

В. И. Скалозубов¹, В. Н. Колыханов¹,
Н. И. Власенко², Хадж Фараджаллах
Даббах А.³

¹ Інститут проблем безпеки АЕС НАН України

² ГП НАЕК «Енергоатом»

³ Одеський національний політехнічний університет

Основные принципы и требования к средствам моделирования и руководствам по управлению тяжелыми авариями на АЭС с ВВЭР

Дан анализ международного опыта моделирования основных процессов при тяжелых авариях для разработки руководств и симптомно-ориентированных инструкций по их управлению. Определена необходимость дополнительных требований к средствам расчетного и экспериментального моделирования при разработке и обосновании алгоритмов управления тяжелыми авариями.

Ключевые слова: тяжелая авария (ТА); расчетные средства моделирования тяжелых аварий (РСМТА); экспериментальные средства моделирования тяжелых аварий (ЭСМТА); водо-водяной энергетический реактор (ВВЭР); руководства по управлению тяжелыми авариями (РУТА); исходные события (ИС); аварийные последовательности (АП); алгоритмы управления тяжелыми авариями (АУТА).

В. І. Скалозубов, В. М. Колиханов, М. І. Власенко,
Хадж Фараджаллах Даббах А.

Основні принципи й вимоги до засобів моделювання й посібників з керування важкими аваріями на АЕС із ВВЕР

Наведено аналіз міжнародного досвіду моделювання головних процесів важких аварій для розроблення посібників і симптомно-орієнтованих інструкцій з їх керування. Визначено необхідність додаткових вимог щодо засобів розрахункового та експериментального моделювання під час розроблення й обґрунтування алгоритмів керування важкими аваріями.

Ключові слова: важка аварія (ВА); розрахункові засоби моделювання важких аварій (РЗМВА); експериментальні засоби моделювання важких аварій (ЕЗМВА); водо-водяний енергетичний реактор (ВВЕР); посібники з керування важкими аваріями (ПКВА); вихідні події (ВП); аварійні послідовності (АП); алгоритми керування важкими аваріями (АКВА).

© В. И. Скалозубов, В. Н. Колыханов, Н. И. Власенко,
Хадж Фараджаллах Даббах А., 2010

Нормативными требованиями ядерной энергетики Украины (ОПБУ-2008, ПБЯ) и рекомендациями МАГАТЭ (IAEA-TECDOC-955, IAEA-TECDOC-953) определена необходимость разработки руководств и (или) инструкций по управлению тяжелыми авариями.

Анализ известных результатов исследований и моделирования тяжелых аварий (например, [1]–[13]) позволяет обобщить основные требования к расчетным и экспериментальным средствам их моделирования на ВВЭР. Расчетные средства моделирования тяжелых аварий (коды) могут моделировать как отдельные процессы и (или) этапы развития тяжелых аварий (детерминизированные коды), так и в целом стадии развития тяжелой аварии (интегральные коды).

Основные требования к применимости расчетных средств моделирования тяжелых аварий (РСМТА) основаны на следующих основных принципах: адаптации, валидации, оптимальности нодализационных схем и альтернативности.

Принцип адаптации определяет необходимость соответствия расчетных моделей конструкционно-техническим характеристикам оборудования и систем (а также их конфигураций) технологическим процессам, условиям и режимам эксплуатации моделируемого объекта.

Целесообразность принципа адаптации РСМТА для моделирования тяжелых аварий на ВВЭР связана с тем, что большинство известных РСМТА разрабатывались непосредственно для других типов реакторных установок.

Основные требования к РСМТА в рамках принципа адаптации:

1) расчетные модели должны учитывать конструкционно-технические характеристики оборудования и систем (а также их конфигурации) моделируемого объекта;

2) расчетные модели должны учитывать технологические процессы, условия и режимы эксплуатации моделируемого объекта.

Принцип валидации определяет необходимость соответствия результатов расчетного моделирования экспериментальным данным, полученным в адекватных натуральных условиях, и (или) опытным данным на натуральных установках.

Целесообразность принципа валидации РСМТА определяется:

отсутствием математических моделей РСМТА (в том числе возможности их расчетной реализации), полностью адекватных реальным процессам в натуральных условиях;

ограничением области применения эмпирических и полумемпирических соотношений для моделирования отдельных процессов условиями их экспериментальной верификации.

Основные требования к РСМТА в рамках принципа валидации:

1) применение РСМТА должно быть обосновано результатами их валидации к условиям ВВЭР, предполагающей сопоставление результатов расчетного моделирования с соответствующими эмпирическими данными, полученными на экспериментальных стендах (адекватных натуральным условиям) и (или) в натуральных условиях на действующем оборудовании;

2) конструкционно-технические характеристики экспериментальных стендов и условия проведения экспериментов, используемых для валидации РСМТА, должны соответствовать (или быть подобными) натуральным условиям развития тяжелой аварии;

3) используемые для валидации РСМТА данные, полученные в натурных условиях, должны отражать процессы и этапы, характерные для развития тяжелой аварии;

4) реализация валидации РСМТА должна быть основана на обобщенных матрицах валидации, которые содержат: основные этапы и/или процессы, происходящие при возникновении и развитии тяжелой аварии;

экспериментальные данные и/или данные по опыту эксплуатации, соответствующие этапам и/или процессам при тяжелой аварии, в том числе область применимости этих данных;

критерии валидации;

5) критерии валидации определяют уровень соответствия результатов расчетного моделирования и эмпирических данных (полностью удовлетворительное, удовлетворительное, неудовлетворительное соответствие).

Уровни соответствия определяются комплексно по:

абсолютным и относительным значениям расхождений расчетных и эмпирических данных;

показателями погрешностей и неопределенности эмпирических данных;

значимости процессов/этапов для последствий тяжелых аварий.

Принцип оптимальности нодализационных схем определяет необходимость независимости результатов расчетного моделирования от принимаемых нодализационных схем при реализации РСМТА.

Целесообразность принципа оптимальности нодализационных схем определяется необходимостью устранения зависимости результатов моделирования от детализации нодализационных схем и «эффектов пользователя». Основное требование к РСМТА в рамках этого принципа заключается в оптимизации нодализационных схем для достижения независимости результатов расчетного моделирования от них в пределах погрешностей/неопределенностей моделируемых параметров.

Принцип альтернативности определяет необходимость проведения аналогичного расчетного моделирования другими РСМТА, удовлетворяющими принципам адаптации, валидации и оптимальности нодализационных схем.

Целесообразность принципа альтернативности объясняется тем, что по опыту моделирования, во-первых, не всегда удается достигнуть полного соответствия принципам адаптации и валидации, а во-вторых, разные РСМТА, удовлетворяющие требованиям их применимости для моделирования тяжелых аварий, могут давать разные результаты моделирования одинаковых процессов/этапов развития тяжелой аварии. В случае таких расхождений должны приниматься более консервативные результаты, т. е. наихудшие условия для последствий моделируемого процесса/этапа.

Необходимо отметить, что до настоящего времени отсутствуют общепринятые принципы и требования к сертификации средств моделирования тяжелых аварий. Согласно передовому международному опыту и рекомендациям МАГАТЭ, обычно при выборе расчетных кодов нужно учитывать:

1) установление потенциальных областей применения расчетных кодов;

2) определение характерных для каждой области применения критериев приемлемости;

3) классификация и окончательный отбор потенциальных кодов.

Экспериментальные средства моделирования тяжелых аварий (ЭСМТА) основаны на эмпирических результатах

поведения процессов при тяжелых авариях, полученных на модельных стендах/установках.

Основные требования к применимости ЭСМТА:

1) выполнение *принципа адекватности* конструктивно-технических характеристик модельных стендов/установок и условий проведения экспериментов натурным характеристикам и условиям.

Выполнение принципа адекватности обосновано при идентичности критериев подобия моделируемых процессов, учитывающих конструктивно-технические характеристики оборудования/систем и условия протекания процессов на экспериментальных стендах/установках и в натурных условиях;

2) ЭСМТА должны идентифицировать определяющие параметры протекания процессов/этапов тяжелой аварии, включая показатели погрешностей и неопределенностей.

Учитывая определенные трудности полного обеспечения всех принципов применимости РСМТА и ЭСМТА, обосновано использование на практике комбинированных расчетно-экспериментальных средств моделирования.

Основные требования к руководствам по управлению тяжелыми авариями (РУТА) заключаются в обоснованном идентифицировании:

1) ИС/групп исходных событий (ИС) и критериев (условий) возникновения тяжелых аварий;

2) характерных признаков изменения технологических параметров и значений параметров, контролируемых системами измерений/диагностики, при возникновении ИС/группы ИС тяжелых аварий (первичные симптомы);

3) АП ИС/групп ИС и характерных этапов (фаз) и процессов их развития, определяющих последствия тяжелых аварий;

4) характерных признаков изменения технологических параметров и значений параметров, контролируемых системами измерений/диагностики, этапов и определяющих процессов развития тяжелых аварий (вторичные симптомы);

5) набора и последовательности реализации необходимых функций безопасности для ликвидации или ограничения последствий аварийных последовательностей (АП) тяжелых аварий, обеспечиваемых критическими конфигурациями систем;

6) алгоритмов управления АП тяжелых аварий для ликвидации или ограничения их последствий;

7) организационно-технических мероприятий по повышению эффективности управления тяжелыми авариями.

Целесообразность такой идентификации связана со следующими положениями:

1. ИС тяжелых аварий являются промежуточными событиями запроектных аварий, вызванных внутренними и внешними событиями при нарушениях нормальных и безопасных условий эксплуатации, которые при определенных условиях развития и отказе критических функций безопасности могут привести к повреждению топлива. Следовательно, этапы тяжелых аварий определяются «предысторией» возникновения и развития ИС запроектных аварий.

Идентификация и группирование ИС тяжелых аварий определяются:

начальными условиями развития возможных АП запроектных аварий, приводящих к повреждению активной зоны;

характеристиками поврежденной зоны (критерии по объему и конфигурации повреждения активной зоны).

Первичные симптомы должны отражать факт повреждения активной зоны в процессе развития запроектной

аварии и удовлетворять принципам адекватности и минимальной достаточности, согласно которым набор и последовательность реализации симптомов в целом должны быть адекватными только для идентифицируемого ИС, а также минимально достаточными для упрощения и, соответственно, более надежной идентификации ИС тяжелой аварии.

2. Каждому ИС/группе ИС тяжелой аварии соответствует в общем случае целый спектр возможных АП, который определяется:

отказами отдельных систем/оборудования, влияющими на развитие и последствия тяжелой аварии;

действиями персонала;

дополнительными нарушениями пределов нормальной и безопасной эксплуатации и процессами, сопровождающими развитие тяжелой аварии (горение, взрывы и т. п.).

Критериями успеха АП при тяжелых авариях являются: целостность физических барьеров безопасности (корпуса, контайнмента);

устойчивое подкритичное состояние топлива (кориума);

отсутствие сверхнормативных выбросов и сбросов в окружающую среду.

В общем случае каждая АП тяжелой аварии состоит из трех укрупненных стадий:

процессов в реакторе и 1-м контуре;

процессов в контайнменте;

процессов в окружающей среде.

На каждой стадии могут реализовываться различные взаимосвязанные физико-химические, гидрогазодинамические, теплофизические, механические и другие процессы.

Таким образом, РУТА должны определять весь значимый для условий безопасности спектр возможных АП, учитывающих:

ИС тяжелой аварии;

возможные отказы систем/оборудования и ошибочные действия персонала;

критерии успеха АП.

Вторичные симптомы необходимы для идентификации АП при протекании тяжелой аварии из всего возможного спектра АП при идентифицированном ИС. Вторичные симптомы, как и первичные, должны удовлетворять принципам адекватности и минимальной достаточности для обеспечения надежного и эффективного управления тяжелой аварией.

Алгоритмы управления тяжелой аварией являются основной целью РУТА, определяя конкретные действия персонала и их последовательность для идентифицированных ИС (по первичным симптомам) и АП (по вторичным симптомам).

Основные требования к алгоритмам управления тяжелыми авариями (АУТА):

1) АУТА должны учитывать «предысторию» возникновения ИС тяжелой аварии, т. е. фактическое состояние систем и оборудования, приведшее в процессе запроектной аварии с внутренними или внешними ИСА к повреждению активной зоны;

2) АУТА должны быть определены для всех возможных АП при идентифицированных ИС тяжелых аварий;

3) АУТА должны определять набор и последовательность действий персонала по:

контролю за состоянием реактора и автоматическим срабатыванием систем;

оперативному вмешательству в процесс развития тяжелой аварии;

дублированию и восстановлению возможных отказов (повреждений) критических конфигураций систем и их элементов по обеспечению необходимых функций без опасности.

РУТА должны разрабатываться на основе результатов моделирования тяжелых аварий расчетными и/или экспериментальными методами, соответствующими установленным к ним требованиям. В результате моделирования тяжелых аварий должны быть определены:

перечень ИС/групп ИС (в том числе и максимально консервативных — полное разрушение активной зоны); первичные и вторичные симптомы возникновения и развития тяжелых аварий;

АП и основные процессы при развитии тяжелой аварии, влияющие на последствия для безопасности и конечные состояния;

критические конфигурации систем, обеспечивающих выполнение необходимых функций безопасности, а также дефициты безопасности для всех возможных АП;

критерии успеха АП тяжелых аварий.

Представленные основные принципы и требования к моделированию и управлению тяжелыми авариями ответственны или могут быть дополнены базовыми принципами МАГАТЭ по разработке и обоснованию РУТА, к которым относятся [14]:

принцип превентивных и смягчающих мер по управлению тяжелой аварией;

принцип фазового развития тяжелых аварий;

принцип специфики проекта;

принцип разработки стратегии управления тяжелой аварией;

принцип диагностики состояний в процессе тяжелых аварий и др.

Дополнительно к базовым принципам на основе опыта разработки РУТА для АЭС России можно указать следующие требования:

1. РУТА должно быть полностью симптомно-ориентированным.

2. Все возможные угрозы для целостности барьеров на пути выхода продуктов деления должны быть рассмотрены в РУТА независимо от вероятности их возникновения.

3. Все возможные угрозы для целостности барьеров должны учитываться даже в том случае, если успех какой-либо стратегии управления аварией устраняет конкретную угрозу.

4. Не требуется гарантий, что стратегия управления аварией окажется успешной — ее использование должно основываться на уверенности, что положительные последствия перевесят любые негативные эффекты.

5. Различные стратегии, применяемые для устранения какой-либо конкретной угрозы, должны быть приоритизированы на основе сравнения их эффективности и последствий. Приоритезация угроз целостности барьеров на пути выхода продуктов деления должна являться основой структуры РУТА.

6. РУТА, разработанные на основе базовых принципов и основных положений, должны внедряться на АЭС независимо от любых модификаций систем и оборудования в целях управления тяжелыми авариями. Учет таких модификаций АЭС в РУТА должен быть плановым процессом с обоснованной периодичностью. К моменту начала работ над аварийными сценариями должен быть выбран и обоснован перечень доминантных аварийных сценариев, подлежащих исследованию.

Известные и предложенные в данной работе положения могут быть основой для разработки отраслевых требований и положений к руководствам по управлению тяжелыми авариями на АЭС Украины с ВВЭР.

Список литературы

1. *Nuclear Europe Worldscan*. — 1999. — № 1–2.
2. *Звонарев Ю. А.* Разработка верификационной базы данных для обоснования безопасности АЭС с ВВЭР при тяжелых авариях / Ю. А. Звонарев, М. А. Будаев, Н. П. Киселев // РНЦ «Курчатовский институт». Материалы конф. «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». — Подольск: ФГУП ОКБ «ГП», 2008.
3. *Papin J.* French Studies on High Burnup Fuel Transient Behavior under RIA Conditions / J. Papin, M. Balourdet, F. Lemoine, F. Lamare, J. Frizonett and F. Shmitz // *Nuclear Safety*. — 1996. — Vol. 37, No. 4.
4. *Звонарев Ю.* Валидация компьютерного кода ASTEC и применение для анализа безопасности АЭС с ВВЭР / Ю. Звонарев, М. Будаев, В. Кобзарь, А. Волчек // Code application and PSA methodologies. Paper No 1 The first European Review Meeting on Severe Accident Research (ERMSAR-2005) Aix-en-Provence, France, 14–16 November 2005.
5. *Кабанов Л. П.* Техническое обоснование управления тяжелыми авариями на АЭС с ВВЭР-1000 / Л. П. Кабанов, Н. А. Козлова, А. И. Суслов. — МЦЯБ — НТЦ ЯРБ РФ — РНЦ «Курчатовский институт», 2006.
6. *Vayssier G.* et al. Severe Accident Management Implementation and Expertise, AMM-SAMIME(00)-P009. European Commission, 2000.
7. *Pilch M. M.* et al. Resolution of the Direct Containment Heating for all Westinghouse Plants with Large Dry or Subatmospheric Containments. NUREG/CR-6338, 1996
8. *Драт Т.* Анализ аварии на АЭС ТМ 1–2 с помощью кода ATHLET-CD / Т. Драт, И. Д. Кляинхитпас, М. К. Кох // *Атомная техника за рубежом*. — 2007. — № 4. — С. 27–34.
9. *Семишкин В. П.* Тепломеханическое поведение корпуса ВВЭР в тяжелой аварии / В. П. Семишкин, В. В. Пажетнов, Е. А. Фризен, В. Д. Локтионов // Материалы конф. «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». — Подольск: ФГУП ОКБ «ГП», 2008.
10. Обеспечение локализирующих функций защитной оболочки НВ АЭС-2 при ЗПА с течами из реакторной установки // ФГУП «Атомэнергопроект» — ИПБЯЭ РНЦ «Курчатовский институт»: Материалы конф. «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». — Подольск: ФГУП ОКБ «ГП», 2008.
11. *EUROPEAN UTILITY REQUIREMENTS FOR LWR NUCLEAR POWER PLANTS*. — 2001. — Rev. C, Vol. 2.
12. *Звонарев Ю.* Валидация компьютерного кода ASTEC и применение для анализа безопасности АЭС с ВВЭР / Ю. Звонарев, М. Будаев, В. Кобзарь, А. Волчек // Code application and PSA methodologies. Paper No 1 The first European Review Meeting on Severe Accident Research (ERMSAR-2005) Aix-en-Provence, France, 14–16 November 2005.
13. *Носатов В.* Анализ тяжелых аварий реакторов ВВЭР с использованием кода MELCOR-1.8.5 // В. Носатов, В. Стрижов. — М.: ИБРАЭ РАН, 2009.
14. *Implemation of accident management programmes in nuclear power plants* —Vienna: IAEA, 2004.

Надійшла до редакції 09.03.2010.