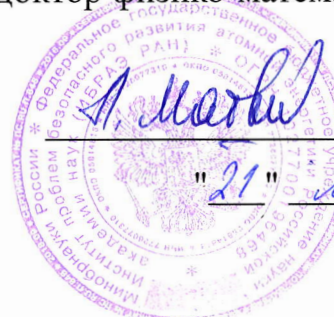


УТВЕРЖДАЮ

Директор ИБРАЭ РАН,
доктор физико-математических наук



Матвеев Л.В.

"21" марта 2025 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу

Шлепкина Александра Сергеевича

«Экспериментальное определение влияния тепломассообменных процессов в оборудовании реакторной установки и защитной оболочке на работу пассивных систем безопасности ВВЭР»,
представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.4.9 – Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность

Актуальность темы диссертации

Диссертационная работа Шлепкина Александра Сергеевича посвящена экспериментальным исследованиям по обоснованию проектных функций системы пассивного отвода тепла (СПОТ) атомной станции (АС) с реакторной установкой (РУ) В-392М.

Во все современные проекты атомных станций, 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). Данные системы включены в каждый проект атомной станции поколения 3+, включая и отечественную Нововоронежскую АЭС-2, на которой сооружены два энергоблока с реакторной установкой В-392М.

Одной из таких систем является система пассивного отвода тепла (СПОТ). Совместно с системами пассивного залива активной зоны СПОТ обеспечивает поддержание уровня теплоносителя в аварийном режиме в реакторе и отвод остаточного энерговыделения от активной зоны. Это осуществляется путем перевода парогенератора ВВЭР 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 значительно уменьшить конденсационные возможности парогенератора. Следовательно, для обоснования работоспособности системы пассивного отвода тепла необходимо доказать, что поступление неконденсирующихся газов не снизит мощность парогенератора ниже допустимого уровня.

Пассивные системы безопасности АС, такие как система пассивного отвода тепла, функционируют в условиях одновременного протекания сложных физических процессов, включающих тепло- и массообмен, фазовые переходы и т.д. Теоретические модели и программы для ЭВМ, хотя и представляют собой мощные инструменты для анализа, не всегда могут обеспечить высокую достоверность прогнозной оценки поведения системы в реальных условиях из-за взаимного влияния сложных нелинейных процессов и элементов оборудования, а также ограниченного объема валидации моделей.

Таким образом, экспериментальные исследования по обоснованию работоспособности системы пассивного отвода тепла, безусловно, являются актуальной научно-технической задачей.

Цель диссертационной работы

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

Для достижения поставленной цели соискателем решены следующие задачи:

1) Разработана методика 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.

2) Проведены опыты, получены и обработаны экспериментальные данные.

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

4) Определено влияние паровоздушной смеси, поступающей из защитной оболочки в объем первого контура, на работу парогенератора в конденсационном режиме.

5) Определена длительность работы парогенератора ВВЭР-1200 в аварийном конденсационном режиме до достижения пороговых значений мощности.

Научная новизна

В выполненном исследовании соискателем получены следующие новые результаты:

1. Впервые экспериментально установлено наличие отрицательных обратных связей между ПГ и системой СПОТ, используемой при работе пассивных систем безопасности реакторной установки В-392М. Определено

их влияние на процессы передачи тепла между первым и вторым контурами реакторной установки ВВЭР-1200 в аварийном режиме.

2. Получены оригинальные экспериментальные данные о процессах, происходящих в трубном пучке парогенератора ВВЭР-1200 (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 конденсационном режиме.

4. Впервые экспериментально подтверждена возможность наличия массообменных процессов между объемами защитной оболочки и реакторной установки В-392М в случае аварии с разрывом главного циркуляционного трубопровода. Определены условия поступления паровоздушной смеси в первый контур.

5. Выявлена зависимость работоспособности парогенератора ВВЭР в конденсационном режиме от местоположения разрыва ГЦК.

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

Кроме того, полученный в ходе экспериментов массив данных может быть использован для совершенствования средств численного моделирования аварийных процессов на РУ ВВЭР-1200 при работе пассивных систем безопасности, а также при разработке перспективных проектов АС с ВВЭР.

Личный вклад. Судя по представленным в рукописи и автореферате данным, соискатель принимал непосредственное участие в модернизации, пуско-наладочных работах и проведении опытов на экспериментальном стенде. Также им выполнен анализ полученного в ходе исследования массива экспериментальных данных, на основании которого были подготовлены материалы, изложенные в диссертации.

Оценка содержания диссертации и ее завершенности

Диссертация изложена на 161 странице, содержит 67 рисунков, 11 таблиц, состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы из 106 ссылок на российские и зарубежные публикации и техническую литературу.

По результатам анализа текста диссертации, автореферата и публикаций автора можно сделать вывод о том, что заявленная цель работы достигнута, а поставленные задачи выполнены.

Соответствие содержания диссертации научной специальности

Тема и содержание диссертации соответствуют пункту № 2 паспорта специальности 2.4.9 – «Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность». Автореферат полностью соответствует основному содержанию и выводам диссертации.

Достоверность полученных результатов

О достоверности экспериментальных данных свидетельствует проработанная методика проведения исследований и обработки результатов измерений, опирающихся на общепризнанные методы и подходы, применение надежных измерительных приборов и датчиков, предварительно прошедших тарировку и метрологическую поверку.

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

Апробация результатов

Результаты диссертации апробированы на 18 российских и международных научно-технических конференциях.

Публикации автора

Результаты диссертационного исследования отражены в 6 научных статьях соискателя в рецензируемых журналах, включенных в перечень ВАК.

В первой главе работы проведен краткий обзор результатов современных исследований в области конденсации водяного пара на различных поверхностях в присутствии неконденсирующихся газов. Показано, что в них слабо учитываются особенности теплообменных процессов, происходящих в оборудовании пассивных систем безопасности атомных станций. Также соискателем выполнен обзор экспериментальных исследований по обоснованию работоспособности ПСБ отечественных и зарубежных АС поколения 3+.

Во второй главе диссертации приведено описание экспериментального стенда ГЕ-2М, на котором были проведены исследования по обоснованию работоспособности парогенератора ВВЭР-1200 с РУ В-392М в аварийном конденсационном режиме. Также описана методика проведения экспериментов и система контрольно-измерительных приборов, установленных на стенде.

В третьей главе представлены результаты экспериментов, проведенных на стенде ГЕ-2М. Определена зависимость степени снижения мощности модели парогенератора от условий протекания аварии. Выявлено наличие взаимосвязей между параметрами процессов, происходящих в различном оборудовании реакторной установки и оказывающих значительное влияние на работоспособность СПОТ.

В четвертой главе приведено описание модернизированного стенда ГЕ-2М с рабочим участком РУ-3О, предназначенным для исследования влияния массообменных процессов между защитной оболочкой и реакторной установкой. Также описаны контрольно-измерительные приборы, установленные на стенде, и представлена методика проведения экспериментов.

В пятой главе представлены результаты экспериментов, проведенных на модернизированном стенде ГЕ-2М с рабочим участком РУ-30. В результате исследований было определено наличие перетока паровоздушной смеси из имитатора защитной оболочки в реакторную установку и оценено его влияние на мощность парогенератора, работающего в конденсационном режиме.

К диссертационной работе имеются **следующие замечания:**

1) На стр. 62 во второй строке неверно использован термин «точность». В данном контексте следует использовать термин «неопределенность».

2) На стр. 66 написано, что каждое сочетание параметров исследовалось только один раз. Представляет интерес повторное выполнение экспериментов несколько раз для исследования воспроизводимости результатов.

3) Формула (3) на стр. 68 соответствует суммарной стандартной неопределенности измерения по ГОСТ 34100.3-2017. Рекомендуется добавить соответствующую ссылку.

4) На стр. 79 приведены рассуждения об отрицательных связях через снижение коэффициента теплоотдачи. Более логично было бы рассматривать снижение парциального давления пара и, как следствие, снижение температуры насыщения пара. Последнее является причиной расхолаживания второго контура для поддержания процесса конденсации пара в трубном пучке.

5) На рисунке 3.8 приведена масса накопленных в трубном пучке неконденсирующихся газов. Однако из описания не ясно, как эта величина была измерена в эксперименте.

6) На стр. 124 необходимо добавить поясняющий рисунок к вводимым обозначениям P_1 - P_4 .

7) В тексте присутствуют незначительные опечатки, например:

– во введении вводится аббревиатура «атомных станциях (АС)», однако дальше по тексту наряду с аббревиатурой АС используется аббревиатура АЭС без расшифровки;

– на стр. 22 в предложении «Результаты опытов использовались для верификации расчетных кодов» вместо «верификации» должно быть написано «валидации»;

– на стр. 102 встречается сокращение «р.у.» для которого отсутствует расшифровка.

Отмеченные замечания не являются принципиальными, не оказывают прямого влияния на выводы, сделанные соискателем, и не влияют на общую положительную оценку представленной диссертационной работы.

Результаты диссертационной работы могут быть использованы в ИБРАЭ РАН для валидации программ для ЭВМ в части моделирования работы пассивных систем безопасности.

Заключение

Диссертационная работа Шлепкина А.С. «Экспериментальное определение влияния тепломассообменных процессов в оборудовании реакторной установки и защитной оболочке на работу пассивных систем безопасности ВВЭР» является законченным научно-квалификационным исследованием. В своём исследовании автор выполнил значительный объем экспериментальной работы, который позволил обосновать работоспособность парогенератора ВВЭР-1200 в аварийном конденсационном режиме с учетом поступления паровоздушной смеси из защитной оболочки.

Результаты, полученные в выполненной работе, имеют важное практическое значение для повышения безопасности и конкурентоспособности энергоблоков АС с ВВЭР.

Диссертационная работа характеризуется явной научной новизной и практической значимостью, полностью соответствует требованиям пп. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842 (в действующей редакции), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а соискатель, Шлепкин Александр Сергеевич, заслуживает присуждения ему

учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.4.9 – Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность.

Отзыв на диссертацию подготовлен на основании заключения, сделанного в результате обсуждения диссертации на расширенном заседании Отделения анализа безопасности ядерных энергетических установок ИБРАЭ РАН, состоявшемся 20 марта 2025 г. (протокол №2 от 20.03.2025).

Заведующий отделением анализа безопасности ядерных энергетических установок, доктор технических наук

Долганов Кирилл Сергеевич

Научный сотрудник лаборатории моделирования перспективных реакторных установок

Рыжов Николай Игоревич

Подписи Долганова К.С. и Рыжова Н.И. заверяю

Ученый секретарь ИБРАЭ РАН, кандидат технических наук



Калантаров Валентин Евграфович