

Акционерное общество
«ОПЫТНОЕ КОНСТРУКТОРСКОЕ БЮРО
МАШИНОСТРОЕНИЯ
имени И.И. АФРИКАНТОВА»
(АО «ОКБМ Африкантов»)



603074, г. Нижний Новгород,
Бурнаковский проезд, 15
Тел. (831) 275-26-40, факс (831) 241-87-72
E-mail: okbm@okbm.nnov.ru
<http://www.okbm.nnov.ru>
ОКПО 08624579 ОГРН 1085259006117
ИНН 525907766 КПП 525350001

УТВЕРЖДАЮ

Директор – Генеральный конструктор
АО «ОКБМ Африкантов»,
доктор технических наук

Д.Л. Зверев

11 2015 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Рамазанова Руслана Махмутовича
«Разработка критериев обеспечения безопасности реакторных установок
на быстрых нейтронах при разгерметизации трубопроводов
с натриевым теплоносителем в процессе эксплуатации», представленной
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.16.09 «Материаловедение (машиностроение)»

Актуальность для науки и практики

Повышение безопасности эксплуатируемых и проектируемых энергоблоков АЭС является одной из центральных задач отрасли. В диссертации описана разработанная концепция для обоснования безопасности реакторной установки на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем (РУ БН) в условиях разгерметизации контура.

Несмотря на действующие консервативные подходы при проектировании, изготовлении оборудования и эксплуатации АЭС существует вероятность нарушения границ герметичности контуров с истечением теплоносителя. Случаи разгерметизации на натриевых стендах, реакторах с натриевым теплоносителем, а также расчётные оценки подтверждают, что вероятность такого события достаточно высокая и в силу опасности протечек натрия требует рассмотрения сценария аварии и обоснования безопасности.

Опасность разгерметизации контура связана, в том числе, с самовоспламенением натрия при контакте с воздухом. Повышение

температуры от горения на оборудовании, опорных и строительных конструкциях может вызвать последующие отказы приборов, защитных и локализирующих систем и устройств. Кроме того, окись натрия в течение короткого времени превращается в гидроокись и карбонат натрия, которые вызывают коррозию конструкционных материалов.

Существующие процедуры оценки безопасности, основанные на концепции «течь перед разрушением» (ТПР), не учитывают особенности поведения материалов при повышенных температурах и ряд событий, реализующихся на установках с натриевым теплоносителем, поскольку они разрабатывались и традиционно применяются для контуров реакторных установок с водяным теплоносителем. По этой причине их применение для контуров РУ БН с натриевым теплоносителем не является достаточным для обеспечения безопасной эксплуатации.

В связи этим в работе сформулированы критерии и в законченном виде разработана процедура их применения в оценке безопасности при проектной аварии на РУ БН с разгерметизацией 1-го и 2-го контуров. Процедура позволяет выполнить на стадии проектирования количественные оценки проектной аварии, связанной с разгерметизацией натриевых трубопроводов, и определить их допустимые состояния.

Структура работы

Диссертация состоит из введения, 5 глав и выводов. Работа изложена на 123 страницах, включая 74 рисунка и 14 таблиц. Библиографический указатель состоит из 72 источников.

Содержание работы

Во введении автор обосновывает актуальность рассматриваемой проблемы, определяет цель и задачи поставленной работы, отмечает научную новизну предложенной методики, практическую ценность полученных результатов, а также перечисляет положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведены основные технические характеристики и условия эксплуатации реакторных установок на быстрых нейтронах и обоснована актуальность поставленной задачи.

В главе проведен анализ имевших место аварийных ситуаций, связанных с течами натрия, на реакторных установках. Проведённый анализ показал, что течи в большинстве случаев имели небольшие объёмы и не сопровождались горением натрия. Также отмечается отсутствие случаев, связанных с разрывом трубопроводов полным сечением, в условиях обеспечения высокой чувствительности систем контроля течей. Таким образом, установлены предпосылки для применения концепции безопасности «течь перед разрушением» в реакторных установках с натриевым теплоносителем.

Дан обзор литературы по существующим процедурам безопасности на базе концепции «течь перед разрушением» для трубопроводов реакторных установок с водяным теплоносителем. Рассмотрены отечественные и зарубежные подходы, имеющиеся в них ограничения и положительный эффект от их применения. Подробный анализ выполнен по процедурам концепции ТПР, разработанным для трубопроводов с натриевым теплоносителем реакторных установок на быстрых нейтронах. Показано, что рекомендуемые в концепции ТПР для установок типа ВВЭР расчётные схемы построены на одной платформе и не учитывают ряд событий в сценарии разгерметизации трубопровода с натриевым теплоносителем.

Во второй главе сформулированы критерии и процедура их применения для оценки развития постулированных дефектов в процессе эксплуатации в натриевых трубопроводах и корпусах оборудования РУ БН.

Разработан и обоснован предложенный автором альтернативный к постулированию сквозной трещины площадью $Dh/20$ подход (D – диаметр, h – толщина стенки трубопровода). По результатам анализа существующих подходов предложены критерии оценки безопасности трубопроводов и корпусов оборудования в условиях влияния возможного горения натрия.

Выполнен анализ особенностей роста поверхностных дефектов при действии как циклических, так и статических нагрузок. Рассмотрены методы определения критической длины сквозной трещины как в условиях ползучести, так и при реализации температурных (вторичных) напряжений.

В диссертации рассмотрены и учтены факторы, влияющие на корректность расчёта расхода через сквозную трещину. Построены диаграммы допускаемых состояний конструкций по сформулированным критериям, определены коэффициенты запаса для трубопровода Ду 800 РУ БН-800.

Проанализированы возможные сценарии истечения и горения вытекающего из трубопровода натрия и выбран наиболее вероятный для трубопроводов РУ БН. На основании имеющихся экспериментальных и расчётных данных сформулированы отвечающие течам температурные граничные условия.

В третьей главе рассматриваются особенности выполнения гидравлических расчётов по определению расходных характеристик истечения натрия через сквозные трещины. Определены зависимости площади раскрытия наименьшего проходного сечения сквозных трещин. Для уточнённого определения раскрытия реальной трещины автором предложен и оттарирован поправочный коэффициент. Влияние пластического деформирования и ползучести материала в раскрытии трещины предложено осуществлять через референсные напряжения и деформации

Автором обоснована необходимость учёта при определении расходных характеристик трения потока о шероховатость берегов трещины. Определён различный характер поверхностей изломов трещины для усталостного нагружения и при ползучести. На основании исследований установлена взаимосвязь между механизмом разрушения и шероховатостью изломов.

Для верификации аналитического подхода автором проведены средствами ANSYS CFX расчётные исследования и экспериментальная верификации оценки расхода натрия через модель сквозной трещины.

В четвертой главе сформирован комплекс данных по свойствам материалов, необходимых для практического применения предложенной расчётной процедуры. В главе приведены с учётом имеющихся собственных и литературных данных результаты исследований свойств применяемых в натриевых установках сталей марок 09X18H9 и 08X16H11M3 в интервале температур 600-800°C, отвечающих горению натрия. На металле заготовки для трубопровода РУ БН-800 получены кратковременные характеристики прочности и пластичности, определены характеристики длительной прочности, пластичности и скорости установившейся ползучести на временной базе до 3000 ч. Спрогнозированы на интервал температур 600-800 °C величины статической трещиностойкости J_{IC} -интеграла и скорости трещины при ползучести. Автором также проведён анализ кинетики выделения вторичных фаз в сталях 09X18H9 и 08X16H11M3, их влияния на механические свойства в интервале температур 450-850 °C и длительности нагружения, отвечающей установкам типа БН.

В пятой главе описаны результаты экспериментальных исследований истечения натрия из сквозной трещины и его горения с целью верификации термогидравлических параметров. В эксперименте внутренний объём модели трубопровода со сквозной трещиной заполнялся натрием с последующим его разогревом до заданной температуры. После этого натрий выдавливался во внешнее пространство через сквозной разрез трубы, имитирующий сквозную трещину, с последующим истечением и горением. В процессе эксперимента проводился мониторинг температуры на поверхности и во внутренней полости модели.

В главе выполнена обработка результатов испытаний. На основании результатов обработки сформулированы уточнённые температурные граничные условия, отвечающие истечению и горению натрия под теплоизоляцией трубопровода.

Основные результаты и выводы

1. На основании проведённых исследований автором разработана полноценная концепция оценки безопасности трубопроводов и корпусов оборудования 1-го и 2-го контуров РУ БН, изготовленных из стали марок 09X18H9 и 08X16H11M3, применительно к случаям истечения и горению натрия из сквозных трещин.
2. Сформулированы критерии, обеспечивающие безопасную эксплуатацию трубопроводов и корпусов оборудования с натриевым теплоносителем, применительно к случаям возможной разгерметизации контура и последующего возгорания натрия.
3. Показано, что в отличие от трубопроводов реакторов ВВЭР в установках типа БН с натриевым теплоносителем условия нестабильного развития трещин определяются не только характером нагружения (силовой или деформационный, усталостный или реологический) и свойствами материала, но и повреждающими факторами, обусловленными горением натрия в зоне его истечения из сквозной трещины.
4. Показано, что для характерного в трубопроводах с натриевым теплоносителем низкого давления при определении длины выявляемой по расходу сквозной трещины для исключения ошибки в не консервативную сторону необходимо корректно определять гидравлическое сопротивление с учётом шероховатости берегов сквозной трещины.
5. Установлена связь между механизмом разрушения, историей нагружения, исходной структурой материала и деформацией в зоне образования сквозной трещины с величиной шероховатости её берегов.
6. По результатам испытаний полномасштабной модели трубы со сквозной трещиной при истечении и горении натрия под теплоизоляцией определен и экспериментально обоснован используемый при определении температурного состояния трубы тип температурных граничных условий.
7. Предложена расчётная модель учёта ползучести металла при определении параметров раскрытия и критической длины сквозной трещины.

8. С использованием подходов, изложенных в диссертационной работе, разработана и утверждена Методика МТ 1.2.1.15.0039-2011 концерна «Росэнергоатом». Методика прошла апробацию при подготовке окончательного отчёта по обоснованию безопасности (ОООБ) РУ БН-800.

Личный вклад автора

Автором проанализированы Российские и зарубежные подходы к определению условий безопасности контура с натриевым теплоносителем установок типа БН в условиях его разгерметизации. Поставлены и проведены экспериментальные исследования по изучению истечения и горения натрия на полномасштабной модели трубы со сквозной трещиной. По результатам обработки экспериментальных данных сформулированы граничные условия для выполнения термпрочностных расчётов трубопроводов применительно к случаям их разгерметизации и горения натрия под теплоизоляцией. Выполнена экспериментальная верификация предложенных зависимостей по определению расходных характеристик истечения натрия через сквозную трещину.

Определены расчётные зависимости по кратковременным и длительным свойствам аустенитных сталей, применяемых на РУ БН, в интервале температур горения натрия (600-800 °С). Предложен подход к расчётам величины раскрытия и стабильности сквозной трещины в условиях ползучести. Подготовлены публикации по теме диссертационной работы.

Автором, совместно с научным руководителем, разработана концепция оценки условий безопасной эксплуатации трубопроводов контуров с натриевым теплоносителем при их разгерметизации с учётом возможного горения натрия под теплоизоляцией. Для обеспечения консервативности расчётных оценок предложено учитывать связь между механизмом разрушения материала, его исходной структурой и деформацией при образовании свободной поверхности с величиной шероховатости берегов сквозной трещины.

По материалам диссертации опубликовано 5 работ, из них 2 работы опубликованы в рецензируемом журнале из перечня ВАК. Основные

результаты диссертационной работы были представлены на 10-ти конференциях и семинарах, в том числе международных.

Вместе с тем по диссертации можно сделать следующие **замечания**:

1. В большинстве рассматриваемых в работе случаев по процедуре применения концепции ТПР рассматривается сквозная трещина в кольцевом направлении трубопроводов. При этом не приведены пояснения, по какой причине сделан выбор в пользу кольцевой, а не осевой трещины.

2. По тексту работы отмечается, что предложенная методика применима не только для натриевых трубопроводов, но также и для натриевых корпусов оборудования. Однако в диссертации не отражены возможные особенности применения указанной методики ТПР относительно конструкции корпусов оборудования установок типа БН.

3. В главе 1 приводится только общая информация об имевших место случаях разгерметизации натриевого оборудования РУ БН без анализа причин возникновения этих течей (высокие напряжения, недостаточная самокомпенсация трубопровода, дефекты при изготовлении и в сварных швах и т.д.). При этом также не рассмотрены методы обнаружения этих течей имеющимися системами контроля на действующих и проектируемых РУ типа БН.

4. В диссертации не указаны виды местных усталостных напряжений, приводящих к росту поверхностных трещин.

5. В главе 2 диссертации на диаграмме допускаемых состояний по скорости роста трещины при ползучести по оси абсцисс используется время. Информативность диаграммы была бы выше, если построить её в координатах зависимости «скорость трещины от длины трещины».

6. Из зависимости критического значения J -интеграла от параметра Холломона следует, что J_{1C} асимптотически стремится к нулю. Для корректного представления величины вязкости разрушения необходимо было указать нижний предел снижения вязкости разрушения за назначенный срок службы РУ БН.

7. В главе 5 диссертации используемый термин КПД (коэффициент полезного действия) не является корректным, поскольку в процессе горения натрия не осуществляется какая-либо, в том числе, полезная работа.

8. В экспериментах с истечением и горением натрия было выбрано пониженное избыточное давление. При этом не достаточно обоснована достоверность полученных данных по отношению к давлению в реальных трубопроводах РУ БН.

Указанные замечания не снижают значимости выполненных диссертантом исследований.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Разработанная в диссертации методика позволяет определить условия безопасной эксплуатации натриевых трубопроводов и корпусов оборудования РУ типа БН применительно к проектным авариям с разгерметизацией контура. Методика позволяет выполнить количественную оценку развития и последствий проектной аварии (длину сквозной трещины, площадь наименьшего проходного сечения, расход и объём вытекающего натрия) и определить на этой основе допускаемые состояния оборудования контура, а также сформулировать рекомендации по чувствительности системы контроля течи, обеспечивающие своевременное выявление течи.

Содержание автореферата полностью соответствует содержанию диссертации. Настоящий отзыв рассмотрен и одобрен после доклада соискателя и обсуждения диссертации на заседании отдела обоснования прочности и ресурса РУ и оборудования АЭС АО «ОКБМ Африкантов» (протокол от 29 октября 2015 г. № 1), а так же на секции Научно-технического совета «Реакторные установки гражданского назначения» АО «ОКБМ Африкантов» (Решение № С2-8-2015 от 6 ноября 2015г.).

Заключение

Диссертация является научно-квалификационной работой, которая обладает научно-технической значимостью для практического определения условий безопасности реакторных установок с натриевым теплоносителем при

исследовании проектных аварий с течами. Диссертация полностью удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям, представляемым на соискание ученой степени кандидата технических наук, а её автор Рамазанов Руслан Махмутович заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.16.09 «Материаловедение (машиностроение)».

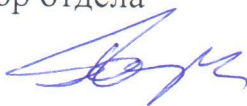
Отзыв составили:

Начальник отдела обоснования
прочности, кандидат технических наук



Олег Юрьевич Виленский

Ведущий инженер-конструктор отдела
обоснования прочности,
кандидат технических наук



Юрий Николаевич Татарский

Главный специалист отдела
материаловедения



Павел Николаевич Майоров

Адрес: 603074, г. Н. Новгород, Бурнаковский проезд, 15
Телефон: (831) 275-26-40
e-mail: okbm@okbm.nnov.ru
www.okbm.nnov.ru