

ОТЗЫВ

официального оппонента академика РАН, доктора физико-математических наук, научного руководителя ФГБУН Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук Алексеенко Сергея 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»

Диссертационное исследование посвящено разработке и апробации методического подхода, который определяет технологию реалистического обоснования безопасности энергоблоков АЭС с реакторами типа ВВЭР при тяжёлых авариях.

Актуальность темы в достаточной мере обоснована и обусловлена необходимостью совершенствования расчётного анализа безопасности АЭС при тяжёлых авариях и обеспечения независимости от зарубежных программ для ЭВМ, а также проблемой сохранения и передачи знаний о специфике тяжёлых аварий на АЭС с ВВЭР, составляющих основу атомного парка России.

Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, списка сокращений и списка использованных литературных источников. Текстовая часть сопровождается иллюстративным материалом. Структура диссертации согласуется с поставленными задачами и вопросов не вызывает.

Во введении отражена актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи работы, научная новизна, положения, выносимые на защиту, личный вклад автора, практическая ценность результатов, методология и методы исследования, достоверность и обоснованность результатов работы, а также указано, где была выполнена апробация полученных результатов.

В первой главе диссертации выполнен анализ используемых в работе терминов, приведён краткий обзор истории создания численных моделей энергоблоков АЭС для детерминистического анализа безопасности. Проведено критическое обсуждение ряда понятий, имеющих разное толкование в литературе. Среди них: тяжелая авария, интегральный код, реалистический анализ. Исходя из текущих проблем расчётного анализа тяжёлых аварий на АЭС с ВВЭР автором определены задачи исследования. В частности,

введено понятие «физико-математической модели» (ФММ), описывающей поведение энергоблока при тяжёлых авариях на АЭС с ВВЭР. Автор представляет ФММ как совокупность трёх множеств: данные об энергоблоке в виде его расчетной модели, современные знания о возникающих на энергоблоке физических процессах и явлениях и связях между ними, и описывающие эти процессы и явления физические модели в составе интегральной программы для ЭВМ (кода). Особое внимание уделяется необходимости реалистического моделирования тяжёлых аварий с целью получения наиболее достоверного прогноза. Такой прогноз представляет собой наилучшую оценку расчётного результата. Для решения этой задачи автором разработан поэтапный методический подход к созданию ФММ. В конце главы 1 кратко описаны содержание каждого этапа и связи между этапами.

Во **второй главе** приведены результаты решения задач на первом этапе методического подхода. Автором даны рекомендации к выбору объектов моделирования при анализе тяжёлых аварий на энергоблоках ВВЭР, рассмотрены проблемы и методы определения представительных сценариев аварий, выделены основные феноменологические стадии аварий, выполнен детальный аналитический обзор ожидаемых физических процессов и явлений, составлена таблица определяющих явлений (PIRT), особое внимание уделено водородной взрывобезопасности. Для каждого процесса (стадии) выполнены оценки важности и объёма поддерживающих экспериментальных данных. Объём и качество феноменологического анализа позволили автору использовать полученные результаты в качестве базиса для дальнейших исследований в рамках диссертации. В частности, они используются на следующем этапе методического подхода при выборе программного средства для численного моделирования тяжёлых аварий.

Вопросы обеспечения наилучшей оценки при моделировании физических процессов с помощью интегральных кодов рассмотрены в **третьей главе** на примере двух версий российского интегрального кода СОКРАТ-В1/В2 и СОКРАТ/В3, которые были разработаны, валидированы и аттестованы в надзорном органе в рамках описываемого в диссертации методического подхода. Автор подтверждает соответствие моделей кода СОКРАТ важным явлениям и процессам при тяжёлых авариях на АЭС с ВВЭР.

Методические особенности валидации выбранного интегрального кода применительно к тяжёлым авариям ВВЭР рассмотрены в **четвёртой главе**. В качестве целей валидации автор видит определение перечня фиксированных и свободных параметров моделей, а также значения погрешности и неопределённости моделей. В соответствии с методическим подходом автора, эти данные далее должны использоваться при получении и обработке результатов численного моделирования тяжёлой аварии для

обеспечения наилучшей оценки прогноза. Разработанные автором матрицы валидации и методика прошли апробацию при аттестации кодов СОКРАТ-В1/В2 и СОКРАТ/В3 в российском надзорном органе, что определяет их ценность для дальнейшего использования при валидации других интегральных кодов, которые могут разрабатываться в нашей стране для анализа безопасности ВВЭР.

Вопросы обеспечения наилучшей оценки на стадии подготовки исходных данных об энергоблоке и разработки расчётных схем для моделирования тяжёлых аварий с использованием выбранного интегрального кода исследованы **в пятой главе**. Рекомендации по квалификации расчётных моделей энергоблоков ВВЭР учитывают результаты, полученные в предыдущих главах.

В шестой главе исследуется проблема использования ФММ энергоблока, разработанной на предыдущих этапах, для реалистического моделирования тяжёлых аварий. Для получения наилучшей оценки результата моделирования предлагается использовать осреднение массива результатов вариантных расчётов, выполненных в рамках анализа неопределённостей входных параметров ФММ, с поправкой на модельную погрешность кода, которая была определена на этапе валидации. Автором приведены рекомендации по учёту разного рода неопределённостей, по выбору и заданию характеристик неопределённости входных параметров. В отношении модельных параметров подчеркивается важность учёта только свободных параметров, для которых не были зафиксированы значения на этапе валидации. Важным результатом является установленная взаимосвязь между результатом расчёта без отклонения входных параметров (референтным) и наилучшей оценкой (средним) как метод обоснования правильности выбора и проверки необходимости уточнения значений входных параметров ФММ. Также в этой главе на примере расчёта тяжёлой аварии автор демонстрирует возможность использования анализа неопределённости для поиска пороговых эффектов в авариях.

Результаты апробации разработанного методического подхода представлены в заключительной, **седьмой главе** диссертации. На примере моделирования аварии на АЭС Фукусима-1 и решения практических задач безопасности для АЭС с ВВЭР автор демонстрирует возможность формирования ложных показаний уровня воды в парогенераторах ВВЭР при тяжёлых авариях. Показано, что искажения измерений уровня воды способны привести к неверной оценке состояния энергоблока при аварии и вызвать ошибочные действия персонала.

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

Достоверность результатов диссертационного исследования обоснована учётом современного уровня знаний, валидацией использованных интегральных кодов на большом количестве экспериментальных данных и экспертизой предложенных подходов при аттестации интегральных кодов в Ростехнадзоре. Также достоверность результатов подтверждается их публикацией в ведущих рецензируемых российских и зарубежных журналах, обсуждением на российских и международных конференциях. Расчётные результаты проверялись при помощи сравнительных анализов с зарубежными программами-аналогами в рамках международных проектов.

Практическая ценность исследования определяется его ориентированием на решение конкретных задач в области анализа безопасности АЭС с ВВЭР. Разработанный методический подход фактически определяет технологию выполнения реалистических расчётов тяжёлых аварий на наиболее распространённом в России типе реакторных установок – ВВЭР. Версии российского интегрального кода СОКРАТ, разработанные и аттестованные в рамках этого подхода, обеспечили отраслевым организациям возможность выполнять расчётное обоснование безопасности АЭС при тяжёлых авариях независимо от зарубежных программ-аналогов. Несмотря на то, что методический подход разработан автором для АЭС с ВВЭР, он имеет достаточно общий характер и поэтому может использоваться применительно к другим типам реакторных установок и интегральным кодам.

Новизна диссертационного исследования определяется, в первую очередь, созданием технологии реалистического детерминистического анализа тяжёлых аварий на АЭС с ВВЭР, которая охватывает все стадии анализа, от выбора сценариев и определения моделируемых физических процессов до интерпретации результатов расчётов с учётом неопределённостей входных параметров. Несмотря на то, что отдельные элементы разработанного методического подхода уже известны и использовались ранее при решении задач безопасности, в работе они были развиты и впервые объединены в единую связанную систему в проекции на область тяжёлых аварий ВВЭР. Также впервые были разработаны и аттестованы версии российского интегрального кода СОКРАТ, позволяющие выполнять независимый расчёт тяжёлых аварий на ВВЭР. Наконец, автором обнаружены ранее неизвестные особенности тяжёлых аварий на ВВЭР.

Всего по теме диссертации К.С. Долгановым опубликовано 36 печатных работ, в том числе, 30 статей в рецензируемых журналах из списка ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ, 2 – в монографиях, и получено 4 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

В целом, можно сделать вывод, что на основании выполненных автором исследований в диссертации изложены новые научно обоснованные технологические и методические решения в области подходов к моделированию тяжёлых аварий на российских проектах АЭС с ВВЭР, внедрение которых способствует повышению безопасности проектируемых и действующих в России и за рубежом АЭС с ВВЭР и вносит значимый вклад в обеспечение независимости расчётного анализа безопасности отечественных проектов АЭС от зарубежных программных продуктов и методик.

К диссертационному исследованию имеются следующие замечания:

1. Последнее время с целью анализа функционирования сложных технологических систем, в том числе и их безопасности, создаются цифровые двойники. Наибольшие успехи достигнуты в сфере атомной энергетики. Но автор ничего о них не говорит. Хотелось бы знать мнение автора о роли цифровых двойников в рассматриваемой автором теме.
2. Из таблиц 3.1 – 3.9 главы 3 следует, что для некоторых процессов при тяжёлых авариях в коде СОКРАТ отсутствуют соответствующие модели (термомеханика трубопроводов первого контура, термомеханика корпуса реактора, выход ПД и актиноидов при взаимодействии расплава с водой, химия йода). Хотя такие процессы тоже отмечены как важные, однако в тексте нет комментариев по этому поводу. Кроме того, отсутствие сопоставления указанных процессов с моделями зарубежных интегральных кодов не позволяет оценить степень соответствия СОКРАТ общемировому уровню.
3. В главе 4 отсутствует матрица валидации интегральных кодов для процессов в бассейнах выдержки. В то же время, эти процессы рассмотрены достаточно подробно в главе 2, а в главе 3 представлена степень их учёта в моделях кода СОКРАТ.
4. В главе 6 при обсуждении результатов анализа неопределённостей выброса водорода из первого контура в тексте даётся только общая рекомендация, как в данном расчёте реалистично оценить скорость выхода водорода. Однако она не подкреплена практическими результатами.
5. В Главе 7 приводятся очень подробные выводы по параграфам, но нет обобщающих выводов в целом по Главе 7, что несколько затрудняет восприятие полученных результатов.

Заключение

Приведённые выше замечания не снижают общую положительную оценку диссертационного исследования. Диссертация К.С. Долганова представляет собой законченное научно-методическое исследование, работа выполнена на высоком научном уровне и вносит значимый вклад в развитие технологии и средств численной оценки безопасности АЭС с ВВЭР при тяжёлых авариях.

Автореферат диссертации достаточно полно и точно отражает содержание диссертационной работы. Результаты, основные положения и выводы диссертации в достаточной мере представлены в научных статьях и докладах на международных и российских научных конференциях.

Содержание диссертации полностью соответствует 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» удовлетворяет требованиям пунктов 9–14 «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
академик РАН,
доктор физико-математических наук



С.В. Алексеенко

ФГБУН Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе
Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д. 1
Электронная почта: aleks@itp.nsc.ru

Подпись С.В. Алексеенко заверяю

Ученый секретарь ИТ СО РАН _____ / Макаров М.С. /

