



ПРЕДПРИЯТИЕ ГОСКОРПОРАЦИИ «РОСАТОМ»

Акционерное общество «Ордена Ленина
Научно-исследовательский и конструкторский институт
энерготехники имени Н. А. Доллежала»
(АО «НИКИЭТ»)
а/я 788, Москва, 101000
Телетайп: 611569 МОМЕНТ,
Тел. (499) 263-73-88, факс (499) 788-20-52
E-mail: nikiet@nikiet.ru, www.nikiet.ru

Вх. № <u>4080</u>	Исполнено
<u>04.12.15</u>	В ДЕЛО
Основн. <u>6</u> л.	№ _____
Прил. _____ л.	подп. _____

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Рамазанова Руслана Махмутовича
«Разработка критериев обеспечения безопасности реакторных установок на быстрых нейтронах при разгерметизации трубопроводов с натриевым теплоносителем в процессе эксплуатации», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.09 – материаловедение (машиностроение)

1. Актуальность темы исследования

В настоящее время не нормирована процедура технического обоснования «течь перед разрушением» (ТПР) для систем трубопроводов реакторной установки на быстрых нейтронах (РУ БН), хотя данный подход является весьма актуальным, так как его применение позволяет в принципе исключить из проектного базиса понятие мгновенного разрушения трубопровода полным сечением. Однако даже частичная разгерметизация натриевого контура и последующее самовозгорание натрия при контакте с воздухом ограничивает применение методологии ТПР и требует всестороннего изучения аспектов безопасности при таком аварийном сценарии.

В виду отсутствия нормативной базы по анализу безопасности при разгерметизации натриевых контуров РУ БН имеется необходимость исследования влияния условий нагружения и морфологических параметров сквозной трещины на процесс истечения и возгорания натрия, интенсивность протекания аварии. Данное изучение должно включать также расчетно-экспериментальную оценку воздействия горения натрия на прочностные свойства и характер разрушения применяемых коррозионностойких сталей аустенитного класса при повышенных температурах. Поэтому выбранное Р.М. Рамазановым направление диссертационного исследования, посвященное разработке критериев обеспечения безопасности реакторных установок на быстрых нейтронах при разгерметизации трубопроводов с натриевым теплоносителем в процессе эксплуатации, является своевременным и актуальным.

2. Оценка проведенного исследования и полученных результатов

Материалы диссертационной работы изложены на 123 листах, включая 74 рисунка и 14 таблиц, содержат введение, пять глав, выводы и список литературы из 72 наименований.

В главе 1 автор акцентирует внимание на тот факт, что традиционные подходы ТПР не учитывают в сценарии разгерметизации трубопроводов с натриевым теплоносителем возможность самовоспламенения натрия при его истечении, а также эффекты ползучести и снижение длительной прочности материалов трубопроводов, выполненных из сталей марок 09X18H9 и 08X16H11M3, с чем можно согласиться, хотя эффекты ползучести в условиях низких механических напряжений проявляются во времени при более высоких температурах (свыше 550°C) и их, безусловно, следует учитывать, например, в проектах высокотемпературных газовых реакторов (ВТГР).



Не в полной мере обоснованы такие выводы по главе I как:

- 1) «избежать случаев разгерметизации натриевых контуров практически невозможно»;
- 2) «в анализе безопасности при разгерметизации не рассматривалось наиболее вероятное исходное событие – образование сквозной трещины, которое может спровоцировать разрушение трубопровода полным сечением».

В главе 2 с использованием подхода ТПР представлены процедуры и критерии оценки безопасности трубопроводов и корпусов оборудования РУ БН с натриевым теплоносителем при их разгерметизации в процессе эксплуатации. Однако в диссертации нет сведений, на какое корпусное оборудование и трубопроводы распространяются данные процедуры.

Разгерметизация оборудования или трубопроводов I контура не представляет ядерной опасности, так как почти весь радиоактивный натрий находится внутри бака реактора, который в целях повышения безопасности заключен в страховочный кожух. Пространство между баком и страховочным корпусом заполнено инертным газом. Согласно исследованиям ОКБМ и ФЭИ разгерметизация трубопроводов I контура любого размера в полностью интегральном реакторе не приводит к ядерноопасным авариям, и для них нет необходимости разрабатывать критерии обеспечения безопасности на базе методологии ТПР.

Применение методологии ТПР является актуальным только для трубопроводов Ду600 и Ду800 "горячих" и "холодных" линий II контура, для которых предусмотрен контроль их герметичности в процессе эксплуатации. Максимальная температура "горячих" веток II контура реактора БН-800 – до 505°C, "холодных" – до 309°C. В режимах нормальной эксплуатации трубопроводы работают при низких механических нагрузках, при которых временными эффектами ползучести, проявляющимися согласно нормам ПНАЭ Г-7-002-86 в основном при напряжениях более 100 МПа и температурах более ~550°C, можно пренебречь. В условиях горения натрия температура на стенке трубы может достигать 800°C, в этом случае проявляются эффекты ползучести, инициируя рост трещины и раскрывая ее берега, но с учетом кратковременности процесса горения (часы) они не могут оцениваться как значительными, при этом сама методология ТПР становится неприемлемой, и речь уже идет не о возможном подроете трещины при ползучести и контроле воспламененной течи, а об аварийной остановке реактора и введении соответствующих противопожарных мероприятий.

Представленная в диссертации «концепция обоснования безопасности трубопроводов и корпусов оборудования» не дает ответ на вопрос, каким образом ситуацию с вытекающим из сквозной трещины натрием II контура при его возгорании можно привести в безопасное состояние. Так на случай разгерметизации натриевого контура в РУ БН предусмотрены системы детектирования течей и защиты от последствий течи натрия. Для предотвращения горения натрия и уменьшения последствий горения на РУ БН используются различные системы безопасности, включая систему пожаротушения и аварийный режим работы вентиляции.

Выводы по главе 2 в целом отражают представленные в ней критерии и процедуры.

Глава 3 посвящена определению расхода натрия через площадь раскрытия трещины. Результаты расчетов с использованием аналитических зависимостей сравниваются с численными расчетами и экспериментальными данными, полученными на катушках с искусственными надрезами, в которые подавалась вода. Для определения глобальной шероховатости и извилистости траектории на пути истечения среды через сквозную трещину проведены исследования поверхностей изломов, полученных на образцах при усталостном нагружении и ползучести. Определено, что чем выше уровень напряжений, тем выше шероховатость излома и в общем случае для сталей марок 08X16H11M3 и 09X18H9 средняя величина шероховатости трещины ползучести (50-200 мкм) больше шероховатости трещины усталости (10-50 мкм). Однако принятая в расчете глобальная шероховатость $\mu_G = 40$ мкм отличается от этих экспериментальных величин.

Из сравнения полученных результатов в отличие от мнения автора видно, что расчет объемного расхода натрия через усталостную трещину аналитическим методом не является консервативным: в сравнении с численными решениями ANSYS CFD расхождение составило 154% при длине трещины 68 мм и 32% при длине трещины 203 мм. Для трещины длиной 400 мм получен умеренно консервативный результат: расхождение менее 15%.

Выводы по главе 3 в целом соответствуют ее содержанию.

В главе 4 приведены данные по свойствам коррозионностойких сталей аустенитного класса марок 09X18H9 и 08X16H11M3 и их сварных соединений, применяемых в системах трубопроводов II контура РУ БН. Проведены испытания и получены расчетные зависимости кратковременных характеристик прочности и пластичности, трещиностойкости, длительной прочности и ползучести в интервале температур 550-800°C на воздухе. Спрогнозированы скорости роста трещины при ползучести. Установлено, что при горении натрия (100ч, 600-800°C) на трубопроводах II контура не следует ожидать заметного снижения свойств материалов. Выводы по главе 4 соответствуют ее содержанию.

В главе 5 представлены обзор экспериментальных исследований с истечением и горением натрия, а также результаты экспериментальных исследований, выполненных на натриевом стенде на трех моделях труб $\varnothing 220 \times 7$ из стали 08X18H10T с окружным сквозным надрезом длиной 25 мм и шириной 0,2 мм. Эксперименты показали, что при низком расходе натрия до 1л/мин возможна закупорка дефекта продуктами взаимодействия натрия, теплоизоляции (каолиновой ваты) и воздуха в течение 10-20 мин. При этом образующиеся продукты имеют высокую коррозионную активность по отношению к аустенитной стали. Закупорка не происходит при расходах натрия свыше 5л/мин. На основании проведенных экспериментов получены граничные температурные условия. Для предотвращения ситуаций с закупориванием берегов трещины на натриевом трубопроводе чувствительность системы контроля течи и герметичности (СКТГ) должна быть не хуже 1л/мин и выявлять течь на ранней стадии после ее образования.

Следует отметить, что ранее в ФЭИ был проведен большой комплекс работ по обоснованию безопасности использования натрия в РУ БН. Были выполнены экспериментальные исследования, в процессе проведения которых изучались различные вопросы, такие как определение скорости горения натрия и характеристики образующихся аэрозолей, системы детектирования горения натрия и пожаротушения, влияние горения натрия на конструкционные материалы и многие другие. На основании этих исследований отрабатывались конструктивные параметры оборудования и систем безопасности РУ БН.

Выводы по главе 5 в целом соответствуют ее содержанию.

3. Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций

Научные положения, сформулированные автором достоверны, логичны, вытекают из существа изложенного материала, базируются как на известных результатах, так и полученных в процессе исследований. Полученные результаты обоснованы как расчетными, так и экспериментальными исследованиями. Аналитические оценки верифицированы численными расчетами, экспериментальные данные по свойствам материалов и истечению самовозгорающегося на воздухе натрия – соответствующими исследованиями и испытаниями при параметрах, приближенных к условиям эксплуатации РУ БН. Общие выводы и рекомендации диссертации соответствуют результатам, представленным в диссертации.

4. Апробация результатов диссертационной работы

Результаты работы прошли достаточную апробацию. Автором по теме диссертации опубликовано 5 работ, в т.ч. в двух рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК. Результаты диссертации также представлены в виде докладов на двух международных научно-технических конференциях, семи российских конференциях и одном межотраслевом семинаре.

5. Научная новизна и практическая значимость полученных результатов

Диссертационная работа, выводы и рекомендации обладают определенной научной новизной. К наиболее значимым элементам научной новизны в настоящей работе относятся:

1) С позиций выполнения условий ТПР сформулированы критерии оценки работоспособности трубопроводов с натриевым теплоносителем при их разгерметизации в процессе эксплуатации и возможном горении натрия под теплоизоляцией.

2) Установленная связь между уровнем напряжений, механизмом роста трещины, исходной структурой материала и её деформацией при образовании свободной поверхности с величиной шероховатости берегов сквозной трещины.

3) Определены и экспериментально обоснованы температурные граничные условия для моделей труб со сквозной трещиной при истечении и горении натрия под теплоизоляцией.

Практическая значимость заключается в том, что предложенный соискателем подход к оценке безопасности контуров с натриевым теплоносителем был использован при разработке Методики МТ 1.2.1.15.0039-2011 эксплуатирующей организации ОАО «Концерн Росэнергоатом», с использованием которой выполнено обоснование безопасности I и II контуров РУ БН-800 при проектных авариях. Обоснование включено в окончательный отчет по обоснованию безопасности атомной станции и в составе комплекта документации представлен в Ростехнадзор для получения лицензии на эксплуатацию ядерной установки энергоблока №4 Белоярской АЭС. Результаты диссертации могут быть использованы также при разработке нормативного документа типа Свод правил и руководств (СПиР).

6. Достоинства и недостатки диссертационной работы

К достоинствам работы следует отнести детальное рассмотрение возможных сценариев разгерметизации натриевого контура РУ БН с использованием подхода ТПР, включая анализ предельного состояния, подраста трещины при циклическом нагружении и ползучести, а также площади разгерметизации и расхода натрия из сквозной трещины с учетом её морфологии. В анализах использованы различные методы и процедуры, в т.ч. расчет по диаграмме TDFAD процедуры R5 для высокотемпературных компонентов с использованием изохронных кривых ползучести и референсных напряжений, а также расчет истечения натрия численными методами с использованием модуля CFX кода ANSYS.

Несомненным достоинством работы является обширная экспериментальная часть, посвященная изучению свойств материалов, включая получение характеристик прочности и пластичности, длительной прочности, ползучести и трещиностойкости для условий нагружения близких к эксплуатации натриевых контуров РУ БН-800, в т.ч. в интервале температур ползучести 550-800°C в результате локального нагрева поврежденного участка трубопровода из-за самовоспламенения натрия при контакте с воздухом под теплоизоляцией в результате его утечки через постулируемую сквозную трещину. Для сталей марок 08X16H11M3 и 09X18H9 сформирована база данных по кратковременным и длительным характеристикам прочности, пластичности и трещиностойкости в интервале температур до 800°C. Определены и оценены морфологические параметры сквозной трещины при циклическом нагружении и ползучести. Серия экспериментов на моделях труб с истечением и горением натрия выявила переходную зону расхода натрия 1-5 л/мин, ниже которой течь достаточно быстро закупоривается продуктами взаимодействия натрия и теплоизоляции. При расходах более 5 л/мин истечение происходит без уменьшения площади раскрытия трещины.

Полученные экспериментальные данные позволили автору сформулировать требования к чувствительности СКТГ, которая для основных трубопроводов II контура должна быть способна выявить начальную течь натрия из образовавшейся сквозной трещины с расходом на уровне 1 л/мин за короткий промежуток времени и определить её местоположение, что является достаточно сложной технической задачей.

По диссертационной работе имеются следующие **замечания**:

1) В тексте и названии ряда разделов диссертационной работы много упоминаний о «концепции безопасности трубопроводов и корпусов оборудования РУ БН с натриевым теплоносителем при их разгерметизации в процессе эксплуатации». Однако выполненные исследования имеют отношение только к трубопроводам II контура. С учетом интегральной (баковой) компоновки РУ БН на трубопроводы I контура и корпуса оборудования (последние не идентифицированы) представленные в диссертации критерии обеспечения безопасности и методология ТПР не должны распространяться, и они по факту не проанализированы.

2) Не делается различия между проектной аварией (ПА) по условию разгерметизации II контура с появлением малой течи через отверстие площадью $4,5\text{см}^2$ по критерию $Dy(2h)$ или щель площадью $4,8\text{см}^2$ по критерию $Dh/20$ для трубопровода $\varnothing 820 \times 12$, что эквивалентно разрыву трубопровода $Dy12$, и максимальной проектной аварией (МПА) с площадью разгерметизации 24см^2 через щель по критерию $Dh/4$ для того же трубопровода $Dy800$, что эквивалентно разрыву трубопровода $Dy55$, определяющему общепринятый проектный базис для реакторов на быстрых нейтронах вместо разрушения полным сечением.

3) Не рассмотрена продольная трещина в средней части колен, предельная длина и площадь раскрытия которой при высоких температурных напряжениях, характерных для трубопроводов II контура, меньше предельной длины и площади раскрытия окружной трещины в поперечном сечении трубы. Именно такая постулируемая продольная трещина может лимитировать выполнение условий ТПР для всего нерадиоактивного II контура РУ БН.

4) С учетом многих неопределенностей в расчете расхода теплоносителя по аналогии с гидравлическим расчетом истечения пароводяной среды через сквозную трещину вместо коэффициента запаса $n_Q = 3$ на чувствительность СКТГ на уровне 1л/ч следовало бы ввести коэффициент запаса $n_Q = 5$, а вместо предлагаемого снижения расхода на 5-10% в результате гидравлического сопротивления на входе в трещину – коэффициент потерь на входе 0,62 при раскрытии берегов трещины δ до 0,15 мм и коэффициент 0,95 при $\delta > 0,15$ мм.

5) В условиях горения натрия под теплоизоляцией температура стенки трубы может достигать 800°C , в этом случае проявляются эффекты ползучести, инициируя рост трещины и раскрывая ее берега, но с учетом кратковременности процесса полного истечения натрия ($\sim 7\text{ч}$ при ПА) и его горения они не могут быть значительными, при этом сама методология ТПР становится уже неприемлемой, и речь уже идет не об оценке возможного подроста трещины при ползучести и контроле воспламененной течи, а об аварийной остановке реактора и введении соответствующих систем безопасности и противопожарных мероприятий.

6) Оценивая в целом представленную в работе «концепцию оценки безопасности трубопроводов и корпусов оборудования РУ БН с натриевым теплоносителем при их разгерметизации в процессе эксплуатации» следует заметить, что концепция безопасности – более широкое понятие и включает в себя также все системы безопасности: защитные, локализирующие, обеспечивающие и управляющие, а также алгоритм их использования. На основании представленной в диссертации «концепции» неясно, каким образом ситуацию с истечением натрия II контура из сквозной трещины с последующим его возгоранием можно привести в безопасное состояние.

7. Общее мнение о диссертационной работе

В целом диссертация Р.М. Рамазанова представляет собой самостоятельное законченное научно-квалификационное исследование, направленное на решение актуальной научно-технической задачи по обеспечению безопасной эксплуатации отечественных реакторов на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем и выполненное на высоком научном уровне. По своему оформлению, структуре и ясности изложения диссертация Р.М. Рамазанова соответствует требованиям ВАК. Она обладает четкой структурой, материал

подается автором в логической последовательности, продиктованной поставленной целью и раскрывающими ее задачами. Диссертация содержит необходимое количество иллюстраций.

Выносимые на защиту результаты являются оригинальными, своевременно опубликованы в научных журналах из перечня ВАК, докладывались на международных и российских научно-технических конференциях.

Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации.

Критический анализ диссертационной работы позволяет сделать заключение о высоком теоретическом уровне автора, значимости полученных в ней результатов и сделанных выводов. Отмеченные недостатки не снижают общую ценность работы, существенно не влияют на научное содержание диссертации и не меняют общей высокой оценки диссертационной работы Р.М. Рамазанова, основные результаты которой имеют практическую значимость, как для проектных, так и эксплуатирующих организаций.

Таким образом, диссертация Рамазанова Руслана Махмудовича на тему «Разработка критериев обеспечения безопасности реакторных установок на быстрых нейтронах при разгерметизации трубопроводов с натриевым теплоносителем в процессе эксплуатации», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук, соответствует требованиям п.9 «Положения о присуждении учёных степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям (утв. Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013г № 842), а её автор Р.М. Рамазанов заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.16.09 - материаловедение (машиностроение).

Официальный оппонент

Ведущий научный сотрудник
отделения целостности конструкций
АО «НИКИЭТ», канд. техн. наук


« 30 »

Киселев Виталий Анатольевич

» ноября 2015г.

Адрес: 101000, Москва, а/я.788

Тел.: +7 499-2637451. Факс: +7 499-2647934. E-mail: kva@nikiet.ru

Подпись к.т.н. Киселева В.А. заверяю
Учёный секретарь АО «НИКИЭТ»
канд. хим. наук



Джалавян Александр Владимирович