

ОТЗЫВ

**официального оппонента Морозова Андрея Владимировича
на диссертацию Долганова Кирилла Сергеевича**

**«Методический подход к созданию моделей энергоблоков АЭС с ВВЭР для реалистического расчётного обоснования безопасности при тяжёлых авариях»,
представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.4.9 – «Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность»**

В диссертационной работе К.С. Долганова исследуются методические вопросы создания и использования моделей энергоблоков для реалистического расчётного анализа безопасности АЭС с ВВЭР при тяжёлых авариях. Общие проблемы обеспечения безопасности АЭС, проявившиеся при аварии на АЭС Фукусима-1 в Японии, подчеркнули необходимость дополнительных исследований с целью развития средств и методов численного моделирования тяжёлых аварий. Одним из важнейших направлений этих исследований является обеспечение реалистического подхода к моделированию с использованием интегральных расчётных кодов. В России АЭС с ВВЭР обеспечивают основную долю атомной энерговыработки, а также представляют собой основной экспортный продукт Госкорпорации «Росатом». Поэтому изучение путей совершенствования расчётного обоснования безопасности реакторных установок ВВЭР при тяжёлых авариях, и в особенности методических аспектов применения интегральных кодов, представляет собой **актуальную тему исследования.**

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

- разработан и апробирован методический подход к подготовке и использованию физико-математических моделей энергоблока в расчётном анализе тяжёлых аварий на АЭС с ВВЭР;
- в рамках данного методического подхода разработан, аттестован и внедрён в практику анализа безопасности ВВЭР интегральный код СОКРАТ/ВЗ, первый код такого класса в России;
- впервые в нашей стране выполнен интегральный анализ тяжёлой аварии на первом энергоблоке АЭС Фукусима-1 и получены важные прогнозные данные об аварии, представляющие интерес для повышения безопасности АЭС с ВВЭР;
- получены новые данные о протекании тяжёлых аварий на АЭС с ВВЭР.

О достоверности результатов и обоснованности положений, выводов и рекомендаций диссертационного исследования свидетельствуют следующие факты:

- подробный обзор текущего состояния проблемы исследований тяжёлых аварий, приведённый в первых главах диссертации, и участие автора в основных международных проектах, посвящённых моделированию тяжёлых аварий;
- широкое использование экспериментальной базы для проверки разработанных методик и качества физических моделей;
- положительные результаты экспертизы разработанных методик и результатов валидации интегрального кода СОКРАТ, как в Ростехнадзоре, так и среди представителей зарубежного научного сообщества.

Практическая значимость исследования заключается в организации и систематизации процесса подготовки исходных данных для расчётов тяжёлых аварий на ВВЭР с помощью отечественного кода СОКРАТ, выполнения этих расчётов и анализа полученных результатов на современном уровне знаний. Методическая строгость выполнения расчётов тяжёлых аварий способствует повышению качества обоснования безопасности российских проектов ВВЭР, как эксплуатируемых внутри страны, так и поставляемых на экспорт. Наличие отечественной методики таких расчётов обеспечивает независимость от зарубежных кодов.

Личный вклад соискателя в получение результатов, изложенных в диссертации, определяется его непосредственным участием в основной части представленных исследований.

Структура диссертации

Материалы диссертации изложены на 357 страницах, включая 135 рисунков и 64 таблицы. Диссертация обладает внутренним единством и состоит из введения, семи глав, заключения, списка сокращений и перечня литературных источников (419 позиций).

Во введении сформулированы цели и задачи работы, представлены защищаемые положения, личный вклад автора, научная новизна и данные о практической ценности, достоверности, обоснованности и апробации полученных результатов.

В первой главе выполнено обоснование задач исследования с учётом текущей проблематики моделирования тяжёлых аварий на АЭС с ВВЭР. В частности, автором проведён анализ нормативных критериев перехода запроектной аварии в тяжёлую стадию, кратко представлена история развития интегрального подхода к моделированию аварий на АЭС и сформулированы текущие проблемы расчётного анализа безопасности АЭС при тяжёлых авариях. Для решения этих проблем автор предлагает использовать физико-математические модели энергоблока, объединяющие и связывающие воедино знания об

аварийных сценариях и физических процессах, интегральную расчётную программу для ЭВМ и знания об энергоблоке. Технологические аспекты создания и использования физико-математических моделей энергоблоков при расчётном исследовании тяжёлых аварий на АЭС с ВВЭР рассматриваются автором в следующих главах диссертации и обобщаются в виде методического подхода.

Во второй главе диссертации автором определяются проблемы и способы выбора представительных сценариев тяжёлых аварий на ВВЭР, выделяются характерные стадии аварий и ключевые физические процессы. Большая часть главы посвящена обзору физических процессов и экспериментальных исследований этих процессов с учётом особенностей ВВЭР. В частности, автором показаны сохраняющийся недостаток знаний о ряде процессов, требующий проведения дополнительных экспериментов.

В третьей главе продемонстрирована полнота моделей интегрального кода СОКРАТ, разработанного с непосредственным участием автора, относительно ключевых физических процессов, определённых в предыдущей главе. Особое внимание уделено обеспечению наилучшей оценки в физических моделях интегрального кода для соблюдения реалистического подхода к моделированию. Также показана важность учёта в моделях феноменологических знаний, получаемых из анализа имевших место аварий.

Четвёртая глава посвящена методическим особенностям валидации интегральных кодов, предназначенных для моделирования тяжёлых аварий. На основе феноменологических стадий и перечня физических процессов, определённых во второй главе, автор приводит разработанные им матрицы валидации интегральных кодов типа СОКРАТ. Интерес представляют методические рекомендации к процедуре валидации таких кодов, приведённые автором на основе его опыта валидации и аттестации двух версий кода СОКРАТ. Значительная роль в валидации кода отведена детальному анализу условий эксперимента, используемого для оценки погрешности моделей. Подобный анализ улучшает качество оценки применимости интегрального кода в заявленной области применения, одновременно позволяя определить недостатки существующей экспериментальной базы.

Следующий этап методического подхода включает работы по определению и использованию данных об энергоблоке в составе расчётной модели при моделировании тяжёлых аварий. **В пятой главе** приведены рекомендации по процессу квалификации входных данных при разработке расчётных моделей энергоблоков для кода СОКРАТ, а также рассмотрены особенности составления расчётных моделей реакторных установок ВВЭР.

Методические аспекты обеспечения реалистического подхода при выполнении расчётного анализа тяжёлых аварий с помощью интегральных кодов исследуются в **шестой главе**. Поскольку целевой функцией моделирования тяжёлой аварии является поиск наилучшей, или наиболее достоверной оценки результата, автор приводит рекомендации по получению такой оценки при помощи анализа неопределённости входных параметров разработанной физико-математической модели энергоблока. Используя в качестве примера код СОКРАТ, автор демонстрирует важность систематизации входных параметров с учётом результатов валидации. Так, он предлагает исключить из рассмотрения параметры моделей, значения которых были определены и зафиксированы на этапе валидации. Также автором приводятся примеры определения и обоснования характеристик неопределённостей входных параметров для расчётов тяжёлых аварий ВВЭР. В качестве наилучшей оценки результата предлагается использовать осреднение полученной выборки результатов. На примере анализа неопределённости выхода водорода из первого контура в ходе представительной тяжёлой аварии показано, что в качестве наилучшей оценки можно использовать результат расчёта без отклонения значений входных параметров от средних значений. В данном случае использование наилучших оценок входных параметров приводит к наилучшей оценке результата. В конце главы автор демонстрирует возможность использования анализа неопределённости для поиска пороговых эффектов в тяжёлых авариях ВВЭР и рассматривает характерный практический пример такого анализа.

Примеры апробации методического подхода, разработанного автором, приведены в **седьмой главе**. Они включают моделирование тяжёлых аварий на АЭС с ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200, а также на первом энергоблоке АЭС Фукусима-1. Автором выявлен и продемонстрирован в расчётах эффект выкипания воды из уравнивательной линии уровнемера на корпусе парогенератора ВВЭР, который может вызывать переоценку показаний уровня воды в парогенераторе на поздней стадии аварии. Это может привести к неправильной оценке персоналом реального состояния энергоблока во время аварии. В рамках исследования возможности байпасирования защитной оболочки радиоактивными веществами автором выполнены расчёты тяжёлой аварии с потерей теплоотвода ко второму контуру. Показано, что естественная конвекция парогазовой смеси в горячем трубопроводе между активной зоной и парогенератором не обеспечивает достаточно быстрый нагрев теплообменных труб парогенератора, что исключает возможность их разрыва и байпасирования защитной оболочки. В расчётах аварии на АЭС Фукусима-1 автором показано хорошее воспроизведение результатов измерений и показана

эффективность методического подхода в качестве инструмента ретроспективного анализа обстоятельств произошедшей аварии.

В заключении диссертации подведены итоги и перечислены основные результаты выполненной работы.

Материалы диссертации изложены К.С. Долгановым в достаточно полной мере в 36 печатных работах, включая 30 статей в рецензируемых журналах из списка ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ, 2 статьи в монографиях, и 4 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

К диссертационному исследованию имеются следующие замечания:

1. Во второй главе работы при определении требующих моделирования процессов и явлений при тяжелой аварии, автором справедливо упоминаются процессы перемешивания, переноса и осаждения бора (раздел 2.3.1.24). В то же время из текста диссертационной работы неясно, учитывался ли при расчетах аварии возможный процесс кристаллизации борной кислоты в активной зоне на стадии её длительного охлаждения за счет работы пассивных систем. Известно, что образование в реакторе твердой фазы борной кислоты препятствует циркуляции теплоносителя в активной зоне, что может послужить одним из факторов, способствующих переходу аварии в тяжёлую стадию.

2. Также во второй главе работы (раздел 2.3.6.7) рассматриваются процессы в устройстве локализации расплава (УЛР) ВВЭР и приводится перечень основных протекающих там процессов. Как известно охлаждение кориума в УЛР происходит за счет испарения борного раствора, поступающего из разрыва первого контура, гидроёмкостей систем пассивного залива активной зоны и других источников. При этом возможен рост концентрации борной кислоты и выпадение её в осадок, как в пространстве между корпусом УЛР и внутренней стенкой шахты реактора, так и внутри корпуса «ловушки». Это может привести к блокировке проходного сечения и снижению расхода охлаждающей жидкости на внешнюю поверхность кориума. В связи с этим было бы целесообразно при проведении расчетов учитывать наличие данных процессов, которые могут оказать значительное влияние на эффективность отвода тепла от расплава в УЛР.

3. При проведении валидации интегрального кода СОКРАТ автором использованы результаты многочисленных экспериментальных исследований аварийных процессов, выполненных на отечественных и зарубежных установках. К их числу относятся эксперименты, проведённые на стенде ГЕ-2М в АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», направленные на исследование работы пассивных систем ВВЭР. Однако, при подготовке матрицы валидации, автор ограничился рассмотрением только двух этапов работ на данной установке: изучение работоспособности дополнительной системы пассивного залива активной зоны (система ГЕ-2) и исследование изменения конденсационной мощности

парогенератора при наличии в паре неконденсирующихся газов, образующихся в первом контуре. Для повышения представительности матрицы валидации рекомендуется также использовать результаты третьего этапа исследований на стенде ГЕ-2М, который включал в себя изучение влияния неконденсирующихся газов, поступающих из под защитной оболочки, на работу парогенератора ВВЭР в конденсационном режиме в ходе суточных экспериментов.

Эти замечания не влияют на общую положительную оценку диссертационного исследования. Диссертация К.С. Долганова представляет собой законченную научно-квалификационную работу. Изложенный в ней методический подход научно обоснован, а его использование в практике численного моделирования тяжёлых аварий вносит значимый вклад в повышение безопасности АЭС с ВВЭР и конкурентоспособность технологии ВВЭР.

Автореферат отражает основные положения диссертационной работы.

Тема и содержание диссертации соответствует паспорту специальности 2.4.9 - «Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность».

Диссертация «Методический подход к созданию моделей энергоблоков АЭС с ВВЭР для реалистического расчётного обоснования безопасности при тяжёлых авариях» отвечает всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утверждённого постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года №842, с последующими изменениями, а автор диссертации Долганов Кирилл Сергеевич заслуживает присуждения ему учёной степени доктора технических наук.

Официальный оппонент

Ведущий научный сотрудник,
доктор технических наук

А.В. Морозов

Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского» (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»)

Электронная почта: sas@ippe.ru



Морозов А.В. удостоверяю:
Заместитель начальника ОДО АО "ГНЦ РФ-ФЭИ"
Л.С. Баруткина 10.06.2014г.