

**В. В. Богодист¹, С.Л. Волошина², Т.В. Габлая², В.Ю. Кочнева²,
К. В. Скалозубов², С. С. Яровой³**

¹НАЭК «Энергоатом», Киев

²Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Киев

³Государственная экологическая академия, Киев

О НЕДОСТАТКАХ ПРОЕКТОВ РЕАКТОРОВ С BWR НА АЭС FUKUSHIMA-DAIICHI

Анализируются недостатки проектов BWR и организационно-технических мероприятий по управлению запроектными авариями, приведшие к катастрофическим последствиям на АЭС Fukushima-Daiichi.

Ключевые слова: тяжелая авария, контайнмент, запроектная авария.

Основные причины катастрофических последствий тяжелых аварий на АЭС Fukushima-Daiichi связаны с недостатками проектов энергоблоков с реакторами BWR и организационно-техническими мероприятиями по управлению запроектными и тяжелыми авариями.

Основными недостатками проектов энергоблоков № 1 – 4 АЭС Fukushima-Daiichi, выявленными в процессе развития тяжелых аварий, являются:

а) недостаточное обеспечение защиты турбинного отделения и помещений дизель-генератора от затоплений промплощадки АЭС (в том числе через подземные траншейные туннели для трубопроводов и кабельной сети);

б) недостаточное обеспечение восстановления/дублирования выполнения функции надежного и длительного электроснабжения активных систем безопасности;

в) недостаточное обеспечение выполнения функции надежного и длительного охлаждения реакторной установки пассивными системами безопасности, не нуждающимися в длительном электроснабжении (в том числе конструкционные ограничения по обеспечению эффективного охлаждения естественной циркуляцией);

г) недостаточная эффективность систем предотвращения парогазовых взрывов и пожаров;

д) недостаточное обеспечение надежности систем, обеспечивающих безопасные условия в бассейне выдержки ядерного топлива;

е) недостаточная организация и эффективность систем контроля и диагностики (в том числе фактическое отсутствие объективной и достоверной информации в состоянии топлива, реакторного контура и других защитных барьеров безопасности в процессе развития аварий);

ж) недостаточная организация и эффективность автоматизированных систем управления аварийными процессами (в том числе запроектными).

В конечном итоге указанные факторы и определили переход аварии в запроектную стадию с повреждением топлива и зависимость развития аварийных процессов от непреднамеренно ошибочных действий персонала, получавшего ограниченную (иногда и противоречивую) информацию о состоянии защитного барьера безопасности и условиях развития аварийных последовательностей.

Недостаточная обоснованность и эффективность системы инструкций/руководств по управлению запроектными (в том числе тяжелыми) авариями, имеющими относительно малую вероятность возникновения (в частности, авариями с полной потерей надежного и длительного электроснабжения). Отсутствие такой эффективной системы управления относительно маловероятными запроектными авариями, возможно, и послужило основной причиной непреднамеренно ошибочных действий персонала в процессе развития аварийных процессов, что подтверждается:

© В. В. Богодист, С.Л. Волошина, Т.В. Габлая,
В. Ю. Кочнева, К. В. Скалозубов, С. С. Яровой, 2012

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

б) фактом непредотвращения парогазовых взрывов и пожаров, которые привели к нарушению целостности защитного барьера безопасности и значительным выбросам радиоактивных продуктов;

в) недостаточностью оперативных действий по обеспечению безопасного состояния бассейнов выдержки и хранения ядерного топлива (эти мероприятия начались фактически после взрывов/пожаров и разрушений в остановленном до аварии на ремонт блоке № 4, топливо которого было полностью перегружено в приреакторный бассейн выдержки) и др.

Последующий анализ информации международных организаций/компаний ядерной энергетики (включая данные эксплуатирующей и проектной организаций – ТЕРСО и General Electric) позволяет сформулировать основные *ограничения/недостатки* как самих проектов энергоблоков АЭС Fukushima-Daiichi в отношении преодоления подобных аварий, так и общих подходов при анализе и обосновании безопасности ядерной энергетической установки.

1. Энергоблоки № 1 – 4 АЭС Fukushima-Daiichi спроектированы на максимальное землетрясение 8,2 балла¹, а инициатором аварии было землетрясение Tohoku-Chihou-Taiheiyo-Oki уровнем 9 баллов в эпицентре на расстоянии 160 км. По данным WANO Tokyo пиковые ускорения на поверхности грунта составляли более 500 см/с² и превышали проектно допустимые значения (370 – 415 см/с²).

Площадка АЭС расположена на утесе высотой до 10 м над уровнем моря и оборудована волнорезами в прибрежной зоне длиной около 2,5 км и высотой над уровнем моря 5,6 м. Вследствие землетрясения вблизи промплощадки возникли волны цунами высотой до 15 м. Защита волнорезов оказалась недостаточной против затопления промплощадки АЭС, приведшего к потере длительного электроснабжения энергоблоков.

Для сравнения на АЭС Onagawa, расположенной на расстоянии 90 км от эпицентра землетрясения, внешние экстремальные события 11 марта 2011 г. были более критичными: высота цунами у побережья достигала 20 м, а пиковые ускорения грунта существенно превышали соответствующие значения на промплощадке АЭС Fukushima-Daiichi. Однако тяжелой аварии на АЭС Onagawa не произошло.

Таким образом, проект недооценил возможность совместного возникновения зависимых, но относительно маловероятных событий запроектного землетрясения и затопления промплощадки. Малая вероятность такого комбинированного внешнего экстремального воздействия определила недостаточное предварительное внимание к анализу, моделированию и обоснованию противоаварийных процедур.

Исторической причиной, повлиявшей в дальнейшем на предаварийный, а затем и аварийный, статус АЭС Fukushima-Daiichi (которая может быть классифицирована как *первый латентный геофизико-антропогенный фактор* [1]), стало то, что при сооружении энергоблока № 1, как и при сооружении последующих, недооценивался факт территориального расположения северо-восточной части о. Хонсю (региона Тохоку) на Северо-Американской тектонической плите как раз в том месте, где она встречается с Тихоокеанской плитой, которая находится в постоянном движении в сторону Японии от Гавайских островов. Тихоокеанская плита, смещаясь и постепенно погружаясь под Северо-Американскую, систематически заставляет последнюю деформироваться. Соответственно деформация Северо-Американской тектонической плиты перманентно приводит к итеративному накоплению базальтовыми геологическими породами потенциальной энергии, которая, высвобождаясь, приводит к движениям земной поверхности, чем и провоцируются непрекращающиеся землетрясения и цунами [1].

Объективная перспективная оценка тектонических сдвигов весьма затруднительна. Тем не менее по результатам наблюдений в течение полутора сотен лет известно, что в этом

¹ По отдельным данным – 8,6 балла.

регионе каждые 30 – 40 лет происходят достаточно крупные землетрясения; их среднестатистическая магнитуда составляет приблизительно 7,4 балла (по шкале Рихтера) [1].

В качестве *второго латентного фактора влияния* на приобретение энергоблоками аварийного статуса следует отнести физико-технические особенности кипящих корпусных реакторов [1]. Прежде всего следует обратить внимание на конструктивные недостатки реакторов рассматриваемого типа. Во-первых, к техническим недостаткам проекта реакторных установок с BWR относится малый объем воды, циркулирующей через реактор, во-вторых – неэффективность использования раствора борной кислоты для жидкостного регулирования мощности реактора. В-третьих, недостатком является необходимость расположения приводов органов регулирования системы управления и защиты реактора под реактором – для введения органов регулирования системы управления и защиты реактора в активную зону снизу с учетом расположения в верхней части корпуса оборудования для сепарации и осушения пара (пространство над активной зоной используется для гравитационного отделения капель воды и паросепарации). В-четвертых, весьма существенным недостатком такого кипящего реактора является специфика нейтронно-теплогидравлической кинетики, провоцирующая накопление со временем усталостных микрповреждений циркониевых оболочек твэлов, которые в случае действия дополнительных (оперативных) факторов могут привести к значительному числу разгерметизированных твэлов. Зафиксированный после аварийного сброса пара факт наличия за пределами оболочек твэлов радиоактивных изотопов цезия и йода при температурах высоких, но недостаточных для повреждения оболочек твэлов вследствие парциркониевой реакции, возможно и есть наглядное тому подтверждение [1].

2. При аварии проявились недостатки проекта в отношении обеспечения работоспособности аварийных дизель-генераторов при затоплениях: восемь из 13 дизель-генераторов расположены в подвале турбинного цеха (машинные залы расположены в 140 м от побережья), два дизель-генератора – на нижнем этаже за энергоблоком № 4, а три дизель-генератора – внутри и вне энергоблока № 6. Уровень воды при затоплении только в машинном зале достиг 1,5 м, что в конечном итоге привело к выходу из строя 12 дизель-генераторов из 13 по причине затопления.

3. Проектами АЭС не обеспечена возможность необходимого длительного отвода остаточных тепловыделений (не менее двух суток) в случае отказа по общей причине активных систем безопасности. Аккумуляторные батареи, обеспечивающие работоспособность системы аварийного охлаждения активной зоны, разряжаются за 10 – 12 ч. Надежное охлаждение естественной циркуляцией обеспечивалось проектом лишь в течение 4 – 8 ч. Эффективность и время работы насосов системы безопасности от турбопривода также ограничены.

Выявлена общая ограниченность проектов АЭС обеспечением и эффективностью пассивных систем безопасности (в частности, эффективностью расположения бассейна сброса давления, органов СУЗ и др.).

Проекты BWR АЭС Fukushima-Daiichi, разработанные более 40 лет назад, в этом отношении морально устарели. Основное современное направление повышения безопасности АЭС и создания реакторов нового поколения связано именно с развитием и повышением эффективности пассивных систем безопасности при возможных запроектных авариях.

4. В обоснованиях проектов недооценена возможность возникновения парогазовых взрывов как крайне маловероятных событий. В частности, следствием этой недооценки явилось отсутствие обоснований мероприятий и противоаварийных процедур при отказах систем подачи рекомбинаторов и удаления водорода. Расчетные обоснования предельной прочности конструкций контайнмента проводились при моделировании квазистатических нагрузок, не соответствующих условиям парогазовых взрывов.

5. АЭС Fukushima-Daiichi, эксплуатирующая реактор BWR, была спроектирована General Electric и введена в эксплуатацию в 1971 г. В частности, блок № 1 должен был быть снят с эксплуатации в феврале 2011 г., поскольку проектный срок эксплуатации BWR 40 лет, но для блока № 1 он был продлен еще на 10 лет.

Опыт большой аварии показал, что решение о продлении сроков эксплуатации блока № 1 было недостаточно обосновано в отношении:

совместного экстремального воздействия землетрясений и затоплений цунами; возникновения парогазовых взрывов (в том числе их влияния на целостность конструкций контайнмента);

относительно высокой условной вероятности отказа контайнментов BWR при сейсмических воздействиях и пожарах (например, при анализе безопасности аналогичного BWR блока № 2 АЭС Peach Bottom (США) такая оценка составила 0,9);

различных сценариев развития тяжелой аварии и других факторов, определяющих необходимые мероприятия по модернизации оборудования и систем.

6. Основу анализа безопасности энергоблоков АЭС Fukushima-Daiichi при тяжелой аварии составляет базовый отчет NUREG-1150, выполненный в соответствии с требованиями регулирующего органа США, NRC, для разных типов реакторов PWR и BWR (в том числе для аналогичных BWR на АЭС Fukushima-Daiichi). В отношении результатов этого отчета и случившейся большой аварии необходимо отметить следующее:

1) анализ безопасности в NUREG-1150 фактически не рассматривал относительно маловероятные экстремальные воздействия, связанные с:

затоплением строительных конструкций энергоблоков (в том числе с полной потерей по этой причине длительного электроснабжения);

совместным воздействием сейсмических нагрузок и затоплений;

возникновением и последствиями парогазовых взрывов.

Опыт АЭС Fukushima-Daiichi показал актуальность рассмотрения этих экстремальных событий (моделирования, анализа и разработки противоаварийных мероприятий);

2) детерминистский анализ прочности строительных конструкций контайнмента основывался на фундаментальных допущениях *квазистатических нагрузок при повышении давления*. Такие технические обоснования не учитывают существенные динамические нагрузки на контайнмент при парогазовых взрывах, имевших место при тяжелой аварии на АЭС Fukushima-Daiichi. В частности, при квазистатических расчетах на прочность контайнмента определяющим внешним параметром является текущее значение давления (напряжения), а при воздействии парогазовых взрывов – *скорость изменения давления*. В конечном итоге авария показала, что конструкции не обеспечивают необходимую прочность при парогазовых взрывах;

3) в NUREG-1150 не рассмотрен достаточно полный перечень исходного события аварии и возможных сценариев развития тяжелой аварии. В частности, такой подход не позволил определить условия необходимости и эффективности охлаждения водными растворами уже поврежденного топлива (особенно плутониевого MOX-топлива на BWR). Современные экспериментально-теоретические исследования показывают, что при определенных условиях подачи охлаждающей среды на поврежденное топливо могут возникнуть отрицательные эффекты, приводящие к росту температуры поврежденного топлива. Опыт развития тяжелой аварии на АЭС Fukushima-Daiichi только усилил актуальность этого вопроса.

Общей причиной указанных выше недостаточных обоснований безопасности при тяжелой аварии в NUREG-1150 является принятый подход *исключения из рассмотрения относительно маловероятных событий*. Опыт больших аварий на Чернобыльской АЭС и АЭС Fukushima-Daiichi показал недопустимость такого подхода для всех АЭС (в том числе и для отечественных энергоблоков с ВВЭР).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Погосов А. Ю.* Физико-технический анализ латентных факторов развития аварийных процессов в энергоблоках АЭС Фукусима-1 // *Ядерная и радиационная безопасность*. – 2012. – № 1.

**В. В. Богодист, С. Л. Волошина, Т. В. Габлая, В. Ю. Кочнева,
К. В. Скалозубов, С. С. Яровий**

ЩОДО НЕДОЛІКІВ ПРОЕКТІВ РЕАКТОРІВ З BWR НА АЕС ФУКУСИМА-ДАІІСНІ

Аналізуються недоліки проектів BWR та організаційно-технічні заходи з управління позапроектними аваріями, що призвели до катастрофічних наслідків на АЕС Фукусіма-Дайічі.

Ключові слова: важка аварія, контайнмент, запроектна аварія.

**V. V. Bogodyst, S. L. Voloshina, T. V. Gablaya, V. Ju. Kochneva,
K. V. Skalozubov, S. S. Jarovoj**

ABOUT LACKS OF PROJECTS OF REACTORS BWR AT THE NPP FUKUSHIMA-DAIICHI

In the article the lacks of projects of BWR and organizational-technical measures are analyzed on a management beyond design basis accident failures, resulting in catastrophic consequences on AES Fukushima-Daiichi.

Keywords: severe accident, containment, beyond design basis accident.

Надійшла 21.05.2012

Received 21.05.2012