

ОПЫТ ВЫПОЛНЕНИЯ АНАЛИЗОВ ТЯЖЁЛЫХ АВАРИЙ ДЛЯ РУ ВВЭР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РК СОКРАТ

**С.И. Пантюшин, А.В. Литышев, Д.Л. Гаспаров, А.В. Николаева, В.В. Астахов,
О.В. Аулова, Н.В. Букин, М.А. Быков**

Введение

В соответствии с требованиями Федеральных норм и правил в области атомной энергетики расчетный анализ тяжелых аварий для АЭС с РУ ВВЭР является обязательной частью «Отчета по обоснованию безопасности» и «Руководства по управлению запроектными (тяжелыми) авариями». Материалы по анализу тяжелых аварий также входят в состав технического проекта АС и РУ. Объем и содержание соответствующих анализов определяются требованиями норм и правил (для российских АЭС с РУ ВВЭР), требованиями контракта (для зарубежных АЭС с РУ ВВЭР). Номенклатура и критерии для анализов определяются в составе ТЗ на АС и РУ, а также требованиями законодательства в области использования атомной энергии.

Для выполнения полноценного расчетного обоснования ЗПА (включая ТА) требуется интегральный расчетный код, который должен соответствовать требованиям нормативных документов по верификации и аттестации (РД-03-33-2008, РД-03-34-2000), а также позволять получать данные, необходимых для представления информации в объеме, регламентируемом требованиями к составу отчета по обоснованию безопасности (НП-006-15).

Наибольший интерес для ОКБ «ГИДРОПРЕСС», как организации Главного конструктора РУ, представляет анализ внутрикорпусной стадии ТА с оценкой времени наступления характерных событий, поведения основных параметров РУ, выхода за пределы корпуса массы и энергии теплоносителя и материалов активной зоны (после разрушения корпуса реактора).

В настоящее время для выполнения задач расчётного моделирования ТА в ОКБ «ГИДРОПРЕСС» используется аттестованный в Ростехнадзоре расчетный код СОКРАТ/В1.

Совместно с разработчиками кода СОКРАТ – ИБРАЭ РАН проводятся работы по верификации, модернизации и совершенствованию кода. С учетом внедрения новых модулей и моделей круг задач, решаемых в ОКБ «ГИДРОПРЕСС» с использованием РК СОКРАТ, постоянно расширяется.

После аварии на АЭС «Фукусима» Дайичи особое внимание уделяется обоснованию безопасности действующих и проектируемых АЭС с РУ ВВЭР при ЗПА, включая ТА, а следовательно, за последние 5 лет объем и номенклатура расчетных анализов с использованием кода СОКРАТ значительно расширились.

В соответствии с требованиями ФНП в ОКБ «ГИДРОПРЕСС» выполняется комплекс расчетов ТА для проектируемых и действующих АЭС с РУ ВВЭР. Для каждого рассматриваемого сценария проводится оценка эффективности и достаточности предлагаемых мер, проводится оценка на основе критериев успешности и разрабатываются исходные данные для последующего анализа водородной взрывобезопасности, целостности защитной оболочки и радиологических последствий.

Дополнительно проводится анализ отдельных процессов и явлений, характерных для тяжелых аварий, которые могут являться потенциальной угрозой для барьера на пути распространения продуктов деления – границы теплоносителя первого контура или защитной оболочки.

Основные работы по анализу ТА в ОКБ «ГИДРОПРЕСС» в 2017 году Модернизация и усовершенствование расчетного кода СОКРАТ/В1

В 2017 году выполнен большой объем работ, направленный на актуализацию матрицы верификации и доработку теплогидравлического модулей РАТЕГ и

тяжелоаварийного модуля СВЕЧА (работы выполнялись совместно с ИБРАЭ РАН). Проведен большой объем верификационных расчетов направленных на повышение адекватности и достоверности получаемых результатов при сравнении с эталонными данными, полученными на крупномасштабных стендах.

Специалисты ОКБ «ГИДРОПРЕСС» и ИБРАЭ РАН участвуют в международных проектах NEA/OECD (ATLAS, PKL, BSAF, TMI-2, FUMAC и т.д.) с целью расширения базы данных по экспериментам, повышение адекватности моделирования и демонстрации возможностей кода для зарубежных стран (включая заказчиков проектов АЭС с РУ ВВЭР).

В 2017 году был завершен проект NEA/OECD ATLAS, по результатам которого проведена качественная и количественная оценка точности результатов с использованием РК СОКРАТ/В1 по сравнению с другими теплогидравлическими кодами (более 30 международных организаций и более 15 программных кодов). Результаты, полученные с использованием РК СОКРАТ/В1 в ОКБ «ГИДРОПРЕСС» и ИБРАЭ РАН вошли в 5-ку лучших среди всех участников проекта.

Значительное внимание уделяется работам, выполняемым ОКБ «ГИДРОПРЕСС» направленным на развитие методической части и расширения номенклатуры исследуемых явлений и процессов.

Выполнение расчетного обоснования ВАБ-2

В 2017 году для проекта АЭС «Бушер-2» впервые в ОКБ «ГИДРОПРЕСС» выполнено расчетно-аналитическое обоснование вероятностного анализа безопасности второго уровня (ВАБ-2). Разработаны методические подходы к выполнению такого рода анализов, которые в дальнейшем будут применяться для проектов АЭС с РУ ВВЭР.

Основной задачей работ являлось выполнение расчетного анализа тяжёлых аварий в поддержку вероятностного анализа безопасности второго уровня АЭС «Бушер-2», разработка соответствующих отчетных материалов для использования их Заказчиком в пакете отчетной документации по вероятностному анализу безопасности второго уровня.

Выполнены работы по расчетному анализу тяжелых аварий на внутрикорпусной и внекорпусной стадии аварии (с учетом выхода и наработки ПД, оценки водорода и процессов в УЛР). Выполнен анализ дозовых нагрузок с использованием аттестованных методик и моделей. Полученные результаты работ переданы Генеральному проектировщику АЭС для использования в формировании окончательного ВАБ-2 для проекта. Работы выполнены на высоком научно-техническом уровне и были приняты Заказчиком с первого предъявления.

Расчетные исследования феноменологических процессов, протекающих при тяжёлых авариях на АЭС с РУ ВВЭР-1000

В 2017 году в ОКБ «ГИДРОПРЕСС» были произведены расчётные исследования феноменологических процессов, протекающих при тяжёлых авариях на АЭС с РУ ВВЭР-1000. Исследования включали в себя исследования в области энергетического и неэнергетического взаимодействия расплава и теплоносителя, исследования поведения парогенератора в условиях тяжёлых аварий, анализы чувствительности, а также исследования по анализу мер по управлению тяжёлыми авариями.

По результатам исследований в области взаимодействия расплава и теплоносителя показано, что:

- нагрузки, возникающие в результате энергетического взаимодействия расплава с теплоносителем для определяющих ТА не представляют опасности для целостности корпуса реактора РУ ВВЭР-1000 и его крепежных элементов;
- ввиду отсутствия нарушения целостности корпуса реактора в случае наличия паровых взрывов для определяющих сценариев ТА, можно сделать вывод о том, что повреждение ЗО по сценарию α -типа исключено для РУ ВВЭР-1000.

В рамках исследований поведения парогенератора в условиях тяжёлых аварий были определены условия, при которых возможно нарушение целостности трубок парогенератора.

Также были проведены расчётные анализы последствий протекания аварий в создавшихся условиях и разработаны меры по управлению подобными авариями.

В ОКБ «ГИДРОПРЕСС» был выполнен анализ чувствительности для ТА на АЭС с РУ ВВЭР-1000 с применением РК СОКРАТ/В1, выполнена апробация методических подходов и анализов результатов. Задачей данного исследования являлось определение диапазона изменения ключевых параметров расчета при варьировании входных параметров в пределах их неопределенностей и определение степени влияния каждой из неопределенностей на рассматриваемые параметры расчета для определяющих сценариев ТА.

Полученные результаты показывают адекватность методики, а также возможность проведения анализов чувствительности используемых расчетных моделей к изменению исходных параметров, практическую возможность обработки и интерпретации результатов. Выполненные анализы чувствительности продемонстрировали важность при оценке корректности моделирования сценариев ТА при помощи используемых ПС и создают основу для сокращения общего количества необходимых численных исследований в расчетном анализе ТА, а также повышения достоверности и предсказуемости результатов.

Для широкого спектра режимов тяжелых аварий были проанализированы меры по управлению аварией (снижение давления в первом контуре, исключение повышения давления в защитной оболочке, использование систем подпитки первого контура и т.д.). Для каждого режима были представлены рекомендации по оптимальному использованию имеющихся и проектируемых систем, а также сделаны выводы о выполнении приемочных критериев и рекомендации по включению в инструкции по управлению ТА.

Сводная информация

Основными направлениями работ ОКБ «ГИДРОПРЕСС» в части ТА являлись:

- доработка и уточнение расчетных моделей, описаний программы и последующий процесс лицензирования расчетного кода СОКРАТ/В1 у Финского Заказчика проекта АЭС «Ханхикиви-1»;

- доработка лицензионных материалов по анализам тяжелых аварий для проекта АЭС «Ханхикиви-1» по итогам взаимодействия с Финским Заказчиком;

- разработка материалов отчета по обоснованию безопасности и тематических отчетов в части анализа отдельных процессов и явлений при тяжелых авариях для проектов АЭС «Бушер-2» и АЭС «Эль Дабаа»;

- разработка материалов по анализу запроектных и тяжелых аварий в части реализации «Актуализированных мероприятий по повышению безопасности при ЗПА и ТА» для Российских АЭС с РУ ВВЭР (для энергоблоков №1-4 Ростовской АЭС), материалов по продлению срока эксплуатации (Калининская АЭС блок №2, Балаковская АЭС блок №3), материалов ООБ (энергоблок №4 Ростовской АЭС), проведены взаимодействия с надзорным органом в части ранее выполненных работ для энергоблоков АЭС с РУ ВВЭР-1000;

- материалы в части обоснования выбора аварийных контрольно-измерительных приборов для РУ ВВЭР-1000 (Бушер-2), ВВЭР-1200 (АЭС «Пакш-2», АЭС «Эль-Дабаа»);

- исходные данные для Генеральных проектировщиков АЭС в части систем управления тяжелыми авариями (УЛР, система пассивного отвода тепла от защитной оболочки (СПОТ ЗО), контаймент, пассивные каталитические рекомбинаторы водорода (ПКРВ) и система контроля концентрации водорода (СККВ)) для проекта АЭС «Бушер-2» и уточнены для проекта АЭС «Ханхикиви-1»;

Основными Заказчиками выступили – АО «Концерн Росэнергоатом», АО «АТОМПРОЕКТ», RAOS Project Oy, АО ИК АСЭ.

Выводы

За последние два десятилетия в ОКБ «ГИДРОПРЕСС» накоплен большой опыт выполнения анализов ЗПА, включая ТА для АЭС с РУ ВВЭР. С учетом длительного положительного опыта использования, успешной аттестации в «Ростехнадзоре», а также

широкого спектра возможностей в качестве базового тяжелоаварийного кода в ОКБ «ГИДРОПРЕСС» используется РК СОКРАТ/В1.

Опыт участия в международных стандартных задачах (проект ATLAS/OECD) и совместных докладах с разработчиками и пользователями расчетных теплогидравлических и тяжелоаварийных кодов показывает, что код СОКРАТ адекватно моделирует основные теплогидравлические и физико-химические процессы в РУ по сравнению другими кодами.

В рамках границ проектирования ОКБ «ГИДРОПРЕСС», как Главного конструктора РУ ВВЭР, с использованием кода СОКРАТ/В1 сегодня решаются следующие задачи:

- обоснование безопасности реакторной установки в ходе тяжелых аварий;
- разработка расчетного обоснования ВАБ-2;
- обоснование аварийных инструкций для тяжелых аварий (РУТА);
- определение параметров массы и энергии расплава, теплоносителя и водорода, поступающих из РУ в ЗО;
- обоснование эффективности и работоспособности системы внутрикорпусного удержания расплава;
- обоснование эффективности мер по управлению тяжелыми авариями;
- выполнение НИОКР и других работ, направленных на поддержку проектирования и эксплуатации АЭС с РУ ВВЭР.

В 2017 году продолжены работы по разработке расчетных моделей и выполнению анализов тяжелых аварий с использованием РК СОКРАТ/В1 с использованием подходов и рекомендаций МАГАТАЭ. В ОКБ «ГИДРОПРЕСС» данный процесс формализован и обеспечивает заметное снижение влияния человеческого фактора на результаты, а следовательно сокращает возможность появления ошибочных результатов.

Список принятых сокращений

АЭС	–	атомная электростанция (АС);
ВАБ	–	вероятностный анализ безопасности
ВВЭР	–	водо-водяной энергетический реактор;
ЗО	–	защитная оболочка
ЗПА	–	запроектная авария;
ПД	–	продукты деления
ПС	–	программное средство
РУ	–	реакторная установка;
РУЗА	–	руководство по управлению запроектными авариями;
РУТА	–	руководство по управлению тяжелыми авариями.
ТА	–	тяжелая авария
УЛР	–	устройство локализации расплава
ФНП	–	федеральные нормы и правила