



Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский
университет «МЭИ» (ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»)
111250, г. Москва,
вн. тер.г. муниципальный округ Лефортово,
ул. Красноказарменная, д. 14, стр. 1
Тел.: (495) 362-75-60, факс: (495) 362-89-38
E-mail: universe@mpei.ac.ru
<https://mpei.ru>

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по науке и инновациям,
доктор технических наук



Комаров И.И.

2024 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу

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»

Структура работы

Диссертационная работа изложена на 357 страницах, содержит 64 таблицы и 135 рисунков, состоит из введения, семи глав, заключения, списка сокращений, списка литературы (419 наименований).

Диссертационная работа носит целостный и законченный характер, написана технически грамотно, в достаточной степени иллюстрирована графическим и ссылочным материалом, содержит расчётно-аналитические и экспериментальные данные, обосновывающие сделанные автором выводы. Основные выводы и заключения сформулированы чётко, однозначно и не допускают двояких толкований.

Актуальность темы

Вопросы прогнозирования путей протекания и последствий тяжёлых аварий с разрушением активной зоны на энергоблоках АЭС в последние 20 лет остаются важным направлением исследований безопасности АЭС в мире. Авария на АЭС Фукусима-1, произошедшая в 2011 году в Японии, дополнительно способствовала росту интереса в научном и инженерном сообществе к исследованию процессов, реализующихся при тяжёлых авариях, и их численному моделированию. Важнейшим вопросом

моделирования тяжёлых аварий является обеспечение реалистического прогноза с учётом неопределённостей знаний. В представленной диссертационной работе автором решается задача разработки технологии выполнения реалистических расчётов тяжёлых аварий на АЭС с ВВЭР при помощи физико-математических моделей, позволяющая получать методически обоснованные наилучшие прогнозные оценки последствий тяжёлых аварий в соответствии с современным уровнем знаний. Поэтому тема диссертационной работы является актуальной с точки зрения соответствия общемировым тенденциям в области исследования тяжёлых аварий и текущим задачам безопасности применительно к АЭС с ВВЭР. Также актуальность темы обусловлена важностью систематизации, сохранения и передачи знаний о тяжёлых авариях на ВВЭР, с которыми связаны задачи, решаемые в диссертации.

Общая методология и методы исследования

При выполнении исследования автором использован широкий набор методических средств, включая системный подход к учёту различных аспектов моделирования тяжёлых аварий, анализ на разных уровнях исследования (применительно к объекту моделирования, физическим процессам, экспериментальным данным, средствам численного моделирования, неопределённостям, результатам расчётов), использование и адаптацию передовых знаний и методик в области феноменологии тяжёлых аварий, валидации физических моделей, квалификации расчётных моделей, учёта неопределённостей. Результаты работы получены в рамках единого методического подхода.

Степень обоснованности и достоверности

Положения диссертации, вынесенные автором на защиту, прошли апробацию в рамках расчётов тяжёлых аварий, выполненных автором в ИБРАЭ РАН в рамках детерминистической поддержки ВАБ-2 российских и зарубежных АЭС и в рамках исследования аварии на АЭС Фукусима-1, а также в ходе различных российских и международных научно-технических конференций и семинаров, в материалах международных проектов МАГАТЭ и ОЭСР, опубликованы в 36 статьях, включая 26 статей в журналах из перечня ВАК при Минобрнауки России.

Научная новизна полученных результатов

Научную новизну работы определяют следующие результаты:

- впервые разработан единый подход к расчётному анализу тяжёлых аварий на АЭС с ВВЭР в рамках реалистического подхода, определяющий технологию выполнения расчётов с использованием программ для ЭВМ СОКРАТ-В1/В2 и СОКРАТ/В3;

- впервые в рамках единого системного подхода выполнен анализ максимально широкого спектра физических явлений и процессов, возникающих на всех основных стадиях тяжёлых аварий на АЭС с ВВЭР от исходного события до формирования радиоактивного выброса в окружающую среду;
- впервые в России разработана, аттестована и внедрена в практику использования версия программы для ЭВМ СОКРАТ/ВЗ, позволяющая моделировать радиационные процессы на энергоблоке и прогнозировать величину и состав радиоактивного выброса в результате тяжёлых аварий на АЭС с ВВЭР;
- разработана и апробирована новая методика валидации интегральных программ для ЭВМ, предназначенных для моделирования тяжёлых аварий;
- разработана и апробирована новая методика квалификации расчётных моделей энергоблоков ВВЭР, предназначенных для использования с интегральной программой для ЭВМ СОКРАТ/ВЗ;
- сформулированы цель и задачи анализа неопределённости расчётов тяжёлых аварий на ВВЭР, определены рекомендации по составлению перечня параметров неопределённости и способы получения наилучшей оценки прогнозного результата;
- впервые в России создана и квалифицирована интегральная модель энергоблока I АЭС Фукусима-1 и с её помощью выполнен сквозной расчёт первых 2-х недель аварии, позволивший получить важные данные о протекании и последствиях аварии, которые вошли в отчётные материалы по международным проектам МАГАТЭ и ОЭСР и учитывались японскими институтами при расследовании обстоятельств аварии и подготовке средств ликвидации её последствий;
- представлены новые данные о поведении уровнемеров на основе уравнительных сосудов в условиях тяжёлых аварий на АЭС с ВВЭР;
- впервые показана недостаточная эффективность теплоотвода естественной конвекцией парогазовой смеси между активной зоной и горячим коллектором парогенератора ВВЭР, приводящая к разогреву теплообменных трубок парогенератора, который вызывает их разрыв и байпасирование гермооболочки радиоактивными материалами при тяжёлой аварии с плотным первым контуром.

Значимость полученных автором результатов для науки и производства

Полученные автором результаты обладают практической значимостью для отечественной науки и атомной энергетики, поскольку разработанный методический

подход и созданная с его помощью физико-математическая модель энергоблока ВВЭР, с одной стороны, способствуют систематизации, сохранению, развитию и передаче знаний в области тяжёлых аварий на АЭС с ВВЭР, а с другой стороны, обеспечивают единую методически обоснованную и соответствующую современному уровню знаний технологию расчётных исследований тяжёлых аварий на АЭС с ВВЭР. Применение этого методического подхода в научных, проектных и конструкторских отраслевых институтах обеспечивает согласованность результатов, получаемых разными экспертными группами с использованием программы для ЭВМ СОКРАТ.

Аттестация программы для ЭВМ СОКРАТ/В3 в НТЦ ЯРБ Ростехнадзора обеспечила независимость расчётного анализа безопасности при тяжёлых авариях, выполняемого для российских энергоблоков АЭС с ВВЭР, от зарубежных программ-аналогов, что является особенно важным результатом в условиях текущей санкционной политики в отношении России.

Рекомендации по использованию результатов и выводов

Разработанный автором методический подход рекомендуется использовать для разработки частных физико-математических моделей конкретных энергоблоков ВВЭР с учётом их конструктивных особенностей, в рамках анализа безопасности при тяжёлых авариях. Также этот подход может быть использован в качестве основы для создания физико-математических моделей других объектов использования атомной энергии: например, энергоблоков АЭС с другими реакторными установками, термоядерных установок.

Результаты феноменологического анализа тяжёлых аварий на ВВЭР формируют основу для совершенствования физических моделей в составе интегральных программ для ЭВМ, включая СОКРАТ, и могут использоваться для планирования экспериментальных исследований применительно к ВВЭР.

Результаты, полученные в рамках апробации методического подхода (возможность искажения показаний уровнемеров в парогенераторах в условиях тяжёлых аварий), необходимо принимать во внимание при разработке мер по управлению тяжёлыми авариями и при планировании работ по квалификации средств измерений на энергоблоках АЭС с ВВЭР.

Материалы диссертации рекомендуется использовать в качестве обучающих материалов в образовательной сфере при подготовке молодых специалистов для атомной отрасли России.

Соответствие содержания диссертации специальности

Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 2.4.9 – «Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность», поскольку работа включает следующие направления исследований по специальности:

- моделирование нейтронно-физических, химических, тепловых, гидравлических и механических процессов, создание программных комплексов, обеспечивающих достоверное расчетное обоснование объектов ядерной техники и их безопасное функционирование при эксплуатации;
- разработка методов расчета технологических процессов в объектах ядерной техники с целью <...> обеспечения их ядерной и радиационной безопасности;
- разработка методов обоснования ядерной и радиационной безопасности и экологической приемлемости технологий и объектов ядерной техники.

Замечания по диссертационной работе

- 1) В диссертации широко используется понятие «физико-математическая модель», однако не приводится каких-либо конкретных примеров таких моделей, что в ряде случаев затрудняет восприятие. Было бы целесообразно привести сжатое изложение основных математических моделей кода СОКРАТ для того, чтобы содержание диссертации стало доступнее более широкому кругу специалистов атомной отрасли.
- 2) К недостаткам диссертации следует отнести отсутствие полноценного обзора предшествующих исследований по тематике моделирования аварий на АЭС. Тем не менее, следует отметить, что в различных разделах диссертации в том или ином виде приводятся сведения о работах предшественников.
- 3) Некоторые положения в разделе «Научная новизна работы» сформулированы недостаточно полно. Например, «... разработана и апробирована новая методика валидации...» или «...представлен новый подход к определению цели, задач, проблем и роли анализа неопределённости...». Автору следовало бы уточнить в чем именно состоит новизна методики и подхода.
- 4) При описании разработанного автором методического подхода на стр.9 используется понятие «единая согласованная система знаний», смысл которого необходимо разъяснить.
- 5) В таблицах PIRT, приведённых в п. 2.3.11, упоминаются процессы с высокой оценкой важности, для которых, тем не менее, в программе СОКРАТ отсутствуют соответствующие модели. Например, термомеханика трубопроводов первого

- контура, термомеханика корпуса реактора, выход ПД и актиноидов при взаимодействии расплава с водой, химия йода, горизонтальное растекание расплава. В работе никак не поясняется, как неучёт этих процессов сказывается на результатах моделирования тяжёлых аварий, и почему соответствующие модели отсутствуют в программе СОКРАТ.
- 6) В разделе 4 утверждается, что разработанные матрицы валидации основываются на результатах феноменологического анализа тяжёлых аварий. В результате этого анализа автором рассмотрены, среди прочих, процессы в бассейне выдержки отработанного топлива. Однако соответствующие матрицы валидации в разделе 4 не приведены.
 - 7) В настоящее время в мире проводятся исследования новых материалов оболочек твэлов, минимизирующих высокотемпературное окисление паром и воздухом (толерантные материалы). В России в качестве такого кандидатного материала рассматривается циркониевый сплав, покрытый слоем хрома. Хотя в работе утверждается соответствие современному уровню знаний, автором не приведены какие-либо сведения об учёте толерантных оболочек твэлов в физико-математической модели энергоблока.
 - 8) Автором отмечается расчётная переоценка глубины абляции бетонного основания в контейнменте энергоблока 1 АЭС Фукусима-1, полученная с помощью различных программ для ЭВМ, включая СОКРАТ, относительно ожидаемой глубины согласно косвенным свидетельствам, полученным на энергоблоке 1. В работе отсутствуют данные, как эта переоценка влияет на результаты расчёта радиоактивного выброса в окружающую среду.
 - 9) На рисунках, представленных в п. 7.1.9, показаны результаты восстановления радиоактивного выброса на АЭС Фукусима-1 при решении обратной задачи. Согласно этим результатам, для ряда радионуклидов наблюдается продолжающийся выброс в период с 26 до 35 ч аварии, однако результаты расчётов по СОКРАТ показывают отсутствие выброса в это время. В тексте отсутствуют комментарии этому несоответствию.
 - 10) Имеются опечатки: 1) с.20 «...валидировать подробные модели», должны быть «подобные»; 2) заголовок раздела 4.7.1 «Протитипность экспериментальных данных», должно быть «Прототипность».

Данные замечания не влияют на положительную оценку представленной диссертации.

Заключение

В целом диссертация Долганова К.С. «Методический подход к созданию моделей энергоблоков АЭС с ВВЭР для реалистического расчётного обоснования безопасности при тяжёлых авариях» представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, в которой решена важная для нужд атомной отрасли России задача разработки и реализации технологии реалистических расчётных исследований тяжёлых аварий на АЭС с ВВЭР при помощи отечественной программы для ЭВМ СОКРАТ. Результаты имеют определяющее значение для обоснования безопасности и обеспечения преемственности знаний в области тяжёлых аварий на энергоблоках АЭС с ВВЭР.

Автореферат соответствует основному содержанию диссертации, а результаты работы достаточно полно представлены в опубликованных Долгановым К.С. работах.

На основании изложенного выше считаем, что диссертация «Методический подход к созданию моделей энергоблоков АЭС с ВВЭР для реалистического расчётного обоснования безопасности при тяжёлых авариях» удовлетворяет требованиям пп. 9–14 «Положения о присуждении ученых степеней» от 24 сентября 2013 года, №842, утверждённого постановлением Правительства РФ, с последующими изменениями, а автор диссертации Долганов Кирилл Сергеевич заслуживает присуждения ему учёной степени доктора технических наук по специальности 2.4.9 – «Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность».

Отзыв на диссертацию подготовлен на основании заключения, сделанного в результате обсуждения диссертации и автореферата на заседании кафедры «Атомные электрические станции» ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», протокол заседания № 03/24 от 13 марта 2024 г.

Заведующий кафедрой АЭС,
канд. геогр. наук

Хвостова Марина Сергеевна

Профессор кафедры АЭС
докт. техн. наук

Проскуряков Константин Николаевич

Доцент кафедры АЭС
канд. техн. наук

Воробьев Юрий Борисович

Подписи Хвостовой М.С., Проскурякова К.Н., Воробьева Ю.Б. заверяю



Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»)

111250, Россия, г. Москва, вн. тер. г. муниципальный округ Лефортово,
ул. Красноказарменная д.14, стр. 1.

Тел. 8 495 362 75-60, факс 8 495 362 89 38

Email: universe@mpei.ac.ru