

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

На правах рукописи



Сахипгареев Азамат Радикович

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ
УДАЛЕНИЯ НЕКОНДЕНСИРУЮЩИХСЯ ГАЗОВ
ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ
ПАРОГЕНЕРАТОРА ВВЭР В КОНДЕНСАЦИОННОМ РЕЖИМЕ**

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: **Морозов Андрей Владимирович**
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Мелихов Олег Игорьевич**
доктор физико-математических наук, доцент,
профессор кафедры атомных
электрических станций
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», г. Москва

Щеклеин Сергей Евгеньевич
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой атомных станций и
возобновляемых источников энергии
Уральского энергетического института
УРФУ, г. Екатеринбург

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

Защита состоится «12» марта 2025 года в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 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 «___» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 75.1.077.01
доктор технических наук



А.В. Морозов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Сооружаемые в настоящее время атомные электростанции (АЭС) оснащаются как активными, так и пассивными системами безопасности (ПСБ). В проекте АЭС с реакторной установкой (РУ) ВВЭР-1200 совместная работа ПСБ и парогенератора (ПГ), работающего в конденсационном режиме, обеспечивает аварийное охлаждение активной зоны в течение 24 часов. Современные подходы к обеспечению безопасности АЭС нового поколения предусматривают необходимость продления автономной работы пассивных систем безопасности до 72 ч.

Однако уже к концу первых суток с момента начала аварии с разрывом трубопровода первого контура конденсационная мощность парогенератора снижается из-за накопления в его трубном пучке неконденсирующихся газов (таких как водород, кислород и азот), что может привести к сокращению длительности работы ПГ и ПСБ и ухудшению условий теплоотвода от активной зоны.

В связи с этим возникает актуальная задача поддержания конденсационной мощности парогенератора в течение более длительного времени, чем предусмотрено в настоящий момент в проекте АЭС с РУ ВВЭР-1200. Для ее решения проектантом рассматриваются несколько технологий удаления неконденсирующихся газов из трубного пучка ПГ с использованием теплообменников смешивающего и поверхностного типов.

Согласно одной из них, предусматривается система, состоящая из теплообменников-конденсаторов (ТК), подключаемых параллельно к гидроемкостям второй ступени (ГЕ-2) и размещаемых в межоболочечном пространстве (МОП) защитной оболочки. ТК конденсируют пар, находящийся в баках системы ГЕ-2, снижая в них давление, и тем самым обеспечивают отвод парогазовой смеси (ПГС) из трубного пучка парогенератора, продлевая время эффективной работы системы пассивного отвода тепла (СПОТ).

В рамках другой концепции удаления неконденсирующихся газов рассматривается система, позволяющая длительно отводить ПГС из трубного пучка парогенератора в объем гидроемкостей второй ступени за счет процесса контактной конденсации пара на струях недогретой жидкости. В результате этого происходит снижение давления в гидроемкостях ГЕ-2 и тем самым создается движущий напор для отвода парогазовой смеси из парогенератора.

Таким образом, обоснование работоспособности предложенных проектантом концепций систем удаления неконденсирующихся газов из парогенератора за счет снижения давления в гидроемкостях системы ГЕ-2, с целью использования их в перспективных проектах АЭС с ВВЭР, позволит повысить уровень безопасности энергоблоков.

Степень разработанности темы диссертации

В процессе подготовки диссертационной работы был проведен поиск литературных источников, посвященных исследованию работы пассивных систем безопасности, применяемых в проектах существующих и разрабатываемых атомных станций с реакторными установками с водой под давлением.

Особый вклад в исследования по экспериментальному обоснованию работоспособности пассивных систем безопасности ВВЭР внесли С.Г. Калякин, О.В. Ремизов, Ю.С. Юрьев, А.А. Цыганок, Ю.В. Чернухина, А.В. Морозов, Д.С. Калякин, В.М. Беркович, Г.С. Таранов и др.

Анализ результатов работ указанных авторов показал, что в них не были рассмотрены вопросы, посвященные продлению времени автономного функционирования существующих пассивных систем безопасности отечественных АЭС с водо-водяными энергетическими реакторами при длительном (до 72 ч) аварийном охлаждении активной зоны.

Цели и задачи

Цель работы – комплексное экспериментальное и расчетное исследование теплообмена при конденсации пара из парогазовой смеси на струях свободно падающей жидкости и внутри пучка вертикальных оребренных труб. Исследование направлено на обоснование проектных функций перспективных систем удаления неконденсирующихся газов из парогенератора ВВЭР.

Объектом исследования являются процессы теплообмена при конденсации пара в теплообменниках поверхностного и смешивающего типов.

Предмет исследования – влияние неконденсирующихся газов на работоспособность систем удаления газов из парогенераторов ВВЭР, работающих в аварийном конденсационном режиме.

Для достижения поставленной цели в работе были решены следующие задачи:

1. Разработаны программы и методики проведения опытов на экспериментальной установке (ЭУ) с рабочими участками «Устройство удаления газов» (УУГ) и «Конденсация на струях» (КНС).

2. Проведены эксперименты для обоснования работоспособности систем удаления неконденсирующихся газов и выполнен анализ полученных данных.

3. Выявлены закономерности процесса конденсации пара на струях свободно падающей жидкости и внутри оребренных теплообменных труб в присутствии неконденсирующихся газов.

4. Оценена конденсационная мощность теплообменников-конденсаторов устройства удаления газов для реальной реакторной установки.

5. Оценен необходимый запас теплоносителя для осуществления отвода ПГС в объем гидроемкости системы ГЕ-2 конденсационным методом.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности

В рамках данной работы были проведены экспериментальные и расчетные исследования процессов теплообмена при конденсации пара на струях свободно падающей жидкости и внутри пучка вертикальных оребренных труб в присутствии неконденсирующихся газов для обоснования технологии удаления парогазовой смеси из парогенератора, направленной на продление времени функционирования пассивных систем безопасности АЭС с реакторной установкой ВВЭР.

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

1. Впервые получены экспериментальные данные о влиянии вида теплообменной поверхности, состава парогазовой смеси и места отвода газов из теплообменников-конденсаторов на эффективность функционирования системы удаления неконденсирующихся газов из парогенератора, работающего в конденсационном режиме, для условий, имеющих место через 24 ч после начала аварии с гильотинным разрывом главного циркуляционного трубопровода и полным обесточиванием АЭС с ВВЭР-1200.

2. Получены экспериментальные результаты влияния параметров парогазовой смеси (состава и давления) и струи жидкости (начальной температуры истечения из цилиндрического отверстия) на теплообмен при контактной конденсации пара в присутствии неконденсирующихся газов при параметрах среды в гидроемкостях второй ступени после ее работы в течение 24 ч.

3. Получены обобщающие зависимости для расчетной оценки параметров процесса конденсации пара из парогазовой смеси внутри теплообменников смешивающего и поверхностного типов, отличающиеся от известных зависимостей тем, что применимы для условий, имеющих место через 24 ч после начала аварии с гильотинным разрывом главного циркуляционного трубопровода и полным обесточиванием АЭС с ВВЭР-1200.

Теоретическая и практическая значимость

Результаты исследования теплообмена при конденсации пара в присутствии неконденсирующихся газов, применительно к работе ПСБ АЭС с ВВЭР в диапазоне параметров, характерных для аварийной ситуации с разрывом главного циркуляционного трубопровода (ГЦТ) полного сечения и наложением потери источников переменного тока собраны в базу экспериментальных данных,

которая предназначена для использования при разработке перспективных проектов атомных станций с водо-водяными энергетическими реакторами.

Методология и методы исследования

Исследования основаны на современном уровне понимания и подходах к моделированию процессов конденсации пара в теплообменниках поверхностного и смешивающего типов. В качестве методологической базы использовались нормативные документы, материалы национальных и международных конференций, рецензируемые периодические издания.

Положения, выносимые на защиту:

1. Экспериментальные результаты, полученные в ходе исследования процесса конденсации пара в теплообменнике поверхностного типа в присутствии неконденсирующихся газов для условий, имеющих место через 24 ч после начала аварии с гильотинным разрывом главного циркуляционного трубопровода и полным обесточиванием АЭС с ВВЭР-1200.

2. Экспериментальные результаты, полученные в ходе исследования процесса контактной конденсации пара в смешивающем теплообменнике в присутствии неконденсирующихся газов при параметрах среды в гидроемкостях второй ступени после ее работы в течение 24 ч.

3. Обобщающие зависимости для расчета процесса конденсации пара из парогазовой смеси внутри теплообменников смешивающего и поверхностного типов исследуемых в работе систем удаления неконденсирующихся газов.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность результатов исследований обоснована использованием общепризнанных методов и подходов для описания процессов тепломассообмена между фазами. Достоверность результатов экспериментов обеспечивается:

– своевременной поверкой использованной аппаратуры, предварительной тарировкой всех используемых первичных датчиков;

– воспроизводимостью результатов эксперимента и согласованностью их с имеющимися в литературе данными.

Основные положения и результаты работы докладывались на: 16–22-й Международных конференциях молодых специалистов по ядерным энергетическим установкам (АО ОКБ «Гидропресс», г. Подольск, 2014–2019, 2022), VI-й Российской национальной конференции по теплообмену (РНКТ-6) (НИУ «МЭИ», г. Москва, 2014), 9-й Международной научно-технической конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР» (АО ОКБ «Гидропресс», г. Подольск, 2015), 14-й Международной конференции «Безопасность АЭС и подготовка кадров» (ИАТЭ НИЯУ МИФИ, г. Обнинск, 2015), IV-й Международной научно-технической конференции «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики» (МНТК НИКИЭТ – 2016) (АО «НИКИЭТ»,

г. Москва, 2016), Научно-технических конференциях «Теплофизика реакторов нового поколения» (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», г. Обнинск, 2015, 2016, 2018, 2022).

Публикации

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 7 печатных изданиях: 4 публикации в журналах, входящих в перечень ВАК, 3 – в других изданиях.

Личный вклад

Автор совместно с сотрудниками лаборатории разработал методики проведения исследований и программы экспериментов. Участвовал в проведении пуско-наладочных и режимных опытов на экспериментальной установке. Выполнил обработку и анализ полученных экспериментальных данных, на основе которых сделаны выводы, изложенные в диссертации. Постановка цели и задач исследования осуществлялась совместно с научным руководителем.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованных источников литературы из 94 наименований. Работа представлена на 160 страницах и содержит 54 иллюстрации и 17 таблиц.

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, определяются цели и задачи исследования, показана научная новизна выполненной работы и ее практическая значимость.

В первой главе диссертации представлен обзор конструкций пассивных систем безопасности существующих и разрабатываемых зарубежных и отечественных атомных станций с реакторами с водой под давлением.

Сравнительный анализ конструкций и принципов работы ПСБ позволил выявить их особенности и показал, что:

– в ряде рассмотренных отечественных АЭС с РУ ВВЭР (построенных и эксплуатируемых в настоящее время), пассивные системы безопасности способны выполнять свои функции без вмешательства персонала только в течение 24 ч;

– в зарубежных проектах АЭС с реакторами с водой под давлением и в отечественной АЭС с реакторной установкой ВВЭР-ТОИ (проект В-510) время автономной работы ПСБ составляет 72 ч.

В результате рассмотрения последовательности процессов, сопровождающих работу пассивных систем в аварийной ситуации на атомных станциях с реакторами ВВЭР, установлено, что наибольшее влияние на длительность функционирования ПСБ могут оказывать неконденсирующиеся газы, скапливающиеся в парогенераторах, и тем самым нарушающие работу последних в режиме конденсации пара.

Для организации оттока ПГС из парогенераторов с целью поддержания их конденсационной мощности после окончания первых 24 ч с момента начала рассматриваемой аварии необходимо обеспечить снижение давления в гидроемкостях второй ступени.

В перспективных проектах ВВЭР для решения данной проблемы проектантом рассматриваются различные концепции систем удаления неконденсирующихся газов с использованием теплообменников поверхностного и смешивающего типов.

В ходе выполненного анализа выявленных литературных источников установлено, что в работах, посвященных исследованию воздухоохлаждаемых теплообменников, нет экспериментальных данных, описывающих теплообмен при конденсации пара в присутствии неконденсирующихся газов внутри труб, охлаждаемых воздухом, при параметрах, характерных для аварии с разрывом ГЦТ с одновременной потерей источников электроснабжения на АЭС с ВВЭР.

Обзор литературных источников показал, что процессы теплообмена при конденсации пара в присутствии неконденсирующихся газов на свободно падающих струях и каплях жидкости при параметрах, характерных для аварии с потерей теплоносителя на АЭС с ВВЭР и условиях работы пассивных систем, недостаточно изучены.

Вторая глава содержит описание экспериментальной установки с рабочими участками «Устройство удаления газов» и «Конденсация на струях» и методики проведения исследований. В состав ЭУ входят рабочие участки УУГ (рис. 1) и КНС (рис. 2), а также вспомогательные системы, предназначенные для создания необходимых условий при проведении экспериментов. К ним относятся: парогенератор; бак подготовки смеси (БПС); гидроемкость, имитирующая бак системы ГЕ-2; две мерные емкости; конденсатор системы поддержания давления; система подачи газов; система подогрева воздуха на входе в имитатор МОП.

Парогенератор объемом 300 л оснащен регулируемым электрическим нагревателем мощностью 12 кВт, способным поддерживать расход пара до 6 г/с. Бак подготовки смеси объемом 48 л предназначен для создания парогазовой смеси требуемых параметров. Имитатор гидроемкости второй ступени представляет собой 650-литровый цилиндрический сосуд высотой 3160 мм.

Рабочий участок УУГ (рис. 1) представляет собой теплообменник, охлаждаемый воздухом. Материал трубного пучка – сталь Ст 20. Длина одной трубки – 4 м, диаметр – 16 мм, что соответствует параметрам предполагаемого натурального теплообменника-конденсатора. В экспериментах применяются гладкие и оребренные трубки. Последние по длине вертикальной части имеют по пять ребер длиной 3 м, высотой 16 мм и толщиной 1 мм. Трубки соединяют раздаточный (верхний) и накопительный (нижний) цилиндрические коллекторы. Количество труб модели УУГ примерно в 7 раз меньше, чем в предполагаемом натурном ТК, т. е. 14 вместо 100. Рабочий участок размещен внутри разборного металлического кожуха, имитирующего МОП защитной оболочки АЭС.

Рабочий участок КНС (рис. 2) представляет собой две параллельные трубки внутренним диаметром 6 мм, соединенные с напорным баком. Одна трубка входит в имитатор сосуда ГЕ-2, через нее в объем гидроемкости подается жидкость в виде диспергированной струи. Другая трубка выведена в атмосферу и предназначена для наблюдения за характером истечения струи.

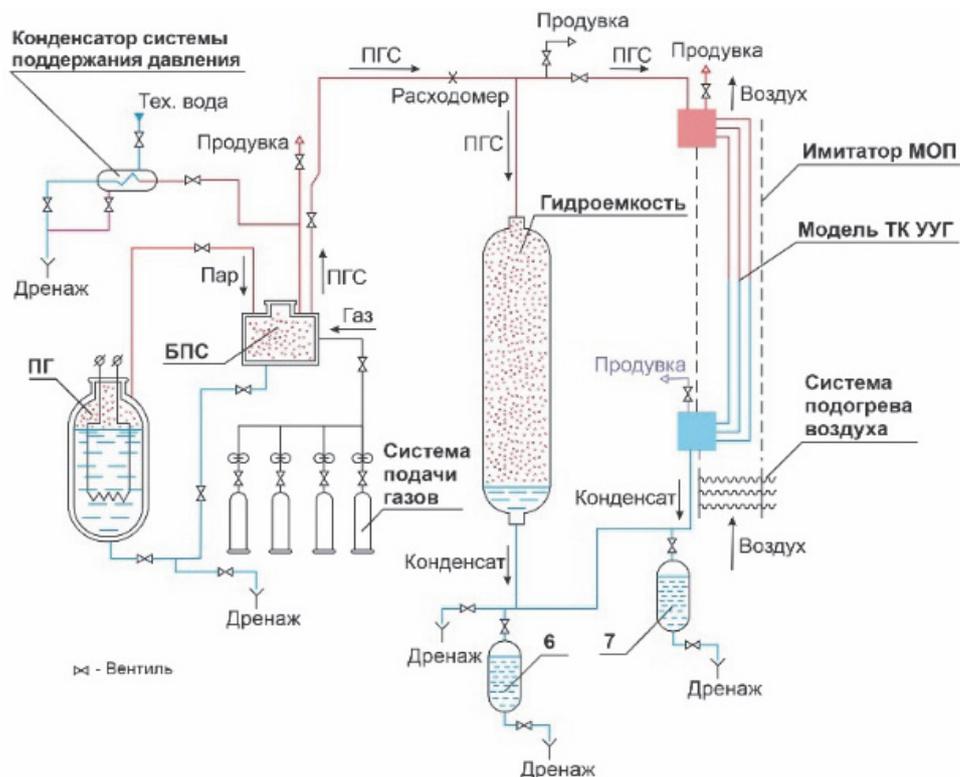


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки с рабочим участком УУГ

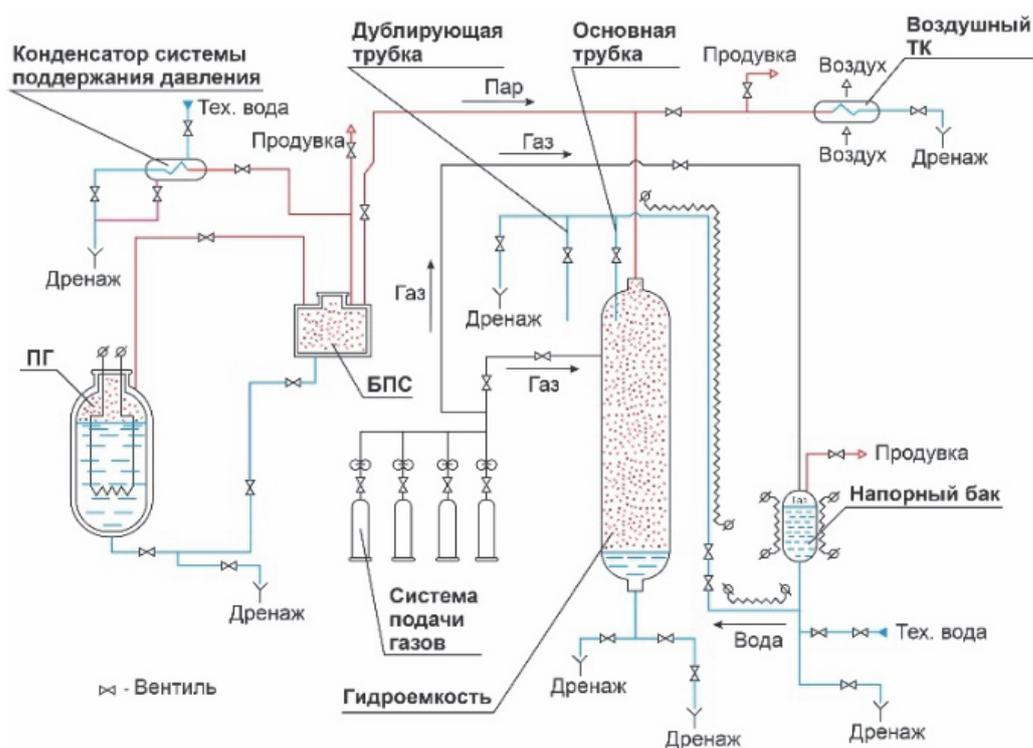


Рис. 2. Принципиальная схема экспериментальной установки с рабочим участком КНС

Целью проведения экспериментов на рабочем участке УУГ являлось исследование процесса теплообмена при конденсации пара из ПГС внутри пучка вертикальных труб и изучение факторов, влияющих на эффективность работы устройства удаления газов.

Целью опытов, проводимых на рабочем участке КНС, являлось определение характеристик системы, обеспечивающей отвод парогазовой смеси из ПГ в объем ГЕ-2 за счет снижения давления в последней в результате контактной конденсации пара на струях жидкости, и исследование факторов, влияющих на ее работу.

В третьей главе представлены результаты исследования на ЭУ с рабочим участком УУГ в двух исполнениях трубных пучков: с гладкими и оребренными трубками. Были проведены эксперименты при давлении $\sim 0,36$ МПа с подачей «чистого» пара и ПГС различного состава.

Исследование влияния вида трубного пучка на эффективность работы УУГ проводилось с подачей в рабочий участок как «чистого» пара, так и паро-азотной смеси с концентрацией азота в паре $C_{N_2} = 0,248$ кг/кг, соответствующей полученной ранее в АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» в ходе экспериментов на крупномасштабном стенде ГЕ-2М.

Анализ экспериментальных данных показал, что при замене гладких теплообменных труб на оребренные, расход пара и конденсационная мощность модели ТК УУГ возрастает на 26 % (рис. 3), что обусловлено увеличением теплоотдачи от трубок к охлаждающему воздуху за счет оребрения. При этом коэффициент теплоотдачи вырос на 23 % с 38,4 до 49,8 Вт/(м²·°C).

Было определено, что изменение температуры среды внутри трубок (рис. 4) в экспериментах с подачей паро-азотной смеси и использованием разных типов трубок носит однотипный характер: происходит равномерное снижение температуры смеси от верхнего сечения к нижнему, что обусловлено накоплением азота в модели ТК УУГ, в процессе конденсации пара из ПГС.

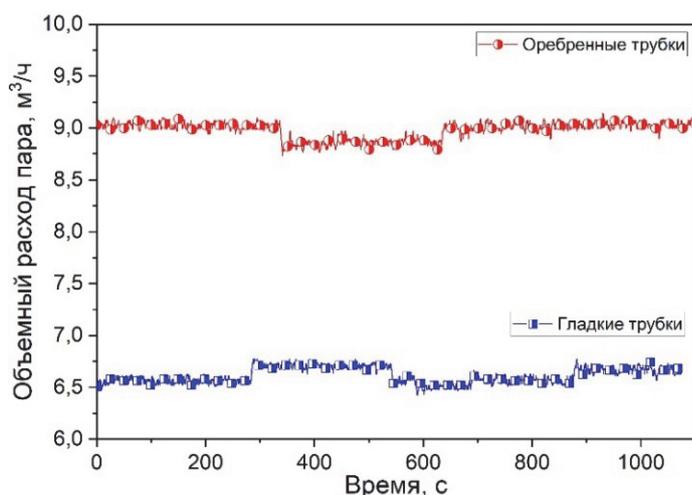


Рис. 3. Объемный расход пара на теплообменник-конденсатор по показаниям расходомера Rosemount-8800D

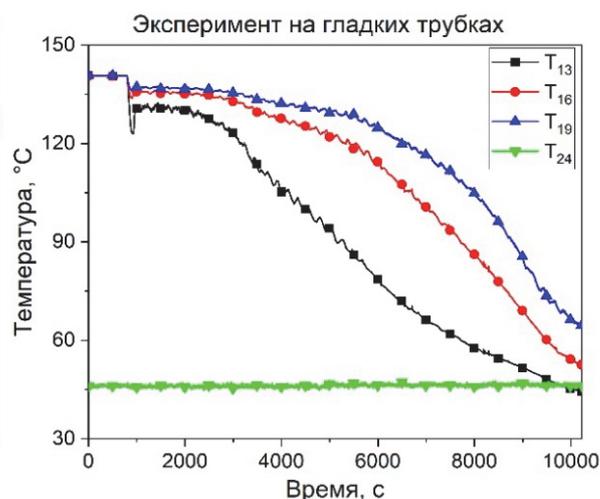


Рис. 4. Температура среды внутри трубки ТК. T₁₃, T₁₆, T₁₉, T₂₄ – термопары, установленные по высоте трубки и на входе в имитатор МОП

Анализ результатов изменения массы конденсата, образующегося в модели УУГ после начала подачи парогазовой смеси в экспериментах с разными видами трубного пучка (рис. 5), показал следующее:

- время работы модели УУГ с гладкими трубами при подаче ПГС на ~ 30 % больше, чем в опытах с оребренными;

- начальная мощность теплообменника с оребренными трубами на ~ 25 % выше, чем в варианте с гладкими трубами.

При измерении скорости воздуха в имитаторе МОП было установлено, что ее начальные значения изменялись от 0,75 м/с на входе до 2,1 м/с на выходе. При этом, по мере накопления в рабочем участке азота, эти значения снизились на 22 % в опыте с гладкими трубами и на 33 % – с оребренными.

Исследование влияния состава ПГС на конденсационную мощность модели оребренного ТК проводилось с целью определения времени, за которое трубный пучок рабочего участка заполнится парогазовой смесью. Для сравнения результатов опытов с гелием и азотом была использована эквивалентная по азоту концентрация гелия:

$$C_{\text{экв}} = C_{\text{He}} \cdot \frac{M(\text{N}_2)}{M(\text{He})}, \quad (1)$$

где C_{He} – концентрация гелия, кг гелия/кг смеси; $M(\text{N}_2)$, $M(\text{He})$ – молярные массы азота и гелия соответственно, г/моль.

В качестве ПГС в исследованиях использовались: паро-азотная ($C_{\text{N}_2} = 0,248$ кг/кг), паро-гелиевая ($C_{\text{экв}} = 0,245$ кг/кг) и паро-азотно-гелиевая смеси ($C_{\text{N}_2} + C_{\text{экв}} = 0,191$ кг/кг).

Анализ показаний термопар показал, что в эксперименте с паро-азотной смесью азот, как более тяжелый по сравнению с водяным паром газ, сразу после подачи опускается в нижнюю часть модели УУГ. В опыте с паро-гелиевой смесью, неконденсирующийся газ распределяется по всему объему труб.

Также было определено (рис. 6), что в эксперименте с паро-азотно-гелиевой смесью характер

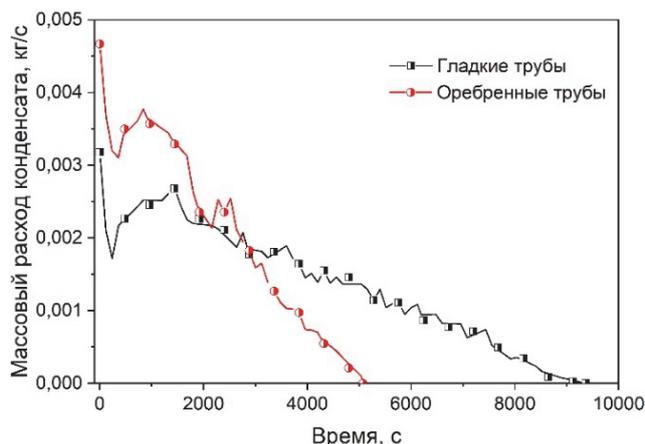


Рис. 5. Изменение массового расхода конденсата, образующегося в модели УУГ, после начала подачи парогазовой смеси

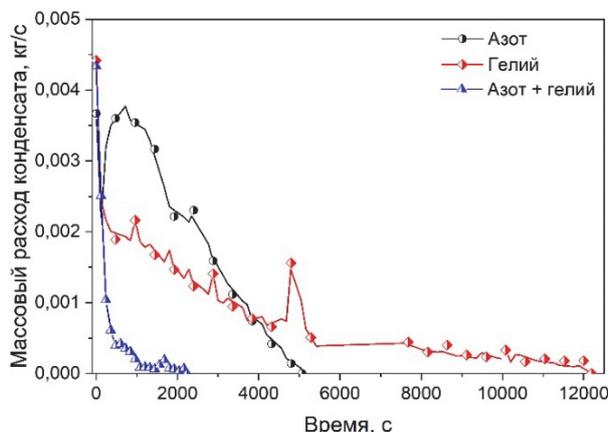


Рис. 6. Изменение массового расхода конденсата, образующегося в модели ТК, после начала подачи парогазовой смеси

протекания процесса конденсации пара значительно отличается. В результате одновременного воздействия двух газов произошло резкое сокращение времени работы модели УУГ, т. е. ее мощность снизилась до нуля в $\sim 2,5$ раза быстрее, чем в эксперименте с азотом, и в ~ 6 раз быстрее по сравнению с опытом с гелием.

Исследование влияния отвода паро-азотно-гелиевой смеси с концентрацией $C_{N_2} + C_{эКВ} = 0,191$ кг/кг из модели ТК УУГ в имитатор МОП на длительность и эффективность работы устройства удаления газов было проведено для двух конфигураций рабочего участка: сдвух осуществлялась отдельно из верхнего и нижнего коллекторов с расходом $0,5 \text{ м}^3/\text{ч} = 0,139 \text{ л/с}$. В ходе анализа полученных экспериментальных данных (рис. 7) было определено, что в опыте с оттоком ПГС из нижнего коллектора в имитатор МОП, сдвух позволяет поддерживать температуру в верхней части модели ТК на уровне, близком к фиксируемому до подачи парогазовой смеси (T_{10} на рис. 7а). Термопары, установленные в центральной части теплообменника-конденсатора, реагируют на активное перемещение ПГС сверху вниз, что отражается в колебаниях их показаний (T_7 на рис. 7а). Температура в нижней части рабочего участка (T_4 на рис. 7а) благодаря сдвух не опускается ниже температуры охлаждающего воздуха (T_{24} на рис. 7).

В опыте с оттоком ПГС из верхнего коллектора (рис. 7б) показания термопар свидетельствуют о неэффективности выбранного подхода, так как только верхняя часть теплообменника продолжает конденсировать пар (T_{10} на рис. 7б), в то время как центральная (T_7 на рис. 7б) и нижняя (T_4 на рис. 7б) части теплообменника не участвуют в отводе тепла.

Изменение массового расхода конденсата (рис. 8) показывает, что сдвух из нижнего коллектора ТК позволяет обеспечить стабильную работу УУГ с практически постоянной мощностью. При этом сдвух из верхнего коллектора практически не влияет на длительность работы УУГ. Таким образом, отвод ПГС

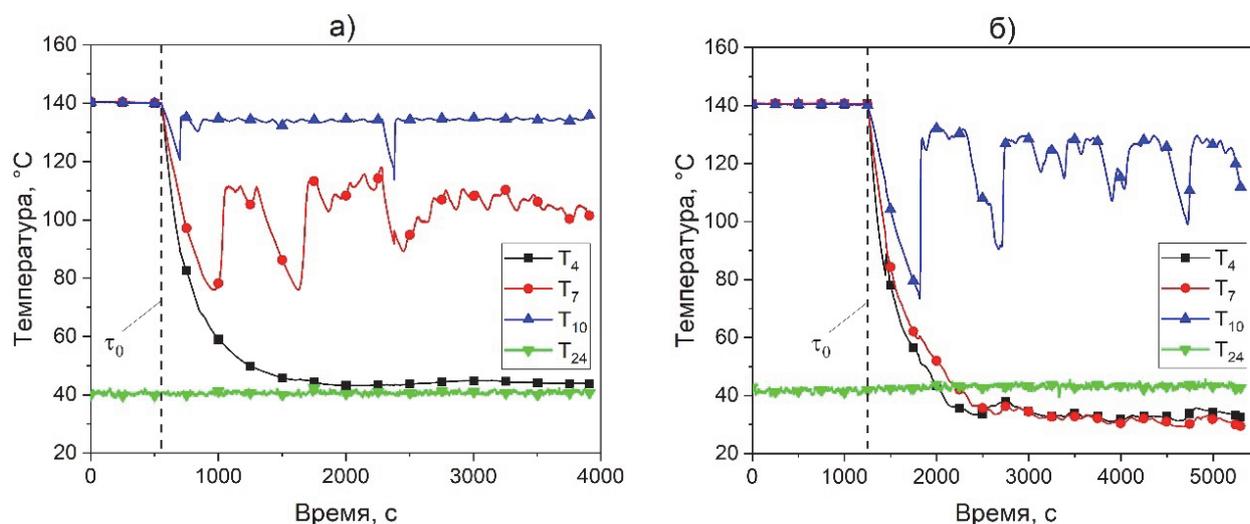


Рис. 7. Температура среды внутри трубки № 4: а) сдвух из нижнего коллектора, б) сдвух из верхнего коллектора, τ_0 – момент подачи среды в теплообменник, T_4 , T_7 , T_{10} , T_{24} – термопары, установленные по высоте трубки и на входе в имитатор МОП

из нижнего коллектора теплообменника в МОП может продлить время работы УУГ, обеспечив длительный отток парогазовой смеси из парогенератора ВВЭР.

Четвертая глава посвящена исследованию процесса контактной конденсации пара на струе недогретой жидкости в присутствии неконденсирующихся газов в объеме имитатора гидроемкости ГЕ-2. В выполненных опытах раствор борной кислоты, поступающей в гидроемкость, заменен водой, а водород в составе парогазовой смеси – на гелий (в целях обеспечения безопасности работ).

Первоначально были проведены гидродинамические испытания, которые показали, что длина сплошного участка струи из используемой на стенде трубки достигает 0,16 м при скорости ее истечения 1 м/с.

Далее была определена интенсивность конденсации «чистого» пара с давлением 0,2 МПа на свободно падающей струе жидкости (максимальной конденсационной мощности). При подаче воды в объем имитатора гидроемкости расход пара из ПГ резко увеличивается до нового стационарного уровня из-за падения давления в емкости за счет контактной конденсации. Величина приращения расхода пара ΔG_s определяется после стабилизации параметров стенда как разность между показаниями расходомера до и после подачи жидкости в имитатор гидроемкости.

Для сравнения результатов экспериментов (рис. 9) был введен безразмерный комплекс $\Delta G_{s0}/G_w$, характеризующий интенсивность конденсации «чистого» пара на струе жидкости:

$$\frac{\Delta G_{s0}}{G_w} = 0,099 - 19,85 \cdot G_w^{-3}, \quad (2)$$

где G_w – расход жидкости, г/с.

Было установлено, что увеличение интенсивности конденсации и рост $\Delta G_{s0}/G_w$ происходит только до значения расхода жидкости 17 г/с. Поэтому опыты проводились при этом расходе.

Далее были проведены эксперименты с парогазовой смесью, в которых температура подаваемой воды изменялась в диапазоне (20–60) °С, давление среды в гидроемкости

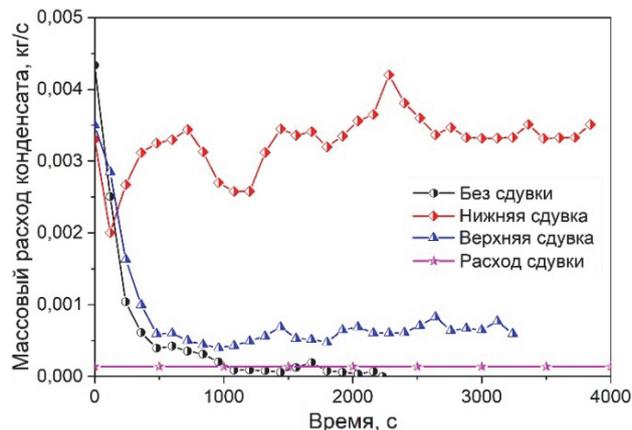


Рис. 8. Изменение массового расхода конденсата, образующегося в УУГ, после подачи ПГС

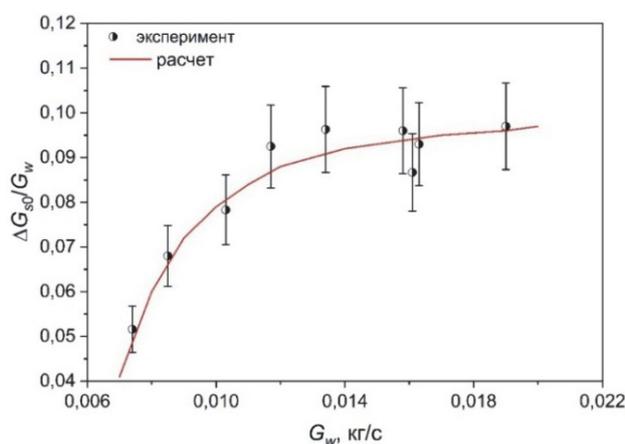


Рис. 9. Зависимость изменения интенсивности конденсации пара от расхода жидкости

составляло (0,2–0,3) МПа. Концентрация азота в смеси изменялась в диапазоне (0–0,6) кг газа/кг смеси, а использовавшаяся для сравнения опытов эквивалентная концентрация гелия равнялась (0–2,17) кг газа/кг смеси.

Изменение температуры стенки $T_{\text{стенки}}$ по высоте гидроемкости непосредственно перед началом подачи струи жидкости для различных режимов в опыте с паро-азотной смесью показано на рис. 10. Из показаний термопар видно, что быстрое снижение температуры ПГС происходит в нижней части гидроемкости, так как там скапливается азот.

В случае подачи гелия (рис. 11), он, благодаря своей меньшей плотности, по сравнению с азотом и водяным паром, сильнее препятствует контактной конденсации, равномерно распределяясь по высоте емкости.

Результаты опытов с паро-азотной смесью представлены на рис. 12.

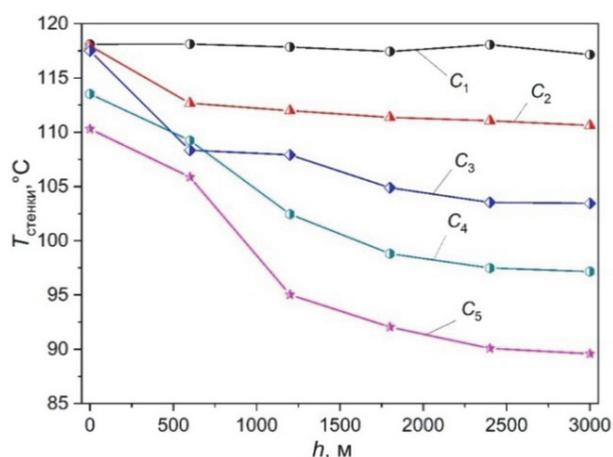


Рис. 10. Изменение температуры стенки гидроемкости по высоте в опыте с паро-азотной смесью: $P = 0,2$ МПа.

h – расстояние от крышки гидроемкости, C_1 – C_5 – концентрации азота в смеси, равные 0; 0,2; 0,33; 0,43; 0,5 кг газа/кг смеси

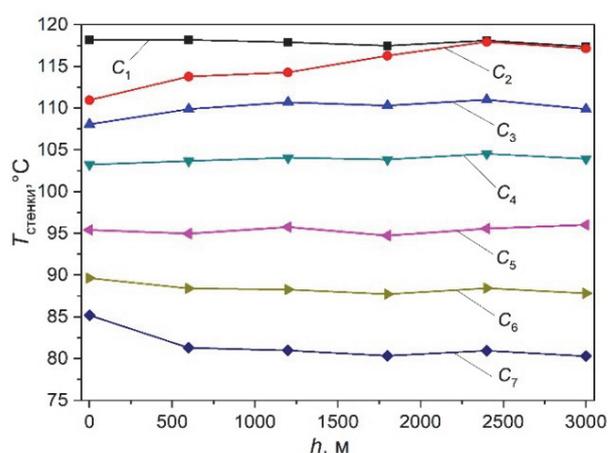


Рис. 11. Изменение температуры стенки гидроемкости по высоте в опыте с паро-гелиевой смесью: $P = 0,2$ МПа.

C_1 – C_7 – эквивалентные концентрации гелия, равные 0; 0,33; 0,64; 0,91; 1,40; 1,82; 2,17 кг газа/кг смеси

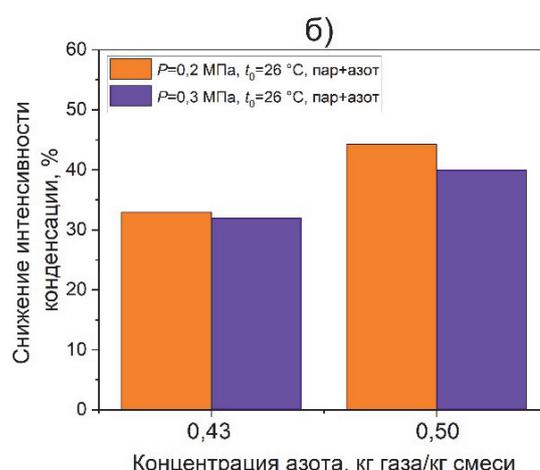
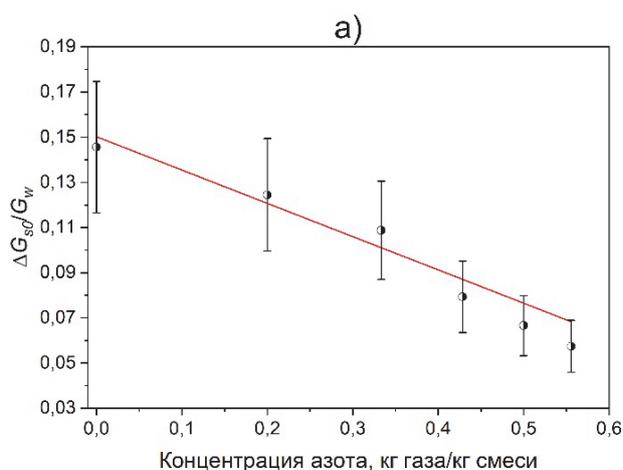


Рис. 12. Изменение интенсивности конденсации пара при подаче жидкости в зависимости от концентрации азота: а) эксперимент с $P_{ГЕ-2} = 0,2$ МПа, б) сравнение результатов опытов при давлении 0,2 и 0,3 МПа

На рис. 12а приведены результаты опыта с паро-азотной смесью, выполненного при давлении 0,2 МПа и температуре воды 26 °С. Видно, что повышение концентрации азота в ПГС приводит к снижению притока пара.

На рис. 12б представлено сравнение результатов опытов при давлении 0,2 и 0,3 МПа. Как видно из рис. 12б, уменьшение интенсивности конденсации пара на струе жидкости за счет наличия азота в смеси тем больше, чем ниже давление среды.

На следующем этапе исследований было определено влияние начальной температуры струи на теплообмен при контактной конденсации.

Результаты проведенных экспериментов могут быть описаны зависимостью для определения интенсивности конденсации пара на струе жидкости в присутствии неконденсирующихся газов:

$$\frac{\Delta G_{s0}}{G_w} = A + B \cdot C_{\text{экв}}, \quad (3)$$

здесь для азота $C_{\text{экв}}$ равна его концентрации C_{N_2} , а для гелия $C_{\text{экв}}$ определяется по формуле (1).

В формуле (3) слагаемое A и коэффициент B имеют вид:

– для паро-азотной смеси

$$A = (19 \cdot (t_s - t_0) - 284) \cdot 10^{-4},$$

$$B = (-26 \cdot (t_s - t_0) + 970) \cdot 10^{-4};$$

– для паро-гелиевой смеси

$$A = (11 \cdot (t_s - t_0) + 150) \cdot 10^{-4},$$

$$B = (13 \cdot (t_s - t_0) - 4670) \cdot 10^{-5},$$

где t_s – температура среды внутри имитатора гидроемкости, °С; t_0 – начальная температура истекающей струи, °С.

Зависимость (3) применима в следующем диапазоне параметров: давление ПГС $P = (0,2-0,3)$ МПа; температура истечения струи $t_0 = (20-60)$ °С; концентрация азота в смеси $C_{N_2} = (0-0,6)$ кг газа/кг смеси; эквивалентная по азоту концентрация гелия в смеси $C_{\text{экв}} = (0-2,17)$ кг газа/кг смеси, внутренний диаметр цилиндрического сопла $d = 6$ мм.

Анализ результатов экспериментов показал, что повышение начальной температуры струи при одинаковом давлении среды в имитаторе сосуда системы ГЕ-2 приводит к снижению интенсивности конденсации пара. При этом наиболее заметно это проявляется в опытах с гелием, так как он, как было сказано выше, в отличие от азота распределяется по всему объему имитатора гидроемкости и начинает оказывать свое влияние на конденсацию сразу при выходе струи из отверстия.

Влияние начальной температуры истекающей жидкости на интенсивность конденсации пара на струе жидкости в присутствии гелия показано на рис. 13 (прямая линия на рис. 13а – расчетная зависимость (3)).

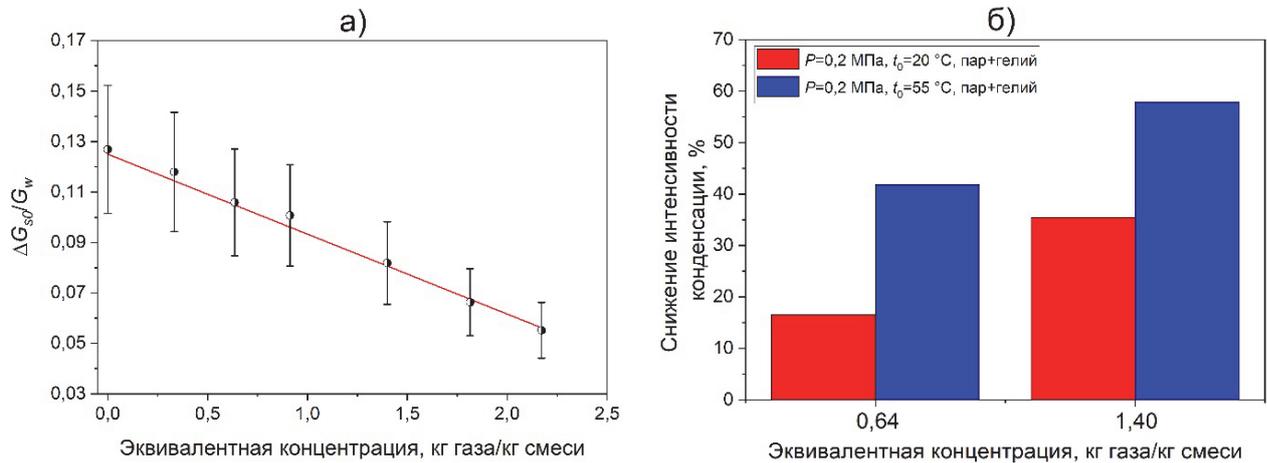


Рис. 13. Изменение интенсивности конденсации пара при подаче жидкости в зависимости от концентрации гелия: а) эксперимент с $t_0 = 20$ °С, б) сравнение результатов опытов при $t_0 = 20$ °С и $t_0 = 55$ °С

На основе полученных экспериментальных данных была выполнена расчетная оценка значения температуры прогрева истекающей струи жидкости в паровой объем гидроемкости и величины эффективного коэффициента теплоотдачи при контактной конденсации пара на струе жидкости в присутствии неконденсирующихся газов.

Начальная температура струи в опытах определялась по показаниям термопары, установленной на расстоянии 0,01 м до среза трубки основной линии подачи жидкости.

Температура свободно падающей цилиндрической струи на конце сплошного участка t_L рассчитывалась по следующей формуле:

$$t_L = t_s - 0,6915 \cdot (t_s - t_0) \cdot \exp \left(-5,784 \cdot \left(\frac{aL}{u_0 R_0^2} + \frac{2\varepsilon_* u_0^2}{5\varphi^2 g R_0} \cdot \left[\left(1 + \frac{2\varphi^2 g L}{u_0^2} \right)^{\frac{5}{4}} - 1 \right] \right) \right), \quad (4)$$

где t_s – температура насыщения пара при давлении насыщения, °С; t_0 – средняя температура струи на выходе из трубки, °С; a – коэффициент теплопроводности, $\text{м}^2/\text{с}$; L – длина сплошного участка струи, м; u_0 – скорость истечения струи, м/с; R_0 – радиус струи, м; $\varepsilon_* = 5 \cdot 10^{-4}$ – безразмерная константа; $\varphi = 0,85$ – коэффициент сужения струи; $g = 9,81$ – ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$.

Конечная температура t_k прогрева струи при пролете парогазового пространства имитатора гидроемкости второй ступени получена с использованием уравнения энергетического баланса на основе анализа опытных данных по расходам пара и жидкости:

$$t_k = t_0 + \frac{\Delta G_{s0}}{G_w} \cdot \frac{r}{c_p}, \quad (5)$$

где $\Delta G_{s0}/G_w$ – безразмерный комплекс, определяемый по (3); r – теплота парообразования, Дж/кг; c_p – изобарная теплоемкость, Дж/кг·К.

По мере пролета струи от места истечения до дна сосуда, она будет прогреваться от начальной температуры t_0 до некой конечной температуры t_k , при этом в месте дробления достигая значения t_L . Используя зависимости (3)–(5), были построены графики изменения температуры диспергированной свободно падающей струи t_{jet} от высоты пролета жидкости внутри имитатора гидроемкости ГЕ-2 (рис. 14), которые могут быть описаны полуэмпирической зависимостью:

$$t_{jet} = t_0 + A \cdot (H/d_{in})^B, \quad (6)$$

где H/d_{in} – высота пролета капли, отнесенная к внутреннему диаметру трубки, из которой происходит истечение. Коэффициент A и показатель степени B имеют вид:

$$A = (55,0 \cdot 10^{-2} \cdot \Delta t_0 - 26,3) \cdot C_{эКВ} + (13,0 \cdot 10^{-2} \cdot \Delta t_0 + 8,7),$$

$$B = (18,0 \cdot 10^{-2} - 5,0 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta t_0) \cdot C_{эКВ} + (1,2 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta t_0 + 8,0 \cdot 10^{-2}),$$

где $\Delta t_0 = t_s - t_0$ – начальный недогрев температуры струи жидкости до температуры насыщения, °С.

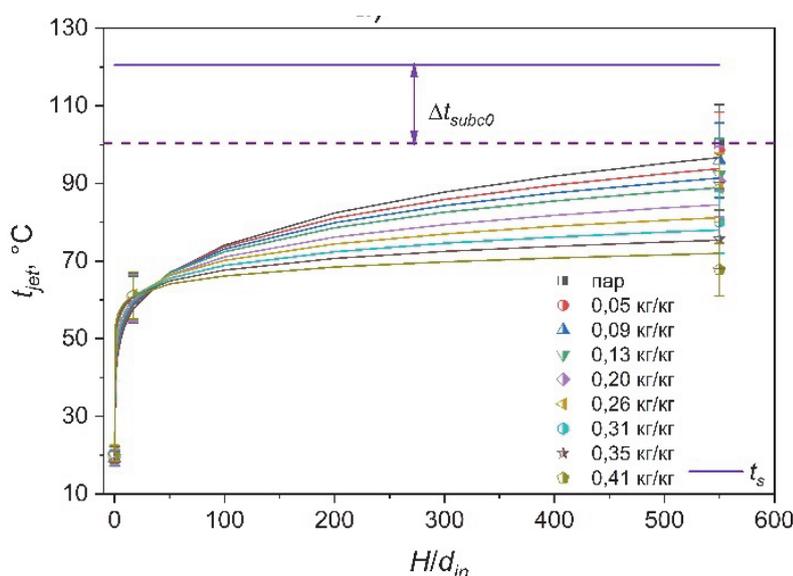


Рис. 14. Зависимости изменения температуры струи от безразмерной высоты пролета при наличии азота в паре:

Δt_{subc0} – недогрев температуры жидкости до температуры насыщения

На рис. 14 видно, что струя жидкости в паровом пространстве за время пролета до нижней точки не прогревается до температуры насыщения. При росте концентрации газа в смеси величина недогрева жидкости увеличивается. Так, на «чистом» паре недогрев составляет примерно 20 °С. При концентрации 0,41 кг газа/кг пара он увеличивается до ~ 50 °С.

Для расчетной оценки теплоотдачи при контактной конденсации пара в присутствии неконденсирующихся газов, в диссертационной работе, в виду сложности данного процесса были введены следующие допущения:

– во-первых, все капли имеют сферическую форму и одинаковый диаметр, равный некоторому среднему эквивалентному диаметру струи;

– во-вторых, в проведенных экспериментах на установке с рабочим участком КНС время падения капли не превышает одной секунды (что было зафиксировано в гидродинамических испытаниях), при этом паровая среда поступает в объем имитатора гидроемкости с постоянным расходом.

Температура среды вне факела струи и сам эффективный коэффициент теплоотдачи приняты постоянными за интервал времени, в течение которого струя жидкости поступает в имитатор гидроемкости.

О влиянии, оказываемом газами на конденсацию пара, можно судить по изменению отношения эффективных коэффициентов теплоотдачи от парозотной смеси и от «чистого» пара к струе жидкости α_3/α_{30} , приведенного на рис. 15, на котором сплошной линией показана зависимость, описывающая результаты экспериментов.

$$\frac{\alpha_3}{\alpha_{30}} = 1 - \left(1,3 \cdot 10^{-2} \cdot K_{\text{фаз}} + 6,1 \cdot 10^{-1}\right) \cdot C_{\text{ЭКВ}}^{6,3 \cdot 10^{-2} \cdot K_{\text{фаз}} + 9,7 \cdot 10^{-1}}, \quad (7)$$

где $K_{\text{фаз}} = \frac{r}{c_{P_{\text{ж}}} \cdot (t_s - t_0)}$ – критерий фазового перехода; r – удельная теплота парообразования, Дж/кг; $c_{P_{\text{ж}}}$ – изобарная теплоемкость жидкости, Дж/кг·К.

Зависимости (6) и (7) применимы для определения температуры прогрева диспергированной свободно падающей струи в ПГС и расчета отношения эффективных коэффициентов теплоотдачи от парогазовой смеси и от «чистого» пара в следующем диапазоне величин: давление парогазовой смеси (0,2–0,3) МПа; температура струи жидкости на выходе из сопла $t_0 = (20–60)^\circ\text{C}$; скорость истечения жидкости из цилиндрического сопла $u_0 = (0,5–0,6)$ м/с; внутренний диаметр цилиндрического сопла $d = 6$ мм; концентрации C_{N_2} и $C_{\text{ЭКВ}}$ равны (0–0,6) кг газа/кг смеси.

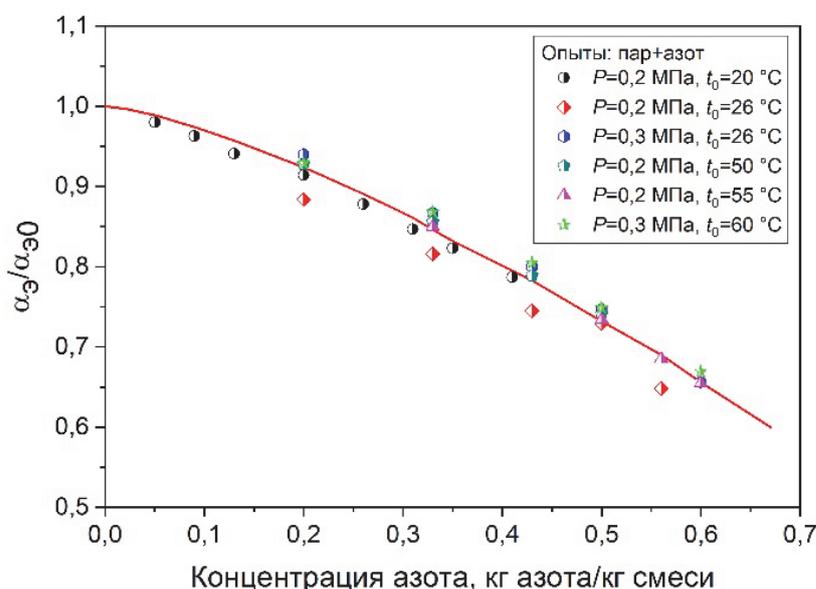


Рис. 15. Зависимость комплекса α_3/α_{30} от концентрации азота в смеси

В пятой главе работы была проведена расчетная оценка эффективности рассматриваемых систем удаления неконденсирующихся газов из парогенератора, работающего в конденсационном режиме, при применении их на АЭС с ВВЭР.

На рис. 16 представлены варианты реализации двух концепций систем удаления неконденсирующихся газов из ПГ в составе комплекса пассивных систем безопасности.

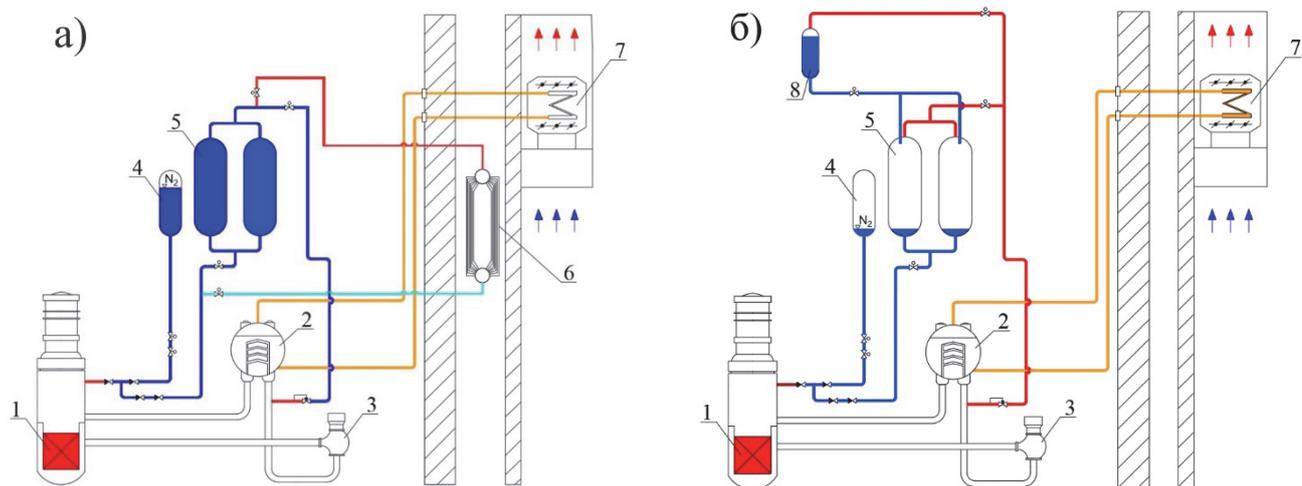


Рис. 16. Принципиальные схемы размещения УУГ (а) и системы дополнительных емкостей для подачи теплоносителя в ГЕ-2 (б) в составе комплекса ПСБ ВВЭР:

- 1 – реактор, 2 – ПГ, 3 – главный циркуляционный насос, 4, 5 – гидроемкости систем ГЕ-1 и ГЕ-2, 6 – теплообменники-конденсаторы УУГ, 7 – теплообменные модули СПОТ, 8 – емкость с запасом недогретой жидкости для ее впрыска в сосуды ГЕ-2

Применение на АЭС с ВВЭР теплообменников-конденсаторов УУГ (рис. 16а) или системы дополнительных емкостей для подачи теплоносителя в ГЕ-2 (рис. 16б) должно способствовать увеличению до 72 ч длительности работы парогенератора в конденсационном режиме и автономного функционирования СПОТ при аварии с гильотинным разрывом главного циркуляционного трубопровода и полным обесточиванием. При этом внедрение системы теплообменников-конденсаторов УУГ позволит оптимизировать конструкцию системы пассивного залива активной зоны (СПЗАЗ) перспективных проектов ВВЭР за счет уменьшения количества гидроемкостей третьей ступени.

Анализ экспериментальных результатов и данных, полученных в ходе расчетной оценки работы теплообменников-конденсаторов устройства удаления неконденсирующихся газов, показал, что:

– применение ТК УУГ обеспечивает конденсацию парогазовой смеси, поступающей из «холодного» коллектора парогенератора с заданным расходом, соответствующим последней ступени расходной характеристики гидроемкостей системы ГЕ-2 в течение двух суток после их опустошения;

– использование оребренных труб приводит к повышению конденсационной мощности УУГ и расхода парогазовой смеси по сравнению с гладкими трубами, но сокращает длительность работы всей системы УУГ. Однако в условиях работы данной системы применение оребрения является избыточной мерой. Из чего вытекает следующее: для обеспечения заданной длительности работы устройства необходима установка дроссельной шайбы в трубопроводе, соединяющем парогенератор и ТК УУГ.

Как показала расчетная оценка (рис. 17), без дроссельной шайбы на линии между ГЕ-2 и УУГ воздух в МОП нагревается достаточно быстро. При этом также происходит снижение температурного напора и «отравление» ТК, так как при таком расходе в него поступает больше газов, чем их сдувается. Представленный на рис. 17 начальный расход ПГС на теплообменник УУГ с учетом дроссельной шайбы завышен в два раза по сравнению с необходимым расходом сдувки парогазовой смеси из парогенератора (1,6 г/с). Такой расход обеспечит отвод ПГС из ПГ в течение не менее 48 ч при непрерывном поступлении газов в трубный пучок теплообменников-конденсаторов УУГ.

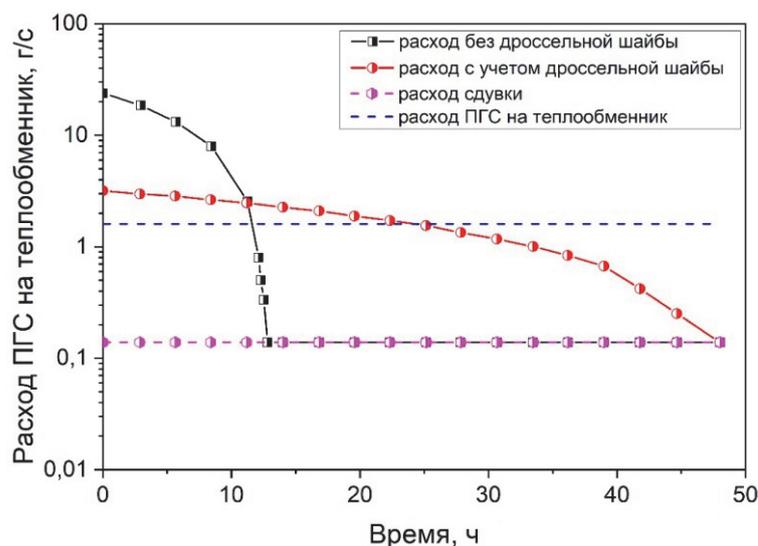


Рис. 17. Изменение расходов парогазовой смеси на один теплообменник-конденсатор УУГ

С целью поддержания конденсационной мощности самих ТК УУГ необходима организация сдувки ПГС из их нижних коллекторов. Как показали экспериментальные результаты, достаточная для этого величина сдувки составляет ~ 10 % от общего расхода парогазовой смеси, поступающей в ТК УУГ из парогенератора, и равного 1,6 г/с. Для очистки этой сбрасываемой из восьми теплообменников-конденсаторов УУГ в межбололочное пространство смеси требуется установка дополнительной фильтрационной секции в системе фильтрации МОП, так как в него будет сбрасываться дополнительно 1,112 г/с (или ~ 4 кг/ч) парогазовой смеси.

В ходе проведения расчетной оценки параметров системы для осуществления отвода ПГС из парогенератора при впрыске недогретой жидкости в объем гидроемкостей ГЕ-2 был консервативно определен запас

холодной воды, необходимой для конденсационной сдувки парогазовой смеси из «холодного» коллектора парогенератора ВВЭР.

В качестве исходных условий для расчета были приняты следующие: к концу первых 24 часов аварии в каждую гидроемкость системы ГЕ-2 объемом 120 м^3 при давлении $0,28 \text{ МПа}$ ($t_s = 131,2 \text{ }^\circ\text{C}$) из первого контура поступает парогазовая смесь с постоянным объемным расходом сдувки $G_s = 0,75 \text{ л/с}$ (или $1,161 \text{ г/с}$), в котором содержится $65,5 \text{ мг}$ азота и $9,63 \text{ мг}$ водорода. Одновременно с этим в гидроемкость подается с постоянным расходом вода с температурой $40 \text{ }^\circ\text{C}$.

Консервативно оценивалась конденсация пара на сплошном, непрерывном участке струи жидкости, так как для распыленной струи полученное значение расхода будет заведомо достаточным для полной конденсации поступающего пара.

На основании проведенных оценочных расчетов для конденсации требуемого расхода пара равного $1,161 \text{ г/с}$ (без учета неконденсирующихся газов) при начальной скорости струи $0,306 \text{ м/с}$ необходимо не менее 7 струй с диаметром 2 мм , при этом расход холодной воды будет равен $6,73 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$.

Полученные значения скорости истечения, диаметра и числа струй позволили определить количество воды, необходимое для обеспечения конденсации пара на струях жидкости в течение 48 ч. Установлено, что для конденсации всего пара, поступающего из ПГ в гидроемкости ГЕ-2, необходим запас воды равный 1155 кг .

Неконденсирующиеся газы, поступающие вместе с паром, снижают эффективность конденсации, вследствие чего данный процесс не заканчивается на сплошном участке струи и продолжается после дробления струи на капли. За время падения капель внутри гидроемкости ГЕ-2 температура среды и эффективный коэффициент теплоотдачи остаются постоянными. При скорости истечения $0,306 \text{ м/с}$ капли прогреваются до температуры парогазовой смеси. Следовательно, запас воды в количестве 1155 кг достаточен для конденсации пара в парогазовой смеси, сдуваемой из парогенератора в течение 48 ч в гидроемкость ГЕ-2.

Общий запас жидкости, необходимый для конденсации пара, поступающего с парогазовой смесью в гидроемкости ГЕ-2 за 48 ч после запуска рассматриваемой системы, определен с коэффициентом запаса равным 15% . Общая масса воды составит: 10626 кг . В пересчете на одну гидроемкость ГЕ-2 получим, что для осуществления сдувки ПГС из парогенератора необходим запас воды равный $1328,3 \text{ кг}$.

Таким образом, применение системы сдувки парогазовой смеси из парогенераторов ВВЭР за счет впрыска недогретой жидкости в объем гидроемкостей ГЕ-2 или установки теплообменников-конденсаторов устройства удаления газов позволит до 72 ч продлить длительность функционирования парогенератора ВВЭР в конденсационном режиме в случае аварии с гильотинным разрывом главного циркуляционного трубопровода и полным обесточиванием АЭС.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Проведена комплексная экспериментальная и расчетная работа по исследованию процессов теплообмена при конденсации пара в присутствии неконденсирующихся газов на струях свободно падающей жидкости и внутри пучка вертикальных воздухоохлаждаемых труб с целью обоснования технологии удаления неконденсирующихся газов для обеспечения работоспособности парогенератора в конденсационном режиме в перспективных реакторах ВВЭР.

Заявленная цель диссертационной работы была достигнута, при этом были решены все поставленные задачи:

1. Разработаны методики проведения экспериментов на установке с рабочими участками «Устройство удаления газов» и «Конденсация на струях» для исследования процессов теплообмена при конденсации пара в присутствии неконденсирующихся газов.

2. В соответствии с разработанной программой проведены экспериментальные исследования и обработаны полученные результаты.

3. Экспериментально выявлены и изучены закономерности процесса конденсации пара внутри оребренных теплообменных труб и на струях свободно падающей жидкости в присутствии неконденсирующихся газов.

4. На основе экспериментальных данных проведена расчетная оценка применимости теплообменников-конденсаторов устройства удаления неконденсирующихся газов для поддержания работы парогенераторов ВВЭР в конденсационном режиме. Определено, что система ТК УУГ способна поддерживать конденсацию парогазовой смеси, поступающей из «холодного» коллектора парогенератора, с расходом достаточным для обеспечения эффективной работы СПОТ. Были выработаны рекомендации для обеспечения заданной длительности функционирования теплообменника-конденсатора УУГ.

5. На основании экспериментальных данных проведена расчетная оценка системы сдувки парогазовой смеси из парогенераторов ВВЭР при впрыске недогретой жидкости в объем гидроемкостей ГЕ-2, в ходе которой был определен суммарный запас теплоносителя в дополнительных емкостях, достаточный для длительной (до 48 ч) работы системы.

Осуществление сдувки парогазовой смеси из парогенераторов ВВЭР за счет впрыска недогретой жидкости в объем гидроемкостей ГЕ-2 или установки теплообменника-конденсатора устройства удаления газов (при внесении в его конструкцию дополнительных изменений, выявленных в ходе диссертационной работы) позволит до 72 ч продлить длительность функционирования парогенератора ВВЭР в конденсационном режиме.

При исчерпании подпитки теплоносителем от СПЗА3, через 24 ч после начала аварии и при учете наличия естественной циркуляции в контуре парогенератор – СПОТ, произойдет переход на «паровой» режим охлаждения

активной зоны, что в значительной мере приведет к снижению эффективности отвода остаточного тепловыделения от реактора. Поэтому автор считает целесообразным использование исследованных в диссертационной работе систем совместно с оптимизированной, по сравнению с примененной в современных проектах ВВЭР, системой пассивного залива активной зоны.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах

1. Экспериментальная оценка влияния контактной конденсации парогазовой смеси на работу пассивных систем безопасности ВВЭР / А.В. Морозов, **А.Р. Сахипгареев** // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2017. – № 1. – С. 17–28. (авторство не разделено).
2. Теплоотдача от парогазовой смеси к свободно падающей струе жидкости в ограниченном объеме применительно к аварийным режимам АЭС с ВВЭР / **А.Р. Сахипгареев**, А.В. Морозов // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2018. – Вып. 3. – С. 127–137. (авторство не разделено).
3. Экспериментальное исследование процессов теплообмена в пучке воздухоохлаждаемых труб с продольным оребрением в пассивной системе безопасности АЭС с ВВЭР / **А.Р. Сахипгареев**, А.В. Морозов // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2018. – Вып. 4. – С. 80–88. (авторство не разделено).
4. Исследование процессов теплопередачи при конденсации пара из парогазовой смеси для поддержания работоспособности парогенератора ВВЭР в аварийном режиме / **А.Р. Сахипгареев** // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2023. – Вып. 1. – С. 214–227.

Тираж 80 экз. Заказ № 376. 28.11.2024
Отпечатано с оригинала автора в АО «ГНЦ РФ – ФЭИ».
г. Обнинск Калужской обл., пл. Бондаренко, 1.