

## МЕЖДУНАРОДНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

### **Общая позиция Рабочей группы по оценке новых проектов АЭС с ВВЭР MDER по вопросам, связанным с аварией на АЭС «Фукусима-Дайичи»**

#### **Предисловие ФБУ «НТЦ ЯРБ»**

В 2006 г. под эгидой Агентства по ядерной энергии Организации экономического сотрудничества и развития (АЯЭ ОЭСР) органами государственного регулирования безопасности при использовании атомной энергии ряда стран, развивающих атомную энергетику, была создана Многонациональная программа оценки новых проектов АЭС (MDER) с целью усиления международного сотрудничества и создания возможностей для реализации новых проектов АЭС, отвечающих международным стандартам безопасности.

На сегодняшний день в деятельности MDER принимают участие представители органов регулирования безопасности при использовании атомной энергии 16-ти стран, эксплуатирующих АЭС, а также строящих или заявивших о намерении соорудить в ближайшем будущем новые АЭС. Кроме того, в деятельности MDER в качестве наблюдателей принимают участие представители МАГАТЭ. АЯЭ ОЭСР выполняет функции технического секретариата.

В настоящий момент в рамках MDER функционируют пять рабочих групп по проведению совместных оценок безопасности новых проектов АЭС (EPR, AP-1000, APR-1400, ВВЭР-1200 и HPR-1000), в ходе деятельности которых успешно осуществляется обмен информацией и опытом по вопросам оценки новых проектов АЭС с целью повышения безопасности и своевременного принятия органами регулирования решений о выдаче лицензий. Рабочая группа по реакторам ABWR с мая 2018 г. функционирует под эгидой Комитета по ядерному регулированию АЯЭ ОЭСР.

В состав Рабочей группы по оценке новых проектов АЭС с ВВЭР (далее – РГ-ВВЭР) входят эксперты уполномоченных органов государственного регулирования безопасности при использовании атомной энергии Венгрии, Индии, Китая, России, Турции и Финляндии.

С 2013 г. по середину 2018 г. ФБУ «НТЦ ЯРБ» (организация научно-технической поддержки российского уполномоченного органа государственного регулирования безопасности при использовании атомной энергии) возглавляло и осуществляло координацию деятельности РГ-ВВЭР, оказывая поддержку органам регулирования и предоставляя отчеты о деятельности группы в Руководящий технический комитет и Группу принятия решений MDER. С мая 2018 г. на принципе ротации руководство деятельностью группы перешло к финскому органу регулирования (STUK).

В состав РГ-ВВЭР входят четыре подгруппы технических экспертов: «Корпус реактора и оборудование под давлением», «Тяжелые аварии», «Аварийные ситуации и переходные режимы» и «Учет в новых проектах АЭС уроков аварии на АЭС «Фукусима-Дайичи».

В части деятельности первых трех подгрупп РГ-ВВЭР подготовлены, утверждены в Руководящем техническом комитете MDER и опубликованы на сайте АЯЭ ОЭСР:

- технический отчет и Общая позиция РГ-ВВЭР по тематическому направлению «Безопасность энергоблока АЭС при тяжелых авариях»;
- технический отчет и Общая позиция РГ-ВВЭР по тематическому направлению «Реактор и компоненты первого контура под давлением»;
- технический отчет по тематическому направлению «Аварийные ситуации и переходные режимы».

В рамках деятельности подгруппы РГ-ВВЭР «Учет в новых проектах АЭС уроков аварии на АЭС «Фукусима-Дайичи» подготовлена, утверждена в Руководящем техническом комитете MDER и опубликована на сайте АЯЭ ОЭСР Общая позиция по вопросам, связанным с аварией на АЭС «Фукусима-Дайичи». Разработанный документ отражает предварительные общие подходы к потенциальному повышению безопасности АЭС с ВВЭР и устанавливает согласованные общие требования («ожидания») к новым АЭС. Данные общие подходы сформулированы в Общей позиции в четырех разделах: Учет внешних воздействий в проекте; Надежность выполнения функций безопасности; Проектные решения, ориентированные на конкретную запроектную аварию; Противоаварийная готовность и реагирование.

ФБУ «НТЦ ЯРБ» осуществлен перевод Общей позиции по вопросам, связанным с аварией на АЭС «Фукусима-Дайичи», на русский язык, полный текст которого представлен ниже. В переводе документа сохранена структура оригинала.

Богдан С. Н., Мистрюгов Д. А., Рогатов Д. М., Федотова Н. А.



Неофициальный перевод

Многонациональная программа оценки проектов  
 Общая позиция по проекту  
 No. CP-VVERWG-01 ДЛЯ ОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ

Дата: 17 мая 2017 г.  
 Действительно: до следующего  
 пересмотра или помещения в архив  
 2-я редакция

## ОБЩАЯ ПОЗИЦИЯ МДЕР ПО ПРОЕКТУ No. CP-VVERWG-01

Деятельность Рабочей группы по реакторам ВВЭР

### ОБЩАЯ ПОЗИЦИЯ ПО ВОПРОСАМ, СВЯЗАННЫМ С АВАРИЕЙ НА АЭС «ФУКУСИМА-ДАЙИЧИ»

#### Участники

Регулирующие органы, принимавшие участие в обсуждениях в рамках рабочей группы МДЕР:	AERB (Индия), НАЕА (Венгрия), NNSA (Китай), Ростехнадзор (Российская Федерация), STUK (Финляндия) и ТАЕК (Турция)
Регулирующие органы, поддержавшие данную общую позицию:	AERB (Индия), НАЕА (Венгрия), NNSA (Китай), Ростехнадзор (Российская Федерация), STUK (Финляндия) и ТАЕК (Турция)
Регулирующие органы, не возражающие против данной общей позиции:	
Регулирующие органы, не согласные с данной общей позицией:	

## Многонациональная программа оценки проектов

### Рабочая группа по реакторам ВВЭР

## ОБЩАЯ ПОЗИЦИЯ ПО ВОПРОСАМ, СВЯЗАННЫМ С АВАРИЕЙ НА АЭС «ФУКУСИМА-ДАЙИЧИ»

### Введение

Членами Рабочей группы MDER по реакторам ВВЭР (РГ-ВВЭР), именуемыми далее «регулирующие органы», являются представители Российской Федерации (Ростехнадзор), Финляндии (STUK), Индии (AERB), Турции (ТАЕК), Китая (NNSA) и Венгрии (НАЕА).

Следует отметить, что к настоящему моменту не все эти страны завершили экспертизу безопасности проектов ВВЭР, реализуемых ими, с учетом уроков аварии на АЭС «Фукусима-Дайичи» и вопросов, связанных с этой аварией. Таким образом, данный документ отражает предварительные общие подходы к потенциальному повышению безопасности АЭС с ВВЭР и устанавливает согласованные общие требования («ожидания») к новым АЭС.

В основе этих общих подходов лежат национальные нормативно-правовые документы вышеуказанных регуляторов и результаты экспертиз безопасности проектов, выполненных к настоящему моменту. Соответственно, некоторые технические особенности проектов ВВЭР еще не были оценены некоторыми странами-участницами, и позиции по отношению к ним могут впоследствии отличаться от представленных в данном документе.

На данный момент в рамках экспертизы безопасности оцениваются следующие проекты:

- ВВЭР (ВВЭР-1000 / АЭС-91 и 92);
- ВВЭР-1200 / АЭС-2006-М;
- ВВЭР-1200 / АЭС-2006-П;
- ВВЭР-ТОИ.

По завершении экспертизы безопасности этих проектов регулирующие органы актуализируют данный документ, чтобы в полной мере отразить выводы о безопасности этих проектов и возможных путях ее дальнейшего повышения с учетом уроков, извлеченных из аварии на АЭС «Фукусима-Дайичи».

Предварительные общие подходы представлены в документе в четырех разделах:

- I. Учет внешних воздействий в проекте;
- II. Надежность выполнения функций безопасности;
- III. Проектные решения, ориентированные на конкретную ЗПА или, как принято в некоторых странах-участницах, ЗУ (здесь и далее по тексту русской версии под термином «запроектные условия» понимается термин “design extension conditions” – см. русский перевод стандарта МАГАТЭ SSR-2/1, требование 20), например ПОС и потерю КП;
- IV. Противоаварийная готовность и реагирование.

Кроме того, в документе есть приложения по областям, в которых было признано необходимым провести дополнительные исследования.

### Исходная информация

В марте 2011 г. на АЭС «Фукусима-Дайичи» произошла тяжелая авария, затронувшая три действующих энергоблока и БВ отработавшего топлива, и косвенно другие объекты, находящиеся на площадке. Непосредственной причиной аварии стало Великое восточно-японское землетрясение магнитудой 9,0 баллов и последовавшее за ним цунами с максимальной высотой волны 14 – 15 м, затопившей площадку АЭС «Фукусима-Дайичи». Это привело к повреждению линии электропередач и серьезному разрушению объектов инфраструктуры, обеспечивающих эксплуатацию и безопасность АЭС (было повреждено электрическое и механическое оборудование, включая дизель-генераторы, аккумуляторные батареи, связанные распределительные щиты или соединения и т. д.).

В результате было потеряно внешнее энергоснабжение, вышли из строя станционные источники электропитания (т. е. произошло ПОС) и нарушена функция отвода остаточного тепловыделения, что привело

к повреждению активной зоны реакторов трех энергоблоков и последующему большому выбросу радиоактивных веществ в окружающую среду (уровень 7 по международной шкале INES).

Для более полного и точного понимания хода аварии на АЭС «Фукусима-Дайичи» в Японии и других странах был проведен ряд исследований, а детальный технический анализ продолжается и в настоящее время. Изучается поведение АЭС в крайне тяжелых условиях (подобных условиям, возникшим в результате аварии на АЭС «Фукусима-Дайичи») с целью определения недостатков проекта и эксплуатации и выдачи практических рекомендаций по модернизации станции, ужесточению надзорных требований и мерам по ликвидации таких ситуаций. Аналогичную деятельность ведут также различные регулирующие органы, ответственные за регулирование безопасности на этапах проектирования, сооружения, ввода в эксплуатацию и эксплуатацию АЭС с реакторами ВВЭР. Все вышеперечисленное направлено на то, чтобы предложить практически возможные усовершенствования АЭС или порекомендовать усовершенствование нормативных требований и руководств в случае тяжелых аварий.

### Общий контекст

Авария на АЭС «Фукусима-Дайичи» показала важность усиления концепции ГЭЗ, что включает в себя:

- корректную идентификацию опасных внешних воздействий (в том числе редких экстремальных событий);
- определение характеристик внешних воздействий и их последствий;
- изучение возможных сочетаний различных внешних воздействий;
- принятие проектных мер для:
  - (а) защиты установки от этих опасных явлений;
  - (б) предотвращения значительного выброса радиоактивных веществ.

Это должно быть отражено:

- в требованиях безопасности и нормативных документах;
- в процедуре лицензирования;
- подробно представлено в обосновании безопасности установки;
- должным образом рассмотрено независимым регулирующим органом.

Авария подчеркнула необходимость проведения многогранного анализа безопасности с применением взаимодополняющих детерминистических и вероятностных методов для всестороннего освещения всех вопросов, важных для безопасности АЭС. При проведении анализа безопасности особое внимание необходимо уделять событиям, затрагивающим одновременно несколько энергоблоков, а также авариям, протекающим в течение длительного периода времени и сопровождающимся масштабными разрушениями на площадке и за ее пределами.

При этом необходимо понимать, что ни проект, ни условия эксплуатации АЭС или других ядерных установок никогда не смогут в полной мере учесть характер конкретного события. Вместе с тем надежный проект, разработанный на основе концепции ГЭЗ, характеризующийся значительным запасом прочности (“safety margins”) и предусматривающий использование разнообразных средств для выполнения критически важных функций безопасности, в совокупности с гибкими симптомо-ориентированными процедурами реагирования операторов будет способствовать ликвидации аварии, превышающей текущие проектные основы.

Проектирование, сооружение, изготовление и монтаж КСЭ должны вестись на основе последних технических достижений с достаточным запасом прочности (“safety margins”) сверх критериев ПА во избежание возникновения пороговых эффектов (cliff edge effects)<sup>1</sup>. Такой подход наряду с надлежащими мерами по ослаблению последствий аварии будет способствовать обеспечению должного реагирования страны-участницы в случае ЗПА или, как принято в некоторых странах-участницах, ЗУ. Необходимо также предусматривать мероприятия, способствующие поддержанию / восстановлению ослабленных функций безопасности.

<sup>1</sup> Пороговые эффекты (cliff edge effects) – это последствия воздействий, при которых самое незначительное увеличение значения какой-либо характеристики рассматриваемого воздействия может иметь значительно большие последствия. Например, внешнее затопление ниже установленного уровня может незначительно влиять или вообще не оказывать влияния на АЭС. Однако даже небольшое увеличение уровня затопления сверх установленного предела (порога) может повлиять на многие функции АЭС и привести к тяжелой аварии.

## ОБЩАЯ ПОЗИЦИЯ

### I. УЧЕТ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ В ПРОЕКТЕ

#### Контекст

*Авария на АЭС «Фукусима-Дайичи» показала, что внешние воздействия на площадку АЭС могут оказать самое серьезное влияние на ее безопасность и поэтому должны быть тщательно рассмотрены при анализе безопасности станции. Такие внешние воздействия, как сейсмическое явление и затопление, могут вызвать ООП систем, важных для безопасности, и тем самым спровоцировать ослабление или потерю некоторых основополагающих функций безопасности, и в результате привести к масштабному выбросу радиоактивных веществ.*

*Регулирующие органы, которые уже проанализировали проекты ВВЭР, реализуемые в их странах, и сделали вывод относительно безопасности этих проектов, установили по состоянию на настоящий момент, что КСЭ типовых АЭС с реакторами ВВЭР, важные для безопасности, спроектированы устойчивыми к внешним и внутренним воздействиям и защищены от них благодаря надлежащим техническим мерам, принятым в проекте, таким как физическое разделение, резервирование, разнообразие, защита от динамических воздействий и т. д. При этом отмечается, что внешние воздействия зависят прежде всего от особенностей каждой площадки, и при анализе надежности проекта необходимо в каждом конкретном случае учитывать конкретные характеристики площадки размещения АЭС.*

#### Обсуждение

##### *1.1. Характеристики конкретной площадки*

Помимо запроектного землетрясения и вызванного им цунами, приведших к аварии на АЭС «Фукусима-Дайичи», существуют и другие примеры внешних воздействий с превышением проектных основ. Так, в декабре 1999 г. была затоплена площадка двух энергоблоков французской АЭС «Блейе» (Blayais). 16 июля 2007 г. в префектуре Ниигата-кен Чуецу (Япония) произошло землетрясение, превысившее проектные значения, установленные для АЭС «Касивадзаки-Карива» (Kashiwazaki-Kariwa). Землетрясение, происшедшее на восточном побережье Соединенных Штатов 23 августа 2011 г. через пять месяцев после аварии на АЭС «Фукусима-Дайичи», также превысило проектные значения для американской АЭС «Норт Энна» (North Anna) [1 – 3].

Во всех этих случаях, за исключением АЭС «Фукусима-Дайичи», блоки были успешно переведены в состояние безопасного останова. Аналогично на АЭС «Фукусима-Дайичи» все действующие энергоблоки были безопасно остановлены после землетрясения магнитудой 9,0 баллов, и КСЭ, важные для безопасности, выдержали это экстремальное землетрясение, а аварийные системы сработали должным образом и выполняли свои функции вплоть до разрушительного затопления площадки волной цунами [4, 5].

Это свидетельствует о том, что для событий, связанных с ЗПА, запас прочности (“safety margins”) играет незаменимую роль. Это свидетельствует еще и о том, что в проекте АЭС «Фукусима-Дайичи» был заложен запас прочности (“safety margins”), достаточный для обеспечения сейсмостойкости с учетом запроектного землетрясения, но не было учтено воздействие цунами, что в итоге и привело к реализации порогового эффекта при превышении высотой волны цунами определенного уровня и послужило причиной множественных функциональных отказов систем безопасности.

Таким образом, при разработке технического (детального) проекта АЭС необходимо комплексно исследовать и рассматривать характеристики и параметры конкретной площадки, и учитывать все аспекты внешних воздействий, т. е. не только землетрясения, но и сопутствующие явления, такие как цунами и другие события (например, пожар, лавину, вулканическую деятельность, замерзание, высокую / низкую температуру, ураган и т. д.). Проект ВВЭР должен рассматривать и отражать характеристики и параметры, относящиеся к безопасности АЭС в целом, и предусматривать достаточный запас прочности (“safety margins”) во избежание возникновения порогового эффекта.

Следует отметить, что, согласно пункту 1.5 документа SSG-35 [8], «при выборе площадки необходимо с самого начала руководствоваться четко установленными критериями в соответствии с нормативно-правовыми требованиями. Такие критерии особенно важны в случае факторов, способных послужить основанием для исключения площадки из рассмотрения. Должен быть найден баланс между характеристиками площадки и особенностями проекта, мерами защиты площадки и административными процедурами».

### **1.2. Надлежащая защита от экстремальных воздействий и их возможного наложения**

Исходным событием аварии на АЭС «Фукусима-Дайичи» стало не только цунами, но и землетрясение. Землетрясение затруднило процесс ликвидации последствий аварии, поскольку замедлило восстановление внешнего энергоснабжения и получение иной помощи извне [5]. Возможны различные варианты наложения внешних воздействий – например, сильный ливень и оползень; землетрясение / падение летательного аппарата и пожар, и т. д. Поэтому проект АЭС должен рассматривать подобное наложение событий и его риск даже при небольшой вероятности возникновения.

### **1.3. Учет многоблочных площадок**

Компактное расположение 1 – 4 блоков и масштабное воздействие цунами и землетрясения на всю площадку АЭС также затруднило противоаварийное реагирование. В качестве примера общего повреждения для 1 – 4 блоков можно назвать разрушение дамбы под действием цунами, повреждение в результате землетрясения емкостей с водой и трубопроводов подачи воды, сдвиг дорожного полотна, оползни, блокировку дорог обломками и блокировку доступа к зданиям. Эти повреждения осложнили организацию альтернативной схемы подачи охлаждающей воды и восстановление электроснабжения [5].

Поэтому для многоблочных АЭС важно уже в начале проектирования учитывать такие факторы, как:

- взаимовлияние энергоблоков;
- необходимость физического разделения энергоблоков во избежание распространения с блока на блок проблем, обусловленных как внешними, так и внутренними событиями;
- наличие общего станционного оборудования (например, систем вентиляции);
- влияние наличия общеблочной системы охлаждения;
- необходимость обеспечения доступа к каждому отдельному энергоблоку и на площадку АЭС в целом с целью предусматривать решения или минимизировать риски для предлагаемой схемы планировки (генерального плана) станции.

Следует также отметить, что при определении последствий внешнего воздействия на АЭС необходимо учитывать влияние данного события на другие расположенные поблизости установки и на безопасность любой системы или обслуживающего оборудования. Необходимо учитывать последствия отказа КСЭ, важных для обеспечения безопасности, не связанной с неядерным оборудованием, если их отказ может повлиять на безопасность АЭС – например, на возможность доступа к ним для осуществления управления и / или ремонта блока, или если такой отказ потенциально способен привести к повреждению систем безопасности.

### **1.4. Оценка опасных внешних воздействий**

Одним из наиболее важных вопросов аварии на АЭС «Фукусима-Дайичи» стало неправильное определение и недооценка проектной высоты волны цунами для этой площадки [5].

При определении проектной высоты волны использовались только детерминистические методы, и не учитывались исследования и результаты вероятностных оценок опасности цунами – например, оценки, выполненной в 2006 г. [6].

До аварии на АЭС «Фукусима-Дайичи» соответствие вероятностной оценке проектного землетрясения было в Японии добровольным. Вместе с тем большинство японских АЭС уделяли большое внимание ВАБ для сейсмических воздействий на конкретной площадке. ВАБ для сейсмических воздействий был выполнен для АЭС «Фукусима-Дайичи», но для других внешних воздействий (например, затопления) ВАБ не проводился, и, соответственно, риск возникновения цунами для этой площадки не учитывался.

При оценке опасных внешних воздействий детерминистический подход подразумевает, что вместе с запасом прочности учет исторических событий и связанной с ними неопределенности компенсирует неполное знание этого вопроса.

С другой стороны, вероятностные методы в явном виде обеспечивают учет неопределенностей и их развития на разных этапах процесса оценки опасных воздействий. Это позволяет определить как проектные, так и запроектные параметры внешних воздействий вместе с определенными уровнями достоверности.

В связи с этим для площадок АЭС важно выполнять и детерминистический, и вероятностный анализ, чтобы лучше понять различные пути количественной оценки неопределенностей и в большей степени компенсировать недостаток знаний.

Поэтому детерминистический и вероятностный подходы должны дополнять друг друга, а результаты их применения должны быть отражены в проекте АЭС и учтены при обосновании безопасности АЭС в случае внешних воздействий.

### *1.5. Периодическая повторная оценка опасных внешних воздействий*

Во время выдачи разрешений на строительство энергоблоков АЭС «Фукусима-Дайичи» – в 60-е гг. – исходное проектное цунами для этой станции было определено исходя из чилийского цунами 1960 г., имевшего рекордно высокую волну 3,122 м. После того, как Японское общество инженеров-строителей (Japan Society of Civil Engineers) опубликовало в 2002 г. документ «Методы оценки цунами для атомных электростанций» [7], держатель лицензии компания «ТЕРСО» добровольно пересмотрела величину проектного цунами.

С помощью этих новых методов детерминистической оценки максимальная высота волны проектного цунами была установлена на уровне 5,7 м. Поскольку эти изменения были сделаны добровольно, а не по указанию регулирующего органа, проектная основа не претерпела изменений. Тем не менее был принят ряд мер по обеспечению выполнения функций безопасности – например, двигатели насосов морской воды были установлены на другой, более высокой отметке.

В феврале 2009 г. было завершено еще одно исследование, которое выполнялось по методологии оценки цунами (Tsunami Assessment Methodology), учитывавшей последние данные по рельефу морского дна и данные наблюдений за уровнем прилива. По результатам этого исследования высота волны цунами была определена на уровне 6,1 м. В связи с этим были приняты дополнительные меры защиты уплотнений двигателей насосов с учетом данной высоты волны.

В связи с повторной оценкой проектного цунами интересно отметить, что в исследовании вероятностной опасности цунами 2006 г., которое проводилось с целью совершенствования методологии и подтверждения пригодности вероятностного метода оценки опасности цунами, в качестве одного из примеров рассматривалась площадка АЭС «Фукусима-Дайичи». Это исследование определило максимальную высоту волны цунами 10,2 м в передней части водозаборного пункта и максимальную высоту затопления 15,7 м с южной стороны основных зданий 1 – 4 блоков АЭС «Фукусима-Дайичи» [5]. Однако результаты исследования не были приняты во внимание для АЭС «Фукусима-Дайичи».

Авария на АЭС «Фукусима-Дайичи» показала, что любые изменения во внешних воздействиях или их понимании следует периодически оценивать с точки зрения влияния этих изменений на проект и конфигурацию АЭС. Если периодический повторный анализ или новая информация говорят о возможности возникновения условий, способных существенно уменьшить запас прочности (“safety margins”) или превысить текущие проектные допущения, необходимо своевременно провести официальную всестороннюю оценку таких потенциальных последствий.

Необходимо осуществить независимый функциональный анализ безопасности в целях достижения полного понимания всех последствий данных условий для ядерной безопасности. Если одним из последствий может стать ООП важных систем безопасности, необходимо незамедлительно предусмотреть компенсирующие мероприятия или принять контрмеры.

Авария на АЭС «Фукусима-Дайичи» показала также, что держатели лицензий и регулирующие органы должны постоянно осуществлять поиск новой научной информации о внешних воздействиях и методологии оценки величины, частоты возникновения и потенциального влияния этих воздействий. Эта новая информация и методологии должны учитываться по мере появления при оценке безопасности проекта и всего жизненного цикла АЭС. Держатели лицензий и регулирующие органы должны своевременно принимать меры по реализации контрмер в случаях, когда новая информация показывает существенное изменение профиля риска для АЭС.

## Учет внешних воздействий в проектных решениях АЭС с реакторами типа ВВЭР

Новые проекты АЭС с ВВЭР разрабатываются с учетом детальных характеристик конкретной площадки и воздействий, относящихся к безопасности АЭС в целом (таких как землетрясение, наводнение, падение летательного аппарата и т. д.), в соответствии с национальными нормами и правилами и с учетом норм МАГАТЭ. Далее представлены некоторые примеры учета внешних воздействий в новых проектах реакторов ВВЭР.

### *Сейсмические воздействия*

В новых проектах реакторов ВВЭР защита от опасных сейсмических воздействий обеспечивается благодаря учету сейсмических характеристик конкретных площадок.

Строительные конструкции и сооружения, а также оборудование, технологические трубопроводы и другие коммуникации и конструкции АЭС с реакторами типа ВВЭР-ТОИ проектируются в расчете на сейсмическое воздействие до 8 баллов по шкале MSK-64.

Для обеспечения возможности сооружения АЭС на площадках с более высокими сейсмическими характеристиками проектом обеспечивается сейсмостойкость до 9 баллов по шкале MSK-64 без существенного изменения пространственных, компоновочных, маршрутно-технологических и других базовых проектных решений [12].

Например, в проекте АЭС «Аккую» (ВВЭР-ТОИ) в Турции для определения уровня проектного землетрясения использованы и детерминистические, и вероятностные методы, и предусмотрены достаточные запасы (“safety margins”). Блоки с ВВЭР, которые планируется соорудить на этой площадке, рассчитаны на максимальное горизонтальное ускорение на свободной поверхности грунта порядка 0,39 g. Еще одним примером является площадка АЭС «Пакш»: в заявке, поданной на получение лицензии на размещение этой АЭС, для двух блоков с ВВЭР-1200 (проект АЭС-2006) для проектного землетрясения указано значение ускорения – 0,34 g.

### *Внешнее затопление*

Новые энергоблоки могут быть защищены от проектного наводнения (затопления) и цунами благодаря применению «концепции сухой площадки» в компоновке станции, при которой, помимо соответствующих запасов, все уязвимые КСЭ размещаются выше уровня проектного затопления. В тех случаях, когда применение «концепции сухой площадки» нецелесообразно, в проекте должны быть предусмотрены стационарные внешние барьеры, такие как насыпь, волнорез или дамба для защиты от воздействия волны. В новых проектах АЭС с ВВЭР проектное затопление определено на уровне ниже нулевой отметки АЭС с наличием достаточного запаса и с демонстрацией отсутствия порогового эффекта. Например, на АЭС «Тяньвань-2» с ВВЭР-1000 в Китае (для которой предусмотрены стационарные внешние барьеры) проектное затопление составляет порядка 7,18 м при нулевой отметке станции 7,85 м, а для АЭС «Аккую» с ВВЭР-ТОИ в Турции (использующей «концепцию сухой площадки») параметры проектного цунами с учетом запаса прочности составляют приблизительно 10,5 м. «Концепцию сухой площадки» планируется использовать и для энергоблоков венгерской АЭС «Пакш» с ВВЭР-1200.

*Другие внешние воздействия (сильный ветер и торнадо, экстремально низкая / высокая температура, взрывы за пределами станции и т. д.)*

Было показано, что проекты ВВЭР учитывают широкий спектр экстремальных условий окружающей среды. Предполагается, что консервативный выбор этих условий позволит охватить самые экстремальные параметры конкретной площадки. Например, в России новые элементы АЭС с ВВЭР, важные для безопасности, разработаны с учетом скорости ветра 30 м/с (на высоте 10 м над уровнем земли) и торнадо класса 3,60 по шкале Фуджиты (Fujita) [13]. Вместе с тем, учитывая, что практически на всех китайских площадках проектная скорость ветра превышает 30 м/с, АЭС «Тяньвань-2» (ВВЭР-1000) спроектирована с учетом условий, характерных для этой площадки.

## Общая позиция

Регулирующие органы пришли к выводу, что при проектировании АЭС с ВВЭР для обеспечения защиты станции от внешних воздействий и предотвращения значительных радиоактивных выбросов важно учитывать следующие аспекты:

- Необходимо тщательно всесторонне изучать характеристики и параметры конкретной площадки, важные для безопасности АЭС в целом, чтобы учесть их в проектной основе и предусмотреть достаточные запасы прочности (“safety margins”) во избежание возникновения потенциальных пороговых эффектов.
- Проект АЭС должен обеспечивать надежную защиту от экстремальных воздействий и возможных сочетаний указанных воздействий (включая экстремальные события с низкой частотой возникновения).
- Проект должен учитывать также и запроектные внешние воздействия и / или предусматривать дополнительные меры для практического исключения большого или раннего радиоактивного выброса.
- В проекте должны быть предусмотрены конкретные технические средства и организационные мероприятия для ликвидации последствий внешних воздействий на многоблочных площадках.
- Для обоснования безопасности АЭС при возникновении внешних воздействий и их сочетаний необходимо применять как детерминистические, так и вероятностные методы.
- В течение всего жизненного цикла АЭС важно с учетом самого современного уровня развития науки и техники (современных знаний) периодически проводить повторную оценку перечня и характеристик внешних воздействий и реакции станции на них.

## II. НАДЕЖНОСТЬ ВЫПОЛНЕНИЯ ФУНКЦИЙ БЕЗОПАСНОСТИ

### Контекст

Уроки аварии на АЭС «Фукусима-Дайичи» свидетельствуют о важности правильного применения концепции ГЭЗ, в том числе о значимости надлежащей защиты станции от редких и экстремальных событий (таких как опасные внешние воздействия).

Правильное применение концепции ГЭЗ означает, что проект АЭС должен содержать ряд надежных и (насколько это практически осуществимо) независимых уровней защиты, ориентированных на обеспечение выполнения следующих основополагающих функций безопасности: управление реактивностью, отвод остаточного тепловыделения из реактора и БВ к КП и удержание радиоактивных веществ.

### Обсуждение

Проект АЭС должен предусматривать эффективные инженерные (технические) средства и организационные мероприятия по обеспечению выполнения основополагающих функций безопасности [9]:

- управления реактивностью;
- отвода тепла от реактора и хранилища топлива;
- удержания радиоактивных веществ, защиты от радиации и контроля плановых выбросов радиоактивных веществ, а также ограничения аварийного выброса радиоактивных веществ.

Под эффективностью технических средств любого уровня ГЭЗ подразумевается достаточная надежность этих средств.

Требования надежности предъявляются к группам средств безопасности [10], выполняющим конкретные функции безопасности. Поэтому при установлении этих требований средства, предназначенные для выполнения основополагающих функций безопасности, необходимо рассматривать вместе с соответствующими обеспечивающими системами (системами энергоснабжения, отопления и вентиляции, и др.).

Средства, входящие в вышеупомянутые группы безопасности, должны рассматриваться проектом как КСЭ, важные для безопасности, что означает, что весь набор требований к качеству должен распространяться на процессы проектирования, изготовления, поставки и эксплуатации этих средств.

При оценке степени надежности групп средств безопасности необходимо принимать во внимание и детерминистические, и вероятностные аспекты. Например: детерминистическим аспектом может служить соответствие критерию единичного отказа, если этот критерий применяется.

В качестве примера вероятностного аспекта можно привести обеспечение уровня надежности, достаточного для достижения общих вероятностных целевых значений, установленных регулирующим органом (таких как частота повреждения активной зоны или частота большого выброса).

Особое внимание необходимо уделять механизмам, способным привести к отказу группы средств по общей причине. Такие механизмы могут быть связаны с внешними и внутренними воздействиями, а в некоторых случаях и с нормальной эксплуатацией установки.

Необходимо анализировать меры, позволяющие снизить вероятность ООП группы средств безопасности. Подобные меры включают применение таких принципов обеспечения безопасности, как физическое разделение, резервирование и разнообразие. Большое внимание следует уделять также воздействиям, способным вывести из строя средства, относящиеся к нескольким уровням ГЭЗ, и влиянию, которое может оказывать на эти средства отказ других средств, предназначенных для поддержания той же функции на другом уровне ГЭЗ.

При оценке степени надежности групп средств безопасности необходимо анализировать и по необходимости количественно оценивать все соответствующие аспекты взаимодействия «человек-машина».

При оценке надежности групп средств безопасности предметом особого внимания являются инновационные технические средства («впервые применяемые»). Необходимым условием применения таких средств является их достаточная апробация, что подразумевает достаточное обоснование их работоспособности посредством расчетного анализа, экспериментальным путем и (или) опытом эксплуатации.

### **Проектные решения АЭС с ВВЭР, обеспечивающие надежное выполнение функций безопасности**

Безопасность новых проектов АЭС с ВВЭР обеспечивается последовательным применением стратегии ГЭЗ. Например, в проекте АЭС-2006 (в частности, блоков Нововоронежской АЭС-2) первый уровень ГЭЗ обеспечивает:

- устойчивость АЭС к внешним воздействиям;
- минимизацию размера зон потенциального радиационного воздействия АЭС на население в ходе нормальной эксплуатации и при аварии;
- разработку проектной основы на базе консервативного подхода с учетом обеспечения безопасности благодаря применению апробированных внутренних свойств РУ, в том числе:
  - саморегулированию мощности реактора;
  - поддержанию давления в первом контуре за счет отрицательной обратной связи по реактивности и давлению;
  - возможности отвода тепла на остановленном реакторе из активной зоны к КП с помощью естественной циркуляции;
  - большому объему воды в горизонтальных ПГ;
- эффективную систему технического обслуживания и ремонта.

На втором уровне ГЭЗ новые проекты ВВЭР используют технические средства (средства диагностики, автоматические средства регулирования, блокировки, автоматические защиты и др.), позволяющие своевременно обнаружить и устранить отклонение от нормальной эксплуатации, а также осуществить управление в случае такого отклонения.

Третий уровень ГЭЗ проекта АЭС-2006 использует хорошо сбалансированную комбинацию активных и пассивных систем безопасности. Такое сочетание обеспечивает быстрое (благодаря действию активных систем) и надежное (благодаря пассивным системам) предотвращение ПА и потенциальных ЗПА.

Активные системы безопасности включают систему аварийной защиты реактора, системы защиты первого и второго контура от превышения давления (эти системы сохраняют работоспособность в случае потери питания), систему аварийного и планового расхолаживания первого контура и охлаждения БВ, систему аварийного впрыска бора, систему аварийного охлаждения ПГ, систему аварийного энергоснабжения, спринклерную систему, систему аварийного газоудаления и некоторые другие. Активные системы безопасности имеют двухканальную конфигурацию с внутренним резервированием (Нововоронежская АЭС-2) или четырехканальную схему (Ленинградская АЭС-2).

В число пассивных систем безопасности входит СПОТ ПГ, пассивная часть САОЗ (ГА) и др. Активные и пассивные системы способны выполнить функции безопасности независимо друг от друга.

Пассивные системы безопасности АЭС-2006 включают также двойную защитную оболочку, исключаящую или ограничивающую выброс радиоактивных веществ в окружающую среду. Внутренняя защитная оболочка изготовлена из предварительно напряженного железобетона с уплотняющей стальной облицовкой и рассчитана на ПА и ЗПА в сочетании с наложением максимального расчетного землетрясения. Внешняя защитная оболочка изготовлена из ненапряженного железобетона и служит для обеспечения защиты систем и элементов реакторного отделения от внешних воздействий природного и техногенного происхождения, включая падение летательного аппарата. Внешняя защитная оболочка обеспечивает герметичность кольцевого пространства. Суммарная (интегральная) утечка из защитной оболочки не превышает 0,3 % объема в день при давлении, равном проектному аварийному давлению.

В случае аварии спринклерная система служит для снижения давления и температуры внутри защитной оболочки и связывания радиоактивного йода, содержащегося в паровой и воздушной среде оболочки. Эта система обеспечивает автоматический впрыск борированной воды в воздушное пространство защитной оболочки в случае, если давление в ней превысит определенное значение, и при этом впрыск будет продолжаться до тех пор, пока давление не упадет до установленной величины.

Чтобы успешно справиться с ЗПА (в том числе тяжелой аварией – 4-й уровень ГЭЗ), проект ВВЭР включает следующие технические средства и организационные мероприятия в дополнение к используемым на уровне 3:

- СПОТ;
- систему удаления водорода из защитной оболочки;
- систему удержания и охлаждения кориума (УЛР или «ловушку»);
- передвижные устройства (компактную вентиляционную градирню с соответствующими трубопроводами; передвижной дизель-генератор и др.), помогающие осуществить подпитку первого контура и БВ, а также отвести тепло из реактора и БВ;
- КИПиА для аварийного мониторинга.

Применение различных технических средств на разных уровнях ГЭЗ способствует обеспечению независимости уровней ГЭЗ друг от друга.

СПОТ предназначена для отвода остаточного тепла из реактора к КП в течение длительного периода времени (описание различных вариантов СПОТ с водяным или воздушным охлаждением представлено в разделе III).

Пассивная часть САОЗ (ГА) Нововоронежской АЭС-2 включает 4 ГЕ 1-й ступени и 8 ГЕ 2-й ступени. Работа системы обеспечивает охлаждение активной зоны в течение не менее чем 24 часов при полном отказе активных систем безопасности и гильотинном разрыве трубопровода первого контура.

Система аварийного удаления водорода предотвращает накопление водорода в защитной оболочке до взрывоопасной концентрации. В состав системы входят пассивные каталитические рекомбинаторы водорода, расположенные в местах возможного скопления водорода. При такой схеме не требуется перемешивание в защитной оболочке для создания однородной среды (атмосферы).

Система постоянного контроля (мониторинга) концентрации водорода состоит из первичных и вторичных устройств (датчиков, средств обработки и представления информации), каналов передачи данных и средств метрологической аттестации, сертификации и регулировки приборов. Система мониторинга может измерять концентрацию водорода в паровоздушно-водородной смеси и осуществлять непрерывный контроль параметров.

В проекте АЭС-2006 УЛР («ловушка») призвано локализовать элементы расплава и фрагменты активной зоны, обеспечить охлаждение расплава (кориума) и гарантировать его подкритичность, а также минимизировать выброс радиоактивных веществ и водорода внутри защитной оболочки. От УЛР тепло пассивно отводится к охлаждающей воде, окружающей приемок расплава активной зоны («core melt pot»), что способно обеспечивать длительное охлаждение и затвердевание расплава. Жертвенный материал УЛР содержит окись гадолиния для обеспечения подкритичности расплава. Образование водорода в УЛР существенно уменьшается (примерно в 4 раза), поскольку расплавленный металл захватывает кислород из окиси алюминия в приемке, а не из воды. Образующаяся на поверхности расплава корка уменьшает выход радионуклидов в защитную оболочку.

### Общая позиция

Для обеспечения надежной ГЭЗ технические средства, предназначенные для поддержания трех основополагающих функций безопасности, должны удовлетворять следующим принципам:

- при установлении требований надежности средства, предназначенные для выполнения основополагающих функций безопасности, должны рассматриваться вместе с соответствующими обеспечивающими системами (системой энергоснабжения, отопления и вентиляции, и др.);
- при проектировании необходимо устанавливать детерминистические критерии и вероятностные целевые значения с целью определения достаточной надежности выполнения функций безопасности и соответствующих технических средств;
- средства должны рассматриваться в проекте как КСЭ, важные для безопасности, что означает, что требования к обеспечению их качества должны распространяться на процессы проектирования, изготовления, поставки и эксплуатации этих средств;
- в проекте станции должны быть приняты меры по снижению вероятности отказа по общей причине средств, выполняющих основополагающие функции безопасности на разных уровнях ГЭЗ. Подобные меры включают применение таких принципов обеспечения безопасности, как физическое разделение, резервирование и разнообразие;
- средства, предназначенные для выполнения конкретных функций безопасности на одном уровне ГЭЗ, должны быть (насколько это практически целесообразно) функционально и физически независимы от средств, предназначенных для выполнения той же функции на другом уровне ГЭЗ;
- технические средства, включение или работа которых требует действий со стороны человека, должны быть проверены на предмет правильности организации взаимодействия «человек-машина». Должно быть тщательно проанализировано влияние потенциальных ошибок человека на работоспособность технических средств, и приняты надлежащие контрмеры;
- проект АЭС должен учитывать возможное запаздывание в срабатывании или работе технических средств по разным причинам;
- применение в проекте инновационных технических средств может быть разрешено при условии их достаточного обоснования посредством расчетного анализа, экспериментальным путем и опытом эксплуатации;
- в проекте должно быть рассмотрено потенциальное негативное взаимовлияние технических средств, которые должны работать одновременно (т. е. взаимовлияние, снижающее их надежность).

### III. ПРОЕКТНЫЕ РЕШЕНИЯ, ОРИЕНТИРОВАННЫЕ НА КОНКРЕТНУЮ ЗАПРОЕКТНУЮ АВАРИЮ

#### Контекст

Уроки, извлеченные из аварии на АЭС «Фукусима-Дайичи», подтвердили, что концепция ГЭЗ остается главной основой обеспечения безопасности АЭС. Вместе с тем анализ уроков аварии подчеркнул необходимость ужесточения требований к организации уровней ГЭЗ и, в частности, уровня, рассчитанного на аварии, не являющиеся тяжелыми авариями, но ранее не включенные в проектную основу АЭС.

Сценарии аварий с ПОС (полной потерей всех внешних и стационарных источников питания, в том числе аварийного питания от дизель-генераторов) и аварийные сценарии потери систем отвода остаточного тепловыделения от ядерного топлива к конечному поглотителю (отказы систем нормальной эксплуатации и систем безопасности, предусмотренных проектом АЭС) являются важными ситуациями, которые должны быть рассмотрены в проекте АЭС.

Далее по тексту данного раздела рассматривается аварийный сценарий ЗПА без его перехода в тяжелую ЗПА (поскольку вопросы управления тяжелой аварией в реакторах ВВЭР рассматриваются в другой подгруппе РГ- ВВЭР).

## Обсуждение

Поскольку сценарии с ПОС или потерей систем отвода тепла к КП могут возникать в результате внутренних или внешних воздействий, приводящих к ООП элементов как нормальной эксплуатации, так и систем безопасности, необходимо обеспечить надежную защиту АЭС от подобных сценариев. Такая защита может быть обеспечена за счет двух видов мероприятий.

Мероприятия первого вида – это меры, направленные на снижение вероятности реализации сценариев ПОС или потери КП (это может быть повышение устойчивости внешней сети к внешним воздействиям; повышение надежности систем безопасности, предназначенных для реагирования на потерю внешнего электропитания или потерю систем отвода тепла нормальной эксплуатации – раздел II Общей позиции).

Мероприятия второго вида направлены на повышение способности станции реагировать на сценарии полного обесточивания или потери КП. Наличие в проекте АЭС технических и организационных мероприятий второго вида необходимо. Такие мероприятия должны обеспечивать выполнение основополагающих функций безопасности (приведенных в разделе II).

Вместе с тем следует отметить, что новые проекты реакторов типа ВВЭР, как правило, гарантируют подкритичность реактора в случае реализации сценариев полного обесточивания (потери КП), поскольку после останова реактора (автоматического или осуществляемого оператором, и ни в коем случае не зависящего от состояния источников энергопитания) обеспечиваемый запас подкритичности считается достаточным для удержания реактора от выхода на критичность даже с учетом реактивности, выделяющейся в ходе расхолаживания РУ. Подкритичность топлива в БВ надежно гарантирована и не требует принятия отдельных мер.

В случае сценариев с полным обесточиванием (потерей КП) на нетяжелой фазе также нет необходимости принимать особые меры по обеспечению выполнения третьей основополагающей функции безопасности, поскольку на этом этапе сохраняется целостность физических барьеров.

Таким образом, для сценариев с полным обесточиванием (потерей КП) важны «технические и организационные мероприятия», обеспечивающие отвод тепла из активной зоны реактора и хранилища топлива.

На начальном этапе полного обесточивания (потери КП) отвод тепла из активной зоны реактора обеспечивается за счет теплообмена к воде ПГ (как правило, в условиях естественной циркуляции); уровень в ПГ уменьшается пропорционально кипению воды, что ведет к уменьшению отвода тепла и нагреву первого контура. При невозможности восстановления отвода тепла через ПГ разогрев первого контура приводит к тому, что тепло из активной зоны отводится за счет выхода среды первого контура через предохранительный сбросной клапан компенсатора давления. До наступления тяжелой фазы аварии основная задача управления заключается в восстановлении отвода тепла из активной зоны через ПГ; в случае ПОС вторая и наиболее важная задача – поддержать (восстановить) контроль параметров АЭС, показывающих состояние основополагающих функций безопасности.

В случае неспособности систем обеспечить отвод тепла из БВ к КП процессы носят значительно более инерционный характер по сравнению с тем, что происходит в аналогичной ситуации в РУ, и персонал АЭС располагает намного большим временем для восстановления функции отвода тепла (по сравнению с реактором).

### Проектные решения ВВЭР на случай некоторых запроектных аварий / запроектных условий

Для преодоления сценариев полного обесточивания (потери КП) могут использоваться такие технические средства, как:

- СПОТ;
- специальные аккумуляторные батареи с длительным периодом разрядки, специальные гидроэлектростанции, газотурбинные установки и т. д.;
- передвижные технические средства для управления авариями.

В различных проектах ВВЭР используются, например, следующие технические средства для преодоления сценариев, связанных с полным обесточиванием (потерей КП тепла):

#### (а) Реактор

Отличительной особенностью новых проектов ВВЭР является применение СПОТ, предназначенных для обеспечения выполнения основных функций безопасности в начальный период ЗПА

с полным обесточиванием (потерей КП). Существует два типа СПОТ ПГ: с воздушным охлаждением (Нововоронежская АЭС-2, проект АЭС-2006-М и ВВЭР-ТОИ в России, АЭС «Куданкулам» с ВВЭР-1000 в Индии) и с водяным охлаждением (Ленинградская АЭС-2, проект АЭС-2006-П).

СПОТ с воздушным охлаждением использует в качестве КП воздух. Остаточное тепло реактора отводится через ПГ к теплообменникам СПОТ типа «пар - атмосферный воздух», в которых пар конденсируется и затем возвращается в ПГ. Забор холодного воздуха происходит в нижней части здания реактора. Нагретый воздух проходит по воздуховодам в куполе защитной оболочки к сбросному дефлектору. При сохранении целостности первого контура тепло может отводиться в течение значительного периода времени без подпитки водой от внешних источников. В случае разуплотнения первого контура отвод тепла обеспечивается благодаря совместной работе СПОТ и ГА 2-й ступени (ГА 2-й ступени в проектах АЭС-2006-М и ВВЭР-1000 АЭС «Куданкулам», и ГА 2-й и 3-й ступени в проекте ВВЭР-ТОИ).

СПОТ с водяным охлаждением, предусмотренная в проекте АЭС-2006-П, использует воду, хранящуюся в баках, расположенных в верхней части защитной оболочки. В случае полного обесточивания вода, испаряющаяся из баков в атмосферу, отводит остаточное тепло. Способность отвода тепла зависит от количества воды в баках (расчетное время варьируется от 24 до 72 часов, после чего необходимо пополнить баки СПОТ от внешнего источника).

Вне зависимости от наличия пассивной системы на более поздних этапах аварии применяется передвижное (мобильное) оборудование для выполнения функций безопасности. В проекте АЭС-2006-М (Нововоронежская АЭС-2) дополнительно применяются следующие технические средства по управлению ЗПА: резервный («альтернативный») дизель-генератор с воздушным охлаждением, резервный промежуточный контур с градирней (блочная замкнутая вентиляторная градирня воздушного типа), передвижная насосная установка для подачи воды от внешних источников, кабели, дополнительные трубопроводы для подключения передвижного оборудования с целью организации циркуляции теплоносителя.

Оборудование, упомянутое выше, используется вместе с оборудованием активных систем безопасности: насосами системы охлаждения БВ, насосами аварийного впрыска бора, теплообменником системы охлаждения БВ, теплообменником САОЗ, трубопроводами этих систем.

В проекте АЭС-2006-П (Ленинградская АЭС-2) в случае полного обесточивания энергоснабжение системы контроля и управления осуществляется от отдельной двухканальной системы электропитания, предназначенной для применения в условиях ЗПА. Оба канала имеют одинаковый комплект оборудования: аккумуляторные батареи емкостью 24 часа работы, передвижной дизель-генератор (со временем работы до 72 часов и более при условии наличия топлива).

В ходе нормальной эксплуатации эта система подключена к двум из четырех каналов системы аварийного энергоснабжения. В проекте АЭС-2006-П предусмотрены также дополнительные устройства для дублирования функции подпитки БВ отработавшего топлива, баков аварийного отвода тепла и первого контура: передвижной дизель-генератор высокого давления и насосные установки, подключаемые к специальным трубопроводам, врезанным в байпас существующих систем безопасности.

Все это передвижное (мобильное) оборудование расположено в специально отведенных местах на площадке, защищенных от внешних воздействий. В обоих проектах (с воздушным и водяным охлаждением) можно использовать дизель-генераторы штатного энергоснабжения для ликвидации ситуации полного обесточивания (в качестве технического средства для ЗПА).

(b) Бассейн выдержки отработавшего топлива

В новых проектах ВВЭР (Нововоронежская АЭС-2, Ленинградская АЭС-2 и др.) не предусмотрены СПОТ от БВ. В случае ПОС отвод тепла может осуществляться за счет разогрева и испарения воды БВ. После этого отвод тепла от БВ может быть организован с помощью передвижных технических средств.

Необходимо учитывать следующее для таких систем:

а. Технические средства, рассчитанные на преодоление сценариев полного обесточивания (или потери КП), должны быть как можно более независимыми от систем нормальной эксплуатации и систем безопасности, обеспечивающих электропитание и отвод тепла в процессе нормальной эксплуатации и при ПА;

б. Критерии приемлемости продолжительности времени срабатывания систем, предназначенных для ликвидации ЗПА / ЗУ типа полного обесточивания или потери КП тепла. Указанное время не должно быть больше времени, в течение которого естественные процессы нагрева и кипения теплоносителя (в ПГ, первом контуре и БВ отработавшего топлива) предотвращают наступление тяжелой стадии

аварийной ситуации. Как правило, это время не должно превышать двух часов для РУ и нескольких часов для БВ отработавшего топлива (запас времени определяется по результатам соответствующего расчетного анализа различных ЗПА до превышения установленного предела повреждения топлива в реакторе и в БВ). При расчете времени срабатывания вышеупомянутых систем (оборудования) необходимо учитывать время организации перемещения персонала к месту нахождения данных систем (оборудования), время расчистки путей перемещения и время транспортировки оборудования к месту развертывания и подключения;

с. Предусмотренные технические средства и организационные мероприятия должны быть достаточными для обеспечения отвода тепла от топлива в течение неограниченного периода времени (Для систем, потребляющих воду – таких как водяные СПОТ – должна быть предусмотрена подпитка с целью пополнения запаса воды. Для систем, работающих на топливе – дизель-генераторы и электронасосы – должно быть обеспечено пополнение запаса топлива). Должны быть рассмотрены потенциальные меры противодействия негативным эффектам, возникающим по истечении длительного периода времени. Например, при невозможности сохранения герметичности уплотнения главного циркуляционного насоса в течение длительного периода времени (более 24 часов) в случае высокой температуры в первом контуре должны быть предусмотрены меры охлаждения уплотнения главного циркуляционного насоса или меры снижения температуры первого контура.

В проекте АЭС должна быть рассмотрена возможность резервирования КП.

### Общая позиция

*Страны-участницы должны считать принципиально важными следующие требования к техническим средствам и организационным мероприятиям, предусмотренным проектом АЭС и направленным на ликвидацию аварий с ПОС или потерей систем отвода тепла к КП:*

1. Технические средства, используемые для управления ЗПА / для ЗУ типа полного обесточивания или потери КП, должны быть, насколько это практически целесообразно, независимы от систем нормальной эксплуатации и систем безопасности. Это означает, что они должны быть:

а) функционально и физически отделены от систем нормальной эксплуатации и систем безопасности (насколько это практически возможно) для обеспечения того, чтобы отказ любого из их элементов не привел к отказу технических средств, предназначенных для управления аварией с полным обесточиванием или потерей КП;

б) защищены от внешних воздействий, в том числе вторичных эффектов таких воздействий (например, в результате землетрясения может произойти разрушение несейсмостойких конструкций и, следовательно, технические средства, предназначенные для управления ЗПА / для ЗУ должны быть размещены в местах, защищенных от потенциального воздействия обломков таких конструкций. Может рассматриваться размещение в бункере или на некотором отдалении от зданий и сооружений).

2. Время срабатывания систем, предназначенных для управления ЗПА / для ЗУ типа полного обесточивания или потери КП, должно учитывать время, необходимое для организации перемещения персонала к месту размещения систем (оборудования), время расчистки путей перемещения и время транспортировки оборудования к месту развертывания и подключения. При этом данное время не должно превышать критическое значение, которое должно быть определено в проекте.

3. На многоблочных АЭС количество технических средств и объем организационных мероприятий, рассчитанных для управления ЗПА / для ЗУ типа полного обесточивания или потери КП, должны быть достаточными для управления такими авариями, протекающими одновременно на всех блоках, поскольку блоки могут находиться в разных эксплуатационных состояниях.

4. Предусмотренные технические средства и организационные мероприятия должны быть достаточными для обеспечения длительного отвода тепла ядерного топлива. В проекте АЭС должны быть рассмотрены потенциальные меры противодействия негативным эффектам, возникающим по истечении большого периода времени.

5. Технические средства, предназначенные для управления ЗПА / для ЗУ, должны рассматриваться в проекте АЭС как КСЭ, важные для безопасности.

6. Проект АЭС должен определять места подключения технических средств, предназначенных для управления ЗПА / для ЗУ типа полного обесточивания или потери КП, к эксплуатационному оборудованию.

*Важно продемонстрировать защищенность выделенных мест в случае воздействий, вызывающих необходимость их применения.*

*Следующие проектные решения способствуют достижению высокого уровня безопасности АЭС при реализации аварийных сценариев типа полного обесточивания или потери КП:*

- 1. Использование СПОТ должно рассматриваться как техническое мероприятие по организации отвода тепла от топлива в реакторе.*
- 2. Применение специальных аккумуляторных батарей большой емкости должно обеспечивать дополнительную возможность контроля состояния основополагающих функций безопасности наряду с другими действиями управления аварией (например, восстановлением энергоснабжения и т. д.).*
- 3. В проекте АЭС должны быть рассмотрены меры, способствующие восстановлению внешнего энергоснабжения (гидроэлектростанция, газотурбинная установка и т. п.).*
- 4. В проекте АЭС должна быть рассмотрена возможность резервирования КП.*
- 5. Должно быть рассмотрено применение передвижных технических средств для управления аварией в качестве меры обеспечения безопасности АЭС в случае аварии с ПОС или потерей КП.*

#### IV. ПРОТИВОАВАРИЙНАЯ ГОТОВНОСТЬ И РЕАГИРОВАНИЕ

##### Контекст

*Авария на АЭС «Фукусима-Дайичи» продемонстрировала низкий (недостаточный) уровень готовности к управлению авариями. Вследствие выброса радиоактивных веществ произошло загрязнение большой территории вокруг АЭС «Фукусима-Дайичи». Результатом аварии стала масштабная эвакуация местного населения, введение ограничений на использование большей части территории для производства пищевых продуктов и рыболовства и других ограничений на ведение промышленной деятельности в этой местности.*

*Авария на АЭС «Фукусима-Дайичи» подчеркнула необходимость рассмотрения всех аспектов противоаварийной готовности и реагирования уже на стадии проектирования. В случае подобной аварии крайне неблагоприятные условия окружающей среды и потенциальное ухудшение состояния региональной инфраструктуры также могут негативно повлиять на эффективность мероприятий противоаварийной готовности и реагирования.*

##### Обсуждение

*Первоначальные действия по ослаблению аварии были выполнены в соответствии с аварийными процедурами компании «ТЕРСО», и приблизительно через 15 минут после землетрясения на АЭС «Фукусима-Дайичи» был сформирован ЦПР. ЦПР располагался в сейсмостойком здании, оборудованном автономными системами энергоснабжения и вентиляции с фильтрующими устройствами. Здание было построено с учетом уроков аварийной ситуации, возникшей на АЭС «Касивадзаки Карива» после землетрясения, происшедшего в префектуре Ниигата-кен Чуэцу в 2007 г. Наличие ЦПР позволило осуществлять на площадке действия по управлению аварией в рамках противоаварийного реагирования [11].*

*Противоаварийные планы должны рассматривать все виды опасных воздействий на площадке, которые могут возникнуть в аварийной ситуации, не только применительно к РУ, но и в отношении БВ отработавшего топлива, станционных хранилищ ОЯТ, объектов обращения с радиоактивными отходами и других ядерных установок, а также радиационно-опасных транспортных операций.*

*Противоаварийные планы должны учитывать все неблагоприятные условия окружающей среды, включая высокий уровень радиации, в которых придется осуществлять противоаварийное реагирование. Помещения щита управления, ЦПР и локальных пунктов управления (места необходимых ручных действий, пробоотбора и потенциальных ремонтных работ) должны быть надлежащим образом защищены от внутренних и внешних воздействий с целью обеспечения доступа к ним и возможности нахождения в них. Для АЭС с ВВЭР необходимо предусматривать специальные, должным образом защищенные места нахождения персонала в условиях тяжелой аварии.*

В дополнение к сооружениям и стационарному оборудованию, обеспечивающим выполнение функций безопасности, проект реактора и БВ должен предусматривать восстановление основополагающих функций безопасности с помощью передвижных средств для большинства состояний реактора и БВ в случае потери этих функций. Действие таких средств должно быть по возможности независимым от состояния стационарного оборудования, и должна быть обеспечена возможность своевременного доступа в соответствующие места для применения данной техники.

*В первые дни аварии на АЭС «Фукусима-Дайичи» отсутствовала оперативная информация о состоянии станции, и вышла из строя система мониторинга состояния окружающей среды из-за повреждений, вызванных землетрясением и цунами, что свидетельствует о важности наличия защищенной (более стойкой) КИПиА для получения информации, необходимой для осуществления реагирования на площадке и за ее пределами, и важности обеспечения возможности мониторинга за пределами площадки на ранней стадии аварии [11].*

КИПиА должны быть спроектированы и размещены в здании реактора и БВ отработавшего топлива таким образом, чтобы оставаться работоспособными в аварийных условиях. В проекте должна быть повышена надежность и функциональные возможности измерительных средств, предназначенных для определения выбросов, уровня радиации и метеорологических параметров. Должна быть обеспечена возможность энергоснабжения этой аппаратуры в течение длительного периода времени в условиях ПОС. Должно быть рассмотрено обеспечение готовности к отбору и лабораторному анализу проб.

*Было отмечено (при аварии на АЭС «Фукусима-Дайичи») масштабное повреждение транспортной инфраструктуры вследствие землетрясения и цунами и недостаточное предварительное планирование эффективных действий по управлению аварией и противоаварийному реагированию. Был серьезно нарушен доступ к внешним ресурсам, и повреждены внешние линии связи, зависящие от местной телекоммуникационной сети, хотя внутренняя коммуникационная сеть компании «TEPCO», обеспечивающая связь между площадкой АЭС и центральным аппаратом, осталась по большей части неповрежденной [3, 11].*

Надежность и функциональные возможности станционной и внешней коммуникационной сети должны учитывать условия, возникающие при опасных внутренних и внешних воздействиях.

*Не было скоординированных мер реагирования на одновременное возникновение ядерной аварийной ситуации и стихийного бедствия. Соответственно, такая ситуация не рассматривалась в программах обучения и тренировок. Противоаварийные планы не рассматривали одновременное возникновение подобных событий, результатом чего стала чрезмерная нагрузка на организацию противоаварийного реагирования и невозможность своевременного выполнения многих действий по управлению аварией [3, 11].*

*В ходе обучения и тренировок персоналу, осуществляющему реагирование, не приходилось иметь дело со столь тяжелыми условиями окружающей среды и другими обстоятельствами (авария сразу на нескольких блоках, отсутствие технических ресурсов) или с таким технически сложным сценарием аварии, произошедшей на реакторах энергоблоков.*

Некоторые из вышеуказанных проблем могли бы быть лучше учтены во время тренировок с использованием средств моделирования условий тяжелой аварии, и тем самым было бы обеспечено лучшее понимание аспектов по управлению ситуациями такого рода.

*Доставка на площадку оборудования, ресурсов и материалов была затруднена по многим причинам. Страх загрязнения от радиоактивных материалов, находящихся на транспортных средствах, затруднил транспортировку оборудования, необходимого для реагирования. У участников противоаварийного реагирования возникали трудности с получением разрешения полиции на перемещение по дорогам, ведущим к площадке и с нее [11].*

Жесткие условия окружающей среды и потенциальное ухудшение состояния региональной инфраструктуры при аварии типа аварии на АЭС «Фукусима-Дайичи» могут негативно сказаться на противоаварийной готовности и реагировании и должны учитываться при планировании противоаварийных мероприятий. Для многоблочных площадок оценка безопасности должна рассматривать станцию в целом; должны быть проанализированы противоаварийные действия и взаимовлияние энергоблоков. Внешние воздействия, способные оказать воздействие сразу на несколько блоков, должны быть определены и рассмотрены при анализе. При обеспечении противоаварийной готовности необходимо напрямую рассматривать события, способные затронуть одновременно несколько блоков.

*Неадекватное качество и количество защитных средств и мероприятий, предусмотренных для защиты участников реагирования, затрудняло противоаварийное реагирование во время аварии на АЭС*

«Фукусима-Дайичи». Не было достаточного количества индивидуальных защитных средств и персональных дозиметров, необходимых для осуществления мер реагирования. В станционных процедурах не было подробного описания стратегии защиты участников реагирования в укрытиях, и пришлось использовать для этой цели станционный кризисный центр, что также затруднило координацию реагирования и руководство этими действиями.

### Проектные решения ВВЭР, обеспечивающие противоаварийную готовность и реагирование

Поскольку рассмотренные выше темы касаются как проектных вопросов, так и особенностей площадки/особенностей держателя лицензии, регулирующие органы все еще ведут оценку проектных и организационных мер, как правило, являющихся составной частью мероприятий по вводу блока в эксплуатацию.

#### Общая позиция

В связи с аварией на АЭС «Фукусима-Дайичи» необходимо учитывать следующие вопросы противоаварийной готовности и реагирования для АЭС с реакторами ВВЭР:

- Необходимо тщательно разрабатывать противоаварийные планы и периодически демонстрировать их практическое применение путем проведения широкомасштабных учений.
- Необходимо доработать учебно-тренировочные комплексы, включив в них сценарии тяжелых аварий, с целью обеспечения противоаварийной готовности персонала и повышения реалистичности учений.
- Функции и обязанности всех организаций, принимающих участие в реагировании и ликвидации аварии, должны быть четко определены и должны периодически проверяться в ходе тренировок и учений; при этом особое внимание должно уделяться взаимодействию и координации планирования действий на площадке и за ее пределами, и организационным вопросам.
- Помещения щита управления, ЦПП и локальных пунктов управления (места необходимых ручных действий, пробоотбора и потенциальных ремонтных работ) должны быть надлежащим образом защищены от внутренних и внешних воздействий с целью обеспечения доступа к ним и возможности нахождения в них. На АЭС с ВВЭР должны быть предусмотрены специальные места, должным образом защищенные и пригодные для нахождения в них персонала в условиях тяжелой аварии. Должна быть предусмотрена возможность доступа к месту подключения передвижного оборудования, используемого для ликвидации аварии, в экстремальных условиях окружающей среды.
- Противоаварийные планы и процедуры должны уделять больше внимания мерам защиты участников противоаварийных действий, т. е. обеспечению достаточного количества защитных средств и аварийных дозиметров и наличию соответствующих стратегий и процедур во избежание неоправданных рисков в процессе противоаварийных действий.
- Должны быть спроектированы и установлены КИПиА, пригодные для работы в аварийных условиях, в целях поддержки противоаварийных действий путем контроля состояния реактора и БВ отработавшего топлива.
- При обеспечении надежности и функциональных возможностей станционных и внешних сетей связи и средств измерения радиоактивных выбросов, уровня радиации и метеорологических параметров необходимо учитывать условия, возникающие в случае экстремальных внутренних и внешних воздействий.
- Станционный противоаварийный план, процедуры и руководства должны содержать мероприятия на случай длительной аварии и одновременной аварии на нескольких блоках.
- Крайне неблагоприятные условия окружающей среды и потенциальное ухудшение состояния региональной инфраструктуры при аварии типа аварии на АЭС «Фукусима-Дайичи» могут негативно сказаться на противоаварийной готовности и должны учитываться при планировании противоаварийных мероприятий.
- Для многоблочных площадок оценка безопасности должна рассматривать станцию в целом, должны быть проанализированы противоаварийные действия и взаимовлияние энергоблоков. Внешние воздействия, способные затронуть одновременно несколько или все энергоблоки, должны быть напрямую рассмотрены в рамках противоаварийной готовности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Mattéi J. M., Vial E., Rebour V., Liemersdorf H., Türschmann M. Generic Results and Conclusions of Re-evaluating the Flooding in French and German Nuclear Power Plants (Общие результаты и выводы повторной оценки затопления французских и немецких АЭС). Eurosafe Forum 2001.
2. Mission Report: Preliminary Findings and Lessons Learned from the 16 July 2007 Earthquake at Kashiwazaki-Kariwa NPP (Отчет миссии МАГАТЭ: предварительные выводы и уроки землетрясения на АЭС «Касивадзаки-Карива» 16 июля 2007 г.). IAEA, 6 – 10 August 2007.
3. The Great East Japan Earthquake Expert Mission // IAEA International Fact Finding Expert Mission of the Fukushima Dai-Ichi NPP Accident Following the Great East Japan Earthquake and Tsunami (Миссия экспертов МАГАТЭ в связи с Великим восточно-японским землетрясением. Международная миссия экспертов по установлению фактов аварии на АЭС «Фукусима-Дайичи», произошедшей после Великого восточно-японского землетрясения и цунами) / IAEA, 24 May – 2 June 2011.
4. North Anna Earthquake Summary (Краткое описание землетрясения в районе АЭС «Норт Энна»). URL: <http://www.nrc.gov/about-nrc/emerg-preparedness/virginia-quake-info/va-quake-summary.pdf> (дата обращения: 28.02.2020).
5. Fukushima Accident Analysis Report (Анализ аварии на АЭС «Фукусима-Дайичи»). – TEPCO, June 2012.
6. Sakai Toshiaki et al. Development of a Probabilistic Tsunami Hazard Analysis in Japan (Разработка вероятностного анализа опасности цунами). ICONS 14, Florida, USA, July 2006.
7. Tsunami Assessment Method for Nuclear Power Plants in Japan (Методы оценки цунами для японских АЭС). Japan Society of Civil Engineers, 2002.
8. Site Survey and Site Selection for Nuclear Installations (Исследование и выбор площадки для ядерной установки). IAEA, No. SSG-35. 2015.
9. Safety of Nuclear Power Plants: Design. Specific Safety Requirements (Безопасность АЭС: Проектирование. Специальные требования безопасности), No. SSR-2/1. Vienna, IAEA, 2012.
10. IAEA Safety Glossary: Terminology Used in Nuclear Safety and Radiation Protection (Глоссарий МАГАТЭ по безопасности: Терминология в области ядерной безопасности и радиационной защиты). 2007 Edition, Vienna, IAEA. 2007.
11. The Fukushima Daiichi Accident. Technical Volume 3/5: Emergency Preparedness and Response (Авария на АЭС «Фукусима-Дайичи». Технический том 3/5 «Противоаварийная готовность и реагирование»). IAEA, August 2015.
12. Booklet Atomenergoproect “VVER-TOI Design”. URL: <http://www.rosatom.ru/upload/iblock/4c2/4c287b01028620e7f17ee1b50f8c93af.pdf> (дата обращения: 28.02.2020).
13. Booklet ROSATOM Overseas “The VVER today”. URL: <http://www.rosatom.ru/upload/iblock/0be/0be1220af25741375138ecd1afb18743.pdf> (дата обращения: 28.02.2020).

## НАПРАВЛЕНИЯ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В РАМКАХ РАБОЧЕЙ ГРУППЫ ПО ВВЭР

Исходя из рассмотренных выше вопросов, РГ-ВВЭР намерена более глубоко рассмотреть некоторые технические аспекты проектов ВВЭР с целью достижения лучшего понимания возможных различий между разными модификациями этого реактора (ВВЭР-1000 / АЭС-92, ВВЭР-1200 / АЭС-2006-М, ВВЭР-1200 / АЭС-2006-П, ВВЭР-ТОИ) и их влияния на безопасность, а также для возможной выработки практических рекомендаций.

Приложения к документу будут опубликованы по мере их разработки соответствующими подгруппами технических экспертов.

**ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ**

Сокращение на английском	Сокращение на русском	Расшифровка
AERB		Регулирующий орган по атомной энергии Правительства Индии
AT	ГЕ, ГА	гидроемкость, гидроаккумулятор
BDBA	ЗПА	запроектная авария
DBA	ПА	проектная авария
DC	ПТ	постоянный ток
DEC	ЗУ	запроектные условия
DiD	ГЭЗ	глубокоэшелонированная защита
CC	УЛР	устройство локализации расплава («ловушка»)
CCF	ООП	отказ по общей причине
CDF	ЧПЗ	частота повреждения активной зоны
ECCS	САОЗ	система аварийного охлаждения активной зоны
ERC	ЦПР	Центр противоаварийного реагирования
HAEA		Государственное ведомство по атомной энергии Венгрии
HVAC		отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха
INES		Международная шкала ядерных и радиационных событий
I&C	КИПиА	контрольно-измерительные приборы и аппаратура
LRF	ЧРВ	частота больших радиоактивных выбросов
NNSA		Национальная администрация по ядерной безопасности Китая
NPP	АЭС	атомная электростанция
PGA	ПУГ	пиковое ускорение грунта
PSA	ВАБ	вероятностный анализ (оценка) безопасности
PHRS	СПОТ	пассивная система отвода тепла
RCP	ГЦН	главный циркуляционный насос
RI	РУ	реакторная установка
Rostechnadzor	Ростехнадзор	Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору
SSC	КСЭ	конструкции, системы и элементы
SBO	ПОС	полное обесточивание станции
SFP	БВ	бассейн выдержки топлива
SG	ПГ	парогенератор
STUK		Центр радиационной и ядерной безопасности Финляндии
TAEK		Турецкое агентство по атомной энергии
TEPCO		Токийская электроэнергетическая компания
UHS	КП	конечный поглотитель тепла
VVER	ВВЭР	водо-водяной энергетический реактор

**ЛИЦА, УЧАСТВОВАВШИЕ В ПОДГОТОВКЕ И РЕЦЕНЗИРОВАНИИ  
ПРОЕКТА ДОКУМЕНТА**

<b>Ц. Дзингши</b>	NNSA, Китай
<b>С. Кавимандан</b>	AERB, Индия
<b>С. Кёсе</b>	ТАЕК, Турция
<b>М. Ю. Ланкин</b>	ФБУ «НТЦ ЯРБ», Российская Федерация
<b>В. А. Неретин</b>	АЯЭ ОЭСР
<b>Д. Петофи</b>	НАЕА, Венгрия
<b>Д. М. Рогатов</b>	ФБУ «НТЦ ЯРБ», Российская Федерация
<b>П. Сало</b>	STUK, Финляндия

