

Токмачев Г.В., Любарский А.В.

Особенности, проблемы и применение вероятностного анализа безопасности для новых реакторов в России

Особенности, проблемы и применение вероятностного анализа безопасности для новых реакторов в России

Токмачев Г.В., Любарский А.В.

АННОТАЦИЯ

Значительное расширение числа новых атомных электростанций (АЭС), которые разрабатываются в России, увеличивает важность вероятностного анализа безопасности (ВАБ), выполняемого до начала эксплуатации АЭС, и его роль в процессе проектирования. В статье рассматриваются применения ВАБ в процессе проектирования новых АЭС. Рассматриваются особенности и ограничения ВАБ, проводимого на этапе проектирования. В статье классифицируются методологические проблемы, связанные с ВАБ для усовершенствованного реактора. Обсуждаются вопросы, которые проектировщики и регулирующий орган должны решить в процессе разработки и экспертизы ВАБ (со ссылкой на проект российской АЭС-2006). Вопросы ВАБ, связанные с аварией на АЭС Фукусима, также рассматриваются.

ВВЕДЕНИЕ

В России и других странах разрабатываются, разрабатываются или эксплуатируются новые реакторы типа ВВЭР. Российский ядерный ренессанс поддерживается российским правительством. Российская энергетическая стратегия определила приоритет политики сокращения энергоснабжения на основе природного газа, направленного на достижение этого путем увеличения производства электроэнергии за счет производства ядерной энергии. В настоящее время в настоящее время разрабатываются два передовых проекта ВВЭР и четыре строятся в России. Кроме того, для нескольких новых АЭС в Турции, Бангладеш, Индии, Белоруссии и др. Разработан базовый проект усовершенствованных установок ВВЭР, необходимых для применения лицензии на строительство.

Значительное расширение числа новых атомных электростанций (АЭС), которые были разработаны, увеличило важность вероятностной оценки безопасности (ВАБ), выполненной на этапе проектирования и дооперационного периода, и подчеркнула проблему оценки адекватности ВАБ. Это этап проектирования, когда ВАБ может внести ценный вклад в повышение безопасности АЭС; однако, чтобы позволить PSA поддерживать проектные приложения, он должен быть всеобъемлющим и адекватным. В документе обсуждается роль ВАБ на этапе проектирования АЭС и рассматриваются вопросы, связанные с ВАБ для новых установок (со ссылкой на проект российской АЭС-2006).

ПРИМЕНЕНИЕ ВАБ НА СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

ВАБ на этапе проектирования жизненного цикла АЭС разрабатывается с целью поддержки технических и организационных решений, принятых в процессе проектирования АЭС, для обеспечения безопасного и сбалансированного проектирования. Ниже приводятся потенциальные применения проектного ВАБ.

Обоснование того, что проект соответствует национальным вероятностным целям безопасности и/или требованиям, установленным ядерным надзорным органом

Результаты ВАБ используются для демонстрации того, что целевые значения безопасности (вероятностные показатели безопасности) были достигнуты для лучшего понимания концепции безопасности проекта АЭС. ВАБ, выполненные для АЭС «Нововоронеж-2», АЭС «Аккую» на этапе проектирования являются типичными примерами такого

Особенности, проблемы и применение вероятностного анализа безопасности для новых реакторов в России применения [1-3]. Результаты ВАБ используются для получения лицензий на строительство и дальнейшую эксплуатацию энергоблока.

Распределение целевых показателей надежности оборудования для его изготовителей

Это ответственность проектировщика станции. Параметры надежности оборудования, используемого в проектном ВАБ, являются предельными значениями надежности элементов, которые должны обеспечиваться производителями. Если оборудование имеет большую значимость для безопасности, то его целевой показатель надежности может быть изменен на более высокий, чтобы обеспечить достижение вероятностных показателей безопасности для рассматриваемой АЭС.

Квалификация оборудования

Новые российские Общие положения обеспечения безопасности [4] позволяют присвоить оборудованию, не принадлежащему к системам безопасности, более низкий класс безопасности, если риск, связанный с отказом этого оборудования, крайне низок. ВАБ является единственным инструментом для оценки таких рисков и должен быть достаточно подробным и всеобъемлющим, чтобы позволить такую оценку для всего интересующего оборудования.

Оценка альтернативных вариантов проекта и оптимизация системных конфигураций

ВАБ используется для выбора наилучшего решения среди различных вариантов проекта. Важно отметить, что необходимо провести всесторонний анализ любого варианта, который должен быть включен в проект, с использованием полномасштабного ВАБ. Это важно не только с точки зрения полноты полученных показателей (например, оценочных значений показателей риска, их неопределенности, значимости элементов и т. д.), но и во избежание отсутствия потенциальных отрицательных аспектов рассматриваемого варианта. Например, дополнительный канал, соединенный с первым контуром, повышает надежность системы аварийного охлаждения активной зоны, но в то же время увеличивает частоту течей первого контура (LOCA), выступает в качестве источника внутреннего пожара, затопления и т. д. Другим примером является установка дополнительных стен, действующих как барьеры распространения пожара, которые могут оказать негативное влияние при сейсмических воздействиях, если они не разработаны надлежащим образом.

Оптимизация системных конфигураций требует рассмотрения различных эксплуатационных состояний, поскольку в некоторых состояниях с остановленным

Особенности, проблемы и применение вероятностного анализа безопасности для новых реакторов в России реактором ВВЭР выполняется плановое обслуживание одного канала безопасности. Это приводит к сокращению или даже потере резервирования в системах безопасности и может потребовать определенных ограничений или перепланировки деятельности по техническому обслуживанию с учетом информации о рисках.

Поэтому ВАБ должен учитывать все особенности проекта для всех эксплуатационных состояний и всех воздействий.

Исходная информация для анализа затрат и результатов

Трудно разработать строгую процедуру взвешивания стоимости и факторов безопасности. Однако выводы ВАБ учитываются при рассмотрении затрат и выгод в соответствии с так называемым интегрированным процессом принятия обоснованных решений о рисках [5].

Вклад в деятельность по связям с общественностью в процессе предварительного лицензирования

Результаты ВАБ используются во время общественных слушаний по вопросам безопасности. Процесс слушаний, связанный с пониманием рисков, позволяет общественности получить более полное представление о вопросах безопасности.

Разработка условий безопасной эксплуатации

Обычной практикой является использование ВАБ для определения разрешенных длительностей вывода в ремонт и интервалов испытаний для систем, связанных с безопасностью. Это выполняется итеративно на разных этапах разработки проекта. Обоснованием плановых ремонтов при работе блока на мощности является еще одно приложение ВАБ на стадии разработки детального проекта. ВАБ также используется для разработки другой операционной и проектной документации до конца разработки проекта.

Разработка перечня научно-исследовательских работ, необходимых для поддержки проектирования

ВАБ используется для определения перечня и приоритета научно-исследовательской деятельности по новым техническим вопросам на усовершенствованных реакторах, который необходимо выполнять в поддержку вариантов проектирования.

Исходная информация для разработки перечня запроектных аварий

Частоты комбинаций группы исходных событий и невыполнения функций безопасности рассчитываются, используя модели ВАБ [6]. Технические меры должны быть реализованы

Особенности, проблемы и применение вероятностного анализа безопасности для новых реакторов в России для сценариев с множественными отказами, если показатели риска для АЭС превышают нормативные требования (частоту повреждения активной зоны $<1E-5/\text{год}$ и/или частоту большого радиоактивного выброса $<1E-7/\text{год}$).

Категоризация постулированных исходных событий по их частоте

Концепция глубоко эшелонированной защиты подразумевает, что рассматриваются постулируемые нарушения и аварии, ведущие к ожидаемым эксплуатационным событиям или условиям аварии. При проведении детерминированных анализов безопасности все постулируемые исходные события и связанные с ними переходные процессы сгруппированы в категории, охватывающие семейство событий ожидаемой частоты. Критерий приемлемости зависит от их частот, которые могут быть рассчитаны с использованием инструментов ВАБ.

Разработка и совершенствование противоаварийных инструкций

Использование расчетных программ и моделей улучшенной оценки, а также улучшенные оценки важных параметров моделирования имеют важное значение для адекватного моделирования сценариев аварий, которые рассматриваются в противоаварийных инструкциях. ВАБ предоставляет ценную информацию для определения сценариев, которые должны быть рассмотрены в инструкциях по управлению аварией, которые также учитывают неопределенности в моделях, параметрах, действиях оператора и других важных особенностях развития аварии.

Обратная связь с детерминистическим анализом для поддержки оценки адекватности глубоко эшелонированной защиты

Одним из существенных результатов ВАБ является генерация логической модели, включающей все взаимосвязи между системами и оборудованием, как внутри систем, так и между системами станции. Такой анализ логической модели с использованием математического инструмента, построенного на основе булевой алгебры, позволяет выявить минимальную комбинацию отказов и ошибок персонала, достаточных для того, чтобы вызвать повреждение активной зоны для всего спектра возможных исходных событий, в том числе запроектных. Такие комбинации обычно называются «минимальными сечениями» (МС); они включают комбинации инициирующих событий, отказов оборудования и ошибок персонала. Здесь, если модель рассчитывается без ограничения по вероятности, мы можем гарантировать выявление всех минимальных сечений, содержащих

Особенности, проблемы и применение вероятностного анализа безопасности для новых реакторов в России как минимум два основных события, представляющих отказы оборудования и/или ошибки персонала и/или неготовность из-за вывода в ремонт.

Если минимальное сечение первого порядка, представляющий независимый отказ, например, отказ общего элемента обеспечивающей системы, появляется в перечне минимальных сечений, то тогда, следовательно, принцип единичного отказа не выполняется, и резервирование рассматриваемой системы должно быть улучшено. Если аналогичный вывод обнаружен в ВАБ для внутренних воздействий (например, пожаров и затоплений), то функциональное и физическое разделение оборудования, важного для безопасности, недостаточно и его необходимо улучшить. [7]

Анализ степени защиты от предполагаемых сценариев террористической атаки

Использование ВАБ для анализа риска терроризма имеет определенные ограничения. Однако инструменты ВАБ, такие как деревья событий, деревья отказов и деревья решений, могут быть полезным подходом к анализу сценариев терроризма и сопоставлению рисков терроризма. Методы, ориентированные на местоположение, используемые в ВАБ для пожаров/затоплений может помочь сосредоточиться на целевой уязвимости и использоваться для оценки последствий успешной атаки.

Выбор безопасных состояний при применении принципа безопасного отказа

Принцип безопасного отказа является принципом, когда все оборудование предназначено для достижения самого безопасного состояния в случае потери обеспечивающих систем. В публикации [8] показано, что неправильное выполнение этого принципа оказало значительное влияние на развитие аварии во время аварии на АЭС Фукусима Дайчи. ВАБ является ценным инструментом для определения наиболее сбалансированного безопасного состояния для оборудования, используемого в рамках интегрированного процесса принятия решений (IRIDM), как обсуждено в [8].

Другие применения ВАБ

Заказчику могут потребоваться дополнительные приложения PSA для внедрения, например, мониторинга риска. В этом случае объем PSA должен быть расширен для реализации специальных атрибутов приложения, которые часто требуют конкретной информации, недоступной на этапе проектирования.

ОСОБЕННОСТИ ВАБ НА ЭТАПЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Проектировщик новой АЭС обычно рассматривает ряд альтернатив в решении вопросов безопасности и приходит к выводу о приемлемости проекта с помощью традиционного инженерного анализа, дополненного пониманием ВАБ, чтобы снизить риск от тяжелых аварий и сделать проект более безопасным. Эта деятельность начинается с ранних этапов процесса проектирования, включающих разработку концептуального, базового и детального проекта в последовательном порядке.

Проектный ВАБ выполняется в очень итерационном режиме в разных точках жизненного цикла АЭС. Некоторые задачи требовали уточнения после выполнения одной или нескольких последующих задач или включения изменений в проект АЭС. На самом деле, ВАБ и проект разрабатываются параллельно. При выполнении следующей ревизии ВАБ проект АЭС более детальный и потенциально может быть изменен из-за того, что ВАБ является трудоемкой задачей, и нелегко сразу реагировать на любые изменения, внесенные в процессе проектирования. Поэтому особое внимание уделяется этим живым особенностям разрабатываемого проекта АЭС.

Как уже упоминалось выше, ВАБ, применимый для всех приложений, должен быть полномасштабным; однако некоторые выводы из некоторых приложений могут быть сделаны даже из ВАБ ограниченного объема. Практический подход заключается в том, что объем PSA варьируется в зависимости от стадии проектирования. Типичная область PSA на разных этапах проектирования кратко описана ниже.

- При разработке концептуального проекта упрощенный ВАБ уровня 1 может быть выполнен только на основе типового набора внутренних исходных событий для условий полной мощности. Такой PSA обычно выполняется для проекта АЭС независимо от особенностей площадки.
- ВАБ расширяется путем включения в анализ различных эксплуатационных состояний и внутренних/внешних воздействий, а также ВАБ уровня 2 на базовом этапе проектирования для оценки более подробных вопросов проектирования на основе подробного описания защитных и локализирующих систем безопасности, комплексной обработки исходных событий и эксплуатационных состояний станции и упрощенного анализа внутренних и внешних воздействий. Однако на этом этапе проектирования информация или данные не полностью доступны в отношении

компоновки систем, оборудования, кабельных трасс и т.п. Поэтому оценку риска трудно получить в ВАБ внутренних воздействий (например, пожар, затопление и т.п.). В этом случае огибающий подход обычно используется на консервативной стороне оценки риска. Более того, базовый проект АЭС не может быть специфичным для площадки, что важно для ВАБ при внешних воздействиях.

- Наконец, полномасштабный ВАБ используется для верификации проекта в отношении вероятностных показателей безопасности/критериев на этапе разработки детального проекта. Полномасштабный ВАБ, обеспечивающий основу для демонстрации соответствия количественным целям безопасности, проводится для проектирования АЭС на определенной площадке с четко определенными характеристиками площадки и подробным описанием проекта всей АЭС. Он включает комплексный анализ внутренних исходных событий и эксплуатационных состояний АЭС, детальный анализ внутренних и внешних воздействий, условий радиоактивного выброса и радиационных последствий вне площадки.

На концептуальных и базовых этапах разработки проекта АЭС отсутствует следующая информация:

- Данные по прокладке трубопроводов;
- Данные по трассировке силовых и контрольных электрических кабелей;
- Данные по компоновке оборудования и деталям его закрепления. Подход с организацией обхода АЭС, широко используемый в ВАБ для воздействий специально для оценки потенциальных пространственных взаимодействий систем, качества строительства, закрепляющих устройств, возможности затопления и т.п. невозможно реализовать на этих этапах проектирования;
- Инструкции по эксплуатации, описывающие работу систем и ее техническое обслуживание, и аварийные инструкции, описывающие действия персонала при аварии на АЭС. Многие аспекты не могут быть оценены в анализе надежности персонала из-за их отсутствия, отсутствия самой АЭС и эксплуатационного персонала;
- Данные по управляющим системам, человеко-машинному интерфейсу и проекту блочного пункта управления;

- Специфические данные по надежности оборудования, что приводит к необходимости использования только обобщенных данных, которые являются более неоднозначными. Для совершенно новой уникальной конструкции элемента применимые данные опыта от референтных АЭС могут быть недоступны. Заметим, что это ограничение также действует для стадии детального проектирования.

Необходимо установить некоторые новые подходы к разработке проектного ВАБ, которые следующие:

- подходы к анализу потенциального риска от ошибок проектирования. Ошибки проектирования могут привести к тому, что АЭС может войти в режим, не учтенный в проекте;
- подходы к тому, как своевременно оценивать изменения проекта, реализованные в процессе его разработки;
- согласованные подходы к оценке конкретных новых технологий (например, цифровые и программируемые системы, пассивные системы безопасности и т. д.).

ВАБ, выполняемый на концептуальных и базовых этапах разработки, неизбежно имеет определенные ограничения, которые являются объективной реальностью. Опыт разработки и анализа ВАБ для АЭС при проектировании показывает, что объем и уровень детализации ВАБ всегда ограничены текущим уровнем детализации при определении площадки, конструкции и эксплуатационных характеристик АЭС. Существует явная проблема в том, что в российских нормах и в стандартах МАГАТЭ [9, 10] не указывается, какая степень и уровень детализации ВАБ соответствуют интересующей стадии жизненного цикла проектирования и как эти ограничения влияют на приложения ВАБ.

Несмотря на ограничения проектного ВАБ, эффективное использование ВАБ на базовом этапе проектирования, когда все изменения легко реализовать, поскольку они влияют только на чертежи и документацию, чрезвычайно велики по сравнению с использованием ВАБ для уже работающих АЭС. На действующих АЭС, помимо изменений в документации, необходимо установить оборудование, возвести строительные конструкции и т.д. в условиях, когда все конструкции уже сооружены. Также важно, чтобы любые строительные работы привели бы к прекращению работы АЭС и потерям в производстве электроэнергии.

Особенности, проблемы и применение вероятностного анализа безопасности для новых реакторов в России

В качестве примера, российский проект АЭС-2006 включал в себя несколько улучшений, основанных на выводах ВАБ, в том числе:

- изменение типа или нормального положения определенных клапанов, чтобы повысить надежность;
- установка изолирующих клапанов на всасывающей части насосов отвода остаточного тепла для исключения их зависимых отказов в режимах останова блока;
- создание дополнительных противопожарных барьеров или повышение их огнестойкости;
- замена нулевых сигналов на ноль плюс для устранения ложных срабатываний, вызванных разрывом цепи при пожаре;
- внедрение дополнительной линии другого диаметра в систему охлаждения бассейна с отработанным топливом во избежание возникновения отказов по общим причинам;
- внедрение диверсифицированных режимов работы (в режиме ожидания или работы) резервированной системы безопасности для снижения вероятности отказов по общей причине;
- внедрение изменений в процессе перегрузки, что все запланированное техническое обслуживание выполняется в состояниях, когда более чем один канал одной системы способен обеспечивать остаточный теплоотвод и т.д.

ЭКСПЕРТИЗА ВАБ

Проект усовершенствованного ВВЭР был рассмотрен российскими ядерным и другими регулирующими органами при участии отрасли [11]. Российский орган по ядерному регулированию издал основные положения [4], чтобы установить количественные целевые показатели безопасности и административные правила для управления процессом лицензирования [12]. ВАБ должен быть предоставлен для получения лицензии на строительство или эксплуатацию блока. Требуемый объем и качество ВАБ определены в нескольких руководствах по безопасности [13-18].

Кроме того, российский орган по ядерному регулированию опубликовал свое заявление о политике в области вероятностной оценки безопасности в 2012 году с учетом

Особенности, проблемы и применение вероятностного анализа безопасности для новых реакторов в России действительности после Фукусимы и прошлого опыта [19]. Было заявлено, что роль ВАБ имеет первостепенное значение.

По сути, упомянутые выше нормативные документы были разработаны для существующих действующих АЭС и не различают ранние этапы проектирования, когда АЭС не существует, и некоторая информация недоступна. Такой же подход можно найти в документах по ВАБ МАГАТЭ. Опыт пересмотра нормативных документов показывает, что неопределенность в распределении требований к ВАБ, выполняемого на ранних стадиях разработки, затрудняет проведение последовательной экспертизы. Такие требования должны быть созданы сообществом ВАБ. В настоящее время регулирующая экспертиза основана исключительно на мнениях и опыте конкретного эксперта, который решает эти вопросы. Считается жизненно важным разработка согласованного подхода регулирующего органа и отрасли к вопросу о том, чем именно должен быть проект ВАБ и как он должен реализовываться в проекте АЭС. Технология ВАБ должна иметь возможность решать ключевые вопросы, касающиеся разработки и лицензирования проектов усовершенствованных реакторов.

ПРОБЛЕМЫ ВАБ, СВЯЗАННЫЕ С УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫМИ РЕАКТОРАМИ

Основным преимуществом нового поколения АЭС серии АЭС-2006 по сравнению с традиционными конструкциями ВВЭР является внедрение дополнительных пассивных систем безопасности в сочетании с проверенными активными системами. Выполнение функций безопасности может выполняться либо активными, либо пассивными системами безопасности независимо друг от друга. Применение комплекса активных и пассивных систем безопасности для преодоления проектных аварий и запроектных аварийных ситуаций является полезным, поскольку реализация принципа разнообразия повышает вероятность выполнения функции безопасности [20].

Самая инновационная пассивная система - это пассивная система безопасности для отвода тепла от парогенераторов в атмосферу, которая обеспечивает стабильный, бесконечный теплоотвод к конечному поглотителю, используя естественную циркуляцию пароводяной смеси и атмосферного воздуха. Кроме того, после большой течи первого контура два или три ступени гидроёмкостей в разных модификациях современного проекта ВВЭР могут снабжать активную зону реактора водой от одного до трех дней для всех течей. Поэтому период отсрочки, то есть период времени, в течение которого обеспечивается функция

Особенности, проблемы и применение вероятностного анализа безопасности для новых реакторов в России обеспечения безопасности без необходимости действий персонала в случае аварии, составляет не менее 24 часов в случае течей первого контура и бесконечный в случае переходных процессов. В условиях остановленного блока огромные запасы воды в бассейне отработавшего топлива и гидроёмкостях могут обеспечить отвод остаточных тепловыделений в течение нескольких недель. Эти периоды могут использоваться для восстановления отказавших систем безопасности.

Новые конструктивные особенности современных АЭС (например, долговременные пассивные системы безопасности, программируемые системы управления, действия персонала в цифровой среде) бросают вызов стандартной, широко используемой методологии, моделям и данным ВАБ. Усилия должны быть направлены на расширение существующей методологии и данных по ВАБ для решения новых проблем. Существует ряд потенциальных проблем, которые могут быть решены с помощью более низких оценок риска новых реакторов, использующих текущую технологию ВАБ, и возникли из неизвестных новых элементов, процессов и технологий, включенных в проект усовершенствованной АЭС [20]. Эти вопросы обсуждаются ниже.

Время выполнения функций

Считается, что расширенное время работы систем безопасности более обычных 24-72 часов превысит период автономности для новых и усовершенствованных реакторов. Например, российские ВВЭР [20] имеют пассивные гидроёмкости низкого давления, называемые второй ступенью, с длительностью работы более 24 часов при течах. В течение этого времени активное аварийное охлаждение активной зоны не требуется. Поэтому в этом случае 24-часовое время выполнения функций недостаточно для количественной оценки фактического вклада в частоту повреждения активной зоны при течах первого контура. В общем случае расчеты для аварийных последовательностей должны быть расширены за пределы момента времени, когда реактор был отключен, а другие системы безопасности были задействованы до достижения длительного стабильного состояния. С другой стороны, для действий по восстановлению можно использовать большее время для выполнения функций, и обычно ремонт в ВАБ игнорируется для существующих установок [21]. Таким образом, время выполнения функций для новых АЭС можно определить как период времени, при превышении которого изменения риска установки незначительны по сравнению с тем, что было во время выполнения функций.

Безопасное конечное состояние

Безопасное конечное состояние является долговременным стабильным состоянием, когда поддерживаются все функции безопасности, такие как контроль критичности, отвод остаточных тепловыделений из реакторной установки и локализация радиоактивных продуктов на границах, предусмотренных в конструкции установки, и параметры установки значительно ниже расчетных пределов для элементов и конструкций. Существует тенденция не рассматривать конечные состояния как безопасные, если параметры нестабильны, а теплоотвод от реакторного топлива не может поддерживаться через замкнутый контур (например, когда необходимо предпринять действия для пополнения источников воды).

Вероятности ошибок для долгосрочных действий персонала

Принцип безопасности для неэнергетических режимов работы новых российских реакторов основан на долгосрочном пассивном теплоотводе остаточных тепловыделений с использованием значительного запаса воды. В этом случае существует проблема оценки вероятности ошибки человека в течение длительного времени, поскольку существующие методологии ограничены меньшими временными окнами. Подходы в области анализа надежности человека должны быть уточнены и расширены для анализа новых ситуаций (например, длительное время, более 24 часов, для принятия решения). Как правило, практика анализа надежности человека требует пересмотра в ВАБ на этапах проектирования. Эта проблема подробно обсуждается в [22].

Отказы по общей причине

Методология, разработанная для усовершенствованных АЭС, различает сильные и слабые факторы связи [23]. В зависимости от этого выбираются модели отказа по общей причине. Есть некоторые аспекты для обсуждения:

- Использование разнообразия в новых российских проектах является эффективной защитой от отказов по общей причине. Одним из подходов к минимизации воздействия общих причин является применение разнообразия в режимах работы, когда некоторые каналы находятся в режиме ожидания, а другие находятся в эксплуатации до аварии. Это уменьшает вероятность отказа по общей причине.
- Широкое использование цифровых систем при проектировании новых АЭС создает методологические проблемы в ВАБ, поскольку отсутствует опыт моделирования

компьютерных систем. В частности, часто возникающие сбои программного обеспечения (повторяющиеся ошибки в избыточных программных модулях) могут вносить большой вклад в общий риск установки [24]. Проблема, связанная с получением данных о сбоях от разработчиков программного обеспечения, должна быть разрешена для обеспечения обоснованной оценки таких отказов по общей причине. Российский подход заключается в применении разнообразия к резервируемому программному обеспечению на основе резервируемых модулей.

- Обычной практикой является не моделировать меж-системные отказы по общей причине для существующих АЭС, поскольку они, как полагают, являются незначительными вкладчиками в частоту повреждения активной зоны, частоту большого радиоактивного выброса и т. д. Однако для будущих реакторов, связанных с присущими им функциями безопасности и демонстрирующих соответствие с очень низкими вероятностными целевыми показателями безопасности, особое внимание должно быть уделено меж-отказам по общим причинам, связанным с подобием в активных под-элементах (двигатели, автоматические выключатели и т. д.). Это становится еще более важным, когда речь идет о риске от многоблочной АЭС [25].

Оценка надежности нового оборудования

Новые проектные решения для новых АЭС иногда основаны на новом уникальном оборудовании. Это поднимает вопрос оценки его надежности, поскольку опыт работы может быть неприменим. Очевидно, что проектные компании должны поощрять и воздействовать на производителей, чтобы обеспечить хорошую экспериментальную и научную поддержку для обоснования показателей надежности, включая пассивное оборудование, например, на основе анализа механики разрушения или других новых подходов.

Методы надежности для анализа пассивных систем, основанных на естественной циркуляции

Очень важна разработка методологии оценки надежности пассивных систем, использующих естественную циркуляцию, включая оценку диапазона неопределенности производительности системы. Внедрение пассивных систем для обеспечения долговременной функции отвода тепла привело к проблеме обоснования стабильности процесса в зависимости от окружающих условий, влияющих на поведение пассивной

Особенности, проблемы и применение вероятностного анализа безопасности для новых реакторов в России системы. В исследовании ВАБ АЭС «Нововоронеж-2» была выявлена проблема, связанная с замораживанием воды в пассивной системе при крайне низких внешних температурах. Также важна эффективность системы при экстремально высоких внешних температурных условиях. Была начата работа по исследованиям и разработкам, чтобы решить проблему на основе результатов ВАБ.

Существующие методы обычно основаны на моделировании Монте-Карло, которые требуют большого количества теплогидравлических расчетов. В результате эти расчеты могут быть чрезвычайно трудоемкими. Чтобы избежать этой проблемы, следует разработать международно признанную методологию. Оценка надежности пассивных систем по-прежнему остается открытой проблемой [26].

РАЗВИТИЕ ВАБ ПОСЛЕ АВАРИИ НА АЭС ФУКУШИМА

События взаимосвязанных внешних воздействий

Влияние на ВАБ последствий землетрясения в Тохоку магнитудой 9,0, сопровождавшихся катастрофой на АЭС Фукусима, значительно. Следуя выводам о катастрофе на АЭС Фукусима (землетрясение, цунами и отказ от всех систем электроснабжения и охлаждения) рассмотрение внутренних и внешних воздействий в ВАБ находится в центре внимания сообщества ВАБ. Это также очень важно для новых российских АЭС, имеющих внутренне присущие функции безопасности. Опыт аварий в Японии показывает, что зависимости между различными внутренними/внешними воздействиями имеют большое значение, поскольку комбинации воздействий могут быть значительными для риска и намного выше, чем риск, связанный с одним воздействием, рассматриваемым индивидуально [27]. Анализ коррелированных внутренних/внешних воздействий должен быть чрезвычайно важным, хотя может потребовать значительных затрат.

Гигантские афтершоки

Еще одна проблема, связанная с сейсмическим ВАБ на основе уроков, извлеченных из аварии на Фукусиме, - это влияние гигантских афтершоков на сейсмическую опасность. Величина наибольшего афтершока во время землетрясения в Тохоку составляла 7,7, и наблюдались сейсмические движения в результате некоторых афтершоков, которые превышали амплитуду проектного землетрясения [28]. Поэтому следует учитывать сейсмические движения грунта для гигантского афтершока землетрясения класса 9 и их воздействия на ослабленные объекты или оборудование.

Отсроченные последствия

Следует разработать методику сейсмического ВАБ, уже применяемую для анализа проекта новых российских АЭС, построенных в сейсмических районах. В частности, некоторые отсроченные последствия, такие как вызванная землетрясением потеря дизельных топливных насосов, могут стать важными при рассмотрении длительного обесточивания. Эта проблема связана с проблемой стабильного безопасного состояния и времени выполнения функций, обсуждавшихся ранее. Расплавление активной зоны происходит спустя 48 часов на блоке 3 и через 72 часа на блоке 2 АЭС Фукусима Дайчи. Этот факт вновь подчеркивает важность пересмотра 24-часового времени выполнения функций, используемого в типичном ВАБ.

Анализ многоблочной АЭС

Следует разработать методологию ВАБ для оценки риска на всей площадке многоблочной АЭС, в частности, следует учитывать влияние нескольких энергоблоков на развитие последовательности событий и определение конечного состояния. Традиционный ВАБ обычно рассматривает общие системы, которые могут быть повреждены из-за аварии или технического обслуживания на соседнем блоке.

Однако опыт Фукусимы показывает, что внешние воздействия, особенно землетрясения, могут приводить к одновременному множественному повреждению ядерных реакторов на площадке для блоков, которые считаются независимыми. Для площадки с несколькими блоками также следует учитывать в анализе потенциальное распространение воздействия, например, сейсмического воздействия, на другие блоки. Очень важно, чтобы при аварийном планировании учитывалось многократное повреждение активной зоны реактора из-за внешнего воздействия, например, землетрясения.

Исторически сложилось так, что некоторые многоблочные аварии и зависимость между соседними блоками рассматривались в российских ВАБ, такие как обесточивание на нескольких энергоблоках. Некоторые зависимости, такие как общие дизели, распределительные устройства, трансформаторы, теплообменники и т. д., очевидны и обычно анализируются при выполнении ВАБ. Особенно важными являются тонкие взаимодействия, которые могут привести к одновременной неготовности систем безопасности на соседних блоках при длительной аварии. Общие запасы охлаждающей воды и дизельного топлива имеют первостепенное значение. Другими важными моментами являются анализ надежности персонала, связанный с управлением аварийными ситуациями

Особенности, проблемы и применение вероятностного анализа безопасности для новых реакторов в России на площадке в случае многоблочных аварий, а также наличие запасных частей и ремонтного персонала для нескольких блоков одновременно. Распределение доступных ресурсов и определение требований к запасным частям может быть очень полезным приложением ВАБ.

Однако существующие вероятностные цели безопасности как в России, так и на международном уровне основаны на безопасности индивидуального реактора. Не существует никаких правил для риска на всей площадке. Этот нормативный разрыв должен быть устранен.

Повреждение бассейна выдержки отработавшего ядерного топлива

Согласно существующей российской нормативной базе необходимо учитывать бассейн выдержки отработавшего топлива в ВАБ для всех воздействий и режимов работы. Для новых АЭС может произойти повреждение отработавшего топлива после потери системы охлаждения бассейна отработавшего топлива (либо в результате случайных отказов, либо после потери обеспечивающих систем). В таких случаях уровень в бассейне выдержки падает, что приводит к оголению ТВЭЛов и повреждению топливных сборок, но со значительной задержкой. Как правило, при таких авариях запас воды достаточен для отвода остаточного тепла в течение нескольких дней путем выпаривания (от 24 часов до 7 дней в зависимости от эксплуатационных состояний АЭС и количества загруженного топлива в бассейне выдержки). Такие последствия могут стать важными при рассмотрении долгосрочных стабильных безопасных условий в ВАБ. Необходимо учитывать два важных аспекта:

- Риск целостности защитной оболочки из-за переопрессовки.
- Риск, связанный с повреждением топлива как в активной зоне реактора, так и в бассейне выдержки из-за тех же самых исходных событий, влияющих на системы, общие для охлаждения реактора и бассейна выдержки.

Следует отметить, что также необходимо количественно определить возможность и вероятность повреждения отработавшего топлива из-за утечек из бассейна выдержки или связанных труб или из-за случайного падения любой груза на хранилище отработавшего топлива. Последнее может произойти из-за отказа транспортно-технологического оборудования для отработавшего топлива или тяжелых грузов. Все вышеупомянутые аспекты должны быть смоделированы в ВАБ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ВАБ является эффективным инструментом для создания действительно безопасного проекта усовершенствованных АЭС. ВАБ выполняется итеративно на разных этапах жизненного цикла проекта АЭС и применяется для принятия решения по различным вопросам проектирования. Ограничения проектного ВАБ должны быть хорошо поняты, чтобы последовательно использовать его результаты. Развитие российского проекта усовершенствованной АЭС с пассивными функциями безопасности и пост-Фукусимская реальность подняли новые проблемы с ВАБ, которые должны быть решены сообществом ВАБ. Ожидается, что вклад МАГАТЭ и регулирующих органов будет очень важен, поскольку в настоящее время на международном уровне не существует требований к ВАБ, проводимых на ранних этапах проектирования и количественных целевых показателей безопасности для многоблочных АЭС и хранилищ отработавшего топлива.

ЛИТЕРАТУРА

1. Швыряев Ю.В., Морозов В.Б., Токмачев Г.В. и др., Обоснование безопасности проекта АЭС-2006 для условий площадки Нововоронежской АЭС-2 методами вероятностного анализа безопасности. Тяжелое машиностроение, 2009 г., №11, стр. 2-6.
2. Швыряев Ю.В., Морозов В.Б., Токмачев Г.В. и др., Использование вероятностного анализа при обосновании безопасности АЭС-2006, проектируемой для площадки Нововоронежской АЭС. Атомная энергия. 2009, том 106, вып. 3, март, стр. 123-129.
3. АО Аккую Нуклеар, Атомная электростанция Аккую. Сводный отчет по вероятностному анализу безопасности уровня 1, 2018, Москва.
4. Ростехнадзор РФ, НП-001-15 Общие положения обеспечения безопасности атомных станций, 2015, Москва.
5. МАГАТЭ, Структура процесса принятия решений на основе комплексного риск-ориентированного подхода, INSAG-25, 2011, Вена.
6. Ланкин М., 2012, О разработке методов определения перечня запроектных аварий, которые необходимо учитывать при проектировании АЭС. Конференция PSAM11 & ESREL2012, Хельсинки, Финляндия, 25-29 июня 2012.

Особенности, проблемы и применение вероятностного анализа безопасности для новых реакторов в России

7. Токмачев Г.В., 2007, Подход к применению ВАБ при проектировании АЭС с реакторами ВВЭР нового поколения. Известия ВУЗов. Ядерная энергетика. Том 3. Выпуск 1, стр. 44-53. Обнинск, 2007 год.
8. Любарский А.В., Токмачев Г.В. Применение принципа безопасного отказа с учетом информации о риске, та же публикация.
9. МАГАТЭ, Разработка и применение вероятностной оценки безопасности уровня 1 для атомных электростанций. Специальное руководство по безопасности SSG-3, 2010, Вена.
10. МАГАТЭ, Разработка и применение вероятностной оценки безопасности уровня 2 для атомных электростанций. Специальное руководство по безопасности SSG-4, 2010, Вена.
11. Ланкин М., Токмачев Г., 2012, Взаимодействие между промышленностью и надзорным органом для улучшения качества ВАБ. Конференция PSAM11 & ESREL 2012, Хельсинки, Финляндия, 25-29 июня 2012.
12. Ростехнадзор РФ, Административный регламент предоставления Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору государственной услуги по лицензированию деятельности в области использования атомной энергии, 2008, Москва.
13. Ростехнадзор РФ, НП-095-15 Основные требования к вероятностному анализу безопасности блока атомной станции, 2015, Москва.
14. Ростехнадзор РФ, РБ-024-11 Положение об основных рекомендациях к разработке вероятностного анализа безопасности уровня 1 для внутренних инициирующих событий для всех режимов работы энергоблока атомной станции, 2011, Москва.
15. Ростехнадзор РФ, РБ-044-09 Основные рекомендации к вероятностному анализу безопасности уровня 2 атомных станций с реакторами типа ВВЭР, 2009, Москва.
16. Ростехнадзор РФ, РБ-076-12 Основные рекомендации к разработке ВАБ-1 блока атомной станции для инициирующих событий, обусловленных внутриплощадочными пожарами и затоплениями, 2012, Москва.
17. Ростехнадзор РФ, РБ-021-14 Основные рекомендации к разработке вероятностного анализа безопасности уровня 1 для блока атомной станции при инициирующих событиях, обусловленных внешними воздействиями природного и техногенного происхождения, 2014, Москва.

- Особенности, проблемы и применение вероятностного анализа безопасности для новых реакторов в России
18. Ростехнадзор РФ, РБ-123-17 Основные рекомендации к разработке вероятностного анализа безопасности уровня 1 для блока атомной станции при исходных событиях, обусловленных сейсмическими воздействиями, 2017, Москва.
 19. Ростехнадзор РФ, Заявление о политике по применению вероятностного анализа безопасности и риск-информативных методов для атомных станций, 2011, Москва.
 20. Токмачев Г., Морозов В., Опыт, полученный при проведении ВАБ новых и усовершенствованных реакторов в России. // Kerntechnik, Мюнхен, 2011, т. 76, № 5, стр. 377-383.
 21. Морозов В.Б., Токмачев Г.В., Байкова Е.В. и др., Оценка вероятностных показателей безопасности АЭС на длительном послеварийном периоде. Известия ВУЗов. Ядерная энергетика. 2010, №2, стр.78-89.
 22. Любарский А.В., Токмачев Г.В., Федулов М.В., Анализ надежности персонала на этапе разработки технического проекта, та же публикация.
 23. Морозов В.Б., Токмачев Г.В., Подход к моделированию отказов по общей причине в вероятностном анализе безопасности проектов новых АЭС с ВВЭР-1000. Известия ВУЗов. Ядерная энергетика. 2008, №4, стр.31-41.
 24. Токмачев Г.В., Подколзина Л.В., Лобанок О.И., Оценка надежности информационно-вычислительной системы с функцией представления параметров безопасности Балаковской АЭС. Ядерные измерительно-информационные технологии, Москва, 2006, № 4, стр. 52-63.
 25. МАГАТЭ, ВАБ для многоблочной АЭС, Предварительный отчет по безопасности, 2018, Вена.
 26. МАГАТЭ, Прогресс в методологии оценки надежности пассивных систем безопасности в усовершенствованных реакторах”, TECDOC 1752, 2014, Вена.
 27. Токмачев Г. Развитие ВАБ для новых реакторов в России после Фукусимы. Конференция PSAM11 & ESREL2012, Хельсинки, Финляндия, 25-29 июня 2012.

28. Ебисава К., Фуджита М., Ивабучи И., Сужио Х., Актуальные проблемы ВАБ в отношении сейсмических событий и цунами на многоблочных АЭС и площадках на основе уроков, извлеченных из землетрясения в Тохоку, Nuclear Engineering and Technology, 44(5), 2012.