

Метод идентификации перечней исходных событий тяжелых аварий, основанный на анализе причин аварии на АЭС «Фукусима-1»

На основе предварительного анализа причин аварии на АЭС «Фукусима-1» обоснованы ограничения традиционных подходов при разработке руководств (инструкций) по управлению тяжелыми авариями. Предложен перспективный метод идентификации перечней исходных событий тяжелых аварий, учитывающий предысторию развития запроектных аварийных последовательностей и состояние систем на момент начала тяжелой аварии.

Ключевые слова: исходные события аварий; тяжелая авария; руководства (инструкции) по управлению тяжелыми авариями.

В. И. Скалозубов, С. В. Барбашев

Метод ідентифікації переліку вихідних подій важких аварій, що ґрунтується на аналізі причин аварії на АЕС «Фукусіма-1»

На основі попереднього аналізу причин аварії на АЕС «Фукусіма-1» обґрунтовано обмеження традиційних підходів до розробки керівництв (інструкцій) з управління важкими аваріями. Запропоновано перспективний метод ідентифікації переліків вихідних подій важких аварій, який враховує передісторію розвитку запроектних аварійних послідовностей та стан систем на момент початку важкої аварії.

Ключові слова: вихідні події аварій; важка аварія; керівництва (інструкції) з управління важкими аваріями.

© В. И. Скалозубов, С. В. Барбашев, 2012

Разработка руководств (симптомно-ориентированных инструкций) по управлению тяжелыми авариями (РУТА/СОАИ) получила активное развитие в передовых ядерных державах (Германия, США, Финляндия, Франция, Япония и др.) после Чернобыльской аварии. Однако последние события на АЭС «Фукусима-1» показали, что одной из основных причин произошедшей тяжелой аварии (7-й уровень шкалы INES) была недостаточная подготовленность и обеспеченность персонала к управлению подобными тяжелыми авариями (с повреждениями ядерного топлива). Отсутствие эффективной системы управления относительно маловероятными запроектными авариями, к которым относятся исходные события на АЭС «Фукусима-1», возможно, и послужило основной причиной непреднамеренно ошибочных действий персонала в процессе развития аварийных процессов, что подтверждается:

а) отсутствием оперативного и эффективного восстановления резервного обеспечения необходимого энергопитания активной части систем безопасности;

б) возникновением парагазовых взрывов и пожаров, которые привели к нарушению целостности защитных барьеров безопасности и значительным выбросам радиоактивных веществ;

в) отсутствием оперативных действий по обеспечению эффективного охлаждения бассейнов выдержки и промежуточного хранилища отработанного ядерного топлива (эти мероприятия фактически начались только после взрывов и разрушений в остановленном до аварии на ремонт блоке № 4, топливо которого было полностью перегружено в приреакторный бассейн выдержки).

Кратко повторим ход аварийных событий.

В соответствии с официальными сообщениями Японского атомно-промышленного комплекса (JAIF) и Кризисного центра МАГАТЭ исходным событием аварии 11 марта 2011 г. на энергоблоках №№ 1–4 АЭС «Фукусима-1» явилась потеря всех источников длительного электроснабжения под воздействием землетрясения с магнитудой 9 и цунами высотой более 10 м. При общем времени исходного аварийного события разрушения защитных барьеров безопасности произошли в разное время и в разных местах: расплавление топливных элементов на энергоблоке № 1 (BWR-460) — спустя 10 ч с момента начала аварии, на энергоблоках №№ 2 и № 3 (BWR-784) — спустя 79 и 80 ч, а в приреакторном бассейне выдержки энергоблока № 4 (BWR-784) — спустя 5 сут*; парагазовые взрывы, приведшие к дополнительным разрушениям защитных барьеров безопасности, произошли 12 марта на энергоблоке № 1, 14 марта — на энергоблоке № 3, 15 марта — на энергоблоке № 2 (предположительно взрывы на энергоблоках №№ 1 и 3 произошли в помещениях над защитной оболочкой реакторов, а на энергоблоке № 2 — в районе подреакторного тороидального теплообменника BWR).

Указанные различия в хронологии процессов тяжелых аварий на энергоблоках №№ 1–4 АЭС «Фукусима-1» связаны не только с проектно-конструкционными особенностями объектов, но и с различиями условий и развития исходных событий запроектных аварийных последовательностей, приведших к тяжелым авариям. Последний фактор недостаточно обоснован в РУТА/СОАИ АЭС «Фукусима-1», что является следствием ограничений сложившихся

* Ввиду отсутствия прямых методов контроля и диагностики состояния защитных барьеров безопасности такая информация является предварительной. По отдельным данным, полученным эксплуатирующей АЭС

в мировой практике традиционных подходов моделирования тяжелых аварий [1].

Ядерная энергетика Украины находится только на начальном этапе разработки руководств и инструкций по управлению тяжелыми авариями. Поэтому важно учесть опыт (в том числе и негативный) при разработке и реализации методического обеспечения РУТА/СОАИ.

Одним из ключевых вопросов разработки РУТА/СОАИ является идентификация (обоснование) перечней исходных событий и аварийных процессов тяжелых аварий (ИСА) в зависимости от предыстории развития запроектных аварийных последовательностей, приведших к повреждению ядерного топлива, снижению работоспособности и надежности систем, важных для безопасности, на момент начала тяжелой аварии. Так, до настоящего времени при моделировании и анализе тяжелых аварий на ВВЭР в качестве ИСА обычно рассматриваются большие течи 1-го контура или потеря питательной воды при конечных состояниях с повреждением топлива [2, 3]. Такой подход требует дополнительных обоснований его консервативности, так как при других ИСА (например, межконтурные течи, экстремальные воздействия и т. д.) могут создаваться «худшие» условия возникновения и развития тяжелых аварий.

В этой работе предлагается метод идентификации перечней исходных событий тяжелых аварий и пример его реализации применительно к доминантной для серийных энергоблоков с ВВЭР групп аварий.

Приведем основные положения предлагаемого методического обеспечения при формировании перечня исходных событий тяжелых аварий.

1. Перечень первичных исходных событий аварий (аварийных ситуаций), П (ИСА_{*i*}), которые при определенных условиях могут привести к недопустимым последствиям (повреждение активной зоны, сверхнормативный выброс/сброс радиационных веществ), определяется проектно-конструкторскими характеристиками энергоблока, условиями и опытом эксплуатации (в том числе статистикой отказов систем, важных для безопасности, и нарушений безопасных условий эксплуатации). Идентификация перечня П (ИСА_{*i*}) осуществляется обычно в рамках вероятностного анализа безопасности (ВАБ 1-го уровня).

Пример типового перечня П (ИСА_{*i*}) доминантных для безопасности групп аварий с течами теплоносителя серийных энергоблоков с ВВЭР-1000 [1]:

большая неизолируемая течь 1-го контура в гермообъем (ГО) вплоть до двухстороннего гильотинного разрыва главного циркуляционного трубопровода (ГЦТ) — S1;

средняя неизолируемая течь 1-го контура в ГО, компенсируемая системой аварийного охлаждения зоны насосами высокого давления (САОЗ ВД), — S2;

малая течь 1-го контура в ГО, компенсируемая системой подпитки-продувки реактора (ТК), — S3;

малая течь 1-го контура в ГО, компенсируемая системой ТК, — S4;

течь 1-го контура во 2-й, компенсируемая САОЗ ВД (эквивалентная авария — отрыв крышки коллектора парогенератора), — T42;

малая течь из 1-го контура во 2-й, компенсируемая системой ТК, — T41.

2. Каждая *i*-я ИСА (обобщенная группа ИСА) имеет определенный *j*-й набор возможных запроектных аварийных последовательностей (АП), приводящих при отказах критических конфигурирующих систем (ККС), которые обеспечивают выполнение необходимых функций без-

опасности (ФБ), к недопустимому повреждению ядерного топлива. Конечные состояния этих АП и являются исходными событиями тяжелых аварий с повреждением топлива (ИСТА_{*ij*}).

Таким образом, перечень исходных событий развития тяжелых аварий

$$П (ИСТА_{ij}) = П (ИСА_i) \cdot АП_{ij}, \quad (1)$$

где АП_{*ij*} — количество *j*-х запроектных аварийных последовательностей в *i*-й группе ИСА, приводящих к недопустимому повреждению топлива.

3. Вероятность (суммарная частота) возникновения исходных событий тяжелой аварии **I (ИСТА)** определяется частотой возникновения *i*-х первичных ИСА **I (ИСА_{*i*})** и вероятностью отказа ККС ФБ в *j*-х аварийных последовательностях до начала повреждения топлива P_{ij} (ККС_{*k*}):

$$I (ИСТА) = \sum_{i=1}^n I (ИСА_i) \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^l P_{ij} (ККС_k), \quad (2)$$

где *i* = 1, ..., *n* — количество первичных ИСА (групп ИСА); *j* = 1, ..., *m* — количество аварийных последовательностей при ИСА_{*i*}, приводящих к тяжелой аварии; *k* = 1, ..., *l* — количество возможных отказов ККС ФБ в *j*-й АП; $P_{ij}(ККС_k)$ — вероятность отказа *k*-й ККС ФБ в *j*-й АП при ИСА_{*i*}.

Пример применения предложенного метода идентификации перечня исходных событий тяжелых аварий для доминантных групп аварий на ВВЭР со средней межконтурной течью (ИСА-Т42) приведен ниже. С учетом (1), результатов моделирования АП и деревьев событий в ВАБ 1-го уровня серийного энергоблока с ВВЭР-1000 [1] перечень П (ИСТА) для ИСА-Т42 имеет следующий вид:

1) группа ИСТА1 (ИСА-Т42) — повреждение топлива при отказе аварийной защиты (АЗ) и отказе ККС, обеспечивающих ФБ «Управление давлением 1-го контура», и/или отказ ККС, обеспечивающих ФБ «Отвод тепла по 2-му контуру» и/или отказ ККС, обеспечивающих ФБ «Управление реактивностью» и/или *полная потеря электропитания*;

2) группа ИСТА2 (ИСА-Т42) — повреждение топлива при отказе изоляции аварийного ПГ и отказе ККС, обеспечивающих ФБ «Отвод тепла по 2-му контуру», и/или отказ ККС, обеспечивающих ФБ «Управление давлением 1-го контура», и/или отказ ККС, обеспечивающий ФБ «Управление реактивностью», и/или отказ ККС, обеспечивающих ФБ «Обеспечение запаса теплоносителя и отвода тепла в 1-м контуре», и/или *полная потеря электропитания*;

3) группа ИСТА3 (ИСА-Т42) — повреждение топлива при отказе ККС, обеспечивающих ФБ «Отвод тепла по 2-му контуру», и/или отказ ККС, обеспечивающих ФБ «Управление давлением 1-го контура», и/или отказ ККС, обеспечивающих ФБ «Управление реактивностью», и/или отказ ККС ФБ «Обеспечение запаса теплоносителя» и отвода тепла по 1-му контуру», и/или *полная потеря электропитания*;

4) группа ИСТА4 (ИСА-Т42) — повреждение топлива при отказе ККС ФБ «Управление реактивностью» и/или отказе ККС ФБ «Обеспечение запаса теплоносителя и отвода тепла по 1-му контуру» и/или *полная потеря электропитания*;

5) группа ИСТА5 (ИСА-Т42) — повреждение топлива при отказе ККС ФБ «Обеспечение запаса теплоносителя и отвода тепла по 1-му контуру» и/или *полная потеря электроэнергии*.

Выводы

1. Для моделирования развития тяжелых аварий и разработки соответствующих организационно-технических мероприятий по их управлению необходимо учитывать состояние систем, обеспечивающих выполнение необходимых функций безопасности, которое определяет как начальные условия тяжелой аварии (в том числе состояние топлива), так и возможность задействования оборудования систем, важных для безопасности и управления тяжелой аварией.

2. Во всех группах перечней исходных событий тяжелых аварий присутствуют аварийные ситуации с полной потерей энергоснабжения. Актуальность аварийных ситуаций с полной потерей электроснабжения подтверждается недавней большой аварией на АЭС «Фукусима-1».

Список использованной литературы

1. Скалозубов В. И. Основы управления запроектными авариями: Монография / В. И. Скалозубов, А. А. Ключников, В. Н. Колыханов. — Чернобыль: Ин-т проблем безопасности НАНУ, 2010. — 400 с.
2. Обеспечение локализирующих функций защитной оболочки НВАЭС-2 при запроектной аварии с течами из реакторной установки / (ФГУП «Атомэнергопроект» ИПБЯЭ РНЦ «Курчатовский институт» // Материалы конф. «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». — Подольск (Россия): ФГУП ОКБ «ГП», 2008.
3. 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.

Поступила в редакцию 31.08.2011.