.I. Heat exchangers based on low temperature heat pipes for autonomous emergency WWER cooldown systems / I.I. Sviridenko // Applied Thermal Engineering Thermal Engineering. — Vol. 28. — Iss. 4. — 2008. — P. 327-334.

64. Зенов, В.М. Моделирование аварийного расхолаживания ВВЭР с помощью пассивности системы безопасности / В.М. Зенов, И.И. Свириденко // В сборнике СИЯЭиП. — Севастополь: СИЯЭиП. — № 3. — 2001. — С. 30-35.

65. Афров, А.М. Методические особенности обоснования пассивных систем безопасности АЭС с ВВЭР-640 / А.М. Афров, М.Ф. Рогов, В.Г. Федоров, И.В. Кухтевич, В.В. Безлепкин, Ю.А. Мигров, В.Б. Хабенский // Теплоэнергетика. — № 11. — 1996. — С. 16-21.

66. Bánáti, J. Simulation of long-term cooling in the VVER-640 power plant after a large break LOCA on the PACTEL facility – pre-test analysis using the RELAP5/MOD3.2 computer code / J. Bánáti, A. Alexeev // Research Report, Lappeenranta University of Technology. Rep. No: A-43. — Finland. — 2000. — P. 118 p.

67. Безлепкин, В.В. Расчетно-экспериментальное обоснование пассивных систем в проекте ЛАЭС-2 / В.В. Безлепкин, С.Е. Семашко, В.Г. Сидоров, И.М. Ивков, М.А. Затевахин, С.Б. Алексеев // Труды II Международной научнотехнической конференции «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики». — ВНИИАЭС. — Москва. — 2008. — С. 937-942.

68. Ивков, И.М. Расчетно-экспериментальное обоснование системы СПОТ
30 / И.М. Ивков // Сборник трудов конференции «Пассивные системы безопасность
АЭС». — АО «ГНЦ РФ – ФЭИ». — Обнинск. — 18-19 декабря 2008 г. — С. 232-237

69. Bezlepkin, V.V. Improvement of safety concept for modern designs of NPP with high power VVER reactors / V.V. Bezlepkin, S.V. Svetlov, A.V. Molchanov // Proceedings of ICONE15 15th International Conference on Nuclear Engineering. — Nagoya, Japan. — April 22-26, 2007. — P. 345-361.

70. Василенко, В.А. Значение и место крупномасштабного стенда КМС в решении проблем безопасности АЭС с ВВЭР / В.А. Василенко, Ю.А. Мигров, В.К. Засуха, В.К. Ефимов, В.В. Безлепкин, С.Е. Семашко // Атомная энергия. — Т. 115. — №. 4. — 2013. — С. 189-192.

71. Девяткин, М.И. Проблемы системы пассивного отвода тепла от защитной оболочки реактора ВВЭР-1200 / М.И. Девяткин // Вестник современных исследований. — №. 12.5. — 2018. — С. 97-99.

72. Безлепкин, В.В. Расчетно-экспериментальное обоснование системы пассивного отвода тепла из защитной оболочки АЭС с ВВЭР-1200 / В.В. Безлепкин, М.А. Затевахин, О.П. Кректунов, Ю.В. Крылов, О.В. Масленникова, С.Е. Семашко, Р.А. Шарапов, В.К. Ефимов, Ю.А. Мигров // Атомная энергия. — Т. 115. — №. 4. — 2013. — С. 183-188.

73. Балунов, Б.Ф. Исследование теплообмена и гидродинамики в водо- и воздухоохлаждаемых теплообменниках систем безопасности АЭС с водоохлаждаемыми реакторами / Б.Ф. Балунов, В. Д. Лычаков, А.А. Щеглов,

А.С. Матяш, К.С. Старухина // Вопросы атомной науки и техники. Серия: ядернореакторные константы. — № 5. — 2018. — С: 223-238.

74. Онуфриенко, С.В. Особенности концепции безопасности проекта АЭС-2006 на площадке ЛАЭС-2 / С.В. Онуфриенко, В.В. Безлепкин, А.В. Молчанов, С.В. Светлов, А.С. Солодовников, С.Е. Семашко // Тяжелое машиностроение. — № 2. — 2008. — С. 6-10.

75. Семашко, С.Е. Обоснование системы пассивного отвода тепла из объема защитной оболочки АЭС с ВВЭР: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.03 / Сергей Евгеньевич Семашко. — Санкт-Петербург, 2013. — 134 с.

76. Деревянко, О.В. Повышение безопасности энергоблоков АЭС с ВВЭР путем усовершенствования систем отвода тепла в аварийных режимах / О.В. Деревянко, А.В. Королёв, А.Ю. Погосов // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Обеспечение безопасности АЭС. — № 35. — 2015. — С. 49-54.

77. Поваров, В.П. Головной блок нового поколения ВВЭР-1200. Особенности ввода в эксплуатацию / В.П. Поваров // Труды X Международной научно-технической конференции «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики». — ВНИИАЭС. — Москва. — 2016.

78. Морозов, А.В. Экспериментальное обоснование проектных функций дополнительной системы пассивного залива активной зоны реактора ВВЭР / А.В. Морозов, О.В. Ремизов // Теплоэнергетика. — № 5. — 2012. — С. 22-27.

79. Морозов, А.В. Экспериментальное обоснование проектных функций дополнительной системы пассивного залива активной зоны реактора ВВЭР / А.В. Морозов, О.В. Ремизов // Теплоэнергетика. — № 5. — 2012. — С. 22-27.

80. Беркович, В.М. Особенности проекта АЭС нового поколения с реактором ВВЭР-1000 повышенной безопасности / В.М. Беркович, И.И. Копытов, Г.С. Таранов, М.Б. Мальцев // Теплоэнергетика. — №1. — 2005. — С. 9-15.

81. Гашенко, М.П. Экспериментальные исследования на интегральных стендах (ИСБ-ВВЭР и ПСБ-ВВЭР), обеспечивающие верификацию теплогидравлических кодов / М.П. Гашенко, И.А. Липатов, И.И. Шмаль, Г.И. Дремин, С.А. Галчанская, А.А. Ровнов, С.М. Никонов, Ю.С. Горбунов,

А.С. Молошников, И.В. Елкин, Ю.А. Мигоров, С.Н. Волкова, Ю.В. Юдов // Теплоэнергетика. — № 11. — 2002. — С. 49-55.

Щепетильников, Э.Ю. Анализ с помощью кода ATHLET экспериментов с малой течью на стенде ИСБ-ВВЭР / Э.Ю. Щепетильников, О.И. Мелихов, В.И. Мелихов // Теплоэнергетика. — № 12. — 1999. — С. 76-80.

83. Дробышевская, И.Н. Валидация кода HYDRA-IBRAE/H2O на ИСБ-ВВЭР ПСБ-ВВЭР интегральных экспериментах на стендах И / И.Н. Дробышевская, Н.А. Мосунова, С.С. Пылев, С.В. Цаун // Известия российской академии наук. Энергетика. — № 5. — 2019. — С. 131-147.

84. Электрогорский научно-исследовательский центр по безопасности атомных электростанций. [Электронный pecypc]. — https://erec.ru/deyatelnost/ nauchno-issledovatelskaya-stendovaya-baza/teplogidravlicheskij-stend-model-vodo-vodyanogo-energeticheskogo-reaktora-(psb-vver).html?ysclid=l1345a3957 (Дата обращения 09.11.2021).

85. Крошилин, А.Е. Численное моделирование экспериментов с течами теплоносителя из первого контура на интегральном стенде ПСБ-ВВЭР с помощью программного комплекса БАГИРА / А.Е. Крошилин, В.Е. Крошилин, А.В. Смирнов // Теплоэнергетика. — № 12. — 2005. — С. 15-22.

86. Калякин, С.Г. Верификация расчетного кода МАСТЕР-Z по результатам экспериментов на крупномасштабном теплогидравлическом стенде ГЕ-2 / С.Г. Калякин, О.В. Ремизов, Ю.С. Юрьев, Ю.В. Климанова, А.В. Морозов // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. — № 2. — 2003. — С. 72-84.

87. Dragunov, Y.G. Development and experimental study of passive safety features for advanced WWER plants / Y.G. Dragunov, N.S. Fil // Proceedings of the 10th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-10). — Seoul, Korea. — October 5-9, 2003.

88. Коршунов, А.С. Использование пассивных технологий обеспечения безопасности в проекте НВАЭС-2. Пути совершенствования пассивных технологий для исключения тяжелых аварий. / А.С. Коршунов, Г.С. Таранов // Сборник трудов международной научно-технической конференции «Безопасность, эффективность и

экономика атомной энергетики». — М.: Концерн «Росэнергоатом». — Т. 2008. — 2008. — С. 979.

89. Шлепкин, А.С. Анализ эффективности тепломассообменных процессов при аварийном конденсационном режиме работы модели парогенератора ВВЭР / А.С. Шлепкин, А.В. Морозов, Д.С. Калякин // Труды 19-й Международной конференции молодых специалистов по ядерным энергетическим установкам (КМС-2017). — Подольск. — АО ОКБ «Гидропресс». — 2017. (CD-ROM) (авторство не разделено).

90. Беркович, В.М. Разработка и обоснование технологии удаления неконденсирующихся газов для обеспечения работоспособности системы пассивного отвода тепла / В.М. Беркович, А.С. Коршунов, Г.С. таранов, С.Г. Калякин, А.В. Морозов, О.В. Ремизов // Атомная энергия. — Т.100. — Вып. 1. — 2006. — С. 13-19.

91. Шлепкин, А.С. Исследование работы модели парогенератора ВВЭР в конденсационном режиме при различных параметрах аварийного процесса / А.С. Шлепкин, А.В. Морозов, Д.С. Калякин, А.С. Сошкина // Теплоэнергетика. — № 5. — 2017. — С. 16-23 (авторство не разделено).

92. Шлепкин, А.С. Обобщение экспериментальных данных по влиянию неконденсирующихся газов на конденсационную мощность модели парогенератора / А.С. Шлепкин, А.В. Морозов // Вопросы атомной науки и техники. Серия: ядерно-реакторные константы. — Вып. 3. — 2018. — С. 147-157 (авторство не разделено).

93. Морозов В. В. Методы обработки результатов физического эксперимента / В. В. Морозов, Б. Е. Соботковский, И. Л. Шейнман // Учебное пособие. Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2024

94. Шлепкин, А.С. Экспериментальное исследование работы пассивных систем безопасности современных проектов АЭС с ВВЭР / А.С. Шлепкин, А.В. Морозов, Д.С. Калякин, А.Р. Сахипгареев // Сборник тезисов докладов 11-й МНТК «Безопасность, экономика и эффективность атомной энергетики». — Москва. — 2018. — С. 187-188 (авторство не разделено).

95. Морозов, А.В. Экспериментальное исследование теплогидравлических процессов в обоснование работоспособности пассивных систем безопасности в новых проектах АЭС с ВВЭР / А.В. Морозов, Д.С. Калякин, С.В. Рагулин, А.С. Сошкина, А.С. Шлепкин, А.Р. Сахипгареев // Вопросы атомной науки и техники. Серия: ядерно-реакторные константы. — Вып. 5. — 2016. — С.72-83. (авторство не разделено).

96. Калякин, Д. С. Конденсационный режим работы парогенератора ВВЭР при аварийных ситуациях: дис. канд. технических наук: 05.14.03. 2012. 137 с.

97. Шлепкин, А.С. Экспериментальные теплофизические исследования в обоснование работоспособности пассивных систем безопасности ВВЭР нового поколения / А.С. Шлепкин, А.В. Морозов, Д.С. Калякин, А.П. Сорокин, А.Р. Сахипгареев // Атомная энергия. — Т.127. — Вып 1. — 2019. — С. 13-17. (авторство не разделено).

98. Шлепкин, А.С. Исследование работы модели парогенератора ВВЭР в конденсационном режиме при различных параметрах аварийного процесса / А.С. Шлепкин, А.В. Морозов, Д.С. Калякин, А.С. Сошкина // Сборник докладов IV МНТК «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики». — Москва. — АО «НИКИЭТ». — Т. 2 — 2016. — С. 436-447 (авторство не разделено).

99. Шлепкин, А.С. Экспериментальное исследование влияния неконденсирующихся газов на процессы конденсации пара в трубчатке модели парогенератора ВВЭР / А.С. Шлепкин, А.В. Морозов // Труды научно-технической конференции «Теплофизика реакторов нового поколения» (Теплофизика-2018). — Обнинск. — АО «ГНЦ РФ – ФЭИ». — 2018. — С. 227-234 (авторство не разделено).

100. Шлепкин, А.С. Экспериментальное исследование влияния процессов в защитной оболочке на работу пассивных систем безопасности Нововоронежской АЭС-2 на крупномасштабном стенде/ А.С. Шлепкин, А.В. Морозов, Д.С. Калякин, А.Р. Сахипгареев, С.В. Рагулин // Труды XXII Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассобмена в энергетических установках». — Москва. — 2019. — С. 421-425 (авторство не разделено).

101. Шлепкин, А.С. Анализ влияния массообменных процессов между реакторной установкой и защитной оболочкой на работу парогенератора ВВЭР в конденсационном режиме / А.С. Шлепкин, А.В. Морозов // Сборник тезисов Всероссийской конференции с элементами научной школы для молодых учёных «XXXV Сибирский теплофизический семинар». — Новосибирск. — 2019. — С. 222 (авторство не разделено).

102. Shlepkin, A.S. Analysis of the influence of mass transfer processes between reactor and containment on the operation of the WWER steam generator in condensation mode / A.S. Shlepkin, A.V. Morozov // Journal of Physics: Conference Series. — IOP Publishing, 2019. — Vol. 1382. — No. 1. — P. 012137 (авторство не разделено).

103. Shlepkin, A.S. Analysis of the influence of heat and mass transfer processes in the WWER equipment on the duration of effective operation of passive safety systems / A.S. Shlepkin, A.R. Sakhipgareev, A.V. Morozov // Journal of Physics: Conference Series. — IOP Publishing, 2020. — Vol. 1677. — No. 1. — P. 012118 (авторство не разделено).

104. Балашевский, А.С. Расчетное обоснование пассивной системы снижения давления в гермообъеме РУ при аварии с течью в условиях длительного обесточивания энергоблока / А.С. Балашевский, В.А. Герлига, Н.И. Власенко // Глобальная ядерная безопасность. — Т. 7. — №. 2. — 2013. — С. 5-14.

105. Пометько, Р.С. Исследование процессов массообмена в реакторной установке с защитной оболочкой при разгерметизации первого контура на интегральной установке модели РУ ВВЭР / Р.С. Пометько, Н.И. Перепелица, Г.С. Таранов // Препринт ФЭИ-2619. — Обнинск. — 1997.

106. Шлепкин, А.С. Экспериментальное исследование тепломассообменных процессов, влияющих на длительность эффективной работы системы пассивного отвода тепла / А.С. Шлепкин, А.В. Морозов, Д.С. Калякин, А.Р. Сахипгареев // Сборник докладов 24-й Международной конференции молодых специалистов по ядерным энергетическим установкам (КМС-2022), — Подольск. — АО ОКБ «Гидропресс». — 2022. — С. 274-281 (авторство не разделено).