

## Отзыв

официального оппонента, кандидата технических наук,  
доцента кафедры теплофизики (№13) института ядерной физики и технологий НИЯУ  
МИФИ

Харитонов Владимир Степанович

на диссертационную работу Чалого Руслана Васильевича на тему «Программный комплекс СОКРАТ-БН для анализа и обоснования безопасности АЭС с реакторами на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.9 – Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность

Диссертационное исследование посвящено разработке программного комплекса СОКРАТ-БН для анализа безопасности реакторных установок с натриевым теплоносителем (РУ БН) в условиях нарушений нормальной эксплуатации, проектных и запроектных аварий, включая аварии с плавлением активной зоны. Данный комплекс представляет из себя интегральный код, который позволяет моделировать взаимосвязанные теплогидравлические, нейтронно-физические, термомеханические процессы, накопление и перенос продуктов деления и активированных продуктов коррозии, а также процессы, связанные с деградацией активной зоны реакторов типа БН.

Тема диссертации, несомненно, актуальна, так как использовавшиеся на момент начала выполнения диссертационного исследования программы для обоснования безопасности РУ БН были ограничены по перечню физических процессов, моделируемых в рамках единого расчета. Это ограничивало возможности практического применения подобных программ для анализа сложных взаимосвязанных процессов в условиях нарушений нормальной эксплуатации, проектных и запроектных аварий в быстрых реакторах с натриевым теплоносителем.

Диссертация состоит из введения, 4 глав, выводов и рекомендаций, списка литературы из 151 библиографической ссылки. Общий объем работы составляет 224 страницы основного текста, включая иллюстрации. Содержание диссертации и автореферата в полной мере отражает суть выполненной работы.

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, представлены научная новизна и практическая значимость работы, достоверность результатов, информация о личном вкладе автора, а также об апробации работы. Перечислены основные положения, выносимые на защиту, приведены публикации по теме исследования.

**В первой главе** выполнен анализ литературы по теме диссертации, на основе которого сформулирована общая постановка задачи исследования. Проанализированы основные характеристики объекта исследования – реакторных установок с натриевым теплоносителем (БН-600, БН-800, проекта БН-1200), важные для обоснования их безопасности. По результатам исследования представлены:

- ключевые характеристики объекта исследования;
- характерные исходные события, инициирующие аварии;
- ключевые явления, характерные для переходных и аварийных режимов в РУ БН;
- обзор экспериментальных установок, на которых были получены экспериментальные данные по теме исследования;
- обзор аттестованных и не аттестованных программ, используемых в области исследования.

**Во второй главе** описана общая структура интегрального кода СОКРАТ-БН, разработанного на базе программы СОКРАТ/В1, приведена информация об основных моделях, включенных в состав разработанного кода, и представлено обоснование выбора используемых приближений.

**В третьей главе** приведена информация по всем экспериментам, в которых были получены экспериментальные данные, необходимые для валидации кода. Подробно рассмотрены примеры валидационных расчетов, выполненных лично автором или при его непосредственном участии. Представлена информация о результатах валидации и верификации разработанного комплекса для каждого из его модулей.

**В четвертой главе** приведены результаты анализа тяжелой аварии для прототипной РУ с натриевым теплоносителем большой мощности. Детально описана разработанная автором расчетная модель интегральной установки РУ БН большой мощности, реализованной во входном наборе СОКРАТ-БН. Расчетная модель включает модели основного оборудования первого и второго контуров, парогенератора третьего контура, а также контура системы аварийного расхолаживания.

В заключении диссертационного исследования приведено обобщение результатов выполненных исследований в соответствии с поставленными задачами.

**Достоверность результатов** диссертационного исследования подтверждается успешно выполненной процедурой валидации и верификации программы СОКРАТ-БН, а также положительным заключением экспертного совета по аттестации программных средств при Ростехнадзоре о возможности использования программы для анализа безопасности объектов использования атомной энергии – АЭС с РУ-БН.

**Практическая значимость** исследования заключается во внедрении программы в промышленную эксплуатацию и ее использованием главным конструктором РУ БН АО «ОКБМ Африкантов» для расчетного анализа и обоснования безопасности РУ на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем БН-600, БН-800, а также проекта БН-1200.

Основные результаты получены Р.В. Чалым лично или при его непосредственном участии. В период 2014 по 2019 гг. Чалый Р.В. лично представлял результаты разработки программы на заседании тематической секции экспертного совета по аттестации программных средств при Ростехнадзоре. В результате две версии программы были успешно аттестованы.

**Новизна исследования** обусловлена тем, что впервые разработан и валидирован российский мультифизичный программный комплекс (интегральный код СОКРАТ-БН) для реакторов на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем. Программный комплекс позволил в рамках единого расчета моделировать наиболее важные для безопасности РУ БН процессы: теплогидравлические, нейтронно-физические, термомеханику топлива, процессы накопления и переноса ПДА также процессы, связанные с деградацией активной зоны. Такой подход позволил снять избыточный консерватизм при комплексном моделировании аварийных процессов в РУ БН.

Результаты работы опубликованы соискателем в 6 научных статьях в рецензируемых изданиях из перечня ВАК Минобрнауки России, в том числе 5 по теме диссертации. Всего по теме диссертации опубликовано 15 научных работ, в том числе 9 свидетельств о регистрации программы. Основные результаты работы докладывались автором и обсуждались на 8 научных конференциях и семинарах.

В целом диссертационная работа Чалого Р.В. вносит существенный вклад в развитие программных средств для комплексного анализа безопасности РУ БН и заслуживает положительной оценки. Однако при ознакомлении с диссертацией возникли следующие вопросы и замечания.

1. Не ясно, о каком механизме теплопередачи идет речь, при котором «... ничем не ограниченный тепловой поток приводил к резкому разогреву и тепловому расширению натрия в ячейке...» (стр. 59). В работе предлагается ограничивать этот тепловой поток величиной критического теплового потока при пузырьковом кипении. При этом не указано с помощью какой карты режимов течения двухфазного потока натрия было определено, что при соответствующих массовой скорости и паросодержании мог реализовываться пузырьковый режим течения при кипении натрия.

Выше на стр. 53 написано, что выбор замыкающих соотношений для двухфазного потока базировался на карте режимов течения, подобной используемой в коде SIMMER-III, где режим течения определяется только паросодержанием. Наверное, в дальнейшем следовало бы дополнить анализ режимов течения двухфазного потока натрия в коде СОКРАТ-БН новой информацией из работы Сорокина А.П. (ВАНТ, Серия: Ядерно-реакторные константы, выпуск 3, 2024), где границы режимов течения двухфазного потока при кипении натрия устанавливаются в зависимости от паросодержания и массовой скорости.

2. Важной составляющей канальных моделей являются замыкающие соотношения для описания поперечного переноса массы, тепла и импульса. В случае ТВС реакторов типа БН на поперечный перенос оказывает влияние закрутка потока в сборке. Но соответствующая информация об используемых замыкающих соотношениях в диссертации не приводится. Это затрудняет анализ расчетных результатов применительно к задаче о блокировке проходного сечения в ТВС, тем более что сопоставление результатов расчета по СОКРАТ-БН с расчетными данными по коду COREMELT проводилось по абсолютным значениям температуры, а не по подогревам.

3. Почему при моделировании переноса радиоактивных продуктов деления и активированных продуктов коррозии не учитывалась очистка натрия в ловушках, которые предусмотрены технологией натриевого теплоносителя в реакторах типа БН?

Содержание диссертации полностью соответствует специальности 2.4.9 – Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность. Диссертация «Программный комплекс СОКРАТ-БН для анализа и обоснования безопасности АЭС с реакторами на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем» удовлетворяет требованиям п. 9 11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842 (в редакции Постановления от 26.05.2020 № 751), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук. Считаю, что, несмотря на отмеченные замечания, работа выполнена на высоком профессиональном уровне и является законченной научно-квалификационной работой, а автор диссертации Чалый Руслан Василевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.9 – Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность.

Официальный оппонент

доцент кафедры теплофизики (№13) института  
ядерной физики и технологий НИЯУ МИФИ  
кандидат технических наук

Харитонов Владимир Степанович

25.12.24

Телефон +7 (495) 788 56 99, доб. 8350

Электронная почта: VSKharitonov@mephi.ru

Адрес: 115409, Москва, Каширское ш., 31 НИЯУ МИФИ

« 24 » декабря 2024 г.



Подпись удостоверению  
Заместитель начальника отдела  
документационного обеспечения  
НИЯУ МИФИ

В. М. Самородова  
25.12.24