

УДК 621.039.586

А. А. Ключников, В. И. Скалозубов, Хадж Фараджаллах Даббах А. *

*Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Киев
Одесский национальный политехнический университет, Одесса

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРИЧИН БОЛЬШОЙ АВАРИИ НА АЭС ФУКУСИМА-1

Предварительно анализируются коренные причины разрушения защитных барьеров безопасности в процессе аварии на АЭС Фукусима-1 и предложены рекомендации по дальнейшему совершенствованию обеспечения управления подобными тяжелыми авариями на отечественных энергоблоках с ВВЭР.

Ключевые слова: внешние и внутренние экстремальные события, запроектная авария, тяжелая авария, защитный барьер безопасности, критическая конфигурация систем, функция безопасности.

11 марта 2011 г. в 14 ч 46 мин (по местному времени) в Японии произошло девятибалльное землетрясение, что привело к автоматическому останову 11 энергоблоков на АЭС Фукусима-1, Фукусима-2, Онагава и Токай Данни. Наиболее критическая ситуация сложилась на АЭС Фукусима-1, которая имеет 6 блоков ВВР (кипящие корпусные реакторы с водой под давлением). До землетрясения в работе находились энергоблоки № 1 (460 МВт), № 2 (784 МВт) и № 3 (784 МВт). Блоки № 4 (784 МВт), № 5 (784 МВт) и № 6 (100 МВт) находились в планово-предупредительных ремонтах. При этом ядерное топливо на блоке № 4 находилось в приреакторном бассейне выдержки, а на блоках № 5 и 6 – в реакторах.

На рис. 1 и 2 приведены вид площадки АЭС Фукусима-1 и схема компоновки основного оборудования АЭС с ВВР.

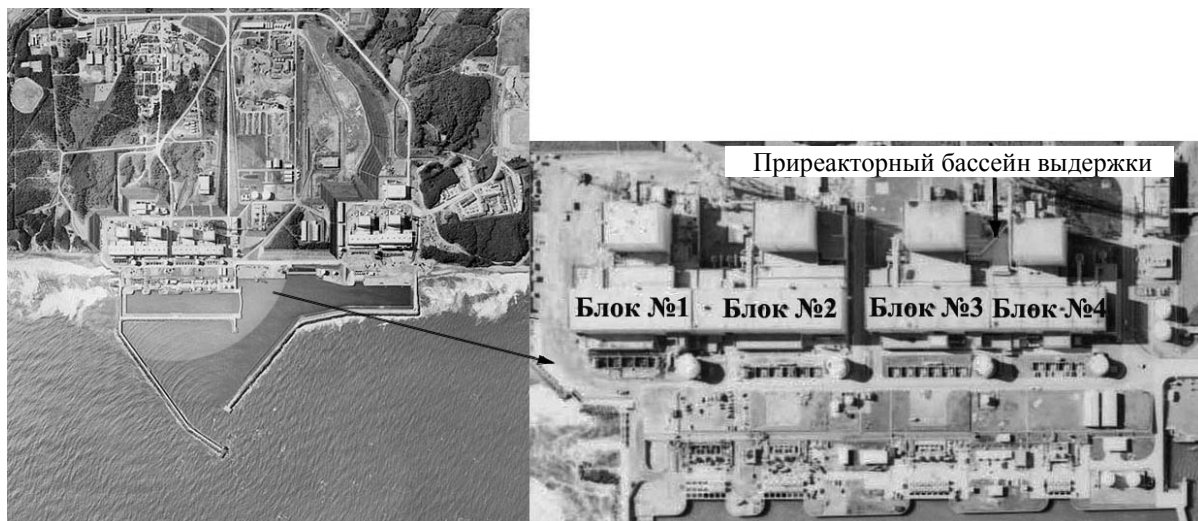


Рис. 1. Площадка АЭС Фукусима-1.

В соответствии с официальными сообщениями Японского атомно-промышленного форума (JAIF) и Кризисного центра МАГАТЭ краткая хронология дальнейших основных событий на АЭС Фукусима-1 следующая.

11 марта в 15 ч 42 мин – потеря всех источников электропитания (в том числе резервных дизель-генераторов), кроме блока № 6. Цистерны с топливом для дизель-генераторов были смыты цунами. В результате землетрясения было потеряно внешнее питание энергоблоков от открытого распределительного устройства, и в последующем произошло аварийное отключение дизель-генераторов систем безопасности в результате залива морской водой. Блоки перешли на охлаждение активных зон пассивными системами безопасности с помощью аккумуляторных батарей. Начаты работы по наладке электроснабжения каналов активных систем безопасности.

© А. А. Ключников, В. И. Скалозубов,
Хадж Фараджаллах Даббах А., 2011

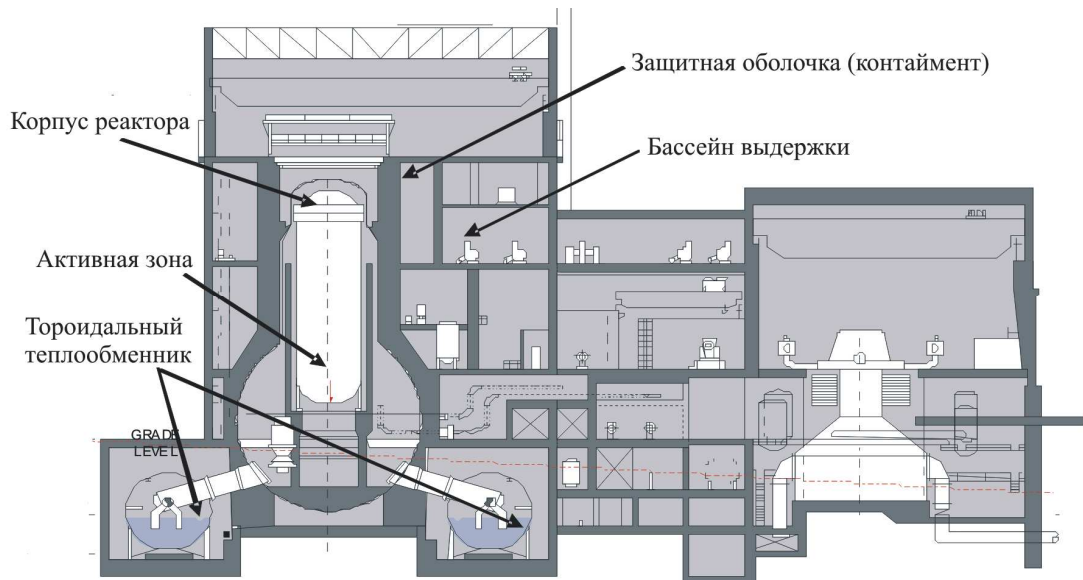


Рис. 2. Принципиальная схема компоновки основного оборудования АЭС с ВВР.

12 марта в 0 ч 49 мин отмечено anomальное возрастание давления в контейнменте реактора блока № 1, а в 15 ч 36 мин произошел взрыв. Защитная оболочка блока № 1 не пострадала. Вечером 12 марта аварийно-ремонтной бригаде удалось открыть клапан на линии дозаполнения теплоносителя и подать к реакторной установке (РУ) морскую воду в смеси с борной кислотой с помощью специальной передвижной насосной станции. В результате повторных толчков силой до 6,2 балла по шкале Рихтера разрушена одна из стен вспомогательного корпуса вблизи энергоблока № 1 АЭС, произошел взрыв ресивера водорода.

13 марта. На всех трех аварийно отключенных энергоблоках (блоки № 1 – 3) продолжаются работы по налаживанию штатного электроснабжения каналов безопасности реакторных установок. Защитная оболочка РУ блока № 1 остается целостной и продолжает находиться под избыточным давлением парогазовой смеси, которая образовалась из-за выкипания теплоносителя. Персонал станции продолжает проводить превентивные периодические сбросы избытков пара на площадку АЭС с целью сохранения целостности защитной оболочки РУ. На блоках № 2 и 3 организовано расхолаживание через систему инъекционного впрыска теплоносителя в реакторный контур, запитанную от автономного источника. Мощность дозы облучения на площадке АЭС Фукусима-1 постепенно растет и составляет от 4000 до 10000 мкР/ч (фоновые значения – около 15 – 25 мкР/ч). В местах радиоактивного загрязнения на площадке АЭС около энергоблока № 1 найдены изотопы радиоактивного йода и цезия, что подтверждает предыдущие предположения о повреждении топливных элементов в активной зоне блока № 1 АЭС. В течение дня на блоке № 3 последовательно отказали сначала система вентиляции гермообъема РУ, потом – система впрыска теплоносителя в РУ. Персоналом АЭС были выполнены аварийные превентивные сбросы избытков радиоактивной парогазовой смеси из-под защитной оболочки. Персонал станции начал подготовку подачи морской воды в защитную оболочку реактора через штатную систему пожаротушения.

14 марта в 4 ч 08 мин отмечен рост температуры воды в бассейне выдержки топлива блока № 4 до 84 °С. На блоке № 1 после впрыска борной воды в корпус реактора, осуществленного 13 марта, продолжается закачивание морской воды в защитную оболочку реакторного отделения через штатную систему пожаротушения. Защитная оболочка не повреждена.

На блоках № 2 и 3 утром 14 марта произошел резкий рост давления парогазовой смеси внутри гермооболочки. В 11 ч 01 мин произошел взрыв водорода в помещении блока № 3 (за пределами защитной оболочки РУ). При этом защитная оболочка осталась целой, блочный щит управления РУ не поврежден. Вечером была налажена подача охлаждающей морской воды внутрь гермообъема через штатную систему пожаротушения. Продолжается залив водой оборудования РУ.

Мощность дозы облучения на площадке АЭС Фукусима-1 составляет около 4600 мкР/ч. В местах радиоактивного загрязнения на площадке АЭС подтверждено наличие изотопов радиоактивного йода и цезия. На блоках № 1 – 3 продолжаются работы по налаживанию штатного электроснабжения каналов активных систем безопасности. Энергоснабжение отдельных систем осуществляется передвижными мобильными дизель-генераторами.

15 марта на всех трех аварийно отключенных энергоблоках (блоки № 1 – 3) не восстановлено налаженное штатное электроснабжение каналов активных систем безопасности РУ. Произошел взрыв водорода в помещении блока № 2. При этом защитная оболочка осталась целой. Избыточное давление парогазовой смеси внутри контейнента составляет порядка 6,5 атм. По информации МАГАТЭ в результате длительного испарения теплоносителя повреждено не менее 5 % ядерного топлива. На блоках № 1 и 3 продолжается закачивание морской воды в защитную оболочку реакторного отделения через штатную систему пожаротушения. Однако у персонала отсутствует уверенность в надежном поступлении морской воды в РУ. Частично разрушено здание энергоблока № 2.

16 марта продолжается закачивание морской воды в защитную оболочку реакторного отделения блоков № 1 – 3 через штатную систему пожаротушения. Подтвержден факт, что имеет место повреждение ядерного топлива, нарушена целостность контура РУ и защитной оболочки. Частично разрушены здания энергоблоков № 1 – 3.

Приреакторный бассейн выдержки, в котором находились все тепловыделяющие элементы блока № 4, полностью обезвожен. Помещение бассейна разрушено взрывом. Планируется охлаждение бассейна с помощью передвижных водометов. Персонал АЭС планирует возобновить электроснабжение каналов активных систем безопасности от работоспособного дизель-генератора энергоблока № 6.

17 марта начаты работы по разбрызгиванию воды над бассейном выдержки. Персонал АЭС осуществлял прокладку временной сети электропитания к блоку № 2. Планируется его подключение к электрической сети после завершения работ по заливу блока № 3. В течение 17 марта в 30-километровой зоне временного отселения вокруг АЭС Фукусима-1 местами зафиксирован значительный рост мощности дозы облучения (от 80 до 170 мкЗв/ч). На границе 30-километровой зоны наивысшая мощность зафиксирована на северо-западе от АЭС на уровне от 3 до 170 мкЗв/ч, в других направлениях – уровень мощности дозы составлял от 1 до 5 мкЗв/ч.

Утром 18 марта было осуществлено четыре сброса морской воды на здание блока № 3 военными вертолетами. Из-за высоких уровней облучения последующие попытки охлаждения блока будут осуществляться лишь с земли с помощью шести полицейских водометов.

Предварительная информация по текущему состоянию блоков АЭС Фукусима-1 на 7 ч 30 мин 21 марта

(активные зоны и приреакторные бассейны выдержки)

Характеристика и параметры блока	Характеристики и состояние блоков АЭС Фукусима-1: Даичи, Япония					
	Блок № 1	Блок № 2	Блок № 3	Блок № 4	Блок № 5	Блок № 6
Активная зона РУ	Частично повреждена	Частично повреждена	Значительно повреждена	-	Надежно охлаждается	Надежно охлаждается
Приреакторный бассейн выдержки	Залит водой, поврежден	Залит водой	Частично поврежден	Значительное повреждение	Надежно охлаждается	Надежно охлаждается
Контур РУ	Поврежден	Неплотный	Поврежден	-	Плотный	Плотный
Защитная оболочка	Повреждена	Неплотная	Разрушена	-	Плотная	Плотная
Здание блока	Повреждено	Повреждено	Разрушено	Разрушено	Целое	Целое
Мощность дозы вблизи блоков	Приближается к 1 – 3 Р/ч	Приближается к 3 – 5 Р/ч	Приближается к 5 – 10 Р/ч	Приближается к 10 – 40 Р/ч	Приближается к 0,1 – 0,3 Р/ч	

25 марта уровень угрозы новых аварийных событий остается стабильно высоким. В контайнменты блоков № 1 и 2 с 23 марта постоянно подается морская вода в количестве 10 - 11 м³/ч. За последние сутки удалось снизить температуру металла корпуса реактора блока № 1 до 229 °С, блока № 2 – до 102 °С, блока № 3 – до 185 °С (штатная температура корпуса реактора типа BWR/4 составляет 305 °С). Подано электроснабжение к штатным системам контроля блочного щита управления блока № 1. Приреакторные бассейны выдержки отработанного ядерного топлива энергоблоков № 1 – 4 АЭС Фукусима-1: состояние ядерного топлива и конструкций бассейна блока № 1 до сих пор не определено и не контролируется из-за сверхвысоких уровней облучения (мощность экспозиционной дозы облучения в окружающих помещениях достигает 27,9 Зв/ч); восстановлен контроль температуры теплоносителя в бассейне блока № 2, которая составляет 47 °С (мощность экспозиционной дозы облучения в окружающих помещениях составляет 1,49 Зв/ч); состояние ядерного топлива и конструкций бассейна блока № 3 до сих пор не определено и не контролируется, продолжается залив морской воды; состояние ядерного топлива и конструкции бассейна блока № 4 до сих пор не определено и не контролируется, продолжается залив морской воды.

Общая ситуация на площадке АЭС Фукусима-1 начала стабилизироваться только в начале апреля. 3 апреля удалось переключить электропитание насосов, закачивающих воду в активную зону, с передвижного на штатный генератор.

Первоначально авария на АЭС Фукусима-1 была переквалифицирована с 4-го уровня международной шкалы INES на 5-й уровень – «авария с широкими последствиями, связанными с тяжелым повреждением активной зоны». Однако, по мнению экспертов МАГАТЭ и ряда регулирующих органов других стран, аварию на АЭС Фукусима-1 следовало квалифицировать не ниже 6-го уровня – «тяжелая авария, значительный выброс радиоактивных продуктов за пределы площадки АЭС, которые требуют принятия соответствующих контрмер». Окончательно аварии на блоках № 1 – 3 были объединены в общее событие, которое квалифицировано аналогично Чернобыльской АЭС 7-м уровнем – «большая авария».

*Предварительный анализ хронологии основных событий*¹ в процессе аварий на энергоблоках № 1 – 4 АЭС Фукусима-1 позволяет сформулировать ряд существенных комментариев по основным причинам.

1. В отношении обеспечения безопасности при аварии на энергоблоках с полной потерей надежного и длительного проектного электроснабжения выявлены принципиальные недостатки реакторов BWR, имеющих достаточно длительные сроки эксплуатации²:

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

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

в) недостаточная эффективность систем предотвращения парогазовых взрывов;

г) недостаточная организация и эффективность систем контроля и диагностики (в том числе фактическое отсутствие объективной и достоверной информации в состоянии топлива³, реакторного контура и контаймента);

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

В конечном итоге указанные факторы и определили переход аварии в запроектную

¹ Предварительность анализа определяется, в первую очередь, предварительностью официальной информации о хронологии событий.

² На момент аварии блок № 1 – 40 лет эксплуатации, блок № 2 – 37 лет, блок № 3 – 35 лет, блок № 4 – 33 года.

³ В частности, факт повреждения ядерного топлива косвенно оценивался только по появлению изотопов йода и цезия на промплощадке.

стадию с повреждением топлива и зависимость развития аварийных процессов от непреднамеренно ошибочных действий персонала, получавшего ограниченную (иногда и противоречивую) информацию о состоянии защитных барьеров безопасности (топливных конструкций, реакторного контура, контайнмента) и об условиях развития аварийных последовательностей.

2. 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:

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

б) фактом непредотвращения 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).

Авария выявила ограниченность традиционного подхода нормативно-методического обеспечения руководств/симптомно-ориентированных аварийных инструкций по управлению запроектными и тяжелыми авариями (РУЗА, РУТА, СОАИ), который фактически исключает организацию эффективного управления авариями с относительно маловероятными исходными событиями и аварийными последовательностями, а также не учитывает зависимость развития процессов и аварийных последовательностей тяжелых аварий (ТА) от исходного аварийного события (ИСА) и предыстории возникновения условий тяжелого повреждения активной зоны реактора. Согласно международной практике критерием целесообразности рассмотрения аварийных последовательностей запроектных аварий (АПЗА) являются оценки $10^{-6} - 10^{-9}$ 1/(реактор-год) [1], ниже которых обычно не разрабатываются соответствующие организационно-технические мероприятия (ОТМ) по управлению запроектными авариями. Аварии на АЭС Фукусима-1 с одновременными отказами основного и резервного электропитания также являются маловероятными, что и послужило возможной причиной фактической неподготовленности эксплуатирующей организации к управлению и устранению последствий таких аварий.

Зависимость ОТМ при управлении ТА от предыстории возникновения условий повреждения топлива на примере корпусных реакторов продемонстрирована на рис. 3: первичные ИСА определяют множество АПЗА, приводящих к недопустимому повреждению активной зоны реактора, а соответственно и различное состояние работоспособности критических конфигураций систем (ККС), обеспечивающих выполнение необходимых функций безопасности (ФБ). Состояние работоспособности ККС ФБ в процессе АПЗА определяют как исходные события тяжелых аварий на разных стадиях развития для корпусных реакторов (ИСА Т1, ИСА Т2, ИСА Т3), так и развитие аварийных последовательностей тяжелых аварий (АПТА), а соответственно и действия/мероприятия по управлению ТА (в том числе по восстановлению/ дублированию работоспособности ККС ФБ). Косвенным подтверждением зависимости развития ТА от предыстории развития запроектных ситуаций являются аварии на блоках №1 – 3 АЭС Фукусима-1: при одновременном возникновении общего первичного ИСА (полная потеря электроснабжения) тяжелое повреждение активной зоны реакторов и взрывы произошли в разное время и в разных местах (на блоке № 1 и 3 взрыв предположительно над защитной оболочкой, а на блоке № 2 в районе теплообменника – см. рис. 2).

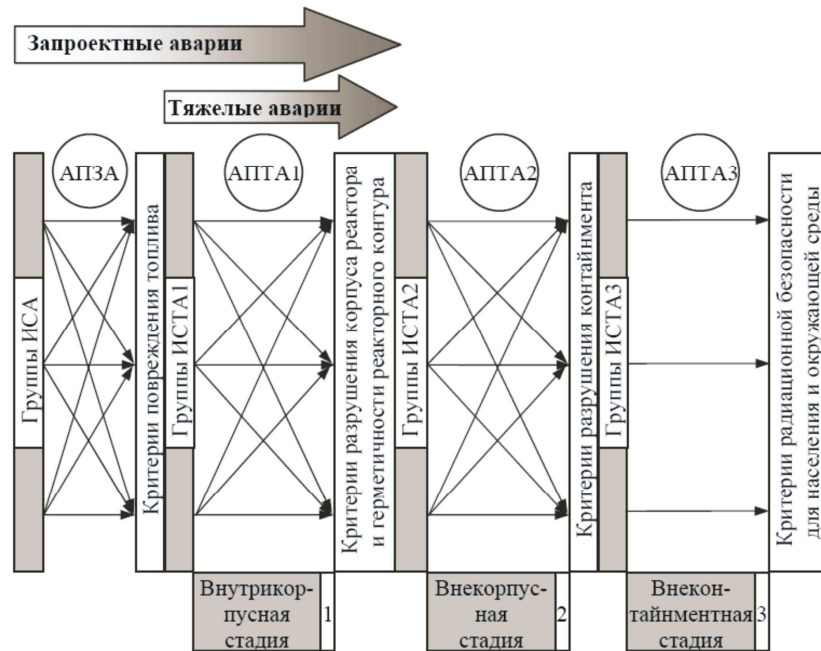


Рис. 3. Этапы и стадии возникновения и развития ТА на корпусных реакторах.

Недостаточная обоснованность системы управления маловероятными авариями, возможно, послужила также одной из коренных причин перехода запроектных аварийных процессов на энергоблоках АЭС Фукусима-1 в стадию тяжелых аварий (с повреждением топлива), вызванную непреднамеренно ошибочными действиями персонала. Анализ предварительной информации JAIF – МАГАТЭ по хронологии развития событий показывает, что до момента взрывов и повреждений топлива на аварийно остановленных реакторах (12 марта на блоке № 1, 14 марта на блоке № 3 и 15 марта на блоке № 2) была периодически и частично обеспечена подача охлаждающей среды в реакторы системами безопасности от аккумуляторных батарей, инъекционным впрыском теплоносителя, системами пожаротушения морской водой и др. Эффекты взаимодействия содержащего изначально плутоний МОХ-топлива (используемого в отечественных реакторах ВВР) при повышенной по отношению к проектным условиям температуре с периодически и частично подаваемой охлаждающей средой изучены недостаточно. По крайней мере, можно говорить об отсутствии однозначного отношения специалистов к целесообразности таких мероприятий. Отсутствуют также однозначное отношение и к необходимости охлаждения водой уже поврежденного ядерного топлива. Одним из аргументов оппонентов охлаждения водой ядерного топлива является возникновение интенсивного парообразования, способствующего резкому росту давления, а также вероятности и мощности парогазового взрыва. Эти вопросы требуют, несомненно, дальнейшего более детального глубокого изучения и достаточно объективных научно-технических обоснований.

Другим характерным примером недостаточной обоснованности системы управления авариями является ограниченное время моделирования аварийных процессов при технических обоснованиях РУЗА, РУТА, СОАИ. Развитие аварийных событий на АЭС Фукусима-1, приведших к повреждению защитных барьеров безопасности, продолжалось около недели с момента полной потери электропитания. Эти факты указывают на ограниченность традиционных подходов моделирования и анализа аварий обычно в течение суток (например, в отчетах по анализу безопасности энергоблоков АЭС Украины).

Прошло 25 лет с момента большой аварии на Чернобыльской АЭС, коренными причинами которой были технические недостатки проекта станции и непреднамеренные ошибочные действия персонала, связанные с объективной неподготовленностью к контролю и управлению такими ТА. К сожалению, следует признать, что эти причины проявились и на АЭС Фукусима-1.

В настоящее время АЭС Украины эксплуатируют другой тип реактора (ВВЭР), имеющий сотни реакторо-лет безопасной эксплуатации. Вероятность возникновения на АЭС Украины землетрясений мощностью 9 баллов и цунами практически исключена. Однако опыт больших аварий на Чернобыльской АЭС и АЭС Фукусима-1 определяет целый ряд актуальных для АЭС с ВВЭР задач, связанных с *нормативно-методическим и проектно-техническим обеспечением контроля и управления ТА*, среди которых предварительно необходимо выделить следующие.

1. Пересмотр и совершенствование критериев целесообразности рассмотрения запроектных аварий (моделирование, анализ и обоснование ОТМ) с учетом состояния работоспособности ККС ФБ. Такой подход позволит разрабатывать ОТМ и для таких маловероятных аварий как на Чернобыльской АЭС и АЭС Фукусима-1. Важно отметить, что последняя долгосрочная Комплексная (сводная) программа повышения безопасности АЭС Украины (КСПБУ) фактически *не определяет* мероприятия по моделированию и управлению *запроектными авариями с полной потерей электроснабжения*. Одной из причин такого положения является принятый в КСПБУ подход оценки значимости и приоритизации ОТМ по вкладу в основные показатели безопасности (частота повреждения активной зоны – ЧПАЗ, частота предельного аварийного выброса – ЧПАВ). Вероятность возникновения ИСА с полной потерей электроснабжения для проектов ВВЭР относительно мала (на несколько порядков меньше, чем доминантных для ВВЭР групп аварий с контурными и межконтурными течами) и вклад такой запроектной аварии, например, в ЧПАЗ ВВЭР меньше 10^{-7} 1/год (категории значимости для безопасности и приоритизации выполнения ОТМ наинизшие, фактически исключающие их выполнение). Такой подход в КСПБУ недопустим, так как на АЭС Фукусима-1 произошла аналогичная запроектная авария с крайне тяжелыми последствиями. Так, в соответствии с результатами отчетов по анализу безопасности для блока № 5 Запорожской АЭС приращение ЧПАЗ для аварийной последовательности с полной потерей электроснабжения (аналогичной аварии на АЭС Фукусима-1) составляет $2,7 \cdot 10^{-8}$ 1/год (0,06 % от суммарной ЧПАЗ), что согласно КСПБУ свидетельствует фактически об отсутствии значимости для безопасности мероприятий по управлению такой запроектной аварией.

Таким образом, необходимо на нормативном уровне исключить нецелесообразность разработки мероприятий и руководств по управлению маловероятными авариями (в том числе запроектными авариями с полной потерей электроснабжения). Также требуют пересмотра и непосредственные вероятностные оценки возникновения ИСА с полной потерей электроснабжения с учетом специфики каждой площадки АЭС Украины. Так, для одной из крупнейших в мире Запорожской АЭС помещения всех зданий дизель-генераторов расположены одинаково в машинном зале на нулевой отметке; а в подвале на отметке -3,6 м находятся вспомогательное оборудование дизель-генераторов, насосы технической воды ответственных потребителей и оборудование аварийного генератора. На Днепре накоплен объем воды, в 4 раза больше годового расхода самой реки. Весь этот объем находится на высоте значительно выше уровня Каховского водохранилища и удерживается на этой высоте плотинами каскада днепровских ГЭС. Техническое состояние плотин наших гидроэлектростанций постоянно вызывает беспокойство общественности страны. Соответственно, вероятность отказа дизель-генераторов по причине затопления относительно высока, а с учетом фактического отсутствия передвижных дизель-генераторов проблема становится еще более актуальной.

2. До настоящего времени при моделировании и анализе ТА 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 создаваться «худшие» условия возникновения и развития ТА (см. рис. 3). Анализ ТА должен проводиться с учетом всего перечня первичных ИСА, а также предыстории и реальной длительности развития АПЗА. Такой подход позволит более обоснованно разрабатывать ОТМ по управлению ТА.

3. Разработка альтернативных риск-ориентированных критериев надежности защитных барьеров безопасности АЭС с ВВЭР, учитывающих предысторию эксплуатационных нагрузок и техническое состояние конструкций на момент возникновения внутренних и внешних экстремальных воздействий. В настоящее время нормативно-проектной документацией определены в основном детерминистские критерии надежности защитных барьеров безопасности (обычно допустимые значения температуры и давления). События на АЭС Фукусима-1 определяют необходимость дополнительных технических обоснований надежности защитных барьеров безопасности ВВЭР при внешних и внутренних экстремальных событиях (землетрясения, наводнения, взрывы, пожары, падения крупных объектов и т.п.), учитывающих не только воздействия/нагрузки непосредственно в процессе аварий, но и с учетом предыстории эксплуатации и фактического состояния конструкций. Учет указанных выше альтернативных риск-ориентированных критериев позволит получить более реалистичные оценки основных вероятностных показателей безопасности АЭС с ВВЭР.

4. Необходимо совершенствование унифицированных для всех АЭС Украины методик штатного и аварийного мониторинга, прогнозирования развития аварии с выбросом радиоактивности в окружающую среду, оценки последствий аварии, выброса и оценки эффективности контрмероприятий, с учетом опыта АЭС Фукусима-1.

5. Дальнейшая модернизация систем контроля и управления доминантными для безопасности АЭС с ВВЭР запроектными авариями (течи 1-го контура, межконтурные течи) должна проводиться с акцентом на развитии пассивных систем безопасности, имеющих более высокую надежность и не требующих длительного энергоснабжения. По опыту аварии на АЭС Фукусима-1 в качестве дополнительных мероприятий по повышению безопасности ВВЭР можно рекомендовать: повышение надежности систем основного и резервного энергоснабжения для обеспечения эффективной и длительной работоспособности активных систем безопасности; повышение надежности обеспечения систем пожаро- и взрывобезопасности; повышение надежности аварийного охлаждения реакторов, бассейнов перегрузки и хранилищ ядерного топлива пассивными системами безопасности.

Технические обоснования дополнительных ОТМ должны основываться на специфике проекта, условий и опыта эксплуатации ВВЭР.

Для повышения надежности контроля за состоянием и составом ядерного топлива перспективным представляется также восстановление и дальнейшее развитие альтернативной к штатным системы нейтринной диагностики. Украина располагает уникальными в мире нейтринными лабораториями (на Ровенской АЭС), созданными еще в советское время и законсервированных на настоящий момент. Преимуществами систем нейтринной диагностики состояния и состава ядерного топлива является принципиальная возможность их расположения за пределами реактора и контаймента, а также осуществление контроля для других энергоблоков и даже промплощадок АЭС (в том числе и объекта "Укрытие").

Перспективные проекты АЭС Украины должны рассматриваться с реакторами нового поколения повышенной безопасности (двойная защитная оболочка и системы пассивного отвода тепла гермозоны, «ловушки» расплавленного топлива, усовершенствованные системы устранения взрыво- и пожароопасных сред и т.п.).

В заключение следует отметить, что представленный анализ является предварительным, так как использованная официальная информация о событиях на АЭС Фукусима-1 также пока является предварительной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Скалозубов В. И., Ключников А. А., Колыханов В. Н.* Основы управления запроектными авариями с потерей теплоносителя на АЭС с ВВЭР. – Чернобыль: Ин-тут проблем безопасности АЭС 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 конф. «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». – Подольск (Россия): ФГУП ОКБ «ГПИ», 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 November 2005.

О. О. Ключников, В. И. Скалозубов, Хадж Фараджаллах Даббах А.

ПОПЕРЕДНІЙ АНАЛІЗ ПРИЧИН ВЕЛИКОЇ АВАРІЇ НА АЕС ФУКУСИМА-1

Аналізуються корінні причини руйнування захисних бар'єрів безпеки в процесі аварії на АЕС Фукусіма-1 і запропоновано рекомендації щодо подальшого вдосконалення забезпечення управління подібними важкими аваріями на вітчизняних енергоблоках з ВВЕР.

Ключові слова: зовнішні та внутрішні екстремальні події, позапроектна аварія, важка аварія, захисний бар'єр безпеки, критична конфігурація системи, функція безпеки.

O. O. Klyuchnikov, V. I. Skalozubov, Haj Farajallah Dabbach A.

PREANALYSIS OF SEVERE ACCIDENT CAUSES AT FUKUSHIMA-1

The paper analyses fundamental causes of destruction of protective safety barriers during accident at Fukushima-1 and offers recommendations on further development of supporting of similar severe accident management at domestic power units with WWER.

Keywords: external and internal extreme events, beyond design basis accident, severe accident, protective safety barrier, critical system configuration, safety function.

Поступила в редакцію 15.06.11