

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИБРАЭ РАН,

доктор физико-математических наук



Матвеев Л.В.

2025 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу

Сахипгареева Азамата Радиковича

«Экспериментальное обоснование технологии удаления

неконденсирующихся газов для обеспечения работоспособности

парогенератора ВВЭР в конденсационном режиме»,

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 Сахипгареева Азамата Радиковича посвящена экспериментальному исследованию процесса теплообмена при конденсации пара в присутствии неконденсирующихся газов на струях жидкости и внутри пучка теплообменных труб, охлаждаемого воздухом в режиме свободной конвекции. Область режимных параметров в экспериментах соответствует представительной запроектной аварии с гильотинным разрывом главного циркуляционного трубопровода и одновременным полным обесточиванием на реакторной установке ВВЭР-1200.

В ходе этой аварии длительное охлаждение активной зоны до начала её осуществляется за счёт совместной работы пассивных систем безопасности и работы парогенератора (ПГ) в конденсационном режиме. При этом мощность теплоотвода от первого контура в ПГ в значительной мере определяется концентрацией неконденсирующихся газов, образующихся в активной зоне и накапливающихся в пучке теплообменных труб. Отравление ПГ неконденсирующимися газами приводит также и к неэффективной работе системы пассивного отвода тепла от ПГ (СПОТ ПГ).

В качестве оригинального способа поддержания эффективной работы парогенератора в режиме конденсации пара автором рассматривается снижение давления в гидроемкостях системы пассивного залива активной зоны (система ГЕ-2) за счёт использования теплообменников поверхностного или смешивающего типов. Эффективность этого проектного решения позволит повысить безопасность и конкурентные преимущества проекта РУ ВВЭР-1200/В-392М, но ранее она не исследовалась.

Таким образом, актуальность темы диссертационной работы и решаемых в ней задач подтверждается необходимостью обоснования возможности увеличения до 72 часов времени работы пассивных систем безопасности РУ ВВЭР-1200, обеспечивающих отвод тепла от активной зоны за счёт удаления неконденсирующихся газов из теплообменных труб ПГ.

Цель диссертационной работы

Целью работы является комплексное экспериментальное и расчетное исследование теплообмена при конденсации пара из парогазовой смеси на струях свободно падающей жидкости внутри гидроемкостей ГЕ-2 и внутри вертикальных труб теплообменника, охлаждаемого воздухом.

Для достижения этой цели соискателем решались следующие задачи:

- 1) Разработка методики проведения опытов на экспериментальной установке с рабочими участками «Устройство удаления газов» и «Конденсация на струях»;

2) Проведение опытов для обоснования работоспособности проектных решений по удалению неконденсирующихся газов и обработка полученных экспериментальных данных;

3) Выявление закономерностей процесса конденсации пара на струях свободно падающей жидкости и внутри теплообменных труб (как гладких, так и оребренных) в присутствии неконденсирующихся газов;

4) Оценка необходимой конденсационной мощности теплообменников-конденсаторов устройства удаления газов для реальной реакторной установки;

5) Оценка запаса теплоносителя, необходимого для отвода парогазовой смеси из холодного коллектора ПГ в объём ГЕ-2 конденсационным методом.

Научная новизна выполненных исследований и полученных результатов определяется отсутствием комплекса экспериментальных и расчётных данных, которые бы соответствовали геометрии и области режимных параметров, представительных для работы пассивных систем безопасности в аварийных условиях на АЭС с ВВЭР-1200.

Соискателем впервые получены результаты, характеризующие работу пассивных систем безопасности в условиях, возникающих на АЭС с ВВЭР-1200 через 24 часа после начала аварии с разрывом трубопровода первого контура и полным обесточиванием:

1) экспериментальные данные о влиянии вида теплообменной поверхности, состава парогазовой смеси и места отвода газов из теплообменника-конденсатора на эффективность функционирования системы удаления газов из парогенератора ВВЭР-1200;

2) экспериментальные данные о влиянии параметров парогазовой смеси (состава и давления) и струи жидкости (начальной температуры) на теплообмен при контактной конденсации пара в присутствии неконденсирующихся газов;

3) обобщающие зависимости для расчетной оценки параметров процесса конденсации пара из парогазовой смеси внутри теплообменников смешивающего и поверхностного типов.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования полученных в ней данных и обобщенных зависимостей, отражающих особенности теплообмена при конденсации пара в присутствии неконденсирующихся газов, для совершенствования пассивных систем безопасности ВВЭР.

Личный вклад. Судя по представленным в рукописи и автореферате данным, Сахипгареев А.Р. занимался поиском и отбором научно-технической информации для подготовки диссертационной работы, принимал непосредственное участие в пусконаладочных и основных опытах на экспериментальной установке, выполнял обработку и анализ полученных экспериментальных данных, на основе которых им были сделаны выводы, изложенные в диссертации.

Оценка содержания диссертации и ее завершенности

Диссертация изложена на 160 страницах, содержит 54 рисунка, 17 таблиц, состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы, включающего 94 ссылки на российские и зарубежные научно-технические публикации по теме исследования.

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 исследования обоснована рассмотрением основных определяющих физических процессов,

использованием общепризнанных методов и подходов для описания процессов межфазного тепломассообмена, а также использованием комплексного экспериментального и расчётного анализа. Достоверность результатов экспериментов обеспечена качественной системой измерений, непротиворечивостью измерений и их соответствием текущим знаниям о физике процессов (в том числе, результатам численного моделирования, полученным при помощи известного теплогидравлического кода RELAP5).

Апробация результатов

Результаты диссертации в достаточной мере апробированы на российских и международных научно-технических конференциях, где соискателем были представлены 15 докладов.

Публикации автора

Результаты диссертационного исследования отражены автором в 4-х научных статьях в рецензируемых журналах, включенных в перечень ВАК.

В первой главе диссертации автором выполнен обзор пассивных систем безопасности на реакторных установках PWR и ВВЭР и показано, что в проектах ВВЭР-1200 и ТОИ накопление неконденсирующихся газов в теплообменных трубках парогенераторов ограничивает время автономной работы пассивных систем в запроектных авариях и препятствует отводу тепла от активной зоны в конденсационном режиме работы парогенераторов. Для уменьшения этого эффекта рассматривается проектное решение по отводу газов из ПГ в гидроёмкости ГЕ-2 за счёт снижения давления в ГЕ-2 при помощи теплообменников смешивающего и поверхностного типа. На основе анализа литературных источников автором показан недостаток знаний о процессах конденсации пара в присутствии неконденсирующихся газов как внутри труб, как и на падающих струях воды применительно к геометрии и условиям, возникающим при запроектных авариях на ВВЭР.

Для устранения этого недостатка автором были подготовлены и проведены серии экспериментов на стендовой базе ФЭИ. Описание двух экспериментальных установок, спроектированных и построенных с его

участием, приведено **во второй главе**. Первая установка предназначена для исследования конденсации пара в гладких и оребренных трубках, охлаждаемых воздухом. На второй установке реализуется конденсация пара на падающих струях в модели гидроёмкости ГЕ-2.

Результаты проведённых автором экспериментов по конденсации в трубках чистого пара, а также пара с примесями азота и гелия, анализируются в **третьей главе**. Показано, что продольное оребрение труб усиливает теплообмен, но приводит к более быстрому их отравлению неконденсирующимися газами. Наименьшее время отравления теплообменника получено в случае присутствия в парогазовой смеси азота и гелия. В качестве меры поддержания конденсации пара продемонстрирована эффективность сдувки газов из нижнего коллектора.

Четвёртая глава посвящена описанию и анализу данных, полученных автором в серии экспериментов с конденсацией пара из парогазовой смеси разного состава на свободно падающих струях недогретой воды в объёме модели ГЕ-2. Исследовано влияние на интенсивность конденсации состава парогазовой смеси, давления, начальной температуры струй воды. Показано, что гелий в составе смеси сильнее подавляет конденсацию по сравнению с азотом. Полученные опытные данные описаны при помощи двух зависимостей: для расчёта интенсивности конденсации и расчёта коэффициента теплоотдачи к струе в прототипных условиях.

В пятой главе полученные экспериментальные данные использованы автором для выполнения расчётов в обоснование эффективности рассматриваемых мер удаления неконденсирующихся газов и продления конденсационного режима работы парогенераторов при аварии на ВВЭР-1200. Показана избыточность оребрения трубок теплообменника и необходимость дросселирования потока парогазовой смеси на входе в теплообменник. Определены характеристики, обеспечивающие отбор газов из парогенератора в течение 48 часов: необходимый запас холодной воды для подачи струй в ГЕ-2, число и диаметр струй, место сдувки газов.

К диссертационной работе имеются **следующие замечания:**

1) На стр. 66 рукописи указано, что «расхождение в показаниях расхода пара, измеряемого по двум методам, не превышало 4,5 %». Из текста неясно, используется ли это расхождение при оценке погрешности измерений расхода, и если да, то каким образом.

2) На стр. 78 рукописи указано, что амплитуда пульсаций в показаниях термопар, измеряющих температуру стенки теплообменных трубок, значительно меньше в опытах с оребрѐнными трубками. Из рис. 3.5 это не следует. Вероятно, автор имел в виду не собственно амплитуду, а длительность стадии с пульсациями.

3) В экспериментах с контактной конденсацией пара на свободно падающей струе автор использует воду при температуре 20–60 °С. Однако в случае рассматриваемой представительной аварии температура парогазовой смеси под гермооболочкой поднимается до 130 °С, что неизбежно приводит к нагреву расположенного там оборудования. Как автор предполагает предотвратить нагрев в сосуде с охлаждающей водой в ходе аварии?

4) При конденсации пара на струях концентрация неконденсирующихся газов в ГЕ-2 постоянно возрастает, что будет постепенно снижать интенсивной конденсации. Однако в расчётных оценках автора этот эффект не учтѐн. Было бы полезно выполнить оценку времени, за которое эффективность конденсации на струях снизится до критического уровня.

5) При конденсации пара на струях часть неконденсирующихся газов будет растворяться в охлаждающей воде и вместе с конденсатом поступать обратно в первый контур. Было бы интересно оценить массу неконденсирующихся газов, возвращаемых таким образом обратно в парогенераторы.

6) На стр. 128 указано, что «сдувку неконденсирующихся газов предполагается осуществлять в МОП». Это означает, что горячие газы будут

вызывать дополнительный нагрев воздуха в МОП. Из текста диссертации неясно, учитывался ли этот нагрев в расчётах.

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 при моделировании запроектных аварий.

Заключение

Диссертационная работа Сахипгареева А.Р. «Экспериментальное обоснование технологии удаления неконденсирующихся газов для обеспечения работоспособности парогенератора ВВЭР в конденсационном режиме» является законченным научно-квалификационным исследованием, в ходе которого автором выполнен большой объём экспериментальных и расчетных исследований, составляющих основу для обоснования технологии удаления неконденсирующихся газов из парогенераторов и демонстрации возможности увеличения времени охлаждения активной зоны при запроектных авариях на АЭС с ВВЭР-1200.

Результаты данной работы являются значимыми для развития атомной отрасли и повышения безопасности энергоблоков АЭС с ВВЭР в Российской Федерации.

Диссертационная работа отличается 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, Сахипгареев Азамат Радикович, 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 21 января 2025 г. (протокол №1 от 21.01.2025).

Заместитель заведующего отделением анализа безопасности ядерных энергетических установок,
доктор физико-математических наук

Семёнов Владимир Николаевич

Заведующий лабораторией анализа запроектных аварий на АЭС,
доктор технических наук

Долганов Кирилл Сергеевич

Подписи Семёнова В.Н. и Долганова К.С. заверяю
Ученый секретарь ИБРАЭ РАН, кандидат технических наук



Калантаров Валентин Евграфович