

На правах рукописи



СЕМАШКО
Сергей Евгеньевич

ОБОСНОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПАССИВНОГО ОТВОДА ТЕПЛА
ИЗ ОБЪЕМА ЗАЩИТНОЙ ОБОЛОЧКИ АЭС С ВВЭР

Специальность 05.14.03 – «Ядерные энергетические установки,
включая проектирование, эксплуатацию
и вывод из эксплуатации»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

САНКТ ПЕТЕРБУРГ – 2013

Работа выполнена на кафедре "Реакторные и котельные установки" в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет" (ФГБОУ ВПО "СПбГПУ").

Научный руководитель:

– *Безлепкин Владимир Викторович* – доктор техн. наук

Официальные оппоненты:

– *Федорович Евгений Данилович* – доктор техн. наук, профессор, ФГБОУ ВПО "СПбГПУ", профессор;

– *Калинкин Александр Иванович* – кандидат техн. наук, старший научный сотрудник, НИИ кораблестроения и вооружения ВМФ ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия», старший научный сотрудник

Ведущая организация: *ФГУП «Научно-исследовательский технологический институт им. А. П. Александрова» (НИТИ), г. Сосновый Бор*

Защита диссертации состоится 24 декабря 2013 г. в 18-00 на заседании диссертационного совета Д 212.229.04 в ФГБОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет" по адресу:

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29,
в аудитории 411 ПГК

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет".

Автореферат разослан «22» ноября 2013 г.

Отзыв на автореферат, заверенный печатью учреждения, в двух экземплярах просим направить по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Факс: (812) 412-9032

E-mail: kg1210@mail.ru

Ученый секретарь
диссертационного совета



К.А. Григорьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В новых проектах АЭС с ВВЭР существенное внимание уделяется управлению запроектными авариями (ЗПА). Для защиты от превышения допустимого давления внутри защитной оболочки (ЗО) здания реактора спроектирована система пассивного отвода тепла (СПОТ) из ЗО. Основным преимуществом таких систем является отсутствие зависимости их функционирования от наличия источников электроснабжения. СПОТ ЗО предназначена для длительного отвода тепла из объема ЗО к конечному поглотителю посредством теплообменников-конденсаторов, расположенных в подкупольном пространстве ЗО при авариях, связанных с течами теплоносителя из элементов реакторной установки внутри ЗО.

Эффективность работы СПОТ ЗО в значительной мере определяется интенсивностью теплообмена при конденсации пара из парогазовой среды на теплообменных поверхностях. В свою очередь, условия конденсации пара, в основном, определяются характером конвективных течений и распределением неконденсирующихся газов в гермообъеме ЗО.

Для расчетного обоснования этой системы были использованы коды в сосредоточенных параметрах, такие как КУПОЛ-М, и трехмерные гидродинамические коды, такие как ПГС-ТК (парогазовая смесь – тепломассообмен и конденсация), STAR-CD. В настоящее время эти коды проходят этап тестирования и верификации применяемых методик и замыкающих соотношений при моделировании процессов тепломассопереноса в контейнентах АЭС с ВВЭР с учетом функционирования СПОТ ЗО.

Таким образом, актуальность темы обусловлена необходимостью расчетного и экспериментального обоснования работоспособности и эффективности СПОТ ЗО проекта АЭС-2006.

Целью работы являлось обоснование работоспособности и тепловой эффективности СПОТ ЗО проекта АЭС-2006 во всех предполагаемых режимах работы этой системы. Исходя из общей цели, в работе решались следующие **задачи**:

– проведение комплексного анализа литературных источников, посвященных теплоотдаче и массообмену при свободной и смешанной конвекции у вертикальных обогреваемых пластин и труб;

– экспериментальное исследование теплоотдачи к трубам модельных теплообменников при свободноконвективном течении воздуха в модели подкупольного пространства на стенде СМК (ФГУП "ЦНИИ им. академика А.Н.Крылова", масштаб 1:4);

– экспериментальное исследование тепломассообмена при конденсации водяного пара на поверхностях модельных теплообменников СПОТ ЗО и процессов тепломассопереноса внутри модели защитной оболочки на крупномасштабном стенде (КМС), (ФГУП «НИТИ им. А.П.Александрова»);

– выработка рекомендаций по выбору зависимостей для расчета поверхностной конденсации пара на вертикальных поверхностях в условиях свободной конвекции;

– валидация компьютерного кода КУПОЛ-М и CFD кодов на полученных экспериментальных данных;

– выполнение расчетного обоснования работоспособности натурального СПОТ 30.

Методический подход. В работе приняты методы экспериментальной теплофизики, методы вычислительной математики, теории тепломассообмена, эмпирические формулы коэффициентов теплоотдачи.

На защиту выносятся:

идеология создания крупномасштабных стендов и их представительность;

экспериментальные данные, полученные на стендах КМС и СМК;

рекомендации по расчету коэффициентов теплоотдачи и массоотдачи (с учетом влияния поперечного потока пара из-за конденсации пара на стенке) при свободной конвекции у вертикальных труб и плоских пластин;

результаты валидации кодов КУПОЛ-М, ПГС-ТК, STAR-CD на задачах, в которых реализуются основные процессы, характерные для рассматриваемого случая;

результаты валидации кодов КУПОЛ-М, ПГС-ТК, STAR-CD на экспериментальных данных, полученных на крупномасштабных стендах;

результаты расчетных исследований СПОТ 30.

Научная новизна работы обусловлена следующим:

разработаны рекомендации по расчету коэффициентов теплоотдачи и массоотдачи при свободной и смешанной конвекции на вертикальных трубах и пластинах, которые позволили уточнить замыкающие соотношения кода в сосредоточенных параметрах КУПОЛ-М;

экспериментально исследованы тепломассообмен при свободноконвективном течении сред в подбололочечных пространствах моделей геометрически подобных теплообменников-конденсаторов СПОТ 30 (стенды КМС и СМК);

проведена валидация специализированного контейментного кода ПГС-ТК и кода STAR-CD на экспериментальных данных, полученных на стендах КМС, СМК и «СПОТ-30», а также на задачах, в которых реализуются основные процессы, характерные для рассматриваемого случая;

проведены трехмерные расчеты течения среды в гермообъеме защитной оболочки и конденсации пара из тернарной смеси (пар, воздух, водород) на поверхности теплообменников натурального СПОТ 30.

Достоверность научных положений основывается на следующем:

– эксперименты выполнены на трех крупномасштабных моделях теплообменников-конденсаторов СПОТ 30. Эксперименты выполнены в диапазоне режимных параметров сред внутри 30, охватывающем диапазон этих параметров на всех ста-

диях протекания аварийных условий;

– предлагаемые выводы и соотношения базируются на результатах экспериментов, проведенных как автором, так и другими исследователями;

– в исследованиях использованы современные средства измерения; выполнен анализ погрешности; предложенные физические модели и соотношения согласуются с современными представлениями о процессах теплообмена;

- выполнена кросс-верификация различных кодов и проведен анализ их чувствительности.

Практическая ценность и реализация результатов работы состоит в том, что проведенные исследования позволили обосновать работоспособность СПОТ 30 проекта АЭС-2006, проверить новые инженерные решения, используемые в пассивных системах, получить новые данные для валидации расчетных кодов.

Результаты настоящей работы могут быть использованы при создании других новых конструкций, например, для расчета температурного режима бассейна выдержки отработанного топлива с системой пассивного отвода тепла АЭС БН-1200.

Созданные крупномасштабные стенды будут включены в матрицы валидации и являются базовыми экспериментальными стендами для исследования процессов теплообмена в СПОТ 30. Полученные экспериментальные данные позволят организации-заявителю расширить область применения расчетных кодов при аттестации в Ростехнадзоре России.

Основные этапы экспериментальных работ выполнялись по взаимосогласованным техническим заданиям совместно с ведущими организациями в отечественной атомной энергетике: ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», ОАО «ОКБМ Африкантов» и др.

Личный вклад автора. Автор участвовал в разработке крупномасштабных стендов СМК, «СПОТ-30» и модернизации стенда КМС, разработке методики проведения опытов и обработки экспериментальных данных.

Участие в проведении валидации кодов ПГС-ТК, STAR-CD на тестовых опытных данных по свободной конвекции на вертикальных пластинах и трубах (включая влияние поперечного потока массы при конденсации пара из парогазовой смеси) и на опытных данных, полученных на стендах СМК, КМС и «СПОТ-30».

Автором проведено сопоставление опытных данных и обобщающих зависимостей по теплоотдаче при турбулентной свободной конвекции на вертикальных обогреваемых пластинах и трубах и разработаны рекомендации по уточнению замыкающих соотношений кода в сосредоточенных параметрах КУПОЛ-М.

Расчетное исследование работоспособности натурного объекта (СПОТ 30). Выбор режимных параметров характерных для функционирования СПОТ 30.

Разработка рекомендаций по размещению теплообменников-конденсаторов во внутреннем объеме 30, выбору их конструктивных параметров и определение тепловой мощности СПОТ.

Апробация результатов работы. Основные результаты проведенных исследований докладывались и обсуждались на 4-й Международной научно-технической конференции (МНТК) «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР» (Подольск, 2005); Международной конференции «NUCLEAR POWER AND ENVIRONMENT» (Варна, Болгария, 2006); 5-й МНТК «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР» (Подольск, 2007); 6-й МНТК «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР» (Подольск, 2009); 7-й МНТК «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики» (Москва, 2010); 7-й МНТК «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР» (Подольск, 2011); Научно-практической конференции (НПК) «Перспективы развития атомной энергетики в Республике Беларусь» (Минск, 2011); 11-й МНТК "Оптические методы исследования потоков" (Москва, 2011); Научно-техническом семинаре "Проблемы верификации и применения CFD-кодов в атомной энергетике" (Нижний Новгород, 2012).

Публикации. Результаты диссертации изложены в 28 печатных работах, включая 10 статей в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 3 патента РФ на полезную модель, 2 авторских свидетельства на программы для ЭВМ.

Внедрение. Результаты работ внедрены в качестве проектных материалов и материалов обоснования безопасности проектов АЭС-2006 и MIR-1200, а также в рабочую документацию сооружаемых АЭС: Ленинградская АЭС (блоки № 1, 2); Балтийская АЭС (блоки № 1, 2); Белорусская АЭС (блоки № 1, 2); АЭС «Темелени» (блоки № 3, 4 – тендерное предложение).

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 91 источник, и одного приложения. Она изложена на 157 страницах текста, имеет 62 рисунка и 35 таблиц. Общий объем диссертации – 198 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы её цели, приведён перечень результатов работы, вынесенных на защиту, обоснованы их научная новизна и достоверность.

В первой главе приведен обзор современных зарубежных и отечественных систем пассивного отвода тепла из контейнента. Приведены требования к СПОТ 3О ЛАЭС-2, описаны ее основные конструктивные особенности (рис. 1).

Работа СПОТ 3О основана на физических законах теплообмена и не требует внешних источников энергии, изменения состояния элементов схемы и действий оператора. Эффективность определяется интенсивностью теплообмена при конденсации пара из парогазовой среды на теплообменных поверхностях. В свою очередь, условия конденсации пара определяются характером свободноконвективных течений и распределением неконденсирующихся газов в объеме 3О. Термодинамические параметры атмосферы при авариях с течами теплоносителя внутри 3О АЭС с ВВЭР рассчитываются с помощью кода КУПОЛ-М и с помощью поддерживающих

трехмерных кодов. В процессе создания интегральных расчетных кодов важным моментом является выбор замыкающих соотношений для расчета коэффициентов теплоотдачи и массоотдачи от парогазовой смеси к поверхности пленки конденсата на поверхности водоохлаждаемых теплообменников, расположенных в подкупольном пространстве. В данной главе был выполнен обзор работ, посвященных исследованию теплообмена при свободной конвекции.

В интегральных кодах КУПОЛ-М, АНГАР для расчета процесса конденсации пара из смеси с неконденсирующимися газами используется тройная аналогия, которая при значительных величинах поперечного потока нарушается с учетом стефановского потока и имеет вид: $\alpha_D(1 - Y_{1w}) = \alpha/\rho c_p$. Центральным вопросом этих методик является определение конвективного коэффициента теплоотдачи. При свободноконвективном течении среды у вертикальных обогреваемых и охлаждаемых поверхностей для обобщения опытных данных по теплоотдаче в области развитой турбулентности используется формула следующей структуры:

$$\overline{Nu}_L = c \cdot Ra_L^{1/3}. \quad (1)$$

Коэффициент “с” по данным из различных источников изменяется в диапазоне от 0,17 до 0,1. В работе указываются причины такого разброса опытных данных и обосновывается значение $c = 0,1$. Следует отметить, что в интегральных кодах эта формула используется с коэффициентом $c = 0,13 \div 0,15$. Для смешанного режима течения среднее значение коэффициента теплоотдачи рекомендуется определять по формуле:

$$\bar{\alpha}_{СК,L} = \bar{\alpha}_{Л,L} \cdot \left(\frac{Ra_{L,кр}}{Ra_L}\right)^{1/3} + \bar{\alpha}_{Т,L} \left[1 - \left(\frac{Ra_{L,кр}}{Ra_L}\right)^{1/3}\right]. \quad (2)$$

Здесь $\left(\frac{Ra_{L,кр}}{Ra_L}\right)^{1/3} = \frac{x_{кр}}{L}$ – условное значение высоты поверхности теплообмена, на которой происходит переход от ламинарного свободноконвективного режима течения к турбулентному; $\bar{\alpha}_{Л,L}$ и $\bar{\alpha}_{Т,L}$. Значение среднего коэффициента теплоотдачи при ламинарном режиме определяется по зависимости:

$$\overline{Nu}_{Л,L} = 0,54 \cdot Ra_L^{1/4}. \quad (3)$$

Условное значение критического значения числа Релея определяется из условия равенства выражений (1) и (3) в точке перехода и равно $Ra_{L,кр} = 6,15 \cdot 10^8$.

Показано, что наряду с тройной аналогией, используемой в кодах, необходимо вводить поправку на искажение профилей скорости, температур и концентраций. Наиболее удобно для этого использовать теоретические решения Кутателадзе С.С. и Леонтьева А.И., Сполдинга Д.Б., Арефьева К.М., а именно:

$$\frac{\overline{Nu}_D}{\overline{Nu}_{D0}} (1 - Y_{1w}) = f(B), \quad (4)$$

где $B = \frac{Y_{1w} - Y_{1f}}{1 - Y_{1w}}$ – концентрационный параметр проницаемости, введенный Сполдингом Д.Б., верхний индекс «-», указывает на среднее значение по высоте трубы или

пластины; \overline{Nu}_{D0} , \overline{Nu}_D – диффузионные значения чисел Нуссельта без учета поперечного потока и с его учетом, соответственно; $Y_{1f} = p_1/P$ – относительное парциальное давление пара в потоке; $Y_{1w} = p_1/P$ – относительное парциальное давление пара у стенки; P – общее давление.

В процессе анализа литературных источников было установлено, что количество работ по исследованию конденсации пара из смеси с неконденсирующимися газами на внешней поверхности вертикальных труб (при свободноконвективном течении парогазовой смеси), проведенных на крупномасштабных стендах, по сравнению с конденсацией паров внутри труб относительно мало. Результаты этих исследований, как правило, обработаны в виде эмпирических зависимостей для среднего значения коэффициента теплоотдачи от объёмной или массовой доли неконденсирующегося газа в парогазовой смеси. Упрощения такого подхода не позволяют распространять их за пределы исследованной геометрии и диапазона режимных параметров и применительно к СПОТ 3О не позволяют ответить на все вопросы.

На основе проведенного анализа сделаны выводы по учету влияния поперечного потока на интенсивность теплообмена. Отмечена необходимость введения в интегральный код поправки, учитывающей влияние поперечного потока на профили скорости, температуры и концентрации.

Учитывая то обстоятельство, что в натуральных условиях работы СПОТ 3О масштабы подкупольного пространства и габариты теплообменника таковы, что числа Релея достигают величин порядка 10^{12} , только крупномасштабные стенды позволяют получить опытные данные, необходимые для проведения валидации программных продуктов и разработки расчетных рекомендаций, и обосновать натурную конструкцию.

С учетом вышесказанного в данной главе обоснована целесообразность модернизации стенда КМС для проведения экспериментальных исследований на интегральной модели с натурными параметрами среды и создания стенда СМК для исследования процессов естественной конвекции и теплопереноса внутри подкупольного пространства 3О.

Кроме того для обоснования теплогидравлических характеристик теплообменника и контура охлаждения СПОТ 3О рекомендовано использовать стенд «СПОТ-3О» ОАО «ОКБМ Африкантов». Создание стенда «СПОТ-3О» и проведение экспериментов выполнялись по техническим заданиям, разработанным с участием автора. В состав модели контура охлаждения входит модель теплообменника-конденсатора (М 1:1).

Вторая глава содержит описание крупномасштабных теплофизических стендов (рис. 2 и 3) и методику проведения экспериментов, измерения параметров. В табл. 1 приведены основные характеристики защитной оболочки АЭС-2006 и стендов.

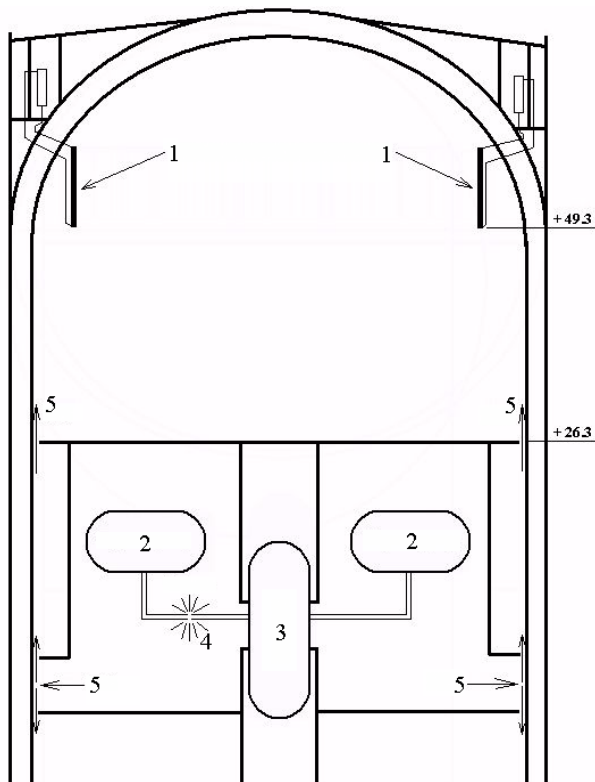


Рис. 1. Размещение СПОТ 30 в здании реактора ЛАЭС-2: 1 – т/о (16 шт.); 2 – ПГ; 3 – реактор; 4 – разрыв; 5 – движение среды

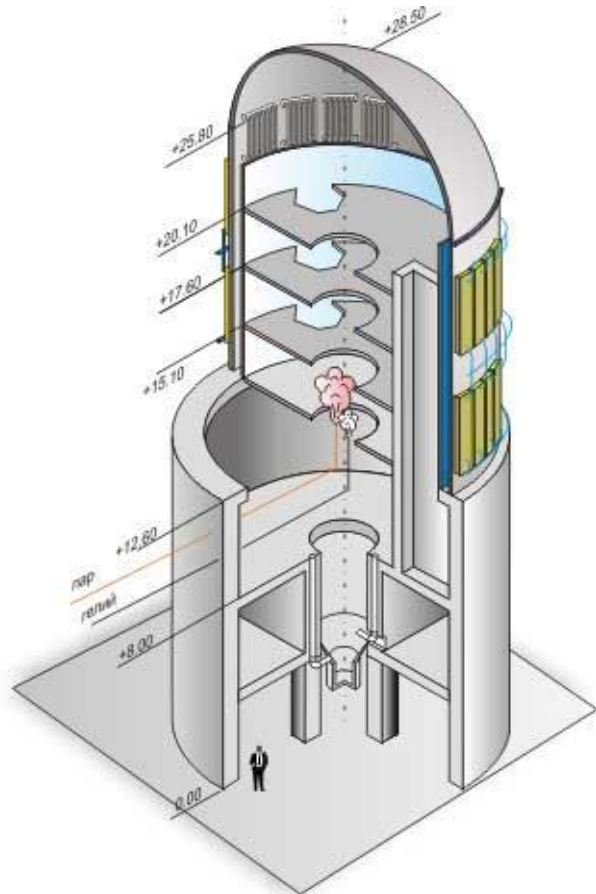


Рис. 2. Стенд КМС

Для обоснования замыкающих соотношений по теплоотдаче при свободноконвективном течении воздуха внутри 30 и валидации трехмерных кодов на базе ФГУП "ЦНИИ им. академика А.Н.Крылова" был создан экспериментальный стенд СМК, который представляет собой модель (М 1:4 см. рис. 3,4 и табл. 1) подкупольного пространства защитной оболочки Ленинградской АЭС-2.

Внутри оболочки по опорному кольцу расположены 16 теплообменников. Высота установки по верхнему коллектору составляет 8,3 м от основания купола, а суммарная площадь теплообменной поверхности составляет 224 м² (с учетом коллекторов). По периметру основания стенда расположены электронагреватели (см. рис. 4). Эксперименты и численное моделирование течения на стенде СМК позволили установить характерные черты течения воздуха в объеме модели защитной оболочки и непосредственно у теплообменников.

Система экспериментальных измерений (СЭИ) стенда СМК включает в себя измерения температуры воздуха внутри модели 30 (11 точек), температуры внутренней и наружной поверхности теплоизоляционного слоя модели 30 (8 точек), скорости потока воздуха под теплообменником (18 точек), температуры охлаждающей воды (27 точек), температуры воды внутри теплообменных трубок (24 точки), расхода охлаждающей воды (9 точек), давления в подводящем коллекторе (1 точка).

Для регистрации результатов экспериментов был использован измерительно-вычислительный комплекс «ТЕРМ». Метрологические характеристики ИВК «ТЕРМ» подтверждены результатами метрологической аттестации в НИТИ.

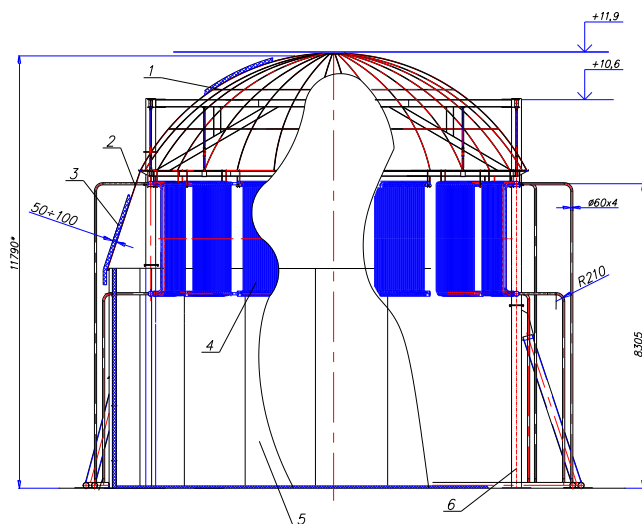


Рис. 3. Стенд СМК: 1 – купол; 2 – каркас нижней части купола; 3 – утеплитель 4-х слойный; 4 – ограждение теплоизолирующее; 5 – панели теплоизоляционные; 6 – каркас несущий

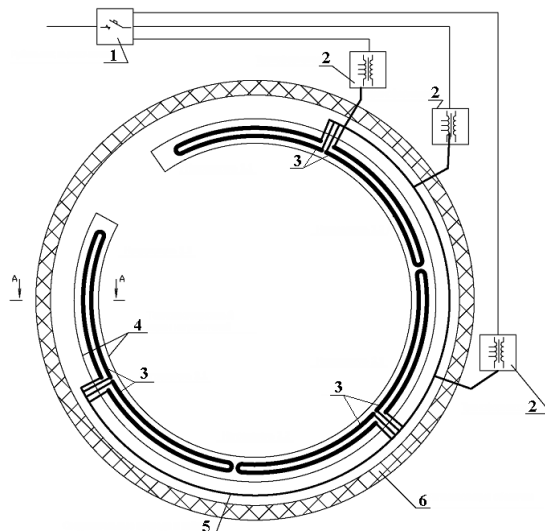


Рис. 4. Электрооборудование СМК: 1 – рубильник; 2 – трансформаторы; 3 – электронагреватель; 4 – теплоизоляционный экран нагревателей; 5 – соединительные провода; 6 – теплоизоляция ЗО

Для обоснования работоспособности СПОТ ЗО был использован экспериментальный стенд КМС (см. рис. 2), созданный на базе ФГУП «НИТИ им. А.П. Александра». На этом стенде обеспечены физические процессы и диапазон режимных параметров, соответствующие натурному объекту (табл. 1).

Основной состав оборудования стенда включает в себя ЗО, систему пассивного отвода тепла из герметичной защитной оболочки, технологические системы подачи сред (воздух, пар, гелий) в ЗО.

Стенд КМС оборудован системой экспериментальных измерений (СЭИ), измерительно-управляющим вычислительным комплексом ИВК-У-КМС, а также системой автоматизированного газового контроля среды контейнента КМС (САГК1 и САГК2). СЭИ стенда разделено на две части: СЭИ гермообъема и защитной оболочки и СЭИ модели СПОТ ЗО.

СЭИ гермообъема и защитной оболочки включает в себя датчики измерений температуры среды в модели ЗО (105 точек); температуры окружающей среды (14 точек); температуры внутренних поверхностей модели ЗО (24 точки); температуры внешних поверхностей модели ЗО (30 точек); давления, перепада давления (5 то-

чек); теплового потока на внешней поверхности ЗО (27 точек); температуры пара на выходе из паропровода (2 точки); расхода среды (пара, воздуха, гелия) (6 точек).

СЭИ модели СПОТ ЗО включает в себя датчики измерений температуры внешней поверхности трубок ТО (34 точки); температуры теплоносителя (40 точек); расхода теплоносителя и конденсата (7 точек); избыточного давления, перепада давления (6 точек).

Система автоматизированного газового контроля включает 34 точки отбора газовых проб.

Метрологические характеристики измерительного оборудования стенда подтверждены результатами метрологической аттестации в НИТИ.

Таблица 1. Характеристики защитной оболочки АЭС-2006 и стендов

Параметр	АЭС-2006	КМС	Масштаб	СМК	Масштаб
Высота, м	67	28,9	1:2,3	12	–
Внутренний диаметр, м	44	12,0	≈1:4	12	≈1:4
Суммарный объем, м ³	76700	1830	≈1:40	–	
Объем над кольцевым зазором, м ³	48622	769	1:63	1130	1:43
Нижний объем, м ³	28078	1069	1:26	–	–
Площадь прямых участков труб теплообменника, м ²	1200	32,6	1:21,8	176	1:6,8
Объем над кольцевым зазором, деленный на площадь теплообменника	40,5	23,6	1:1,72	6,42	1:6,3
Высота от щели до теплообменника, м	22,8	4,3	1:5,3	5,8	1:4
Высота теплообменника, м	5,0	1,70	1:2,94	2,5	1:2
Мощность системы, МВт	24	0,570	≈1:40	0,14	1:160

В третьей главе приведено описание экспериментальных данных, полученных на крупномасштабных стендах СМК и КМС.

На стенде СМК проведены эксперименты, целью которых являлась верификация зависимостей, используемых для расчета теплоотдачи на теплообменниках СПОТ ЗО в отсутствии конденсации пара на их поверхностях.

Получены стационарные значения параметров среды под оболочкой при циркуляции охлаждающей воды в теплообменниках. Мощность электронагревателей в экспериментах задавалась в диапазоне 130-140 кВт.

Основные результаты экспериментов:

1. Время выхода на стационарное состояние для подведенной мощности составило примерно 2 часа. В это время наблюдался монотонный рост температур как воздуха в подбололочном пространстве, так и воды в элементах циркуляционного контура.

2. После выхода на стационарное состояние подогрев теплоносителя в теплообменниках составлял величину $21 \div 25$ °С. Установленные по высоте теплообменных трубок термопары зарегистрировали равномерный подогрев воды, текущей в трубке. Также наблюдается небольшой подогрев воды (примерно 2 °С) при ее движении внутри раздаточного коллектора.

3. Общая характеристика циркуляции в оболочке характеризуется восходящим горячим потоком воздуха от электрического нагревателя к теплообменнику и нисходящим потоком охлажденного воздуха от теплообменника. Более высокий уровень температуры, зарегистрированный термопарой, расположенной внутри купола у стены на высоте 1,5 м (Рис. 5), свидетельствует о смещении восходящего горячего потока к стене. Пульсации, зарегистрированные системой измерения скорости, свидетельствуют о существовании крупномасштабных турбулентных вихрей. Вертикальная скорость течения под теплообменником СМК достигала 1,2 м/с.

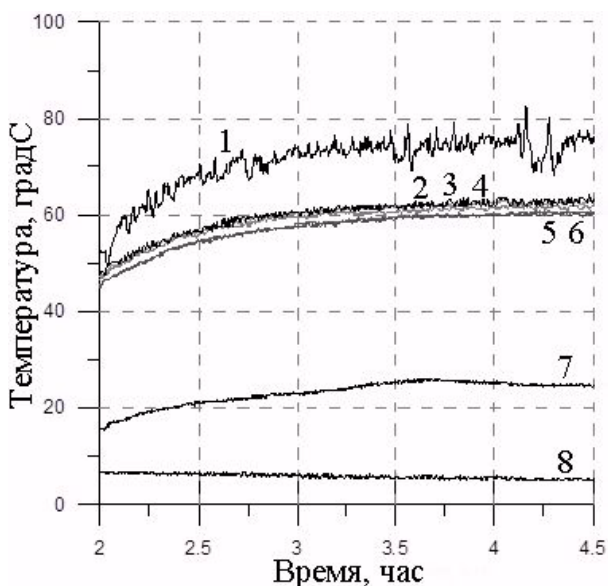


Рис. 5.— Температура под ЗО и температура в т/о, 1 — у стены на высоте 1,5 м, 2,3,4,5,6 — на высоте 2, 4,6,8,10 м, соответственно, 7,8 — на выходе и входе т/о.

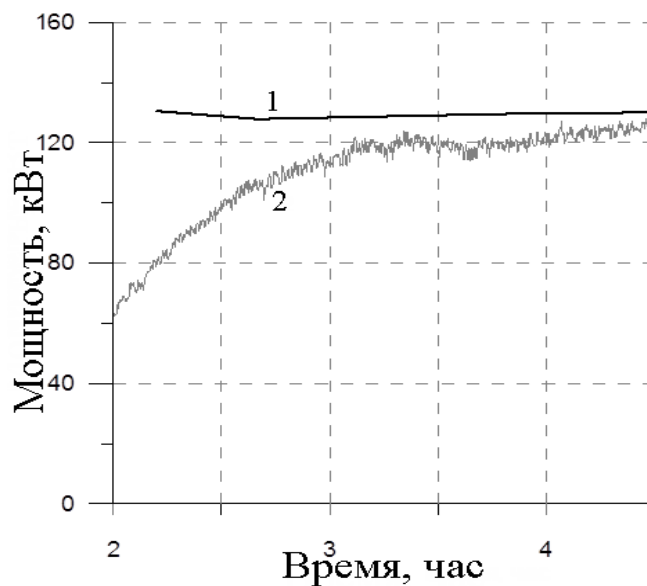


Рис. 6. — Мощность, 1 — на электронагревателе, 2 — отведенная на теплообменник

4. По результатам проведенных экспериментов оценен уровень тепловых потерь. Сопоставление рассчитанной по тепловому балансу мощности теплообменника и подведенной электрической мощности к оболочке (Рис.6) показывает, что тепловые потери оболочки находились на уровне 10 кВт).

На стенде КМС был проведен ряд экспериментов по исследованию работы теплообменников-конденсаторов СПОТ 30 в условиях параметров среды, близких к расчетным параметрам при авариях в контейнменте ЛАЭС-2.

Методика проведения экспериментов обеспечивает достижение стационарных граничных условий в парогазовой среде контейнмента и в контуре принудительной циркуляции теплоносителя СПОТ 30 при разных условиях давления парогазовой среды и скорости циркуляции теплоносителя в теплообменниках-конденсаторах.

В таблице 2 приведены основные теплогидравлические параметры экспериментов, проведенных при испытаниях модели СПОТ 30 на стенде КМС за 2008 г., 2011 г. и 2012 г.

Для каждого стационарного состояния определялись значения мощности секций теплообменников-конденсаторов на основе измерений величины расхода и подогрева теплоносителя в них.

Таблица 2. - Параметры основных экспериментов на стенде КМС.

№ эксп-та	$P_{\text{среды 30}}$, кПа	$T_{\text{среды 30}}$, °C	$T_{\text{вх, СПОТ}}$, °C	$G_{\text{спот}}$, м ³ /ч	$Q_{\text{спот}}$, кВт	$C_{\text{газа}}$, %	K , кВт/(м ² ×°C)
1	274	112	100	56	114	44	324
2	360	126	100	56	354	35	356
3	400	131	100	90	563	31	455
4	371	120	100	56	271	46,4	346
5	374	122	100	56	316	44	326
6	489	135	100	56	589	36	443
7	468	133	78	30	682	37	282
8	362	120	78	30	441	45	279
9	240	98	76	30	173	61	179
10	263	101	77	30	191	60	181
11	285	103	78,5	30	195	60	181
12	349	115,5	80,5	30	334	51	217
13	362	117,5	77	30	397	49	223
14	466	131	78	30	622	40	266

На рисунке 7 и в таблице 3, в качестве примера, приведены результаты характерных экспериментальных данных для режима со стационарным состоянием - среднее давление парогазовой среды 489±2 кПа, температура воды на входе в СПОТ 30 100°C.

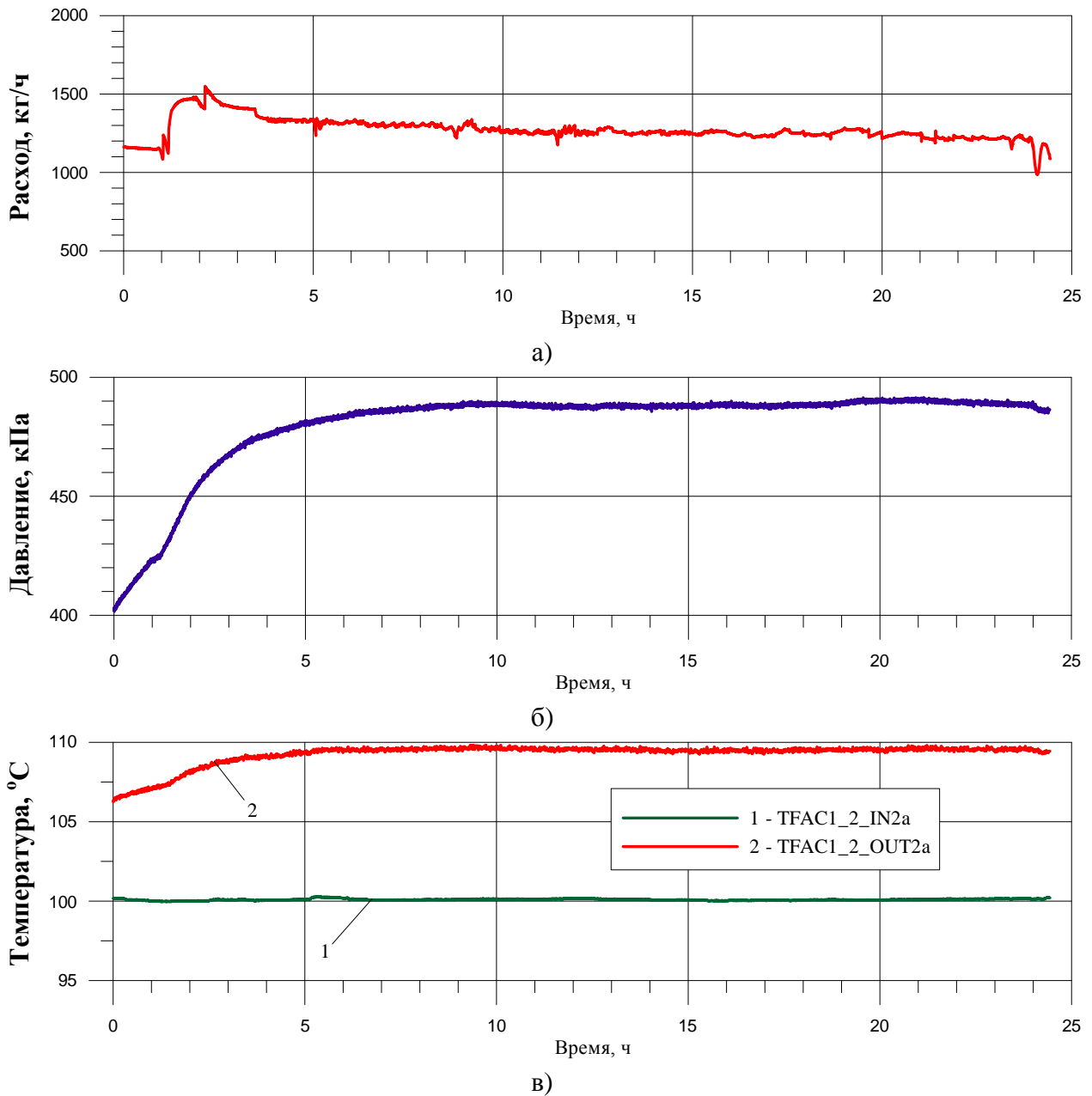


Рис. 7 – а) Расход пара, подаваемого в ЗО; б) Абсолютное давление парогазовой среды ЗО; в) температура воды на входе (1) и выходе (2) секции №1 т/о СПОТ ЗО.

Таблица 3. - Производительность т/о СПОТ ЗО при температуре охлаждения 100 °С и давлении среды в ЗО 489 кПа

Обозначение	Тепловая мощность секции СПОТ ЗО, кВт	Тепловая мощность СПОТ ЗО, кВт	Тепловая мощность подаваемого пара в ЗО, кВт	Тепловые потери, кВт
Секция №1	150	589	710	121
Секция №2	146			
Секция №3	149			
Секция №4	144			
Среднее знач.	147±3			

Проведенные на стенде КМС крупномасштабные исследования подтвердили работоспособность СПОТ ЗО и позволили получить данные, необходимые для верификации расчетных кодов, применяемых при моделировании процессов отвода тепла из гермообъема с помощью теплообменников-конденсаторов и процессов тепломассопереноса внутри ЗО.

В четвёртой главе представлены результаты расчетных исследований проведенных экспериментов и натурного объекта.

Термодинамические параметры среды при авариях с течами теплоносителя внутри защитной оболочки АЭС с ВВЭР рассчитывались с помощью кода КУПОЛ-М с уточненными замыкающими соотношениями.

Уточнение замыкающих соотношений проведено на основе численного моделирования свободной конвекции у вертикальных пластин и цилиндров и сравнения их с опытными данными, полученными Тсюжи и Нагано (для пластины), и с опытными данными Клаузинга (вертикальный цилиндр). Установлено, что для области развитой турбулентности при свободноконвективном течении около вертикальной плоской поверхности (при $\Delta t < 30^\circ\text{C}$) для расчета теплоотдачи при турбулентном режиме справедлива формула (1), где коэффициент $c = 0,1$.

Значения по средней теплоотдаче, полученные в результате численного моделирования свободной конвекции воздуха и азота относительно вертикальных труб обобщаются зависимостью:

$$\overline{Nu}_{СК,L} = \{0,3164 \cdot (Ra_L)^{1/6} + 0,6(L/d)^{1/2}\}^2. \quad (5)$$

Эта формула с приемлемой точностью справедлива как в ламинарной, так турбулентной областях не только для труб, но и для плоских вертикальных пластин (при $d \rightarrow \infty$ эта формула переходит в зависимость (1) с коэффициентом $c=0,1$).

Сравнение результатов расчетов по коду КУПОЛ-М с уточняющей зависимостью (5) подтвердили справедливость применения соотношений (4) и (5). Для детального анализа данных и понимания определяющих их процессов использовалось численное моделирование тепломассопереноса с помощью трехмерных гидродинамических кодов. Для этого в настоящей работе применялся специализированный контейментный код ПГС-ТК и коммерческий код STAR-CD, позволяющие рассчитывать турбулентные течения сжимаемой многокомпонентной смеси. Коды основаны на решении осредненных по Рейнольдсу уравнений гидродинамики, для замыкания используется полуэмпирическая низкорейнольдсовая $k - \epsilon$ модель турбулентности (Lien, F.S., Chen, W.L., and Leschziner, M.A. Low-Reynolds-Number Eddy-Viscosity Modelling Based on Non-Linear Stress-Strain/Vorticity Relations. *Proc. 3rd Symp. on Engineering Turbulence Modelling and Measurements*, Crete, Greece. 1996.), которая, как показали результаты тестовых расчетов, позволяет получить достаточно надежные результаты для рассматриваемых условий. В кодах реализована

модель поверхностной конденсации, включающая расчет тепломассообмена на поверхности пленки и течения пленки по трубам теплообменника-конденсатора. Эти коды были тщательно верифицированы на большом числе тестовых задач, для которых имеются известные решения или надежные экспериментальные данные.

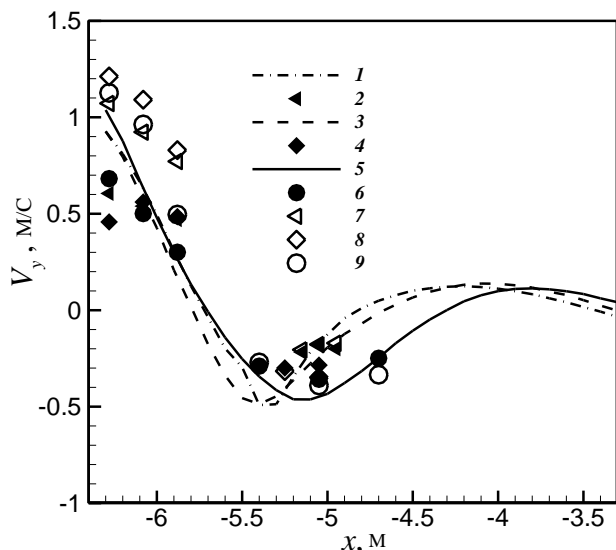


Рис. 8. Рассчитанные по трехмерному коду (линии) и измеренные (символы) вертикальные скорости течения под теплообменником СМК на высотах 5,24 м (1, 2 и 7), 4,44 м (3, 4 и 8) и 3,44 м (5, 6 и 9)

Сравнение результатов экспериментального и численного моделирования на стенде СМК позволили установить характерные черты течения воздуха в объеме модели защитной оболочки и непосредственно у теплообменников.

Общая картина течения состоит в сложном взаимодействии восходящей струи, образующейся над нагревателем и распространяющейся вдоль стенки оболочки, и стекающей вниз с теплообменников холодной воздушной струи (рис. 8).

Из рисунка 8 видно, что результаты измеренных вертикальных компонент скорости удовлетворительно согласуются с рассчитанными величинами.

В таблице 4 приведены основные величины, полученные в процессе экспериментов на стенде СМК.

Таблица 4. – Параметры экспериментов на СМК

Вариант	$t_a, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{воды}}, ^\circ\text{C}$	Q, кВт	Потери, %	$t_{\text{вну}}, ^\circ\text{C}$	$Q_{\text{конв}}$	$t_w, ^\circ\text{C}$	$\Delta t = t_{\text{вну}} - t_w, ^\circ\text{C}$
T1	19	$T_w = T_w(y), 11...24$	135	5	69,2	106,19	21,9	48,8
T2	20	$T_w = T_w(y), 1.5...19.5$	133	10	61,5	99,11	14,6	46,16

Сравнение средних значений коэффициентов теплоотдачи, полученных в расчетах, с опытными данными приведены в таблице 5. Из рассмотрения этой таблицы видно, что результаты расчета (α_T) достаточно хорошо согласуются с коэффициентом теплоотдачи ($\alpha_{\text{конв, опыт. д.}}$), полученном при обработке опытных данных.

Таблица 5. – Сравнение результатов расчетов в полной трехмерной постановке с опытными данными

Вариант	Q , кВт	$T_{\text{средняя}}$, °С	α_T , Вт/м ² /К	Nu	Ra	$\alpha_{\text{конв, опыт. д.}}$, Вт/м ² /К
T1	135	69.2	10.6	950	$5.3 \cdot 10^1$ ₀	10,02
T2	133	61.5	10.6	1020	$6.2 \cdot 10^1$ ₀	9,43

Были выполнены расчеты конвекции в защитной оболочке АЭС и на стенде КМС. Теплообменники моделировали участками вертикальных поверхностей эквивалентной площади. Расчеты течения среды в КМС выполнены с полным описанием всех помещений внутри защитной оболочки и моделированием теплообменников участками вертикальных поверхностей и детальным описанием отдельного теплообменника (или его фрагмента), помещенного в сектор подкупольного пространства.

Приведенные на рис. 9 результаты показывают сложную картину распространения парогазовой среды (ПГС) внутри защитной оболочки. На рис. 10 показано течение около теплообменника стенда КМС и натурального теплообменника. Это течение характеризуется сильной неоднородностью и зависит как от конфигурации теплообменника, так и от внешних условий.

Таблица 6. Результаты экспериментов на стенде КМС и расчетного моделирования с помощью кода КУПОЛ-М для бинарной смеси

№ экс.	Секции теплообменников, φ *)	P, кПа	T, °С	$Q_{\text{ТО}}$, кВт	$Q_{\text{сум}}$, кВт	k, Вт/(м ² К)
Эксперимент						
4	Секция №1, $\varphi = 0^0$ Секция №2, $\varphi = 90^0$ Секция №3, $\varphi = 180^0$ Секция №4, $\varphi = 270^0$	371±2	120±2	68.0±3.3 77.0±3.3 53.3±3.3 72.7±3.3	271±27	-
Расчет						
4	Секция №1, $\varphi = 0^0$ Секция №2, $\varphi = 90^0$ Секция №3, $\varphi = 180^0$ Секция №4, $\varphi = 270^0$	374	117,4	74,6 78,3 73,9 77,2	304	373 369 370 369,8

*) φ – угловая координата расположения теплообменников (по часовой стрелке)

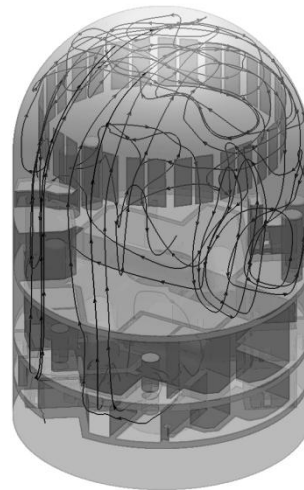
В таблицах 6 и 7 приведены сопоставления результатов экспериментов на стенде КМС и расчетного моделирования с помощью кодов КУПОЛ-М, ПГС-ТК, STAR-CD. Соответствие расчетных и экспериментальных данных вполне удовлетворительно. Сравнение с данными, приведенными в таблице 6 и 7, показывает, что расчетные результаты, полученные с помощью разных кодов и в разных постановках, согласуются между собой. Превышение рассчитанной мощности над полученной в эксперименте, связано с неопределенностью учета тепловых потерь.

Таблица 7. Сопоставление результатов расчетного моделирования по кодам ПГС-ТК и STAR-CD

№ экс п.	Секции теплообменников	P_{30} , кПа	T_{30} , °C	$Q_{ТО}$, кВт	$Q_{СУМ}$, кВт	k , Вт/(м ² К)
Код ПГС-ТК						
4	Секция №1, $\varphi = 0^0$	352	117.5	76	301	380
	Секция №2, $\varphi = 90^0$			71		340
	Секция №3, $\varphi = 180^0$			80		410
	Секция №4, $\varphi = 270^0$			74		360
Код STAR-CD						
4	Секция №1, $\varphi = 0^0$	370	119.9	74	310	320
	Секция №2, $\varphi = 90^0$			78		330
	Секция №3, $\varphi = 180^0$			79		350
	Секция №4, $\varphi = 270^0$			79		330
		Сектор с теплообменником в виде участка поверхности				
		370	120.3	78	-	330
		Сектор с реальным теплообменником				
		370	121.1	75	-	310



а



б

Рис. 9. Течение в помещениях стенда КМС (а) и ЗО Ленинградской АЭС-2 (б)

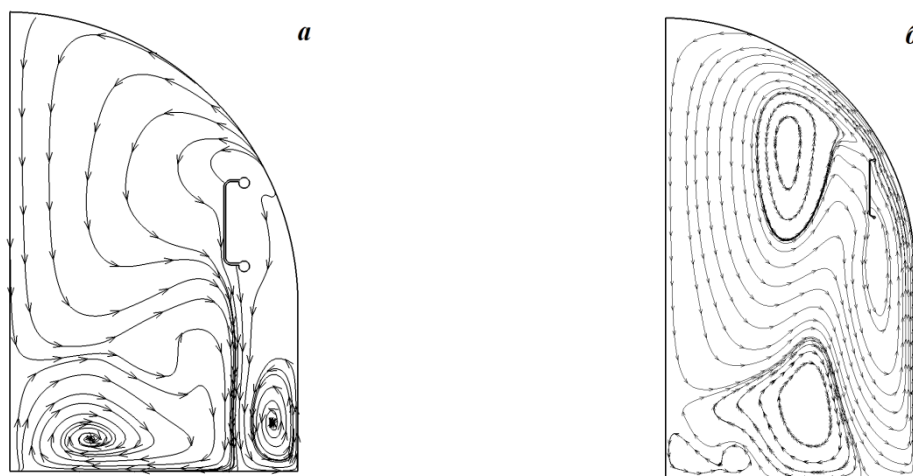


Рис. 10. Течение около теплообменника стенда КМС (а) и теплообменника Ленинградской АЭС-2 (б)

На стенде КМС также было исследовано распространение легкого газа (гелия) по помещениям стенда и его влияние на тепломассоперенос. В табл. 8 в качестве примера приведено сопоставление результатов эксперимента на стенде КМС и расчетного моделирования по коду КУПОЛ-М для тернарной смеси.

В экспериментах было обнаружено хорошее перемешивание среды в помещениях герметичного объема при работе системы пассивного отвода тепла вне зависимости от места подачи гелия.

Таблица 8. Сопоставление результатов экспериментов на стенде КМС и расчетного моделирования по коду КУПОЛ-М для тернарной смеси

№ эк. сп.	Секции теплообменников	P, кПа	T, °C	Концентр. He, % об.	Q _{то} , кВт	Q _{сум} , кВт
Эксперимент						
9	Секция №1, $\varphi = 0^0$	240	98	0,15	43,6	173
	Секция №2, $\varphi = 90^0$				42,8	
	Секция №3, $\varphi = 180^0$				44,5	
	Секция №4, $\varphi = 270^0$				41,7	
Расчет						
9	Секция №1, $\varphi = 0^0$	235	92	0,16	39,5	159
	Секция №2, $\varphi = 90^0$				39,5	
	Секция №3, $\varphi = 180^0$				39,8	
	Секция №4, $\varphi = 270^0$				39,8	

В данной главе с учетом полученных рекомендаций выполнен расчетный анализ натурального объекта СПОТ 30.

Некоторое представление о характере течения среды в объеме защитной оболочки и вблизи теплообменников можно сделать из рассмотрения рис. 9 б и 10 б.

Показано соответствие характеристик СПОТ 30 функциональным требованиям.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате выполненного анализа методик расчета конденсации водяного пара из парогазовой среды при свободной конвекции у вертикальных пластин и труб, а также анализа моделей для расчета конденсации пара, используемых в контейментных кодах, выявлена необходимость валидации и верификации кода КУПОЛ-М и CFD кодов, применяемых для обоснования пассивной системы отвода тепла от защитной оболочки АЭС с ВВЭР (ПГС-ТК, STAR-CD).

2. Создана экспериментальная установка для исследования естественной конвекции и теплоотдачи от газовой среды к теплообменникам системы СПОТ 30 на модели подкупольного пространства защитной оболочки (стенд СМК), разработаны методики измерений и проведения экспериментов.

3. Разработаны требования по модернизации стенда КМС в г. Сосновый Бор для экспериментального исследования процессов тепломассопереноса внутри защитной оболочки и интенсивности конденсации пара на теплообменниках системы СПОТ 30, разработаны требования к системе измерений и методика проведения экспериментов.

4. В результате выполненных экспериментальных исследований на стендах СМК и КМС получены данные для валидации интегральных контейментных кодов и CFD кодов.

5. По результатам сопоставления экспериментальных и расчетных данных, а также результатам численных экспериментов, выработаны рекомендации по корректировке замыкающих соотношений кода КУПОЛ-М, предназначенных для расчета конденсации пара в условиях естественной и смешанной конвекции.

6. Полученные с использованием верифицированных кодов результаты численного моделирования позволили надежно обосновать работоспособность натурального СПОТ 30.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Ведущие рецензируемые научные журналы из перечня ВАК:

1 Ефанов А.Д. Верификация кода КУПОЛ-М по результатам экспериментов / А.Д. Ефанов, А.А. Лукьянов, С.Е. Семашко [и др.] // Теплоэнергетика. 2004. № 2. С. 12–16.

2. Онуфриенко С.В. Особенности концепции безопасности проекта АЭС-2006 на площадке ЛАЭС-2 / С.В. Онуфриенко, В.В. Безлепкин, С.Е. Семашко [и др.] // Тяжелое машиностроение. 2008. № 2. С. 6–10.
3. Бахметьев А.М. Экспериментальное обоснование контура охлаждения СПОТ 30 проекта АЭС-2006 для ЛАЭС-2 / А.М. Бахметьев, М.А. Большухин, С.Е. Семашко [и др.] // Атомная энергия. 2009. Том 106. Вып. 3. С. 148–152.
4. Семашко С.Е. Расчетно-экспериментальное моделирование процессов в защитной оболочке при наличии пассивного конденсатора в системе пассивного отвода тепла./ С.Е. Семашко, В.В. Безлепкин, М.А. Затевахин [и др.] // Атомная энергия. 2010. Том 108. Вып. 5. С. 308–312.
5. Безлепкин В.В. Расчетно-экспериментальное обоснование системы пассивного отвода тепла из защитной оболочки АЭС с ВВЭР-1200./ В.В. Безлепкин, М.А.Затевахин, С.Е. Семашко [и др.] // Атомная энергия. 2013. Том 115. Вып. 4. С. 183–189.
6. Безлепкин В.В. Экспериментальное исследование системы отвода тепла из защитной оболочки на СМК./ В.В. Безлепкин, М.А.Затевахин, О.П. Кректунов , Семашко С.Е. [и др.] // Атомная энергия. . 2013. Том 115. Вып. 4. С. 197–200.
7. Зайцев Д.К. Численное моделирование течения парогазовой смеси в защитной оболочке АЭС с ВВЭР при пассивном отводе тепла./ Д.К.Зайцев, Е.М.Смирнов, А.А Смирновский, С.Е. Семашко [и др.]// Атомная энергия. 2013. Том 115. Вып. 4. С. 205–211.
8. Василенко В.А. Значение и место крупномасштабного стенда КМС в решении проблем безопасности АЭС с ВВЭР./ В.А.Василенко, Ю.А.Мигров, В.В. Безлепкин, С.Е. Семашко [и др.] // Атомная энергия. 2013. Том 115. Вып. 4. С. 189–192.
9. Василенко В.А. Стенд КМС – крупномасштабная модель защитной оболочки АЭС с ВВЭР./ В.А.Василенко, Ю.А.Мигров, В.В. Безлепкин, С.Е. Семашко [и др.] // Атомная энергия. . 2013. Том 115. Вып. 4. С. 192–196.
10. Безлепкин В.В. Исследование теплоотдачи при свободной конвекции применительно к замыкающим соотношениям для расчетных кодов./ В.В.Безлепкин, М.А., О.П.Кректунов, С.Е. Семашко [и др.] // Атомная энергия. . 2013. Том 115. Вып. 4. С. 201–205.

Патенты и свидетельства

11. Пат. 85029 Российская Федерация. Система пассивного отвода тепла из внутреннего объема защитной оболочки / Безлепкин В.В., Семашко С.Е. [и др.]– № 2009108307/22; заявл. 26.02.2009; опубл. 20.07.2009, Бюл. № 20.
12. Пат. 96283 Российская Федерация. Система пассивного отвода тепла через парогенератор/ Безлепкин В.В.,Семашко С.Е. [и др.].0- № 2010110445/22, заявл. 16.03.2010; опубл. 20.07.2010, Бюл.№20.
13. Пат. 100328 Российская Федерация. Система пассивного отвода тепла от теплообменника устройства локализации расплава./ Семашко С.Е. [и др.]– № 2010124317/07, заявл. 17.06.2010; опубл.10.12.2010, Бюл.№ 34.
14. Программа для ЭВМ SPAS_AEP. Свидетельство №2007612790, зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 15.06.2007.
15. Программа для ЭВМ СОКРАТ-В1/В2. Свидетельство №2010610562, зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 14.01.2010.

Статьи в трудах, материалах международных и всероссийских конференций, в сборниках научных трудов:

16. Защитная оболочка как барьер безопасности АЭС. / Кухтевич И.В., Безлепкин В.В., Молчанов А.В., Семашко С.Е., Ефанов А.Д.// Сб. трудов. Расчетные и экспериментальные исследования тепломассопереноса в защитной оболочке при тяжелой аварии на АЭС с ВВЭР. Часть 1. Обнинск -1995.
17. Верификационные исследования в обоснование системы пассивного отвода тепла от гермооболочки./ Кухтевич И.В., Безлепкин В.В., Солодовников А.С., Илюхин Ю.Н., Семашко С.Е., Светлов С.В. //Сб. трудов. Процессы тепломассообмена и гидродинамики в системах безопасности АЭС с ВВЭР-640.С.-Петербург: АООТ «НПО ЦКТИ». 1997.С.42-60
18. Обоснование конструктивных и технологических решений, применяемых в пассивной системе отвода тепла от гермооболочки./ Кухтевич И.В., Безлепкин В.В., Солодовников А.С., Молчанов А.В., Семашко С.Е. //Сб. трудов. Процессы тепломассообмена и гидродинамики в системах безопасности АЭС с ВВЭР-640. С.-Петербург: АООТ «НПО ЦКТИ». 1997. С. 60-64.
19. Применение пассивных систем безопасности в проекте АЭС 91/99М. / Алексеев С.Б., Безлепкин В.В., Молчанов А.В., Светлов С.В., Семашко С.Е. . [и др.] // Сб. тезисов. 4-я МНТК "Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР". Подольск. 2005. С.92.
20. Passive Heat Removal System for Reactor Plant of New Generation VVER-640. Design and Experimental Justification./ V.V. Bezlepkin, S.V. Svetlov, S.B. Alexeev, V.O. Kuhtevich, S.E. Semashko, V.G. Sidorov. // Proceedings of Conference ICAPP '03 Córdoba, Spain, May 4-7, 2003. Paper 3154.
21. Experience Gained in Best-Estimate Codes Use for Safety Assurance of NPP with VVER./V. Bezlepkin, I. Ivkov, V. Kuhtevich, S. Svetlov, S. Semashko, V. Sidorov.// International Nuclear Forum «NUCLEAR POWER AND ENVIRONMENT»,organized by Bulgarian Atomic Forum, 2 – 4 June 2006, Varna
22. Бахметьев А.М. Задачи расчетно-экспериментального обоснования СПОТ 30 для АЭС нового поколения. / Бахметьев А.М., Большухин М.А., Безлепкин В.В., Семашко С.Е. [и др.] // Сб. тезисов. 5-я МНТК "Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР". Подольск. 2007. С.54.
23. Безлепкин В.В. Расчетные анализы процессов в защитной оболочке КМС при моделировании аварий типа LOCA с отводом тепла пассивными конденсаторами. / Безлепкин В.В., Семашко С.Е. [и др.] // Сб. тезисов. 6-я МНТК "Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР". Подольск. 2009. С.42.
24. Мигров Ю.А. Экспериментальные исследования внутриконтейментных процессов и пассивных систем безопасности проекта АЭС-2006 на стенде КМС. / Мигров Ю.А., Засуха В.К., Гошков А.И., Безлепкин В.В., Семашко С.Е., Ивков И.М. // Сб. тезисов. 6-я МНТК "Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР". Подольск. 2009. С.62.
25. Безлепкин В.В. Расчетно-экспериментальное моделирование процессов в контейменте при наличии пассивной системы СПОТ 30. / Безлепкин В.В., Затевахин М.А., Семашко С.Е., Симакова О.И., Ивков И.М.// 7-я МНТК «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики». ОАО «Концерн Росэнергоатом».Москва. 26-27 мая 2010.

26. Семашко С.Е. Особенности концепции безопасности проекта АЭС-2006 на площадке ЛАЭС-2./Семашко С.Е.// III Международная специализированная выставка «Атомэкспо-Беларусь-2011». Научно-практическая конференция «Перспективы развития атомной энергетики в Республике Беларусь». Минск. 2 – 4 марта 2011.
27. Безлепкин В.В. Применение многоточечной системы ЛДА при экспериментальном исследовании системы отвода тепла из контейнента. / Безлепкин В.В., Затевахин М.А., Семашко С.Е. [и др.]// CD-DISK: 11-й МНТК "Оптические методы исследования потоков ". Москва. 2011. С.32.
28. Затевахин М.А. Верификация и валидация CFD– кодов на задачах свободноконвективного теплообмена и поверхностной конденсации. / Затевахин М.А., Безлепкин В.В., Семашко С.Е.[и др.] // CD-DISK: Труды научно-технического семинара "Проблемы верификации и применения CFD– кодов в атомной энергетике ". Нижний Новгород. 19-20 сентября 2012.