

Акционерное общество
«Государственный научный центр Российской Федерации –
Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского»

На правах рукописи



Шлепки Александр Сергеевич

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ
ВЛИЯНИЯ ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ 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)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Обнинск – 2024

Работа выполнена в Государственном научном центре Российской Федерации – Физико-энергетическом институте имени А.И. Лейпунского, г. Обнинск.

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Морозов Андрей Владимирович

Официальные оппоненты: **Болтенко Эдуард Алексеевич**
доктор технических наук, старший научный сотрудник, начальник отдела нестандартных теплотехнических измерений
АО «Электрогорский научно-исследовательский центр по безопасности атомных электростанций», г. Электрогорск

Лобанов Павел Дмитриевич
доктор технических наук, старший научный сотрудник Института теплофизики имени С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск

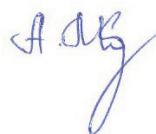
Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук

Защита состоится «16» апреля 2025 года в 14 часов 00 минут на заседании совета по защите диссертаций 75.1.077.01 на базе Акционерного общества «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского», по адресу: 249033, г. Обнинск Калужской обл., пл. Бондаренко, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» и на сайте <https://www.ippe.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 75.1.077.01
доктор технических наук



А.В. Морозов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Одним из важнейших направлений развития атомных станций на сегодняшний день является разработка, обоснование и внедрение пассивных систем безопасности (ПСБ), которые не требуют для своей работы участия оператора и не зависят от источников электроснабжения. В АЭС с реакторной установкой (РУ) В-392М к данным системам безопасности относятся системы пассивного залива активной зоны из гидроемкостей первой (ГЕ САОЗ) и второй (ГЕ СПЗАЗ) ступеней и система пассивного отвода тепла (СПОТ).

ГЕ САОЗ и ГЕ СПЗАЗ обеспечивают повторный залив активной зоны и поддерживают уровень теплоносителя в ней в течение 24 часов в случае возникновения аварии, связанной с большой течью теплоносителя первого контура с полным отказом активной части системы аварийного охлаждения активной зоны. СПОТ предназначена для перевода парогенератора в режим конденсации пара первого контура и сброса переданного второму контуру тепла в атмосферу через воздушные теплообменники.

Длительность работы СПОТ не ограничена, однако в случае аварии в трубный пучок парогенератора вместе с паром будут поступать и неконденсирующиеся газы. Даже при небольших массовых концентрациях эти газы способны в значительной мере уменьшить мощность парогенератора.

Следовательно, для обоснования проектной функции системы пассивного отвода тепла необходимо доказать, что поступление неконденсирующихся газов не снизит мощность парогенератора ниже допустимых параметров. Также необходимо исследовать тепло- и массообменные процессы в оборудовании первого контура, оказывающие влияние на эффективность работы парогенератора в конденсационном режиме.

Степень разработанности темы диссертации

В процессе диссертационного исследования были проанализированы экспериментальные и расчетные работы, относящиеся к системам пассивной безопасности современных и перспективных водо-водяных ядерных реакторов.

Определено, что в исследования по данной тематике внесли вклад ряд ученых и инженеров ведущих проектных, эксплуатационных и научных организаций атомной отрасли. Однако анализ проведенных ранее исследований показал, что в существующих работах практически не рассматривались обратные связи между параметрами теплообменника системы пассивного отвода тепла, парогенератора (ПГ), защитной оболочки (ЗО) и объема первого контура. Также в значительной доле анализируемых работ диапазон параметров проводимых экспериментов не включал те, что характерны для функционирования оборудования ВВЭР-1200 в аварийном режиме.

Кроме того, существующие исследования учитывают только наличие газогенерации в активной зоне и возможное поступления азота из объема гидро-

емкостей первой ступени. Ни в одной из анализируемых работ не проводилось определение влияния теоретически возможного перетока паровоздушной смеси из объема защитной оболочки в реакторную установку через сечение разрыва главного циркуляционного трубопровода. Также не выявлено работ, в которых был бы проведен анализ процессов, имеющих место при работе пассивных систем после окончания отвода парогазовой смеси из «холодного» коллектора парогенератора ВВЭР.

Цели и задачи

Цель диссертационной работы заключалась в обосновании комплексной работоспособности пассивных систем безопасности АЭС с 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 пассивных систем безопасности Нововоронежской АЭС-2 (НВАЭС-2) в процессе аварии, связанной с гильотинным разрывом главного циркуляционного трубопровода (ГЦТ) 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 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.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности

В рамках данной работы были проведены экспериментальные исследования по обоснованию работоспособности пассивных систем безопасности реакторной установки ВВЭР-1200 проекта В-392М и изучены тепло- и массообмен-

ные процессы, происходящие в оборудовании этих систем. Таким образом, отраженные в диссертации положения соответствуют пункту № 2 паспорта специальности 2.4.9. «Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность», а именно «разработка методик экспериментальных методик и экспериментальные исследования в реакторных условиях и вне реакторов свойств и характеристик материалов, конструкций, оборудования и систем с целью выявления закономерностей их изменения в течение жизненного цикла объектов ядерной техники».

Научная новизна работы

1. Впервые экспериментально установлено наличие отрицательных обратных связей между параметрами теплообменного оборудования атомной станции с реакторной установкой В-392М, используемого 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 пучке парогенератора РУ В-392М, работающего в конденсационном режиме, после прекращения отвода парогазовой смеси из его «холодного» коллектора. Обнаружена нелинейная зависимость мощности парогенератора от скорости накопления неконденсирующихся газов.

3. Получены полуэмпирические формулы, которые можно использовать для расчета основных параметров парогенератора, работающего в режиме конденсации пара.

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 параметрами теплообменного оборудования, используемого 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 АЭС с РУ 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.

Достоверность результатов работы

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.

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.

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 исследований, выполнил анализ полученного массива экспериментальных данных, на основе которого им были подготовлены публикации в рецензируемых журналах и доклады на различных научно-технических конференциях. Постановка цели и задач работы осуществлялась совместно с научным руководителем.

Апробация результатов

Основные положения и результаты работы представлялись и получили одобрение на: Научно-технических конференциях «Теплофизика реакторов ново-

го 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 научно-технических конференциях молодых специалистов (АО ОКБ «Гидропресс», Подольск, 2016–2019, 2022), IV 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 теплообмена 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 перечень ВАК, 4 – в других изданиях (в т.ч. индексируемых в РИНЦ и международных базах данных).

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованных источников. Работа содержит 161 страницу, 11 таблиц, 66 рисунков. Список цитируемой литературы включает 106 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

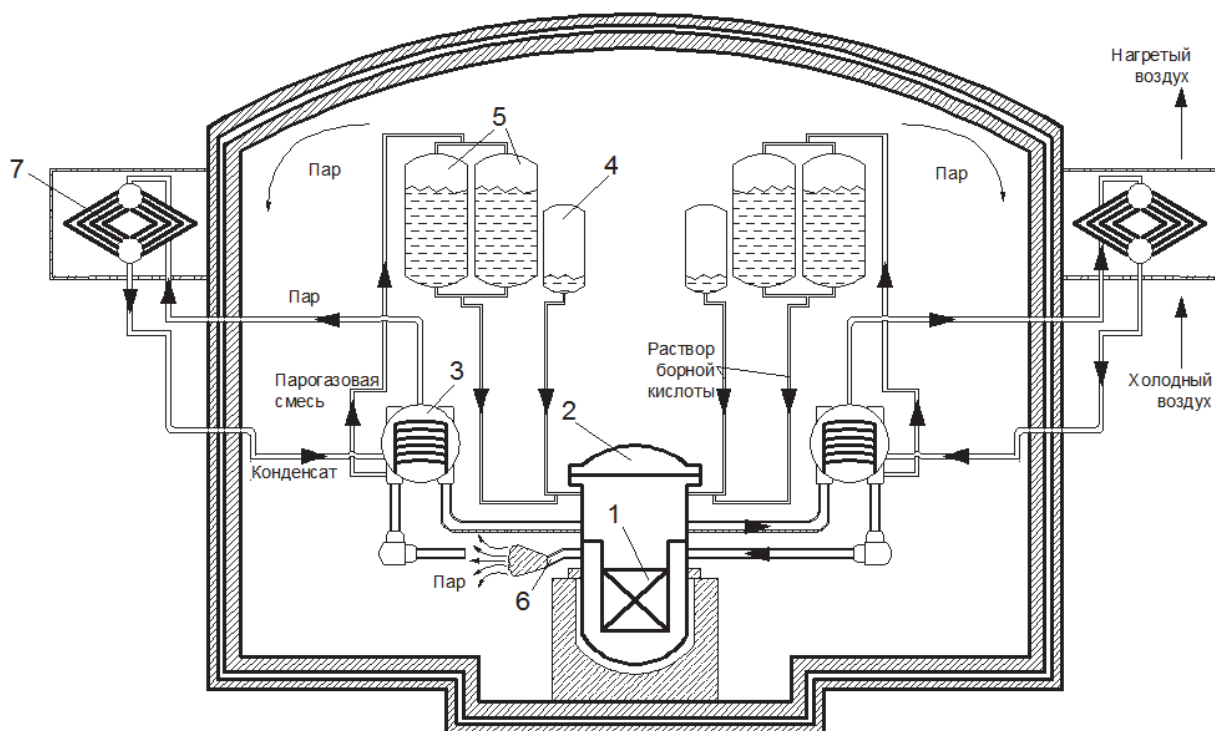
Во введении продемонстрированы преимущества атомной отрасли и отмечены проблемы безопасности АЭС. Показана роль человеческого фактора и обоснована перспективность использования систем безопасности, основанных на пассивном принципе, без использования внешних источников энергии и участия в их работе персонала. Продемонстрировано, что процессы, происходящие в оборудовании пассивных систем, имеют значимые особенности и изучены лишь частично, что ставит задачу проведения комплексных экспериментальных исследований.

В разделе обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи, показана новизна, достоверность результатов и их практическая значимость. Представлены положения, выносимые на защиту.

В главе 1 автором был проведен обзор работ в области конденсации водяного пара в присутствии неконденсирующихся газов. Также им были рассмотрены результаты проведенных экспериментальных исследований по обоснованию пассивных систем безопасности различных зарубежных и отечествен-

ных проектов АЭС: AP-1000 (США), KERENA (ЕС), АЭС с РУ В-407 (Россия), АЭС с РУ В-491 (Россия). Детально было рассмотрено устройство пассивных систем, включенных в состав атомной станции с реакторной установкой ВВЭР-1200 проекта В-392М (рис. 1).

Система гидроемкостей первой ступени состоит из четырех баков. Суммарно в них содержится 200 м³ раствора борной кислоты. При снижении давления в первом контуре ниже порогового открываются два последовательно установленных обратных клапана, расположенных на каждом трубопроводе, и происходит подача охлаждающей жидкости в объем первого контура.



- 1 – активная зона, 2 – корпус реактора, 3 – парогенератор,
4 – система гидроемкостей первой ступени, 5 – система гидроемкостей второй ступени,
6 – разрыв ГЦК, 7 – теплообменник системы СПОТ

Рис. 1. Пассивные системы безопасности АЭС с РУ В-392М

После опорожнения сосудов ГЕ САОЗ и при снижении давления в главном циркуляционном контуре до 1,5 МПа начинает работать система гидроемкостей второй ступени. В ее состав входят восемь гидроемкостей объемом 120 м³ каждая. В случае аварии в верхнюю часть гидроемкостей начинает поступать насыщенный пар под давлением, соответствующим давлению в реакторной установке. С учетом того, что сосуды расположены на большей высотной отметке чем реактор, то в совокупности давления пара и гидростатического давления достаточно для того, чтобы обеспечить необходимый расход борной кислоты из баков ГЕ СПЗАЗ в объем реактора. Система ГЕ СПЗАЗ, при условии совместной работы с системой пассивного отвода тепла (СПОТ), способна в течение 24 часов осуществлять отвод остаточных энерговыделений с помощью испарительного охлаждения активной зоны.

В состав СПОТ входят четыре идентичных независимых канала. В каждый из них включены два воздухоохлаждаемых теплообменника, предназначенные для конденсации поступающего в них пара. Принцип действия СПОТ заключается в следующем: в случае аварии парогенераторы переводятся в режим конденсации пара, поступающего в трубный пучок из активной зоны. Образовавшийся конденсат сливается обратно в реактор, за счет разницы в высотном расположении между ним и ПГ. Благодаря теплоотдаче от первого контура начинается кипение котловой воды в межтрубном пространстве. Образующийся пар поступает в воздушные теплообменники за счет естественной циркуляции. Далее пар конденсируется, отдавая тепло в атмосферу, а конденсат сливается обратно в объем парогенератора.

В ходе аварии в трубный пучок парогенератора поступают неконденсирующиеся газы, ухудшающие теплообмен. Для устранения этого фактора осуществляется отвод парогазовой смеси (ПГС) из «холодного» коллектора ПГ в объем сосудов ГЕ СПЗА3 с объемным расходом ПГС, равным значению расхода охлаждающей жидкости, истекающей из гидроемкостей.

В результате выполненного обзора литературных источников был проведен анализ некоторых из существующих и перспективных проектов реакторных установок поколения 3+. Определено, что каждая из них имеет в своем составе пассивные системы безопасности. Все они прошли процедуру обоснования своих проектных характеристик на крупномасштабных полновысотных интегральных стендах. В ходе исследований часто моделировалась совместная работа сразу нескольких систем. Несмотря на затратность такого метода, в рассмотренных источниках утверждается, что только так возможно достаточно качественно обосновать эффективность и надежность работы ПСБ.

Обзор выполненных исследований показал, что полученные в ходе рассмотренных исследований данные неприменимы для обоснования работоспособности ПСБ АЭС с реакторной установкой В-392М.

Во второй главе представлено описание экспериментального стенда ГЕ-2М, использованного для обоснования работоспособности пассивных систем безопасности АЭС с РУ В-392М.

На рис. 2 изображен общий вид исследовательской установки. В состав стенда ГЕ-2М входят: модель парогенератора реактора ВВЭР, бак-аккумулятор пара с системой подачи пара от ТЭЦ, имитатор теплообменника СПОТ. Высотные отметки размещения оборудования соответствуют проектным.

Длина труб парогенератора, их диаметр, а также высота трубного пучка ПГ соответствуют натурным. Площадь теплообменной поверхности модели в 48 раз меньше площади теплообменных трубок парогенератора ПГВ-1000МКП. Масса неконденсирующихся газов на входе в ПГ и расход отвода парогазовой смеси также соответствует натурному, с учетом масштабного коэффициента 1:48.

Отвод тепла от модели парогенератора осуществляется через имитатор теплообменника СПОТ, в которой конечным поглотителем тепла является техниче-

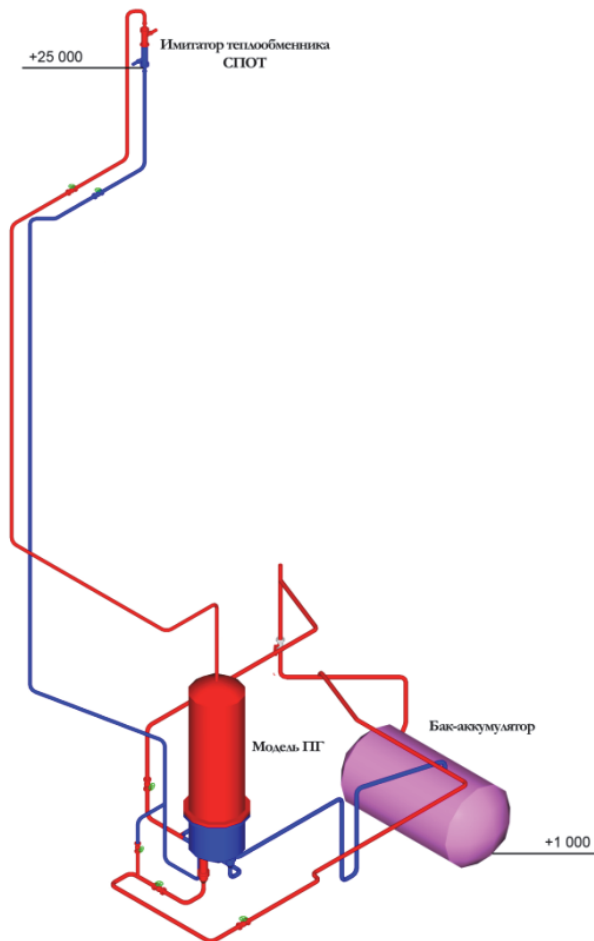


Рис. 2. Общий вид стенда ГЕ-2М

лектора. В первой серии экспериментов концентрации неконденсирующихся газов на входе в рабочий участок были определены согласно расчету суточного аварийного процесса, проведенного в АО ОКБ «Гидропресс». Расход отвода парогазовой смеси также соответствовал натурному, с учетом масштабного коэффициента. Эксперименты проводились с помощью метода стационарных состояний. На первом этапе на вход в парогенератор подавался только «чистый» пар. Далее в этот пар подмешивались неконденсирующиеся газы и одновременно осуществлялся отвод парогазовой смеси из коллектора ПГ. Таким образом достигалась возможность сравнения значений мощности парогенератора при различных концентрациях неконденсирующихся газов с максимально возможной на «чистом» паре.

Во второй серии экспериментов варьировались концентрации неконденсирующихся газов. В третьей серии опытов отсутствовал отвод ПГС из «холодного» коллектора парогенератора.

В третьей главе представлены результаты экспериментального исследования работоспособности парогенератора в конденсационном режиме. Автором был произведен анализ экспериментальных данных с целью определения особенностей процессов, протекающих в оборудовании первого контура и СПОТ.

Основные параметры опытов отражены в таблице 1.

ская вода. Зависимость изменения мощности теплообменника СПОТ стенда от давления пара на выходе из парогенератора соответствовала натурной для одного канала с учетом масштабного коэффициента.

В экспериментах кислород был заменен азотом из соображений безопасности (оба газа тяжелее пара), а водород по той же причине гелием (оба газа легче пара).

Основной целью проведения экспериментов на крупномасштабном теплогидравлическом стенде ГЕ-2М являлась оценка степени снижения конденсационной мощности парогенератора из-за присутствия в его трубном пучке неконденсирующихся газов.

Было выполнено три серии экспериментов с различными концентрациями азота и гелия на входе в парогенератор и расходом отвода парогазовой смеси из его «холодного» кол-

Таблица 1 – Основные параметры экспериментов на стенде ГЕ-2М

Номер	C_{N_2} , г/кг пара	C_{He} , г/кг пара	$C_э$, г/кг пара	Расход отвода ПГС, л/с
Первая серия опытов				
1	0,435	0,03	0,645	0,208
2	0,076	0,01	0,146	0,104
3	0,046	0,008	0,102	0,069
4	0,046	0,008	0,102	0,033
Вторая серия опытов				
5	2,1	0,04	2,4	0,208
6	0,12	0,053	0,54	0,208
7	0,12	0,041	0,45	0,208
8	0,11	0,042	0,44	0,208
9	0,41	0	0,41	0,208
10	2,1	0,043	2,4	0,163
Третья серия опытов				
11	2,1	0,05	2,4	–
12	0	0,3	2,1	–
13	0,02	0,0032	0,046	–
14	0	1,0	7,0	–

В опытах неконденсирующиеся газы подавались на вход «горячего» коллектора ПГ при различных соотношениях концентраций азота и гелия. Для анализа полученных результатов экспериментов был применен показатель эквивалентной суммы расхода газов $C_э$, учитывающий разницу плотности используемых сред. $C_э$ рассчитывается как $C_{N_2} + 7 \cdot C_{He}$. Этот показатель позволяет проводить сравнительный анализ результатов экспериментов между собой.

В первой серии опытов было выполнено исследование работоспособности парогенератора в конденсационном режиме. Номер эксперимента совпадает с номером расходной ступени системы ГЕ СПЗА3, определяющей расход ПГС из «холодного» коллектора парогенератора. Концентрация неконденсирующихся газов, поступающих в ПГ, определялась как средняя во временном диапазоне работы системы ГЕ СПЗА3 на каждой ступени расхода.

Главной величиной, определяющей работоспособность парогенератора в аварийном конденсационном режиме, является его мощность. На рис. 3 изображено изменение относительной конденсационной мощности модели парогенератора в экспериментах № 1–4.

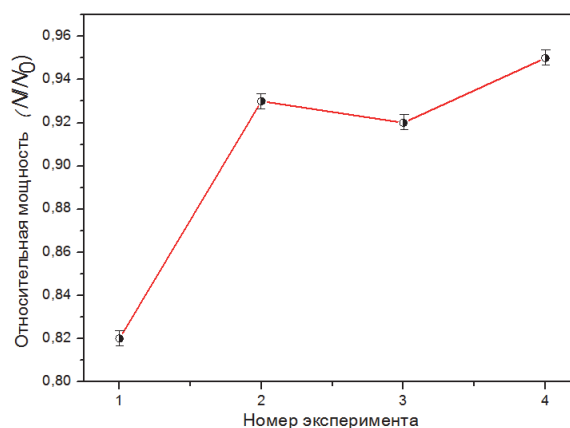
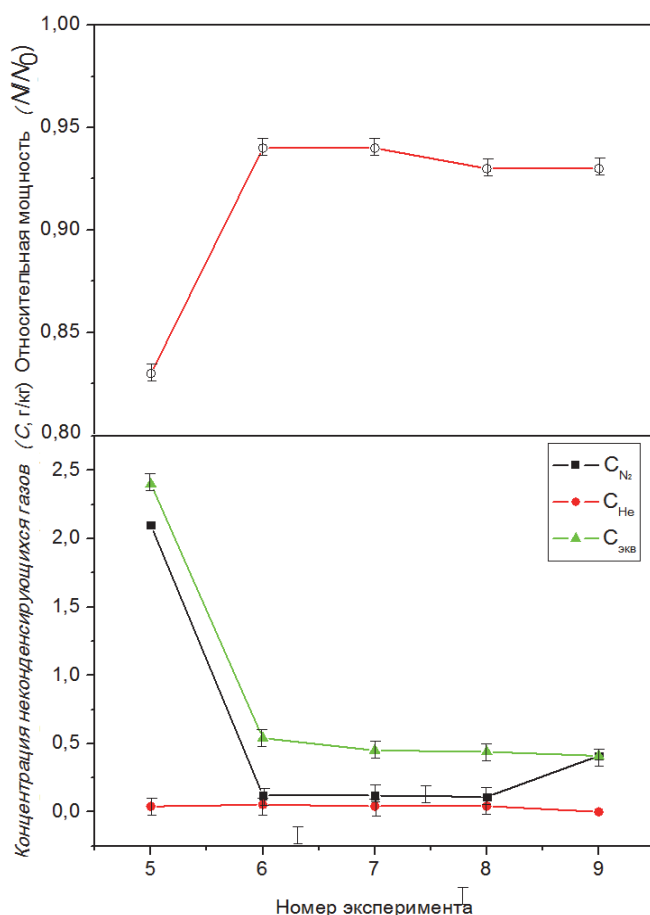


Рис. 3. Значения относительной конденсационной мощности ПГ в экспериментах № 1–4. N_0 – мощность на чистом паре, N – мощность при наличии неконденсирующихся газов

Как видно из рис. 3, ни в одном из опытов значение мощности ПГ не снизилась более чем на 20 % от начальной (без газов). Таким образом было определено, что парогенератор в конденсационном режиме работоспособен при параметрах, характерных для всех ступеней расхода системы ГЕ СПЗА3.

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.

На рис. 4 показана связь между степенью снижения конденсационной мощности парогенератора и составом парогазовой смеси, поступающей на вход в ПГ. Из рисунка видно, что состав смеси не оказывает значительного влияния на изменение конденсационной мощности ПГ. Так в эксперименте № 9 для приготовления ПГС использовался только гелий, а в опыте № 8 смесь азота и гелия, при этом их эквивалентные концентрации были равны. Несмотря на разницу в составе парогазовой смеси были получены достаточно близкие показатели снижения мощности ПГ. Также стоит отметить, что даже в эксперименте с самыми консервативными параметрами мощность не снижается ниже 82 % от значения при работе на «чистом» паре.



а) значение относительной конденсационной мощности парогенератора в опытах № 5–9,

б) значения концентраций газов и их эквивалентной суммы

Рис. 4. Зависимость изменения относительной конденсационной мощности модели ПГ от состава парогазовой смеси

получены достаточно близкие показатели снижения мощности ПГ. Также стоит отметить, что даже в эксперименте с самыми консервативными параметрами мощность не снижается ниже 82 % от значения при работе на «чистом» паре.

Анализ данных, полученных в первой и второй сериях экспериментов, позволил определить, что из-за движения сред в контурах, вызванного естественной циркуляцией, между параметрами ПГ и теплообменника СПОТ возникают отрицательные обратные связи, приводящие к стабилизации мощности ПГ.

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 главным образом за-

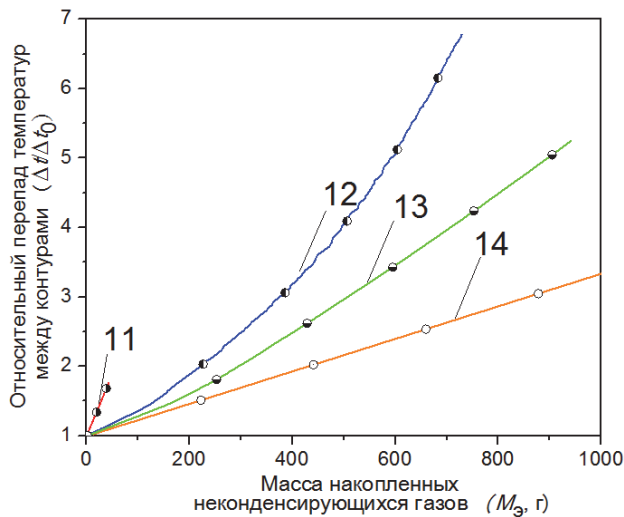
висит от температуры окружающего воздуха и не снижается в ходе аварийного процесса. Совокупность этих факторов приводит к тому, что теплообменник системы пассивного отвода тепла начинает расхолаживать второй контур. Вследствие этого повышается температурный напор между первым и вторым контурами. Это в свою очередь приводит к росту конденсационной мощности ПГ. 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.

Третья серия опытов была посвящена исследованию изменения мощности ПГ в конденсационном режиме при отсутствии отвода ПГС из «холодного» коллектора. Длительность проведения экспериментов № 11–14 была выбрана одинаковой – 7200 с. Только в эксперименте № 13 конденсационная мощность модели ПГ снизилась ниже предела измерения расходомера пара к 4200 с, что привело к прекращению опыта. Для обобщения результатов исследования был введен параметр относительного температурного напора $\Delta t/\Delta t_0$.

На рис. 5 изображена зависимость относительного температурного напора $\Delta t/\Delta t_0$ от суммарной массы накопленных в трубном пучке неконденсирующихся газов в экспериментах № 11–14.

Как видно из рис. 5, при одинаковой накопленной массе газов величина $\Delta t/\Delta t_0$ имеет различные значения, причем наименьшая величина относительного температурного напора достигается в опыте № 14 с максимальной C_3 на входе в ПГ. 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 температурного напора 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 напора 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 напор. Это негативно сказывается на длительности работы парогенератора в конденсационном режиме.

В связи с этим, величиной, качественно характеризующей процессы в трубном пучке ПГ, был принят показатель относительного температурного прироста $\Delta t' = \alpha \cdot (\Delta t/\Delta t_0)$, где $\alpha = [1 + M/\tau]^{-1}$ – поправочный коэффициент, учитывающий скорость накопления неконденсирующихся газов в трубчатке парогенератора (M/τ). На рис. 6 изображено изменение показателя $\Delta t'$ в экспериментах.



11–14 – номера экспериментов

Рис. 5. Зависимость $\Delta t/\Delta t_0$ от накопленной в трубном пучке массы неконденсирующихся газов M_3

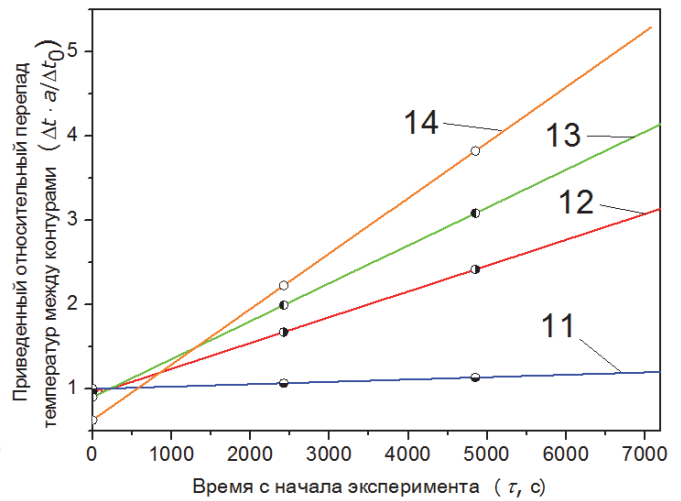


Рис. 6. Зависимость изменения показателя относительного температурного прироста $\Delta t'$ от времени

Из рис. 6 видно, что наибольшая скорость роста значения $\Delta t'$ характерна для эксперимента № 14, в котором конденсационная мощность ПГ уменьшалась наиболее быстро. И, напротив, наименьшее изменение показателя теплообмена наблюдается в эксперименте № 11 с минимальным изменением мощности ПГ. Таким образом, скорость изменения данной величины позволяет качественно оценить эффективность процессов передачи тепла в парогенераторе.

Анализ экспериментальных данных позволил получить зависимость для определения значения относительного перепада температур между контурами:

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

где N – конденсационная мощность, Вт, c – концентрация неконденсирующихся газов, кг/кг, r – теплота парообразования, Дж/кг, τ – время, с.

На рис. 7 изображено сравнение значений температурного напора, полученных экспериментально и с помощью формулы (1) в экспериментах № 11–14, проведенных без отвода ПГС из «холодного» коллектора парогенератора. Разница значений, полученных расчетным и экспериментальным путем, не превышает 10 % в среднем и 20 % максимально.

Также была получена формула, описывающая изменение конденсационной мощности ПГ во времени при подаче парогазовой смеси:

$$N = N_0 + a_2 \cdot \tau^{0,27}, \quad (2)$$

$$a_2 = -0,75 - 0,018 N_0 \cdot c, \quad (3)$$

где N_0 – конденсационная мощность ПГ в начальный момент времени, a_2 – коэффициент, учитывающий влияние накопленной массы неконденсирующихся газов и скорость их поступления.

На рис. 8 представлены результаты сравнения экспериментальных данных с расчетными величинами.

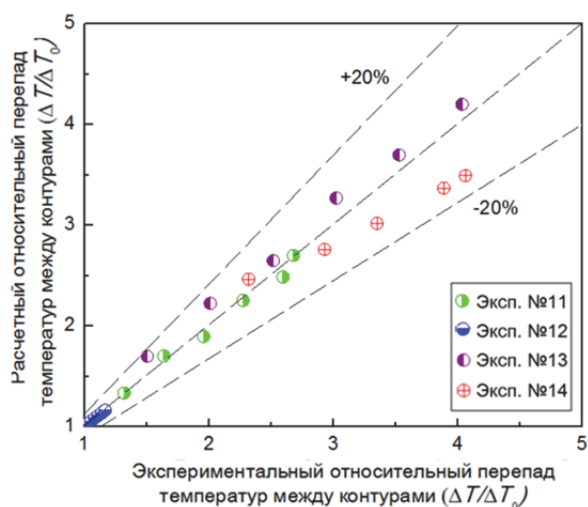


Рис. 7. Сравнение расчетных и экспериментальных значений относительных перепадов температур между контурами

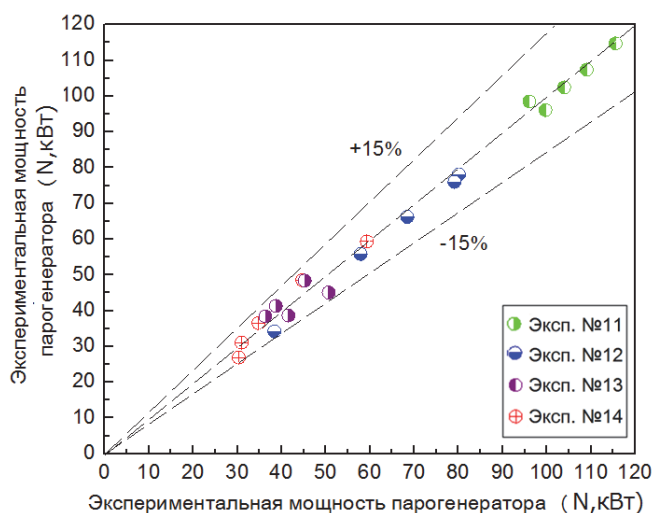


Рис. 8. Сравнение расчетных и экспериментальных значений конденсационной мощности модели парогенератора

Анализ полученных результатов показал, что отклонение рассчитанных значений от полученных в ходе опытов не превышает 11 % в среднем и 15 % максимально.

В ходе исследований был получен большой массив экспериментальных данных, углубивший понимание аварийных процессов, происходящих в парогенераторе ВВЭР, работающем в аварийном режиме. Однако в этих опытах не учитывалось возможное поступление паровоздушной смеси из объема контейнента в реактор через разрыв. Для исследования влияния воздуха из ЗО на работу парогенератора в конденсационном режиме стенд ГЕ-2М был модернизирован путем добавления в его состав имитаторов защитной оболочки и реактора.

В четвертой главе описывается модернизированный с непосредственным участием автора экспериментальный стенд ГЕ-2М с рабочим участком РУ-ЗО, имитирующим реакторную установку и защитную оболочку. Описана разработанная при участии автора методика проведения экспериментальных исследований.

На рис. 9 показан общий вид рабочего участка (р.у.) и защитной оболочки стенда ГЕ-2М. Рабочий участок имитирует корпус реактора ВВЭР и представляет собой коаксиальную трубную конструкцию, состоящую из двух труб 377×6 мм и 325×6 мм. Масштабный коэффициент равен 1:144 с сохранением высотных отметок основных элементов корпуса реактора. На рабочем участке расположены два целевых патрубка высотой 850 мм, которые предназначены для моделирования сечений разрыва на входе и выходе реактора. Металлический имитатор защитной оболочки представляет собой теплоизолированный цилиндрический сосуд со сферическим днищем и верхней плоской крышкой. Объем имитатора контейнента – 79 м³.

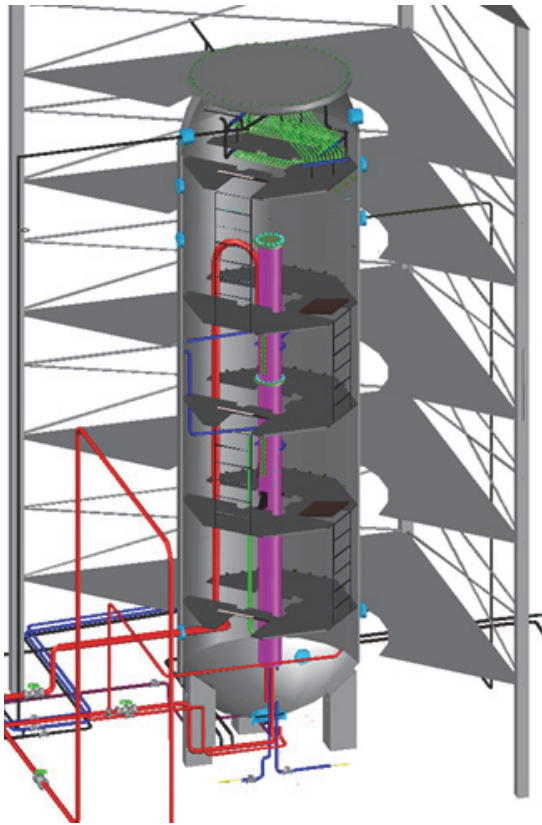


Рис. 9. Общий вид рабочего участка и имитатора защитной оболочки стенда GE-2М

используемых измерительных приборов. Приведенная погрешность для большинства приборов не превышала 1 %.

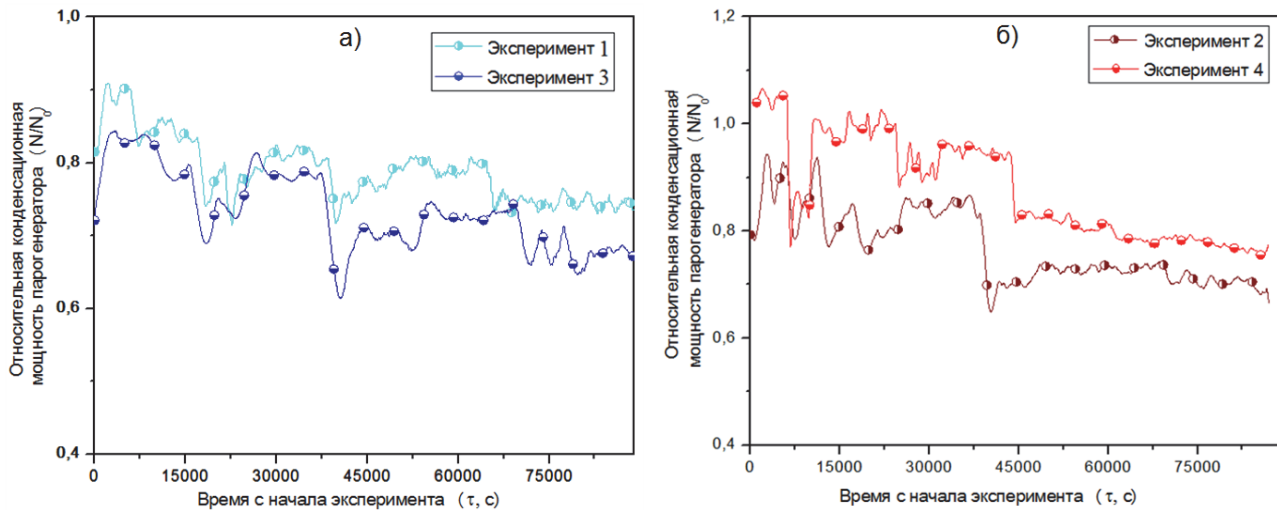
Экспериментальный стенд GE-2М предназначен для моделирования аварии «Разрыв ГЦТ полным сечением в условиях потери всех источников переменного тока». Преодоление аварии осуществляется пассивными системами безопасности СПОТ и GE СПЗА3. На стенде, при непосредственном участии автора, было проведено четыре суточных эксперимента, в которых моделировались две аварии с гильотинным разрывом ГЦТ на входе («холодная» ветка ГЦК) и две на выходе («горячая» ветка ГЦК) из реактора. Опыты отличались как местом, так и площадью моделируемого разрыва.

В пятой главе представлены результаты экспериментального исследования работоспособности парогенератора, работающего в конденсационном режиме, при наличии всех возможных источников неконденсирующихся газов. В ходе опытов с 280 датчиками, измерявших температуры, давления и расходы сред, был получен массив экспериментальных данных, который был проанализирован автором. Результаты выполненного анализа представлены в данной главе. В опытах № 1 и № 3 исследовались процессы, возникающие при гильотинном разрыве «холодной» ветки ГЦТ, в экспериментах № 2 и № 4 при разрыве «горячей» ветки. В опытах № 1 и № 2 ширина имитатора сечения разрыва составляла 14 мм, и общая площадь разрыва соответствовала натурной с учетом масштабного коэффициента рабочего участка. В экспериментах № 3 и № 4 ширина щели была увеличена в два раза. На рис. 10 показано сравнение результатов данных опытов.

Система контрольно-измерительных приборов и аппаратуры обеспечивает регистрацию и регулирование параметров процессов, протекающих во время проведения экспериментальных исследований. В процессе работы стенда измеряются следующие параметры:

- давление в характерных точках трубопроводов и основного технологического оборудования (р.у., ЗО, ПГ);
- уровень воды в основных элементах оборудования;
- температура воды и пара в трубопроводах стенда, а также температура сред в ЗО, р.у., ПГ;
- расходы пара на р.у., ПГ; расходы конденсата из «горячего» и «холодного» коллекторов ПГ; расходы в линиях подачи технической воды на оборудование стенда.

Заметный вклад в погрешности измерения параметров вносила погрешность



а) моделирование разрыва «холодной» ветки ГЦК,
 б) моделирование разрыва «горячей» ветки ГЦК

Рис. 10. Динамика изменения относительной конденсационной мощности модели парогенератора в экспериментах № 1–4

Как видно из рис. 10, результаты экспериментов с разным местоположением разрыва качественно практически не отличаются, изменяется только значение перепада между начальной и конечной мощностью. Разница в значениях конденсационной мощности может свидетельствовать о наличии поступления воздуха в парогенератор в случае экспериментов с моделированием разрыва «горячего» трубопровода.

Также из рис. 10 видно, что степень снижения мощности ПГ в значительной степени зависит от площади сечения разгерметизации. Необходимо отметить, что конденсационная мощность ПГ в течение суточного аварийного процесса не снижается ниже 59 % от начальной ни в одном из экспериментов.

Также анализировались перепады давлений между контурами стенда (рис. 11). Как видно из рис. 11, значение ΔP заметно отличается в различных опытах. Единственным фактором, который мог повлиять на этот параметр, является поступление неконденсирующихся газов. Таким образом, можно утверждать, что переток ПГС между защитной оболочкой и рабочим участком имел место и наибольший объем неконденсирующихся газов поступил в ПГ при моделировании разрыва «горячей» ветки ГЦК.

Дальнейший анализ экспериментальных данных потребовал осуществления более детальной оценки процессов, происходящих в плоскости разрыва главного циркуляционного

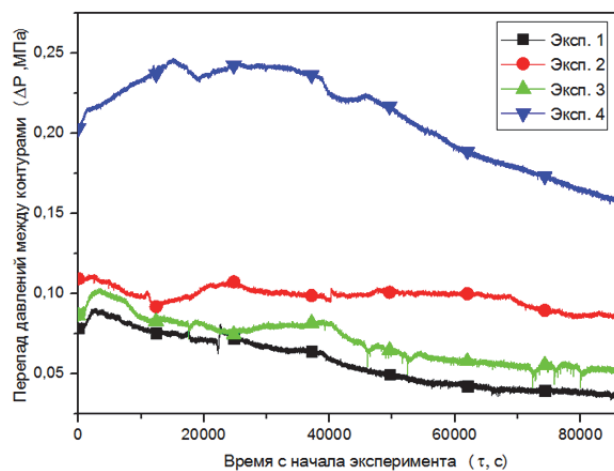


Рис. 11. Перепад давлений между контурами стенда ГЕ-2М в различных экспериментах

трубопровода. Было определено наличие перепада давления между ЗО и РУ равного:

$$\Delta P = P_1 - P_2'' = g \cdot z \cdot (\rho_{mix} - \rho''), \quad (4)$$

где P_1 , P_2'' – давления в верхней части щели со стороны реакторной установки и защитной оболочки соответственно, ρ_{mix} – плотность паровоздушной смеси в ЗО, ρ'' – плотность пара в первом контуре, z – расстояние от нижнего края разрыва. Данный перепад давления появляется из-за разницы плотностей сред в защитной оболочке и реакторе. В результате при равенстве давлений сред возникает движение из реакторной установки в защитную оболочку с расходом равным:

$$G_{\Delta p} = D^{2,5} \cdot [g \cdot \rho'' \cdot (\rho_{mix} - \rho'')]^{0,5}, \quad (5)$$

где D – диаметр разрыва.

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

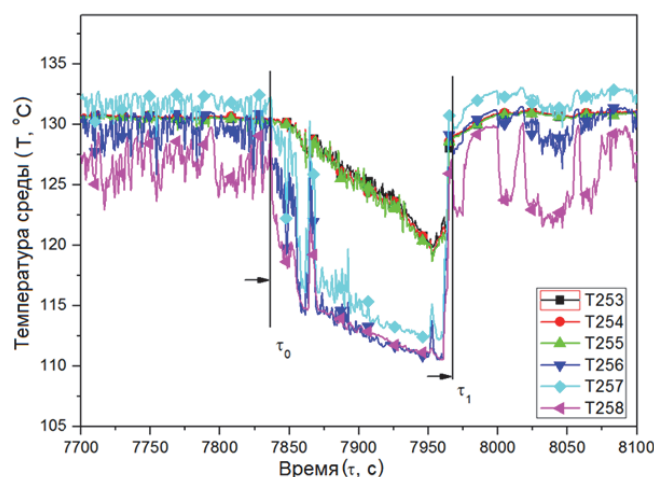
$$N_{\Delta p} = G_{\Delta p} \cdot r, \quad (6)$$

то уравнение баланса между средами в ЗО и РУ может быть записано в виде:

$$N_{out} = N_{core} + N_{\Delta p} - N_{SG} - G_{HA}(i' - i_{HA}), \quad (7)$$

где N_{out} – суммарная тепловая мощность, связанная с потоком пара, уходящего через сечение разгерметизации, N_{core} – энергия остаточного тепловыделения активной зоны, $N_{\Delta p}$ – тепловая энергия, уносимая через разрыв в результате разницы давлений первого контура и в объеме защитной оболочки, N_{SG} – тепловая энергия, отводимая парогенераторами, G_{HA} – расход охлаждающей жидкости из сосудов ГЕ СПАЗ.

Таким образом, для начала процесса массопереноса парогазовой смеси из защитной оболочки в реактор необходимо, чтобы N_{SG} превысила сумму $N_{\Delta p}$ и N_{core} .



T253–T255 и T256–T258 – термодатчики в верхнем и нижнем участках щели

Рис. 12. Изменение показаний термодатчиков, расположенных в сечении разрыва трубопровода ГЦК

Кроме того, так как этот перепад давлений увеличивается по высоте разрыва, то его наименьшее значение будет наблюдаться в нижней части разрыва.

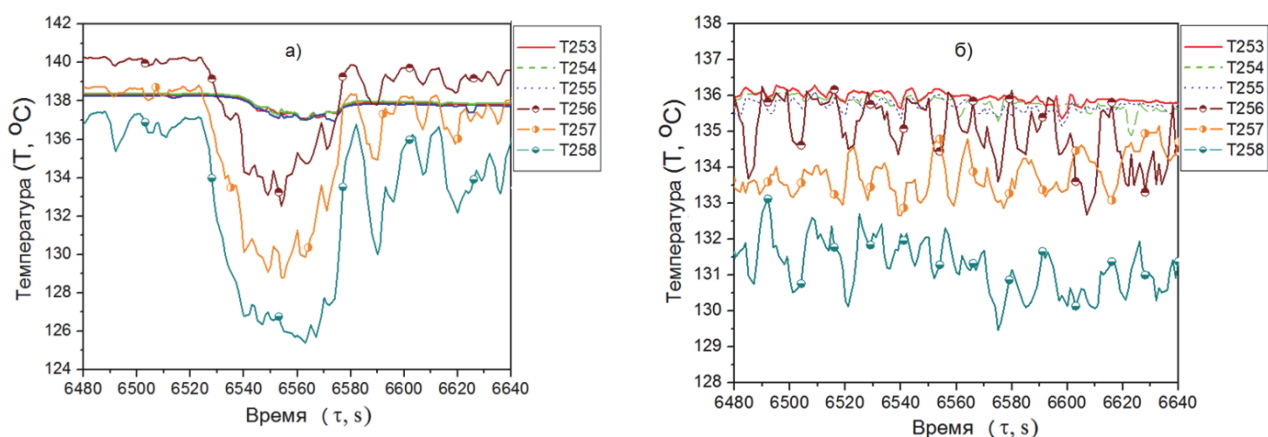
На рис. 12 изображено изменение показаний термодатчиков, установленных в сечении разрыва при кратковременном прекращении подачи пара в рабочий участок.

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 рис. 12, 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.

Также выяснилось, что картина движения сред в разрыве ГЦТ в значительной мере различается в опытах с моделированием разрыва «горячей» и «холодной» веток ГЦТ (рис. 13).

Как видно из рис. 13, в эксперименте № 1 с имитацией разрыва «холодного» трубопровода наблюдается резкое, но короткое по длительности, снижение температуры среды в нижней части сечения разрыва. Иная картина наблюдается в эксперименте № 2. Как видно из рисунка, невозможно точно определить момент начала поступления воздуха в ЗО. Однако температура в верхней части разрыва больше, чем в нижней, даже со стороны РУ. Это означает, что в случае разрыва как «холодной», так и «горячей» ветки ГЦК паровоздушная смесь в первый контур поступала через нижнюю часть разрыва. Также это позволяет утверждать, что в ходе эксперимента воздух из защитной оболочки периодически поступает в объем первого контура малыми порциями.



а) T253–T255 и T256–T258 – термопары, установленные в верхнем и нижнем участках щели в эксперименте № 1; б) T247–T249 и T250–T252 – термопары, установленные в верхнем и нижнем участках щели в эксперименте № 2

Рис. 13. Изменение показаний датчиков температуры, установленных в плоскости сечения разгерметизации

Для исследования принципиальной возможности продления работоспособности парогенератора и оценки запаса его мощности при отсутствии отвода парогазовой смеси, эксперимент № 3 был продлен до момента, когда мощность ПГ снизится до уровня ниже 20 % от номинальной. Общая продолжительность данного эксперимента составила ~ 50,5 ч. На рис. 14 изображено изменение мощности модели ПГ в течение всего эксперимента.

На рис. 15 изображено изменение показаний термопар, установленных в имитаторе сечения разрыва ГЦК.

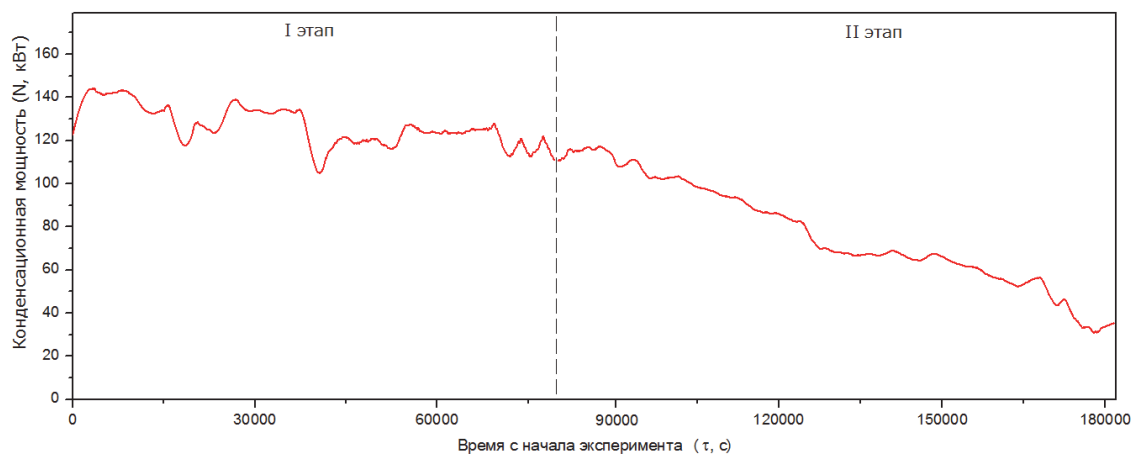
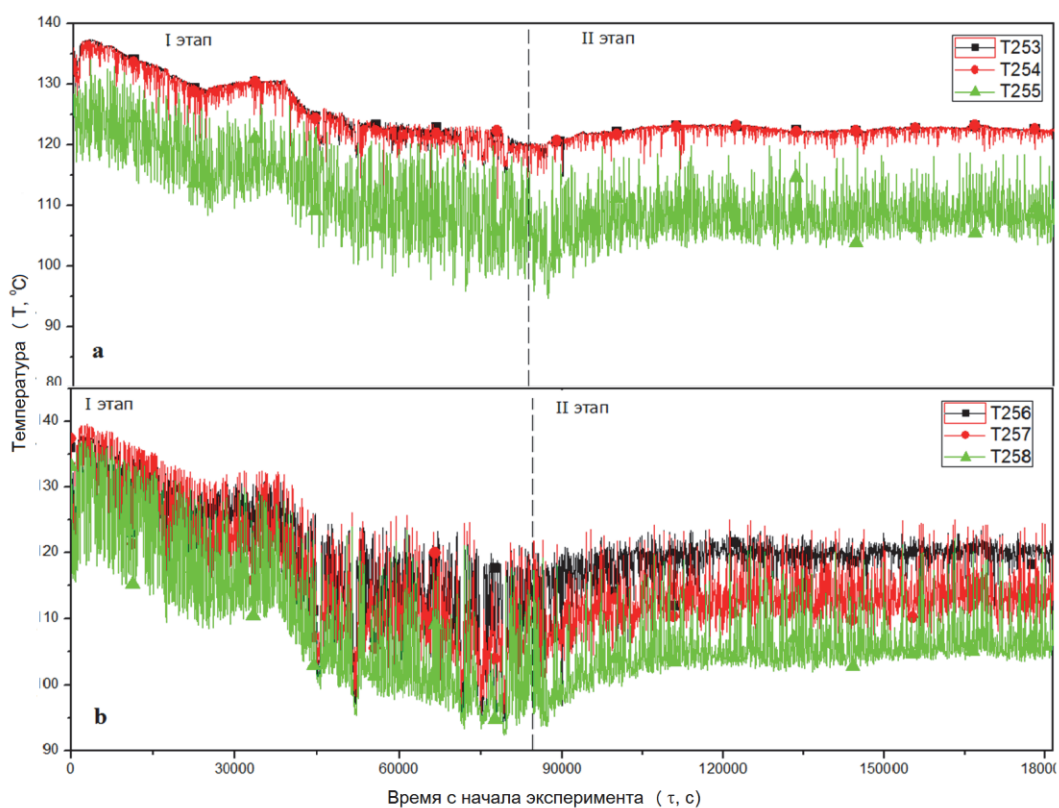


Рис. 14. Зависимость изменения конденсационной мощности парогенератора от времени в эксперименте № 3



а) в верхнем сечении, б) в нижнем сечении

Рис. 15. Изменение температуры среды в сечении разрыва ГЦТ в эксперименте № 3

Из рис. 15 видно, что на втором этапе эксперимента количество и амплитуда колебаний температуры в сечении разрыва значительно снизились, что говорит о прекращении поступления воздуха из объема защитной оболочки.

Изменение коэффициента теплопередачи на втором этапе эксперимента № 3 может быть описано следующей эмпирической зависимостью, полученной путем аппроксимации экспериментальных данных:

$$k = 4,933 + 57,38 \cdot e^{-5,2 \cdot 10^{-5} \cdot \tau}, \quad (8)$$

где τ – время, с.

На рис. 16 изображена усредненная скорость накопления газов на первом и втором этапах эксперимента № 3 соответственно. Графики, изображенные на рис. 16, были получены благодаря использованию корреляции между отношением коэффициентов теплоотдачи при конденсации чистого пара и ПГС, и отношением масс пара и воздуха:

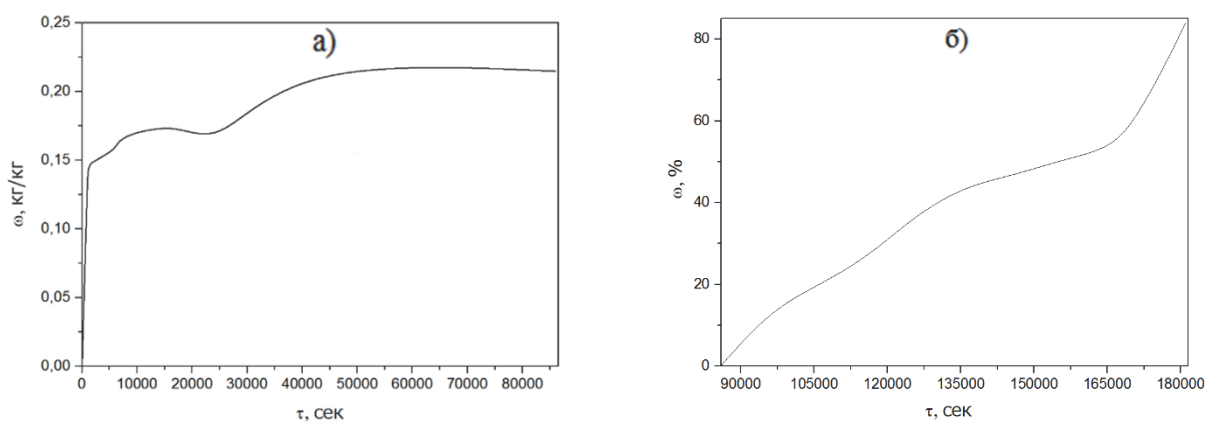
$$\omega = -0,44 \sqrt{\frac{\alpha}{0,388 \cdot \alpha_0}}, \quad (9)$$

где ω – процентное соотношение масс пара и воздуха, α – коэффициент теплоотдачи, α_0 – коэффициент теплоотдачи чистого пара.

Отношение α/α_0 может быть рассчитано как:

$$\frac{\alpha}{\alpha_0} = \frac{N \cdot \Delta t_0 \cdot (\lambda \cdot F^2 \cdot \Delta t_0 \cdot \Delta t - N_0 \cdot \delta \cdot N)}{\Delta t \cdot (\lambda \cdot F^2 \cdot \Delta t_0 \cdot N - N_0^2 \cdot \delta \cdot N)}, \quad (10)$$

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



а) в ходе первого этапа, б) в ходе второго этапа

Рис. 16. Изменение отношения массы газов к массе ПГС в объеме трубного пучка и коллекторов модели ПГ на различных этапах эксперимента № 3

Анализ полученных результатов позволяет количественно оценить долю неконденсирующихся газов, накапливающихся в трубном пучке модели парогенератора. Как видно из рис. 16а, на первом этапе эксперимента, из-за наличия сдвиги ПГС, накопление неконденсирующихся газов в трубном пучке происходило с расходом около 0,072 г/ч, в то время как на вход РУ подавались газы с расходом ~ 41 г/ч. Средняя скорость накопления неконденсирующихся газов в трубном пучке ПГ во втором этапе опыта равнялась 7,4 г/ч, а поступление газов на вход рабочего участка в этот период составило 25,9 г/ч. Это означает, что в трубном пучке парогенератора накопилось не более чем 28,5 % от подаваемых газов. Остальная часть либо уходила в объем модели защитной оболочки через разрыв ГЦТ, либо накапливалась в «холодном» коллекторе парогенератора.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

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 проектных функций пассивных систем безопасности 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 АЭС 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 в 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 параметрами парогенератора, работающего в конденсационном режиме, и теплообменника 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 влияния локализации места разрыва главного циркуляционного трубопровода и его геометрических 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, температурный напор между контурами и коэффициент теплопередачи.

7. Результаты проведенного исследования позволили снять замечания НТЦ ЯРБ к проекту НВАЭС-2 с РУ В-392М 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.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Экспериментальное исследование тепломассообменных процессов при работе парогенератора ВВЭР в аварийном конденсационном режиме / А.В. Морозов, **А.С. Шлепкин**, Д.С. Калякин, А.С. Сошкина // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2017. – № 1. – С. 29–41.

2. 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. – 2017. – № 5. – С. 16–23.

3. Обобщение экспериментальных данных по влиянию неконденсирующихся газов на конденсационную мощность модели парогенератора / **А.С. Шлепкин**, А.В. Морозов // Известия высших учебных заведений. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2018. – № 3. – С. 147–157.

4. Экспериментальные теплофизические исследования в обоснование работоспособности пассивных систем безопасности ВВЭР нового поколения / **А.С. Шлепкин**, А.В. Морозов, Д.С. Калякин, А.П. Сорокин // Атомная энергия. – 2019. – Т.127. – Вып. 1. – С. 13–17.

5. Актуальные теплофизические проблемы и пути совершенствования пассивных систем охлаждения активной зоны реактора ВВЭР / А.В. Морозов, Д.С. Калякин, А.Р. Сахипгареев, **А.С. Шлепкин**, А.С. Сошкина // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2022. – № 4. – С. 119–130.

6. **Шлепкин А.С.** Исследование влияния тепломассообменных процессов на работу пассивных систем безопасности ВВЭР в случае аварийной ситуации // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2023. – № 1. – С. 197–213.

Подписано к печати 19.12.2024 г. Заказ № 399.
Формат 60×84 ¹/₁₆. Усл. п. л. 0,8. Уч.-изд. л. 1,1. Тираж 80 экз.

Отпечатано с оригинала автора в АО «ГНЦ РФ – ФЭИ».
249033, Обнинск Калужской обл., пл. Бондаренко, 1.