



УТВЕРЖДАЮ

Директор ИБРАЭ РАН

Доктор физико-математических наук

Л.В. Матвеев

«16» февраля 2024 г.

Заключение

Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук
(ИБРАЭ РАН)

Диссертация «Методический подход к созданию моделей энергоблоков АЭС с ВВЭР для реалистического расчётного обоснования безопасности при тяжёлых авариях» выполнена в Отделении анализа безопасности ядерных энергетических установок.

В период подготовки диссертации соискатель Долганов Кирилл Сергеевич работал в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук в Отделении анализа безопасности ядерных энергетических установок в должности научного сотрудника, заведующего лабораторией.

В 2002 г. К.С. Долганов с отличием окончил Московский энергетический институт (технический университет), ему присуждена степень магистра физики по направлению «Техническая физика».

В 2005 г. К.С. Долганов защитил диссертацию «Обоснование безопасности уран-графитовых реакторов при осушении каналов» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.03 - Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации в диссертационном совете Д 212.157.07 при Московском энергетическом институте (техническом университете).

По результатам обсуждения диссертации К.С. Долганова «Методический подход к созданию моделей энергоблоков АЭС с ВВЭР для реалистического расчётного обоснования безопасности при тяжёлых авариях» принято следующее заключение.

Диссертация К.С. Долганова выполнена на высоком научном уровне, в ней решена важная научно-инженерная проблема методического сопровождения процесса создания физико-математических моделей энергоблоков АЭС с ВВЭР, предназначенных для реалистического расчётного анализа тяжёлых аварий с целью повышения качества обоснования безопасности и обеспечения независимости технологии ВВЭР, а также для накопления, сохранения и передачи знаний о протекании тяжёлых аварий на АЭС с реакторными установками ВВЭР.

Цель диссертационной работы состояла в разработке общего методического подхода, позволяющего создавать, развивать в соответствии с современным уровнем знаний и использовать на практике инструментарий для реалистического расчётного обоснования безопасности энергоблоков АЭС с ВВЭР при ТА, включая определение исходных данных для анализа водородной взрывобезопасности, радиационных последствий, оценки эффективности мер по управлению ТА и функционирования оборудования и систем при ТА.

Личный вклад соискателя заключается в том, что им:

- Проведён анализ, синтез и апробация современных знаний в различных областях анализа безопасности АЭС с легководными реакторами, в том числе полученных с его непосредственным участием, а также обобщение этих знаний в форме методического подхода к созданию физико-математических моделей энергоблоков ВВЭР.
- Выполнен анализ и адаптация современных тенденций, нормативных требований и

результатов зарубежных экспертиз документации интегрального кода СОКРАТ/В1 в виде методики валидации интегральных ТА кодов и методики квалификации расчётных моделей энергоблоков ВВЭР для анализа ТА.

- Выполнен анализ феноменологии ТА на энергоблоках ВВЭР.
- Разработаны расчётные модели энергоблоков ВВЭР.
- Разработана расчётная модель энергоблока 1 АЭС Фукусима-1, с её помощью выполнены расчётные исследования аварии на АЭС Фукусима-1 и выполнен анализ уроков этой аварии применительно к энергоблокам ВВЭР.

Под руководством и при непосредственном участии соискателя получены следующие результаты:

- созданы версии В1/В2 и В3 интегрального кода СОКРАТ;
- разработаны матрицы валидации и выполнена валидация версий интегрального кода СОКРАТ;
- физико-математические модели апробированы на практике в задачах обоснования безопасности энергоблоков АЭС с ВВЭР (включая детерминистические расчёты тяжёлых аварий в рамках вероятностного анализа безопасности уровня 2, оценку эффективности РУТА, расчёты исходных данных для решения задач водородной взрывобезопасности);
- исследованы задачи конвективного переноса тепла между а.з. и парогенератором при тяжёлой аварии с плотным первым контуром в рамках исследования возможности байпассирования ГО и формирования раннего радиоактивного выброса.

Достоверность полученных результатов и выводов диссертационного исследования подтверждается:

- анализом современного уровня знаний при разработке методического подхода, в том числе учётом результатов ранее выполненных научных работ по теме исследования, успешно апробированных в задачах анализа безопасности АЭС;
- валидацией интегрального кода СОКРАТ на широком спектре представительных экспериментальных данных, включая исследования отдельных явлений и эксперименты на интегральных стендах;
- аттестацией двух версий СОКРАТ в ФБУ «НТЦ ЯРБ» Ростехнадзора;
- представлением и обсуждением результатов в ведущих международных и российских научных рецензируемых журналах и на научно-технических конференциях;
- сравнительным анализом моделей и результатов их использования с зарубежными программами-аналогами в рамках международных исследовательских проектов.

Научная новизна заключается в том, что в работе впервые:

1. Разработан методический подход, позволяющий в рамках единой согласованной системы знаний создавать и использовать на практике инструментарий для реалистического расчётного обоснования безопасности энергоблоков АЭС с ВВЭР при ТА, включая определение исходных данных для анализа водородной взрывобезопасности, радиационных последствий, оценки эффективности мер по управлению ТА и функционирования оборудования и систем при ТА.

2. Разработана и аттестована в ФБУ «НТЦ ЯРБ» Ростехнадзора версия российского интегрального кода СОКРАТ/В3, обеспечивающая реалистическое моделирование радиационно значимых процессов на энергоблоках ВВЭР и расчёт радиоактивных выбросов при ТА.

3. С учётом мировых тенденций в области валидации программ для ЭВМ и современных вычислительных возможностей разработана и апробирована новая методика валидации интегральных ТА кодов.

4. С использованием новой методики квалификации расчётных моделей, учитывающей специфику ВВЭР и феноменологию ТА, разработаны физико-математические модели энергоблоков АЭС со всеми проектами РУ ВВЭР, эксплуатирующихся в России, а

также модели строящихся за рубежом энергоблоков АЭС «Аккую» (Турция), АЭС «Руппур» (Бангладеш).

5. Представлен новый подход к определению цели, задач, проблем и роли анализа неопределённости при использовании физико-математических моделей для моделирования ТА на ВВЭР.

6. Впервые в России создана полномасштабная расчётная модель энергоблока 1 АЭС Фукусима-1 с учётом всех основных элементов энергоблока и выполнен расчёт первых двух недель аварии в единой постановке, позволивший получить важные прогнозные данные о состоянии барьеров безопасности, расположении и составе кориума, о причинах и возможных местах горения водорода в ходе аварии, об особенностях работы систем безопасности и средств измерений при ТА.

7. Верифицирован наблюдавшийся на энергоблоке 1 АЭС Фукусима-1 эффект формирования ложных показаний уровнемера в реакторе на стадии разрушения активной зоны, и установлена возможность возникновения аналогичного эффекта в парогенераторах ВВЭР при развитии ТА.

8. Исследован ранее не рассматривавшийся для РУ ВВЭР процесс естественной циркуляции парогазовой смеси по горячему трубопроводу между активной зоной и парогенератором, создающий риск байпасирования гермооболочки и раннего радиоактивного выброса в тяжёлых авариях с плотным первым контуром.

Практическая ценность состоит в том, что результаты, полученные в ходе диссертационного исследования, позволили:

- разработать методический подход к созданию физико-математических моделей энергоблоков для выполнения детерминистических расчётов ТА в обоснование безопасности АЭС с ВВЭР и в рамках аварийного реагирования, а также для систематизации, сохранения и развития накопленных знаний в области ТА на ВВЭР, в том числе в рамках подготовки молодых специалистов для отраслевых организаций;
- решить следующие важные практические задачи в области анализа безопасности АЭС с ВВЭР:
 - аттестовать версии интегрального кода СОКРАТ-В1/В2 и СОКРАТ/В3, что обеспечило отраслевым организациям (АО «ОКБ Гидропресс», АО «Атомэнергопроект», НИЦ «Курчатовский институт») возможность выполнять расчётное обоснование безопасности АЭС при ТА в соответствии с требованиями российской нормативной базы;
 - разработать и квалифицировать расчётные модели энергоблоков для всей линейки проектов РУ ВВЭР, эксплуатируемых в России, а также для энергоблоков АЭС «Аккую» и АЭС «Руппур», строящихся за рубежом;
 - создать физико-математические модели энергоблоков ВВЭР и с их помощью выполнить детерминистические расчёты тяжёлых аварий в поддержку ВАБ-2, руководств по управлению тяжёлыми авариями, определить исходные данные для проектирования систем безопасности АЭС с ВВЭР;
 - успешно пройти экспертизы документации по версиям кода СОКРАТ в странах-импортёрах технологии ВВЭР (Финляндия, Венгрия, Египет и др.);
 - выполнить расчётные исследования аварии на АЭС Фукусима-1, результаты которых были использованы японскими институтами при организации и планировании работ по ликвидации последствий тяжёлых аварий;
 - выявить эффект ложных показаний уровнемеров при тяжёлых авариях на АЭС с ВВЭР, который свидетельствует о необходимости квалификации системы измерения уровня воды в элементах РУ в условиях тяжёлых аварий и позволяет избежать ошибок в интерпретации состояния энергоблока при тяжёлых авариях по данным измерений уровня в рамках симптомно-ориентированного подхода.

Представленный в работе методический подход разработан для АЭС с ВВЭР, но имеет достаточно общий характер и поэтому может использоваться применительно к различным

типам реакторных установок и интегральным кодам.

Материал диссертации с достаточной полнотой изложен в 36 печатных работах (из них 30 - в ведущих реферируемых отечественных и зарубежном журналах из списка ВАК при Минобрнауки России, 2 - в монографиях). По результатам диссертационного исследования получено 4 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

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

Заключение принято на заседании Отделения анализа безопасности ядерных энергетических установок ИБРАЭ РАН.

Присутствовало на заседании 24 человека. Результаты голосования: «за» - 24 человека, «против» - 0 человек, «воздержалось» - 0 человек, протокол № 4 от 22.02.2024 г.

Заведующий отделением анализа безопасности
ядерных энергетических установок ИБРАЭ РАН

доктор технических наук



Киселев Аркадий Евгеньевич