

СТАТЬИ

ОСОБЕННОСТИ ВЫПОЛНЕНИЯ И ЭКСПЕРТИЗЫ ВЕРОЯТНОСТНОГО АНАЛИЗА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ПРОЕКТА НОВОЙ АЭС

Токмачев Г.В. (ОАО «Атомэнергопроект»)

Документы МАГАТЭ разного уровня требуют, чтобы обоснование безопасности проекта АС осуществлялось комбинированно взаимно дополняющими детерминистическими и вероятностными методами [1–3]. При проектировании АС выполнение вероятностного анализа безопасности (ВАБ) является итеративным процессом, обеспечивающим обратную связь с процессом проектирования. В идеале, для новой АС разработка ВАБ должна начинаться на стадии концептуального проекта с целью проверки адекватности уровня резервирования и разнообразия систем безопасности, продолжаться на последующих стадиях разработки проекта для оценки более детальных проблем и использоваться после пуска АС для поддержки ее эксплуатации [3].

Недавно МАГАТЭ выпустило два стандарта, детализирующих требования к ВАБ первого и второго уровней [4,5]. Стандарты аккумулируют опыт разработки ВАБ, но проблема заключается в том, что этот опыт, в основном, накоплен за последние 20 лет, когда технология ВАБ бурно развивалась, а новые станции, по сути, не проектировались. Поэтому существующая методология ВАБ и соответствующие нормативные документы развинулись, ориентируясь на действующие АС. В то же время, выполнение ВАБ для еще не существующей проектируемой АС имеет свою специфику, только сейчас осваиваемую на практике ядерным сообществом.

Ренессанс атомной энергетики, выражающийся в резком увеличении числа проектируемых АС, а также в разработке проектов усовершенствованных АС, поставил новые проблемы как перед разработчиками ВАБ в проектно-конструкторских компаниях, так и перед регулирующими органами, проводящими экспертизу и лицензирование. Следует отметить, что эти две категории специалистов, находящихся в одной ядерной «лодке», должны действовать согласованно для достижения общей цели: сооружения безопасных АС. В противном случае они могут уподобиться гребцам, каждый из которых действует по своему собственному алгоритму, забывая, что лодка общая.

То, что технология ВАБ, выполняемых для новых проектов, проходит сейчас своеобразный период приработки, подчеркивает недавний доклад экспертов Комиссии по ядерному регулированию США (NRC) [6], в котором говорится о возникших перед NRC проблемах. В докладе констатируется, что ядерная промышленность США применяет технологии, основанные на информации о риске (например, для написания Технологического регламента), в процессе разработки проекта АС в той мере, в какой это позволяет уровень выполненного ВАБ. При этом промышленность выражает интерес при утверждении данных документов в NRC уже на ранних предэксплуатационных стадиях в процессе сертификации проекта или получения эксплуатационной лицензии. Со своей стороны NRC выявило ряд проблем, затрудняющих реализацию таких планов. Это связано с принципиальной невозможностью удовлетворить все требования к технической адекватности ВАБ на этапе проектирования, необходимостью разработки согласованных стандартов, отсутствием регулирующего подхода к учету дополнительных неопределенностей, сопутствующих результатам предэксплуатационных ВАБ, опасностью задержки пусков АС из-за длительных сроков прохождения экспертизы, различиями в вероятностных критериях безопасности, принятых для действующих и проектируемых АС.

В настоящей статье сделана попытка обобщить имеющуюся информацию по различным аспектам, которые относятся к ВАБ, выполняемым в рамках разработки проектов новых АС.

Вероятностные критерии безопасности

В двух зарубежных странах, строящих новые АС, приняты нормативные критерии для вероятностных показателей безопасности, которые приведены в табл. 1. Следует отметить, что изменился критерий (критерий применяется для действующих станций), относящийся к ВАБ второго уровня, так как вместо частоты раннего большого радиоактивного выброса для новых АС используется частота большого выброса, что теперь совпадает с российскими требованиями.

Таблица 1

Вероятностные критерии безопасности для новых АЭС

Страна	Частота повреждения активной зоны, 1/год	Частота большого радиоактивного выброса, 1/год	Условная вероятность отказа защитной оболочки
США [6]	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-6}$	0,1
Финляндия [7]	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-7}$	-

Внедрение более жестких требований вызывает определенное сопротивление. Так, известный эксперт США [8] утверждает, что в промышленной ядерной технологии технические характеристики современных проектов, фундаментальные пределы надежности персонала, пределы сложности автоматизированных систем и надежность программного обеспечения – все вместе означают, что заслуживающая доверия частота повреждения активной зоны может составлять $1 \cdot 10^{-5}$ в год. В связи с этим, по его мнению, при существующем опыте и понимании фундаментальных пределов оценки, полученные для нового поколения реакторов «с внутренне присущей безопасностью» в диапазоне $1 \cdot 10^{-7} - 1 \cdot 10^{-6}$ в год, крайне сомнительны.

В качестве одного из примеров приводится опыт таких оценок для пилотируемых космических кораблей, когда при реальной статистике, составляющей один отказ на 5–20 запусков, были получены оценки порядка один отказ на $1 \cdot 10^5$ запусков после модернизации Шаттла. Они, несмотря на увеличение наработки на отказ более чем в 1000 раз, не вызвали тогда скептицизма. После известной аварии эти оценки снова были пересмотрены и теперь составляют один отказ на 200 запусков, что считается разумным значением.

Регулирующие требования к ВАБ и технологиям, основанным на риске, для проектной стадии

В NRC имеется неудовлетворенность существующей нормативной базой, поэтому сейчас разрабатывается подход, основанный на информации о риске, к лицензированию проектов усовершенствованных реакторов в будущем, который предполагает более активное использование результатов ВАБ. Сотрудники NRC США выполнили обзор по применению ВАБ, осуществляющихся до ввода АС в эксплуатацию, который планируется использовать при разработке стандартов ВАБ [9]. В США выделяют четыре проектных стадии: разработка концептуального, предварительного и окончательного проектов, в последнюю стадию объединены: сооружение, испытания и ввод АС в эксплуатацию. В настоящее время большинство новых проектов, таких как AP1000 и ABWR, находятся в окончательной стадии разработки. Отмечается, что NRC осознает важность ВАБ даже при отсутствии опыта эксплуатации анализируемой АС. Поэтому требования к его выполнению включены в объем сертификации проекта, а также в условия получения лицензии. В поддержку этих требований Американское общество инженеров-механиков (ASME) начало разработку согласованного стандарта по ВАБ для проектов усовершенствованных легководных и других реакторов, который будет распространяться на проектируемые и действующие АС.

В соответствии с существующими регулирующими требованиями США к стандартной сертификации проекта, изложенными в 10 CFR 52.47(a)(27), Заявитель должен представить описания ВАБ, выполненного для рассматриваемого проекта, и его результатов. Эта информация используется NRC для решения следующих задач при проведении экспертизы [9]:

- определения и рассмотрения потенциальных недостатков проекта и последующей эксплуатации АС, когда небольшое число отказов может приводить к повреждению активной зоны, невыполнению защитной оболочкой заданных функций или большому выбросу;
- уменьшения или исключения значительных составляющих риска на действующих АС, актуальных и для новых проектов, путем внедрения соответствующих мер и требований;
- оценки безопасности на основании информации о риске, включая такие аспекты, как надежность проекта, уровень глубокоэшелонированной защиты, устойчивость к тяжелым авариям, влияние на риск специфических ошибок персонала, характерных для проекта;
- определения соответствия риска, связанного с проектом, целевым показателям NRC;
- оценки баланса предупредительных и защитных свойств АЭС, предусмотренных проектом.

Кроме того, результаты ВАБ используются в программе NRC по обеспечению надежности. Ее цель заключается в доказательстве того, что АС спроектирована, сооружена и эксплуатируется таким образом, который соответствует предположениям и оценкам риска на стадии разработки проектного ВАБ. С помощью этой программы также устанавливаются основные критерии надежности для систем, структур и элементов, согласующиеся с данными ВАБ и проектными показателями готовности.

Выполнение специфического для АС полномасштабного (полный спектр внутренних и внешних иницирующих событий и эксплуатационных состояний) ВАБ первого и второго уровней является обязательным предварительным условием для получения лицензии на сооружение и эксплуатацию в Финляндии [7]. Регулирующие требования также предписывают использование ВАБ на всех стадиях сооружения АС, примером может служить АЭС Oikiluoto 3 (OL3), строительство которой находится на окончательной стадии, а начало промышленной эксплуатации намечено на 2012 г.

Области применения ВАБ на предэксплуатационном периоде

При проектировании ВАБ может применяться для решения различных задач, а именно:

- выбора наилучшего среди различных проектных вариантов;
- разработки сбалансированного проекта;
- демонстрации достижения целевых показателей безопасности;
- определения номенклатуры и приоритетности научно-исследовательских работ, выполняемых для поддержки будущих проектов;
- улучшения понимания новых проектов;
- разработки доэксплуатационной и эксплуатационной документации;
- классификации систем, сооружений и элементов АС и др. [7, 9].

Далеко не всегда мотивы выполнения ВАБ определяются необходимостью подачи документов в надзорный орган для получения какого-либо разрешительного документа. Например, ВАБ модульной водоводяной АЭС NuScale¹ был проведен на очень ранней долицензионной стадии исключительно для решения внутренних задач разработки проекта [10]. Предварительный ВАБ первого уровня был выполнен для режима работы на

¹ Электрическая мощность одного автономного модуля АЭС составляет 45 МВт, всего может быть до 24 модулей на станции. Каждый модуль имеет собственную объединенную ядерную паропроизводящую установку и металлическую защитную оболочку, а также блок генерации электроэнергии. Реактор тепловой мощностью 160 МВт охлаждается естественной циркуляцией (в проекте нет главных циркуляционных насосов). Системы отвода остаточных тепловыделений и охлаждения защитной оболочки также являются пассивными.

мощности и остановленного реактора, внутренних инициирующих событий, внутренних пожаров и затоплений, а также сильных ветровых воздействий. Сейсмический ВАБ выполняется сейчас. Кроме того, выполнен ВАБ второго уровня, включая анализ тяжелых аварий. Как утверждают авторы, использование ВАБ в процессе проектирования позволило идентифицировать тяжелые аварии и улучшить конструктивные решения и технические характеристики, позволяющие предотвратить такие аварии или смягчить их последствия. Как результат, общая частота повреждения активной зоны реактора оценена значением $2,8 \cdot 10^{-8}$ в год (исключая сейсмический риск) [10]. Следует отметить, что эта величина попала в диапазон значений, отнесенных к сомнительным в [8]. Таким образом, существует определенная проблема доверия к количественным результатам ВАБ.

Наиболее широкое применение ВАБ прослеживается при проектировании АЭС OL3 (проект EPR для Финляндии) [7]. Это вызвано не только и не столько давлением регулирующего органа, сколько его активным участием в разработке ВАБ (практически параллельно с проектировщиками). Поэтому финский опыт сейчас наиболее показателен в свете возможностей применения ВАБ. При проектировании и сооружении OL3 подход, основанный на информации о риске, был применен для решения следующих практических задач:

- поддержки детального проекта систем, сооружений и элементов;
- обеспечения адекватной защиты против внутренних и внешних воздействий;
- определения доэксплуатационных и эксплуатационных программ инспекций;
- классификации систем, сооружений и элементов по классам безопасности;
- разработки инструкций;
- тренировки персонала АС;
- разработки технологического регламента,
- разработки программ периодических проверок и ремонтов оборудования при работе реактора на мощности.

Как утверждается в [7], результаты ВАБ вызвали ряд изменений в оригинальном проекте EPR до подачи заявки на получение лицензии, в том числе:

- введен дополнительный канал аварийной системы ввода бора, которая теперь имеет структуру 3х100 % и удовлетворяет принципу N+2 отказов;
- система аварийного впрыска теперь также удовлетворяет принципу N+2 отказов;
- добавлена стальная облицовка внутренней защитной оболочки;
- система отвода тепла из герметичного объема теперь удовлетворяет принципу единичного отказа;
- на трубопроводах первого контура установлены ограничители перемещения свободных концов труб в случае аварии с течью теплоносителя первого контура (в дополнение к концепции «течь до разрыва»);
- расширено разнообразие систем безопасности, например систем подачи аварийной питательной воды и аварийного охлаждения активной зоны, изолирующих клапанов защитной оболочки, систем электроснабжения, дизель-генератора, используемого при потере всех других источников нормального и аварийного питания, систем управления, в частности, внедрены дополнительные системы управления, построенные по принципу жесткой логики и резервирующие цифровые системы, для большинства важных функций;
- обеспечено функционирование системы подачи аварийной питательной воды в течение 72 часов при полной потере отвода тепла к конечному поглотителю путем подпитки ее баков от систем химически обессоленной воды и пожаротушения;
- улучшено физическое разделение систем, важных для безопасности;
- разработаны мероприятия по извлечению топлива из реактора после аварии с течью теплоносителя первого контура;
- изменена конструкция ловушки расплавленного ядерного топлива и упрощено обращение с расплавленным кориюмом;
- предотвращен выброс теплоносителя в атмосферу при течи из первого контура во второй (снижение давления в первом и втором контурах);

- установлены вертикальные и горизонтальные противопожарные барьеры из минеральной ваты в зазоре между защитными оболочками;
- улучшена защита против затопления в зданиях технического водоснабжения;
- защищены системы всасывания воздуха на резервных дизельных электростанциях от заноса их снегом при буряне, когда весьма вероятно обесточивание АЭС, кроме того, смонтирована дополнительная всасывающая линия изнутри здания.

Дополнительно экспертиза ВАБ подняла вопрос о способе достижения состояния холодного останова энергоблока при отказе по общей причине на открытие обратных клапанов всех четырех каналов системы аварийного впрыска, что ведет к отказу всех пассивных и активных систем аварийного охлаждения активной зоны реактора. Заявитель представил анализ, в котором был продемонстрирован такой способ сначала путем расхолаживания через второй контур, а затем за счет подачи воды в первый контур от системы отвода остаточных тепловыделений и сброса воды через клапан компенсатора давления в бак перегрузки.

В период сооружения АЭС ОЛЗ методология ВАБ будет применена для разработки доэксплуатационных и эксплуатационных программ инспекций трубопроводов, относящихся не только к классам безопасности, что будет реализовано впервые в мире на строящейся станции. Инспекции будут фокусироваться на важных с точки зрения риска сегментах трубопроводов, комбинируя анализ последствий из ВАБ, оценку потенциала деградации и вторичных последствий разрывов трубопроводов.

Для удовлетворения регулирующих требований АС был предложен метод разработки Технологического регламента с учетом информации о риске, и вскоре ожидается предоставление результатов его использования в надзорный орган. Методы ВАБ будут применены для оптимизации периодичности и стратегии проверок оборудования и систем, а также для оценки допустимого времени вывода в ремонт. Кроме того, ВАБ используется для определения таких ситуаций с отказами оборудования, когда переход из одного эксплуатационного состояния в другое связан с большим риском, чем ремонт отказавшего оборудования в исходном состоянии.

В соответствии с финскими требованиями, ВАБ должен использоваться для поддержки процесса классификации систем, сооружений и элементов. В итоге, некоторые изменения были сделаны по результатам ВАБ (повышены классы безопасности оборудования систем технического водоснабжения и промежуточного контура, а также выключателей главных циркуляционных насосов).

В период ввода АС в эксплуатацию существуют риски при проведении испытаний после загрузки топлива, которые должны быть оценены с помощью ВАБ. При получении негативных результатов должны предприниматься меры по снижению риска, которые могут быть следующими [7]:

- разработка специфических программ испытаний;
- замена одного испытания другим;
- сдвиг времени проведения испытаний на неядерную фазу пуска;
- получение требуемой информации из других испытаний;
- уменьшение вероятности потенциальных возмущений.

Ограничения ВАБ, выполняемого на стадии разработки проекта

При проектировании АС нет нужного объема проектных и эксплуатационных исходных данных (особенно на ранних стадиях проектирования), необходимых для проведения детального ВАБ, в частности, отсутствует следующая информация [9–11]:

- сведения о трассировке трубопроводов, необходимые для анализа внутренних затоплений и сейсмических воздействий;
- сведения о раскладке силовых и контрольных кабелей, необходимые для детального анализа внутренних пожаров;
- данные о компоновке оборудования и деталях его раскрепления (требуются для анализа внутренних пожаров и затоплений, а также сейсмического ВАБ и анализа биения трубопроводов);

- аварийные и эксплуатационные инструкции, описывающие порядок действий операторов или всей смены при аварии (многие аспекты не могут быть оценены при проведении анализа надежности персонала из-за отсутствия АС и эксплуатирующего ее персонала, поэтому обычно принимается огибающий подход);
- данные по обеспечивающим и управляющим системам, человеко-машинному интерфейсу, включая проект блочного пульта управления;
- результаты большинства теплогидравлических анализов улучшенной оценки, необходимых для определения временных характеристик аварийных последовательностей;
- данные об эксплуатационном опыте по протеканию процессов и специфике функционирования систем;
- специфические данные по надежности оборудования, из-за чего используются только обобщенные данные, обладающие большей неопределенностью.

Поэтому ВАБ выполняется со значительными допущениями в отношении детальных характеристик проекта, особенно на ранних проектных стадиях, как это было для упомянутой выше АЭС NuScale [10].

Еще одно упрощение анализа, по сравнению с рекомендациями руководств, связано с невозможностью провести обход проектируемого объекта, как это принято при выполнении ряда ВАБ, например пожарного ВАБ для действующей АС [11].

Учитывая вышесказанное, обычно используются упрощенные «огибающие» технологии анализа, позволяющие получить результат с определенной степенью консерватизма. Например, при проведении пожарного ВАБ на этапе разработки рабочего проекта EPR была применена упрощенная методология, основанная на четком физическом разделении различных каналов на пожарные отсеки, когда не используется информация по трассировке кабелей, а консервативно постулируется отказ всего оборудования в рассматриваемом отсеке [11].

Методологические проблемы ВАБ для новых АС

При выполнении ВАБ для проектируемой АЭС приходится сталкиваться с проблемами, связанными с отсутствием [9]:

- согласованного подхода к использованию источников данных (например данных с действующих АС предыдущих поколений) при разработке модели, включая их валидацию (применимость данных по показателям надежности, собранных на действующих АС, является важным аспектом; эксперты NRC считают, что в ряде случаев более целесообразно использовать данные по неядерным аналогам);
- подходов к анализу потенциального вклада в риск проектных ошибок, в результате которых реактор попадает в режим, не предусмотренный в проекте;
- руководств для принятия решения при выборе между достаточностью предположений при моделировании, которые затем включаются в программу обеспечения надежности, и необходимостью дальнейшей разработки ВАБ;
- согласованных подходов к проведению оперативных оценок проектных изменений, которые характерны для процесса быстрой разработки проекта;
- руководств для принятия решения на разных проектных стадиях с учетом качественных и количественных результатов ВАБ;
- согласованных подходов к рассмотрению специфических новых технологий (например цифровых и программируемых систем) и проектных решений (например пассивных систем безопасности).

К последним можно отнести и анализ возгорания кабелей, не поддерживающих горение, который проводится в рамках пожарного ВАБ и является одним из ключевых. Дело в том, что эксплуатационная статистика, используемая для оценки частот пожаров, зачастую основана на данных по возгораниям кабелей старого типа. В работе [11] сделана попытка разрешить проблему путем использования допущения об уменьшении частот возгораний кабелей нового типа в 100 раз.

Стандарт МАГАТЭ [4] затрагивает проблему определения времени выполнения системами безопасности заданных функций пока реактор не достигнет безопасного стабильного состояния останова и не будут задействованы долговременные средства поддержания его в этом состоянии. Во многих случаях это время составляет 24 или 48 часов для большинства иницирующих событий. Однако отмечается, что для новых проектов, которые имеют средства, отдаляющие повреждение активной зоны, скорее всего, необходимо рассматривать более длительное время.

К методологическим проблемам относится и разработка методологии анализа надежности персонала, выполняющего заданные функции в условиях больших запасов времени [9].

Повсеместное использование программно-технических средств в проектах новых АС делает их анализ одним из определяющих для качества разрабатываемого ВАБ. Ключевыми проблемами, связанными с характеристиками цифровых систем, являются: понимание видов отказов таких систем, степень выявления неисправностей при самотестировании и проверках, анализ надежности программного обеспечения / отказов по общей причине, данные по отказам элементов и изначальное планирование интеграции модели надежности цифровой системы с моделью ВАБ [12]. Последнее актуально, когда проект новой АС разрабатывается разными организациями. Поэтому важно, чтобы различные модели создавались с использованием одинаковых средств.

При анализе надежности программного обеспечения необходимо рассматривать две категории отказов по общей причине: отказ операционной системы и отказ прикладной программы. Отказ операционной системы по общей причине – гипотетический случай, вызывающий катастрофический отказ всех работающих компьютеров. Отказоустойчивый проект и защитные свойства платформ операционных систем, работающих в режиме реального времени, вместе со значительным опытом эксплуатации создают уверенность, что вероятность отказа операционной системы минимальна. Отказ прикладных программ по общей причине является постулированным отказом, общим для резервируемых процессоров и совместно используемых алгоритмов, входных сигналов от датчиков и путей обработки сигналов. Предполагается, что вероятность отказа такой системы при выполнении заданных функций будет составлять $1 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-4}$ на требование [12].

Результаты количественных оценок надежности программного обеспечения практически не публикуются, что вызвано отсутствием исходных данных от его разработчиков, рассматривающих такую информацию как рекламу на свою продукцию. В этом плане показательна публикация [13] о выполнении вероятностного анализа цифровых систем защиты и управления японского трехпетлевого реактора с водой под давлением (PWR) на этапе сооружения (блок 3 АЭС Tomari введен в промышленную эксплуатацию в декабре 2009 г.). С одной стороны, авторы утверждают, что отказы программного обеспечения не рассматривались, исходя из предположения о выполнении процесса верификации и отладки программ в соответствии с национальными промышленными стандартами. С другой стороны, те же авторы признали необходимость дальнейшего исследования для разработки модели надежности программного обеспечения.

Следует отметить, что необходимость анализа надежности программного обеспечения предписывается и отечественным документом ОПБ-88/97 [14] (см. пп. 4.4.4.5 и 4.4.5.9).

Заключение

Бурный рост числа проектируемых АС повысил значимость ВАБ, выполняемого на предэксплуатационной стадии, и высветил проблему оценки его адекватности. Действительно, ВАБ является инструментом, который позволяет провести комплексную количественную оценку уровня безопасности АС как целостного объекта с учетом всей совокупности мер, реализуемых на проектной стадии, и выбрать оптимальный вариант проектных решений из возможных альтернатив. С другой стороны, комплексный детальный анализ несуществующего объекта, зачастую еще и не до конца разработанного, в принципе не может конкурировать по качеству с ВАБ для действующей АС. Опыт участия автора в экспертизах МАГАТЭ показывает, что ВАБ для проектируемой АС всегда получает заметно больше негативных замечаний наивысшего приоритета от экспертов, чем ВАБ для

действующей АЭС, причем это снижение качества ВАБ связано с незаконностью проекта. Такие результаты экспертиз прогнозируемы изначально, так как история развития ВАБ в период проектного застоя привела к тому, что вся нормативная и методологическая документация ориентирована на ВАБ для действующих АС. Требования нормативной документации предписывают учитывать опыт эксплуатации анализируемой АС, проводить обходы станции, детально анализировать кабельную раскладку при пожарах, базировать анализ надежности персонала на эксплуатационной документации и т.п., что невозможно, например, на стадии разработки технического проекта или не осуществимо позже без значительной задержки сроков пуска энергоблока. В частности, такой дисбаланс беспокоит NRC, которая всегда была локомотивом идей ВАБ, и в настоящее время это инициирует ее активную законодательную деятельность.

ВАБ на проектной стадии имеет неизбежные ограничения – это объективная реальность. Кроме того, существует ряд методологических проблем, связанных с новыми свойствами современных АС, которые ждут своего решения. Несмотря на это, возможность эффективного использования результатов ВАБ в процессе разработки проекта, когда достаточно поменять чертежи и документацию, несравненно выше, чем на действующей АС, когда кроме документации необходимо внедрять оборудование, сооружать строительные конструкции и т.п., причем в условиях работающего объекта. Поэтому необходима выработка согласованного подхода надзорного органа и промышленности к тому, каким должен быть ВАБ и как он должен практически использоваться на предэксплуатационной стадии.

Список литературы

1. Basic Safety Principles for Nuclear Power Plants: 75-INSAG-3 rev. 1. INSAG-12 / A Report by The International Nuclear Safety Advisory Group. – Vienna: International Atomic Energy Agency, 1999.
2. Safety of Nuclear Power Plants: Design: Safety Requirements. Safety Standards Series No. NS-R-1– Vienna: International Atomic Energy Agency, 2000.
3. Safety Assessment and Verification for Nuclear Power Plants: Safety Guide. Safety Standards Series No. NS-G-1.2 – Ядерная и радиационная безопасность, 2010, № 3(57), с. 3–9 – Vienna: International Atomic Energy Agency, 2001.
4. Development and Application of Level 1 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants: Specific Safety Guide. No. SSG-3 – Vienna: International Atomic Energy Agency, 2010.
5. Development and Application of Level 2 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants: Specific Safety Guide. No. SSG-4 – Vienna: International Atomic Energy Agency, 2010.
6. N. T. Saltos, L. A. Mrowca, T. R. Tjader. Implementation of Risk-Informed Applications for New Reactors. 10th International Probabilistic Safety Assessment & Management Conference PSAM10, 7–11 June 2010, Seattle, USA.
7. A. Julin, J. Marttila, R. Virolainen, L. Reiman. Use of Risk Informed Approach in Design, Construction and Commissioning of OL3 EPR. 10th International Probabilistic Safety Assessment & Management Conference PSAM10, 7–11 June 2010, Seattle, USA.
8. J. R. Fragola. Supporting Preliminary Design Decision Making with A Risk Data Base. 10th International Probabilistic Safety Assessment & Management Conference PSAM10, 7–11 June 2010, Seattle, USA.
9. J. Wood, B. Wagner, K. Coyne, N. Siu. Probabilistic Risk Assessments for Nuclear Power Plants in Design: A Limited-Scope Literature Review. 10th International Probabilistic Safety Assessment & Management Conference PSAM10, 7–11 June 2010, Seattle, USA.
10. K. B. Welter, R. Snuggerud, J. Pottorf, M. Modarres, I. S. Kim. Probabilistic Risk Assessment of NuScale Reactor During the Design Phase. 10th International Probabilistic Safety Assessment & Management Conference PSAM10, 7–11 June 2010, Seattle, USA.
11. H. Kollasko, J. Blombach. Methodology for Fire PSA during Design Process. 10th International Probabilistic Safety Assessment & Management Conference PSAM10, 7–11 June 2010, Seattle, USA.
12. Li Shi, R. Enzinna, S. Yang, S. Blodgett. Probabilistic Risk Assessments of Digital I&C in Nuclear Power Plant. 10th International Probabilistic Safety Assessment & Management Conference PSAM10, 7–11 June 2010, Seattle, USA.
13. K. Kondo, H. Fujimoto, M. Yamashita. A PSA Model Developed for the Digital Reactor Protection System of the Latest PWR in Japan. 10th International Probabilistic Safety Assessment & Management Conference PSAM10, 7–11 June 2010, Seattle, USA.
14. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций ОПБ-88/97 НП-001-97 (ПНАЭ Г-01-011-97). Госатомнадзор России, Москва, 1997 г.

РЕФЕРАТЫ СТАТЕЙ

УДК 621.039.58

Токмачев Г.В. **Особенности выполнения и экспертизы вероятностного анализа безопасности при разработке проекта новой АЭС.** – Ядерная и радиационная безопасность, 2010, № 4(58), с. 3-10.

Рассмотрены аспекты применения вероятностного анализа безопасности (ВАБ) при разработке проекта новой АЭС. Охарактеризованы вероятностные критерии безопасности и имеющиеся нормативные требования. Рассмотрены области применения ВАБ на предэксплуатационном периоде. Приведена информация об ограничениях ВАБ, выполняющегося на проектной стадии, и существующих методологических проблемах. Табл. 1. Библ. 14.

Ключевые слова: атомная станция, безопасность, вероятностный анализ безопасности, проектирование, регулирующая деятельность

Токмачев G.V. **Special features of development and review of probabilistic safety assessment carried out for new NPP in design.** – Nuclear and Radiation Safety, 2010, No. 4(58), p. 3–9.

The paper considers application of probabilistic safety assessment (PSA) for new nuclear power plants in design. Probabilistic safety criteria and existing regulatory requirements are characterized. Areas of PSA applications at the pre-operational stage are considered. Information about limitations of the PSA performed at the design stage and existing methodological issues is presented. Tabl. 1. Bibl.14.

Key words: nuclear power plant, safety, probabilistic safety assessment, design, regulatory activity