

**В. И. Скалозубов, В. Н. Ващенко\*, С. С. Яровой\*, В. В. Злочевский\***

*Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Киев*

*\*Государственная экологическая академия последипломного образования и управления, Киев*

## **МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ ПЕРЕЧНЕЙ ИСХОДНЫХ СОБЫТИЙ ТЯЖЕЛЫХ АВАРИЙ НА ОСНОВЕ ОПЫТА АЭС ФУКУСИМА-1**

На основе предварительного анализа основных причин 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 управления тяжелыми авариями.

**Актуальность вопроса.** Разработка руководств/симптомно-ориентированных инструкций по управлению тяжелыми авариями (РУТА/СОАИ) получила широкое развитие в передовых ядерных державах (Германия, США, Финляндия, Франция, Япония и др.) и активное развитие после Чернобыльской аварии. Однако последние события на АЭС Фукусима-1 показали, что одной из основных причин произошедшей большой аварии (7-й уровень шкалы INES) была недостаточная подготовленность и обеспеченность персонала по управлению подобными тяжелыми авариями (с повреждениями ядерного топлива). Отсутствие эффективной системы управления относительно маловероятными запроектными авариями, к которым и 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) фактом произошедших парогазовых взрывов и пожаров, которые привели к нарушению целостности защитных барьеров безопасности и значительным выбросам радиоактивных продуктов;

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

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 явилось потеря всех источников длительного электроснабжения под воздействием девятибалльного землетрясения и цунами. 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) произошло спустя 10 часов с момента начала аварии, на энергоблоках № 2 (BWR-784) и № 3 (BWR-784) спустя 79 и 80 часов, а в приреакторном бассейне выдержки энергоблока № 4 (BWR-784) спустя 5 суток<sup>1</sup>; парогазовые взрывы, приведшие к дополни-

© В. И. Скалозубов, В. Н. Ващенко, С. С. Яровой, В. В. Злочевский, 2012

<sup>1</sup> Ввиду отсутствия прямых методов контроля и диагностики состояния защитных барьеров безопасности такая информация является предварительной. По отдельным данным, полученным эксплуатирующей АЭС Фукусима-1 компании ТЕРСО, повреждение топлива на энергоблоках № 1 - 3 началось уже в первые часы аварии, которое привело и к образованию отверстий в корпусах реакторов.

тельным разрушениям защитных барьеров безопасности, произошли соответственно 12 марта на энергоблоке № 1, 14 марта на энергоблоке № 3 и 15 марта на энергоблоке № 2 (предположительно взрывы на энергоблоках № 1 и 3 произошли в помещениях над защитной оболочкой реакторов, а энергоблоке № 2 – в районе подреакторного тороидального теплообменника ВВЭР).

Указанные различия в хронологии процессов тяжелых аварий на энергоблоках № 1 - 4 АЭС Фукусима-1 связаны не только с проектно-конструкционными особенностями объектов, но и в различии условий и развития исходных событий запроектных аварийных последовательностей, приведших к тяжелым авариям. Последний указанный фактор недостаточно обоснован в РУТА/СОАИ АЭС Фукусима-1, что является следствием ограничений сложившейся 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 в зависимости от предыстории развития запроектных аварийных последовательностей, приведших к повреждению ядерного топлива и состояния работоспособности и надежности систем, важных для безопасности, на момент начала тяжелой аварии. Так, до настоящего времени при моделировании и анализе тяжелых аварий на ВВЭР обычно в качестве ИСА рассматриваются большие течи 1-го контура или потеря питательной воды при конечных состояниях с повреждением топлива (см., например, [2, 3 и др.]). Такой подход требует дополнительных обоснований его консервативности, так как при других ИСА (например, межконтурные течи, экстремальные воздействия и т.д.) могут создаться «худшие» условия возникновения и развития тяжелых аварий.

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

**Основные положения** предлагаемого методического обеспечения при формировании перечня исходных событий тяжелых аварий:

1. Перечень первичных исходных событий аварий/аварийных ситуаций, П (ИСА<sub>i</sub>), которые при определенных условиях могут привести к недопустимым последствиям (повреждение активной зоны, сверхнормативный выброс/сброс радиационных продуктов), 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<sub>i</sub>) осуществляется обычно в рамках вероятностного анализа безопасности (ВАБ 1-го уровня). Пример типового перечня П (ИСА<sub>i</sub>) доминантных для безопасности групп аварий с течами теплоносителя серийных энергоблоков с ВВЭР 1000 следующий [1]:

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

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

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

4) малая течь 1-го контура в ГО, компенсируемая системой ТК, – S4;

5) течь 1-го контура во 2-й, компенсируемая САОЗ ВД (эквивалентный размер – отрыв крышки коллектора парогенератора - ПГ), – T42;

6) 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 критиче-

ских конфигурирующих систем (ККС), обеспечивающих выполнение необходимых функций безопасности (ФБ), к недопустимому повреждению ядерного топлива. Конечные состояния этих АП и являются исходными событиями тяжелых аварий с повреждением топлива (ИСТА<sub>ij</sub>).

Таким образом, перечень исходных событий развития тяжелых аварий

$$P(\text{ИСТА}_{ij}) = P(\text{ИСА}_i) \cdot \text{АП}_{ij}, \quad (1)$$

где АП<sub>ij</sub> – 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<sub>i</sub>) и вероятностью отказа ККС ФБ в j-х аварийных последовательностях до начала повреждения топлива P<sub>ij</sub>(ККС<sub>k</sub>):

$$I(\text{ИСТА}) = \sum_{i=1}^n I(\text{ИСА}_i) \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^l P_{ij}(\text{ККС}_k), \quad (2)$$

где i = 1, ..., n – количество первичных ИСА/групп ИСА; j = 1, ..., m – количество аварийных последовательностей при ИСА<sub>i</sub>, приводящих к тяжелой аварии; k = 1, ..., l – количество возможных отказов ККС ФБ в j-й АП; P<sub>ij</sub>(ККС<sub>k</sub>) – вероятность отказа k-й ККС ФБ в j-й АП при ИСА<sub>i</sub>.

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 формулы (1) и результатов моделирования АП и деревьев событий в ВАБ 1-го уровня серийного энергоблока с ВВЭР-1000 [1] перечень P(ИСТА) для ИСА-Т42 имеет следующий вид:

1) группа ИСТА1 (ИСА-Т42) – повреждение топлива при отказе аварийной защиты (АЗ) и отказе ККС, обеспечивающих ФБ «Управлением 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 электроснабжения*;

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 электроснабжения*;

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 электроснабжения*;

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 электроэнергии*;

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*.

Приведенный пример применения предложенного метода идентификации перечня исходных событий тяжелых аварий позволяет сделать *следующие основные 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, для 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Скалозубов В.И., Ключников А.А., Кольханов В.Н. Основы управления запроектными авариями: монография. - Чернобыль: Ин-т проблем безопасности НАН Украины, 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 конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». - Подольск (Россия): ФГУП ОКБ «ГП», 2008.
3. Звонарев Ю., Будаев М., Кобзарь В., Волчек А. Валидация компьютерного кода ASTEC и применение для анализа безопасности АЭС с ВВЭР // 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 Nov. 2005.

**В. И. Скалозубов, В. М. Ващенко, С. С. Яровой, В. В. Злочевський**

#### **МЕТОД ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПЕРЕЛІКУ ВИХІДНИХ ПОДІЙ ВАЖКИХ АВАРІЙ НА ОСНОВІ ДОСВІДУ АЕС ФУКУСИМА-1**

На основі попереднього аналізу основних причин на АЕС Фукусима-1 обґрунтовано обмеження традиційних підходів при розробці керівництв/інструкцій з управління важкими аваріями. Запропоновано перспективний метод ідентифікації переліків вихідних подій важких аварій, враховуючи передісторію розвитку запроектних аварійних послідовностей та стан систем на момент початку важкої аварії.

*Ключові слова:* вихідні події аварій, важка аварія, керівництва/інструкції управління важкими аваріями.

**V. I. Skalozubov, V. M. Vashchenko, S. S. Yarovoy, V. V. Zlochevsky**

#### **METHOD OF IDENTIFICATION OF THE LISTS OF INITIAL EVENTS SERIOUS ACCIDENTS ON THE EXPERIENCE OF FUKUSHIMA-1 NUCLEAR POWER PLANT**

Based on a preliminary analysis of the main reasons for NPP Fukushima-1 justified limitations of traditional approaches to development management leaderships/instructions severe accident. We propose a promising method for identifying lists initial events of severe accidents that takes into account the background of colliding-design accident sequences and state systems at the beginning of a severe accident.

*Keywords:* initiating events of accidents, severe accident, leaderships/control instructions severe accident.

Поступила в редакцію 03.08.11