

Применение вероятностного анализа безопасности для решения эксплуатационных проблем на АЭС

Г.В.Токмачев, М.В.Федулов

Области применения ВАБ действующих АЭС

С середины 90-х годов прошлого столетия технология вероятностного анализа безопасности (ВАБ) атомных электростанций (АЭС) стала все более широко применяться во многих странах как инструмент для принятия решений при проектировании, эксплуатации и регулирующей деятельности с учетом информации о риске. В документе МАГАТЭ [1] систематизирована практика применения и разработаны требования к качеству ВАБ в зависимости от предполагаемых областей использования его результатов, которые разбиты на следующие категории:

1. Оценка уровня безопасности АЭС и определение основных вкладчиков в риск.
2. Оценка и обоснование проекта.
3. Поддержка эксплуатации АЭС.
4. Оценка влияния на безопасность предлагаемых мер по модернизации действующей АЭС, изменений эксплуатационной или лицензионной документации.
5. Надзорно-инспекционная деятельность как регулирующего органа, так и эксплуатирующей организации.
6. Оценка проблем безопасности.

Более детально области применения ВАБ, большинство из которых относятся к действующим АЭС, представлены в таблице 1.

МАГАТЭ готовит к выпуску три стандарта по безопасности, в которых будут затронуты вопросы применения ВАБ [2]. Это стандарты по разработке и применению ВАБ первого и второго уровней, а также по принятию решений на основании информации о риске.

Считается, что широкое применение результатов ВАБ для повышения эксплуатационных характеристик АЭС может привести к хорошим результатам [3]. В частности, последнее срабатывание аварийной защиты реактора на АЭС Goesgen в Швейцарии, где активно используются результаты ВАБ для принятия эксплуатационных решений, было 11 декабря 1990 года. Это трёхпетлевая АЭС типа PWR (проект KWU) мощностью 1020 МВт, эксплуатируемая с 1979 года.

Таблица 1 Области применения ВАБ

Область применения ВАБ	Направление применения ВАБ	Конкретное применение ВАБ	
1. Оценка уровня безопасности АЭС		1.1. Оценка общего уровня безопасности	
		1.2. Периодический контроль безопасности	
		1.3. Анализ степени защиты при предполагаемых сценариях террористических атак	
2. Оценка проекта		2.1. Применение ВАБ для поддержки принятия решений при проектировании АЭС	
		2.2. Оценка важности для безопасности отклонения проекта действующих АЭС от пересмотренных детерминистских требований	
3. Эксплуатация АЭС	3.1. Техническое обслуживание и ремонт	3.1.1. Оптимизация программы технического обслуживания и ремонта	
		3.1.2. Хранение на АЭС источников риска при внутренних и внешних воздействиях (пожары, затопления, сейсмика и т.п.)	
		3.1.3. Поддержка программы контроля старения оборудования АЭС на основании информации о риске	
	3.2. Управление аварией и противоаварийное планирование	3.2.1. Разработка и улучшение противоаварийных инструкций	
		3.2.2. Поддержка управлением аварий на АЭС (предотвращение и управление тяжелыми авариями)	
		3.2.3. Поддержка противоаварийного планирования	
	3.3. Тренировка персонала	3.3.1. Улучшение программ тренировок оперативного персонала	
		3.3.2. Улучшение программ тренировок ремонтного персонала	
		3.3.3. Улучшение программ тренировок руководства АЭС	
	3.4. Мониторинг риска	3.4.1. Планирование конфигурации (например, поддержка деятельности, связанной с проверками и техническим обслуживанием/ремонтom)	
		3.4.2. Оценка и управление конфигурацией в режиме реального времени (реагирование на новые условия)	
		3.4.3. Обоснование продолжения работы блока на мощности при отступлении от требований Технологического регламента	
		3.4.4. Динамические требования Технологического регламента, основанные на информации о риске	
	4. Изменения на действующей АЭС	4.1. Изменения самой АЭС	4.1.1. Модернизация АЭС
			4.1.2. Продление срока эксплуатации
		4.2. Изменение регламентных требований	4.2.1. Определение и оценка изменений допустимого времени вывода оборудования в ремонт и изменений действий, предписываемых Технологическим регламентом

Область применения ВАБ	Направление применения ВАБ	Конкретное применение ВАБ
		4.2.2. Оптимизация требований Технологического регламента на основании информации о риске
		4.2.3. Определение и оценка изменений периодичности проверок
		4.2.4. Эксплуатационный контроль на основании информации о риске
		4.2.5. Эксплуатационные инспекции на основании информации о риске
		4.3. Внедрение программы обеспечения качества для конструкций, систем и элементов в зависимости от их класса безопасности
	4.3.2. Оценка влияния на риск изменения требований к обеспечению качества	
5. Надзорно-инспекционная деятельность	5.1. Надзор за эксплуатацией	5.1.1. Планирование и определение приоритетов в инспекционной деятельности (надзорного органа и промышленности)
		5.1.2. Долгосрочные показатели эксплуатации, основанные на риске
		5.1.3. Краткосрочные показатели эксплуатации, основанные на риске
	5.2. Оценка эксплуатации	5.2.1. Оценка результатов инспекций
		5.2.2. Анализ и ранжирование событий при эксплуатации
6. Оценка проблем безопасности	6.1. Оценка риска	6.1.1. Оценка корректирующих мер с точки зрения риска
		6.1.2. Оценка риска с целью выявления и ранжирования проблем безопасности
	6.2. Принятие регулирующих решений	6.2.1. Долгосрочные регулирующие решения
		6.2.2. Временные регулирующие решения

Объем применения ВАБ варьируется от страны к стране [4]. Наиболее часто ВАБ используется для оценки мер по модернизации, оптимизации программы технического обслуживания и ремонта, мониторинга риска и обоснования изменения регламентных требований. В то же время, в Швеции ВАБ широко применяется практически во всех из перечисленных выше областей, включая, помимо этого, такие задачи, как анализ

физической защиты АЭС, верификацию детерминистических анализов безопасности и анализ влияния произошедших событий на состояние барьеров глубокоэшелонированной защиты.

В ряде стран разрабатываются нормативные документы по применению ВАБ для решения эксплуатационных проблем. Лидерами являются США и Япония [4].

За последние 10 лет в США разработан ряд нормативных документов по использованию информации о риске при оценке мероприятий, регламентных требований, эксплуатационных проверок и контроля [5-8]. Эти документы применяются в качестве нормативной базы и в некоторых других странах [4]. Недавно подход, основанный на информации о риске, был использован для пересмотра нормативных документов, относящихся к противопожарной защите и контролю горючих газов или содержащих требования к системе аварийного охлаждения активной зоны реактора и термошоку под давлением. Кроме того, в США разработан стандарт по классификации конструкций, систем и элементов в соответствии с их важностью для безопасности на основании информации о риске [4].

В Японии выпущены руководства по использованию информации о риске в регулировании эксплуатации АЭС и требования к качеству соответствующих ВАБ [4].

В Румынии применение ВАБ регламентируется нормативным документом государственного надзорного органа «Требования к вероятностному анализу безопасности атомных станций» [9]. В соответствии с нормативными требованиями, оценки риска используются на АЭС Cernavoda с реактором типа CANDU для решения следующих задач:

- анализа предлагаемых мероприятий по модернизации;
- анализа предлагаемых изменений эксплуатационной документации;
- анализа разовых отклонений от требований Технологического регламента;
- выпуска ежегодного отчета по оценке кумулятивного риска;
- мониторинга уровня надежности оборудования;
- эксплуатации программы мониторинга риска, которая применяется для планирования ремонтов и технического обслуживания, а с мая 2006 года используется операторами блочного пульта управления в режиме «он-лайн».

Возможности применения ВАБ для решения эксплуатационных проблем на АЭС показывает и опыт различных АЭС Испании [10], отраженный в таблице 2.

Таблица 2 Области применения ВАБ на АЭС Испании

Применение ВАБ	АЭС					
	Sta M de Garoi	Asco I&Ii	Almaraz I&II	Cofrentes	Vandellos II	Trillo
Программы оптимизации технического обслуживания и ремонта						
Требования к техническому обслуживанию	+	+	+	+	+	+
Плановые ремонты систем безопасности при работе блока на мощности	+			+		+
Мониторинг риска при работе блока на мощности	+	+	+	+	+	
Мониторинг риска для состояний с остановленным реактором	+			+		
Оптимизация проверок и инспекций						
Проверки, основанные на информации о риске				+		
Эксплуатационный контроль, основанный на информации о риске		+	+	+	+	
Программы улучшения эксплуатационных характеристик арматуры с электро- и пневмоприводом	+			+		
Поддержка эксплуатации						
Управление тяжелыми авариями				+		
Изменение допустимого времени вывода в ремонт оборудования систем безопасности		+		+		+
Регулирование, основанное на информации о риске						
Изменение перечня систем, конструкций и элементов, классифицируемых как важные для безопасности и регулируемых специальными правилами				+		
Управление риском недовыработки электроэнергии						
Управление риском неготовности и монитор остановов энергоблока				+		

Оценка и разработка мер по модернизации

Работа [11] посвящена применению ВАБ для оценки целесообразности мер по модернизации на АЭС Goesgen в Швейцарии. В результате внедрения различных мероприятий частота повреждения активной зоны была уменьшена более, чем на 2 порядка. В настоящее время это значение составляет $1,97E-6$ в год, причем учтен вклад от всех возможных внутренних и внешних исходных событий. Доминантным вкладчиком (74%) являются сейсмические воздействия. Наиболее эффективными были мероприятия, снижающие риск в режимах с остановленным реактором, которые включают запрет на проведение плановых ремонтных работ при низком уровне воды в реакторе, внедрение дополнительного третьего канала отвода тепла от бассейна выдержки отработанного ядерного топлива, а также обеспечение возможности подачи воды в этот бассейн от системы пожаротушения.

Эффективность мер по модернизации на швейцарских АЭС оценивается с учетом значения, на которое снижается частота повреждения активной зоны в результате внедрения мероприятия, и затрат на модернизацию. Их соотношение должно превышать установленный количественный критерий целесообразности реализации мероприятия.

Во Франции [12] оценка целесообразности мер по модернизации также проводится с двух сторон: путем анализа затрат на их внедрение и получаемых экономических выгод от повышения готовности энергоблока или снижения стоимости обслуживания, а также в результате оценки влияния этих мер на безопасность. Последнее оценивается по изменению четырех параметров: частоты повреждения активной зоны, вероятностей раннего и позднего радиоактивных выбросов, а также дозовых нагрузок на персонал и население.

Высокий вклад некоторых ситуаций в частоту повреждения активной зоны на остановленном реакторе привел к реализации ряда мер на французских АЭС [4]:

- для исключения избыточного дренирования первого контура в режиме ремонтного расхолаживания были изменены регламентные требования и аварийные инструкции, внедрены дополнительные измерения уровня теплоносителя первого контура, вихревой сигнал и автоматический запуск системы подпитки первого контура;
- другой выявленной проблемой является неоднородность борного раствора, что может привести к реактивным авариям. Для уменьшения вероятности таких событий были изменены эксплуатационные инструкции как для нормальной эксплуатации, так и для аварийных ситуаций, а также повышена автоматизация ряда процессов;

- высокий риск холодной переопресовки первого контура из-за непредусмотренной изоляции системы теплоотвода, который был выявлен при проведении ВАБ, вызвал необходимость изменения аварийных инструкций и уставок срабатывания предохранительных клапанов компенсатора давления.

Для АЭС Krško (двухпетлевой проект PWR фирмы Westinghouse электрической мощностью 730 МВт), эксплуатируемой совместно Словенией и Хорватией, надзорным органом установлен ряд вероятностных показателей, используемых для оценки возможных изменений [13], в частности, частота повреждения активной зоны должна быть ниже значения $1E-4$ 1/год, а большого раннего радиоактивного выброса – $5E-6$ 1/год. Оба показателя относятся к режиму работы энергоблока на полной мощности. Любое мероприятие, приводящее к увеличению риска, требует независимого анализа.

На АЭС Dukovany (Чехия) методы ВАБ были использованы для оценки эффективности замены существующих систем управления на цифровые [14]. Получено, что частота повреждения активной зоны снижается на 12 %. Однако авторы указывают на большую неопределенность полученных результатов, в частности, связанную с оценками вероятности отказов по общей причине элементов управления. В связи с этим, в Швеции [4] выполняется специальная программа работ, основанная на методах ВАБ, для оценки влияния на безопасность цифровых средств, внедряемых на АЭС.

На АЭС Paks в Венгрии [15] и Ровенской АЭС в Украине [16] с реакторами типа ВВЭР-440/213 методами ВАБ была обоснована необходимость отказа от проектного алгоритма искусственного обесточивания секций собственных нужд при аварии с течью теплоносителя первого контура.

В Великобритании вероятностные анализы, наряду с традиционными детерминистскими обоснованиями, были использованы для обоснования допустимости повышения обогащения ядерного топлива и увеличения периода между перегрузками с 18 до 24 месяцев на АЭС Sizewell B и с 2-х до 3-х лет на АЭС с газовым теплоносителем [4].

На АЭС Ringhals-3 (PWR, проект фирмы Westinghouse) в Швеции осуществляется двухступенчатое повышение тепловой мощности энергоблока с 2783 до 3000 и затем до 3160 МВт. Обоснование безопасности энергоблока с повышенными параметрами проводится с применением ВАБ [17]. Авторы отмечают, что изменения на АЭС влияют на следующие аспекты ВАБ:

- увеличение температур и давления влияет на критерии успеха;
- вероятность ошибок оператора может увеличиться из-за сокращения времени на принятие решений;

- характеристики выбросов могут измениться;
- изменения систем АЭС влияют на логическую модель ВАБ.

Результаты ВАБ АЭС Laguna Verde в Мексике также были использованы для обоснования допустимости повышения тепловой мощности реакторной установки на 5% [4].

Кроме того, для этой АЭС были проведены детерминистические и вероятностные анализы для оценки влияния на риск фильтров, которые установлены в прямке защитной оболочки и могут забиваться тепловой изоляцией во время аварии с течью теплоносителя. Результаты анализов привели к замене фильтров. Аналогичная проблема решалась с применением ВАБ и на АЭС Японии [4].

В Бельгии результаты ВАБ второго уровня вылились во внедрение каталитических рекомбинаторов водорода внутри защитной оболочки на всех семи АЭС [4].

На АЭС Bohunice V-1 в Словакии осуществляется снятие с эксплуатации обоих блоков ВВЭР-440/230. Методами ВАБ оценен риск нескольких стратегий хранения отработанного ядерного топлива [18]. Получено, что хранение топлива последней и предыдущей кампании в существующем бассейне выдержки в два яруса приводит к очень высокому риску. В то же время, врезка всасывающей линии системы охлаждения бассейна на более высокой отметке или хранение топлива последней кампании в корпусе реактора позволяет снизить частоту тяжелой аварии на три порядка.

Эксплуатационный контроль

При проведении эксплуатационного контроля, основанного на информации о риске, используется анализ значимости элементов на основании модели ВАБ. В Испании применяются следующие критерии [10]:

- если фактор повышения риска составляет более 1,005, то элемент АЭС классифицируется как очень важный для безопасности, а если менее 1,001 – как не являющийся важным для безопасности;
- если фактор повышения риска попадает внутрь этого диапазона, то элементы классифицируются на основании экспертных оценок коллектива специалистов. Используя этот подход, на АЭС Almaraz был снижен класс безопасности для более трех четвертей сегментов трубопроводов класса 1 согласно классификации ASME XI.

На АЭС Швейцарии методы ВАБ используются для отбора оборудования, которое должно быть включено в объем программы контроля старения [4]. Для отбора элементов, не относящихся к первому классу безопасности, применяются результаты анализа

значимости, выполненного в рамках ВАБ. Критериями отбора является превышение значения $1E-3$ по критерию Фуссела-Весели или два по критерию увеличения риска.

На АЭС Loviisa (АЭС с ВВЭР-440) в Финляндии, срок эксплуатации которой продлен до 50 лет, а электрическая мощность увеличена до 510 МВт, результаты полномасштабного ВАБ используются для разработки программы эксплуатационного контроля трубопроводов, одобренной надзорным органом [19]. В качестве критериев используются условные вероятности повреждения активной зоны и раннего радиоактивного выброса.

Изменение регламентных требований

Инструментарий ВАБ был использован в Испании для обоснования изменения ряда регламентных требований, в частности, надзорный орган согласовал увеличение допустимого времени вывода в ремонт в следующих случаях [10]:

- на АЭС Trillo для планового ремонта дизель-генераторов с 14 до 28 дней;
- на АЭС Cofrentes для спринклерной системы с трех до семи дней;
- на АЭС Asco для аккумуляторов с одного часа до 24 часов.

На АЭС Borssele в Нидерландах приняты следующие вероятностные критерии для определения возможности и длительности ремонта [4]:

- увеличение суммарного значения частоты повреждения активной зоны реактора не должно превышать 5% для всех видов ремонтов и 2% - для плановых ремонтов;
- значение частоты повреждения активной зоны реактора для текущей конфигурации не должно превышать $1E-4$ в год;
- произведение этого значения на длительность вывода в ремонт не должно быть больше $5E-8$.

Последнее требование является на порядок более жестким, чем это применяется на АЭС США, Чехии и некоторых других стран [4].

На АЭС Krško [13] при оценке возможности проведения плановых или внеплановых операций с отключением оборудования систем безопасности в режиме работы энергоблока на мощности используются следующие критерии: суммарное приращение вероятности повреждения активной зоны за период отключения должно быть меньше $2E-6$, а вероятности большого раннего радиоактивного выброса – $5E-6$. Кроме того, текущая частота повреждения активной зоны не должна превышать значение $1E-3$ 1/год.

На АЭС Chinshan в Тайване методы риска используются для обоснования того, что плановые ремонты систем безопасности можно проводить при работе реактора на мощности [4]. В 2003 году надзорный орган разрешил такой ремонт для системы отвода остаточных тепловыделений. В дальнейшем число систем, ремонтируемых при работе реактора на мощности, продолжало увеличиваться.

Аналогичная практика существует в Финляндии [4], где надзорный орган допускает плановые ремонты систем безопасности в режиме работы энергоблока на мощности, если удовлетворяются детерминистические критерии (например, принцип единичного отказа) и риск от ремонтов невелик. В соответствии с первым ВАБ для АЭС Olkiluoto, выполненном в 1989 году, вклад от таких ремонтов в частоту повреждения активной зоны составлял 5%. После оптимизации графика ремонтов методами ВАБ этот вклад снизился до 1%.

На АЭС Dukovany в Чехии [20] методы ВАБ были использованы для анализа требований Технологического регламента. Большинство требований были признаны слишком жесткими, что является распространенным явлением, но в двух случаях обнаружены существенные дефициты безопасности, разрешаемые Технологическим регламентом. Эти дефициты связаны со слишком большим допустимым временем вывода в ремонт секций 6 кВ и 0,4 кВ и возможностью одновременного ремонта дизель-генератора и резервного электроснабжения.

На АЭС Yonggwang, Ulchin и Kori в Корее результаты ВАБ первого и второго уровней, а также анализ дозовых нагрузок на население были использованы для обоснования увеличения периодичности испытаний защитной оболочки на интегральную утечку с 5 до 10 лет [4].

В США промышленность сделала аналогичный запрос в NRC с предложением увеличить периодичность таких испытаний с 10 до 15-20 лет. Оценка безопасности для 75 энергоблоков, включенных в заявку, уже завершена [4].

На АЭС «Borssele» в Нидерландах ВАБ был использован для разового обоснования отклонения от регламентных требований [4]. Быстрый ремонт насоса охлаждения активной зоны, способного работать в условиях затопления, был невозможен из-за отсутствия запасных частей. Было показано, что перевод энергоблока в холодное состояние с пониженным резервированием систем безопасности, как это было установлено в Технологическом регламенте, приводит к увеличению риска. С таким выводом согласился надзорный орган.

В Финляндии [4] подобные заявки подаются в надзорный орган 2-3 раза в год. Заявитель должен представить анализ риска и доказать, что риск будет минимальным.

Мониторинг риска

Оперативный контроль количественного уровня риска при переключениях (выводе оборудования в ремонт), изменяющих конфигурацию систем действующей АЭС, обычно называется мониторингом риска [21]. В таблице 3 приведены некоторые характеристики систем мониторинга риска на ряде АЭС.

Таблица 3 Характеристика систем мониторинга риска, применяемых на АЭС

Название АЭС	Страна	Тип реактора	Объем модели ВАБ	Программа мониторинга риска	Использование в режиме он-лайн	Источник информации
Bohunice V-2	Словакия	ВВЭР-440/213	ВАБ-1. Все эксплуатационные состояния	ЕОOS	Да	[22]
Mochovce	Словакия	ВВЭР-440/213	ВАБ-1. Все эксплуатационные состояния	Safety Monitor	Нет	[23]
Ascó I & II	Испания	Westinghouse PWR, трехпетлевой, 1025 МВт	ВАБ-1. Режим работы реактора на мощности	ЕОOS	Да	[10]
Vandellós II	Испания	Westinghouse PWR, трехпетлевой, 1080 МВт	ВАБ-1. Режим работы реактора на мощности	ЕОOS	Да	[10]
Garroña	Испания	GE-BWR-4, 465 МВт	ВАБ-1. Все эксплуатационные состояния	ЕОOS	Да	[10]
Cofrentes	Испания	GE-BWR-6, 1080 МВт	ВАБ-1. Все эксплуатационные состояния	ЕОOS	Да	[10], [24]
Dukovany	Чехия	ВВЭР-440/213	ВАБ-1. Все эксплуатационные состояния	Safety Monitor	Нет	[25]
Temelin	Чехия	ВВЭР-1000/320	ВАБ-1. Все эксплуатационные состояния	Safety Monitor	Нет	[26]
Cernavoda	Румыния	CANDU	ВАБ-1. Режим работы реактора на мощности	ЕОOS	Да	[9]

На АЭС Mochovce программа мониторинга риска внедрена в 2003 году [23]. Критерии риска, применяемые при использовании системы мониторинга риска на этой АЭС, основаны на оценке частоты повреждения активной зоны реактора в год для текущей конфигурации по приведенной ниже схеме.

- Нормальная эксплуатация – меньше, чем $2,0E-5$:
 - продолжается нормальная эксплуатация;
 - нет ограничений на техническое обслуживание и ремонт.
- Предупреждение - $2,0E-5$:
 - применяются ограничения по времени;
 - техническое обслуживание и ремонт должны выполняться немедленно.
- Тревога - $2,5E-4$:
 - применяются жесткие ограничения по времени;
 - техническое обслуживание и ремонт должны выполняться немедленно;
 - могут потребоваться компенсирующие меры.
- Высокий риск - $1,0E-3$:
 - необходимы срочные меры для снижения риска.

На АЭС Bohunice V-2 уровень предупреждения составляет $1,0E-5$, тревоги - $4,0E-4$, а высокого риска - $1,0E-3$ [22].

Основными пользователями программы мониторинга риска на АЭС Mochovce являются следующие структурные единицы и категории персонала [23]:

- рабочая группа по ядерной безопасности;
- рабочая группа по планированию технического обслуживания и внеплановых ремонтов;
- рабочая группа по планированию планово-предупредительных ремонтов;
- начальники смен и инженеры по безопасности.

В Испании до вывода в ремонт любого оборудования требуется оценить количественно риск от новой конфигурации с использованием программы мониторинга риска [9]. Поэтому фирма Iberdrola внедрила системы мониторинга риска на 4-х АЭС в Испании (Cofrentes, Trillo, Vandellós и Ascó), а заодно и на АЭС Angra-2 в Бразилии [27]. На АЭС Cofrentes такая система основана моделях ВАБ уровня 1, разработанных для работы энергоблока на мощности и режимов с остановленным реактором, а также ВАБ уровня 2. Критерии принятия решения представлены в таблице 4.

Таблица 4. Критерии принятия решений на основании текущей информации о риске на АЭС Cofrentes

Приращение вероятности повреждения активной зоны, 1/год	Действия	Приращение вероятности раннего большого выброса, 1/год
$>1E-05$	Нельзя начинать мероприятие. Требуется избегать таких ситуаций	$>1E-06$
$1E-6 - 1E-5$	Оценить не рассчитываемые в ВАБ факторы. Выполнить действия по управлению риском	$1E-7 - 1E-6$
$<1E-6$	Нормальная эксплуатация. Мероприятия не требуются	$<1E-7$

Система мониторинга риска на АЭС Cofrentes работает в режиме реального времени и выдает сведения о риске операторам блочного пульта управления [27]. Оценка риска проводится автоматически на основании информации о выводе оборудования в ремонт, заносимой этими операторами в электронные оперативные журналы. Кроме того, эта система используется персоналом, ответственным за планирование ремонта и технического обслуживания.

В соответствии с требованиями надзорного органа Тайваня эксплуатирующая организация должна оценить риск всех операций на остановленном реакторе до начала останова энергоблока на планово-предупредительный ремонт [4]. Для этого используется программа мониторинга риска TIRM.

Использование методов ВАБ для оптимизации технического обслуживания и ремонтов возможно и на исследовательских реакторах. В Индии ВАБ был частью многопараметрического оптимизационного процесса наряду с оценками стоимости работ и коллективных доз облучения персонала [28].

Условия функционирования оперативного персонала

На АЭС Dukovany в Чехии [20, 29] результаты ВАБ используются для совершенствования целого ряда аспектов, связанных с функционированием оперативного персонала:

- разработки симптомно-ориентированных противоаварийных инструкций, что дает очень хорошее соотношение затраты/выгода в плане снижения риска из-за относительно низкой стоимости анализа и реализации его рекомендаций. В Чехии существует требование, что для всех последовательностей с частотой

реализации более чем $1E-8$ 1/год необходимо наличие таких инструкций (аналогичный критерий применяется на АЭС Козлодуй в Болгарии [30]);

- определения программ противоаварийных тренировок на полномасштабном тренажере. Для этого используются три критерия важности того или иного сценария (частота, трудность и значимость с точки зрения риска), которые легко определяются по результатам ВАБ;
- сокращения сменного локального персонала. Допустимость такого сокращения была обоснована с помощью вероятностных оценок;
- улучшения человеко-машинного интерфейса на блочном щите управления.

На Ровенской АЭС (Украина) первые две задачи также решаются с привлечением результатов ВАБ [16].

В Финляндии результаты ВАБ должны использоваться при разработке программ тренировок оперативного и ремонтного персонала. Операторы блочного пульта управления должны проходить тренировку наиболее важных действий с точки зрения риска раз в три года [4].

На АЭС Hinkley Point B в Великобритании методы ВАБ были использованы для обоснования увеличения длительности смены с 8 до 12 часов [4].

Противоаварийное планирование

В Швейцарии надзорный орган определил три наиболее вероятных референтных сценария с радиоактивным выбросом для целей противоаварийного планирования и разработки противоаварийных мероприятий. Допускается не рассматривать специфические сценарии как «референтные», если результаты ВАБ второго уровня показывают, что суммарная частота «отброшенных» сценариев является малой, т.е. порядка $1E-6$ на реакторо-год (за исключением землетрясений) [4].

Информация по частотам и размерам выброса, полученная при выполнении ВАБ второго уровня для АЭС Borssele в Нидерландах, была использована для определения аварийных зон, где предусматривается сооружение укрытий, эвакуация или йодная профилактика [4].

В Японии модель ВАБ была дополнена моделью йодного обмена для оценки эффективности йодной профилактики и других защитных мер [31]. Результаты анализа являются основой разработки документов по противоаварийному планированию. Одной из рекомендуемых мер является доаварийное распространение йодистых препаратов среди населения, проживающего вблизи АЭС.

Необходимый объем ВАБ

Позиция надзорного органа США состоит в том, что в зависимости от того, для какой цели применяется ВАБ, меняется его необходимый объем и уровень детализации [32]. Например, для классификации конструкций, систем и элементов с точки зрения их влияния на риск должен выполняться полномасштабный ВАБ, а для простого изменения регламентных требований достаточно его части. Объем ВАБ должен быть достаточен для моделирования рассматриваемых причинно-следственных связей. Другими словами, если в ВАБ не моделировался какой-нибудь специфический элемент или система, то его результаты не могут быть использованы для обоснования изменений, связанных с вышеуказанными объектами.

Подход МАГАТЭ также предусматривает возможность проведения разных по объему ВАБ для решения различных эксплуатационных задач [1]. В отношении ВАБ первого уровня для режимов работы на мощности сформулирован набор общих требований к качеству базового ВАБ, которые должны выполняться при любом его использовании, а также наборы дополнительных требований и рекомендации по изменению вероятностной модели в зависимости от конкретного применения анализа. В документе [1] декларируется, что в некоторых случаях требуется выполнение ВАБ второго и третьего уровней, например, при использовании результатов ВАБ для противоаварийного планирования, и сделан обзор существующих вероятностных показателей для принятия решений, однако конкретных рекомендаций по расширению объема ВАБ первого уровня не приводится.

Заключение

В большинстве стран, эксплуатирующих АЭС, технология ВАБ используется для решения эксплуатационных проблем, хотя степень его применения, глубина проработки используемых моделей, решаемые задачи и критерии принятия решений отличаются. Существует тенденция расширения этой деятельности, в которой определенную координирующую роль играют международные организации. В ряде стран применение ВАБ стимулируется политикой надзорных органов и выпускаемыми ими документами. В других странах эксплуатирующие организации инициативно используют ВАБ для облегчения диалога с надзорным органом при изменениях, вносимых в эксплуатационную документацию или проект АЭС.

Наиболее частыми областями применения ВАБ являются оценка мер по модернизации, оптимизация технического обслуживания и ремонта систем безопасности,

включая внедрение программ мониторинга риска, и обоснование отклонений от регламентных требований.

Список литературы.

1. Determining the Quality of Probabilistic Safety Assessment (PSA) for Applications in Nuclear Power Plants. IAEA-TECDOC-1511, IAEA, Vienna, Austria, 2006.
2. I. Kouzmina Overview of IAEA Safety Standards on Safety Assessment, PSA, and RIDM. IAEA Regional Workshop on Application of PSA for Improving the Operational Safety of Nuclear Power Plants, 31 March – 4 April, 2008, Rez, Prague, Czech Republic.
3. J.-U. Kluegel PSA Applications at NPP Goesgen. IAEA Regional Workshop on Application of PSA for Improving the Operational Safety of Nuclear Power Plants, 31 March – 4 April, 2008, Rez, Prague, Czech Republic.
4. Use and Development of Probabilistic Safety Assessment. CSNI WGRISK. NEA/CSNI/R(2007)12. Organization for Economic Co-operation and Development (OECD). Nuclear Energy Agency. Committee on the safety of nuclear installations, Paris, France, 14 November, 2007.
5. An Approach for Using Probabilistic Risk Assessment in Risk-Informed Decisions on Plant-Specific Changes to the Licensing Basis, Regulatory Guide 1.174 Rev. 1, Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, USA, 2002.
6. An Approach for Plant-Specific, Risk-Informed Decisionmaking: In-service Testing, Regulatory Guide 1.175, Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, USA, 1998.
7. An Approach for Plant-Specific, Risk-Informed Decisionmaking: Technical Specifications, Regulatory Guide 1.177, Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, USA, 1998.
8. An Approach for Plant-Specific Risk-Informed Decisionmaking for Inservice Inspection of Piping, Regulatory Guide 1.178 Rev. 1, Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, USA, 2003.
9. G. Strasser Current PSA Status and Risk Monitor Application at Cernavoda NPP. IAEA Regional Workshop on Application of PSA for Improving the Operational Safety of Nuclear Power Plants, 31 March – 4 April, 2008, Rez, Prague, Czech Republic.
10. F. Osorio PSA Applications in Spain. IAEA Regional Workshop on Application of PSA for Improving the Operational Safety of Nuclear Power Plants, 31 March – 4 April, 2008, Rez, Prague, Czech Republic.

11. J.-U Kluegel Risk-Informed Plant Modifications at NPP Goesgen. IAEA Regional Workshop on Application of PSA for Improving the Operational Safety of Nuclear Power Plants, 31 March – 4 April, 2008, Rez, Prague, Czech Republic.

12. V. Sorel PSA Development and Use at EdF. IAEA Technical Meeting on Development of a safety guide on Level 1 Probabilistic Safety Assessment (PSA) and Applications for Nuclear Reactors. 20 - 24 November, 2006, IAEA, Vienna, Austria..

13. S. Cimeša Risk Informed Decision Making at SNSA. IAEA Regional Workshop on Application of PSA for Improving the Operational Safety of Nuclear Power Plants, 31 March – 4 April, 2008, Rez, Prague, Czech Republic.

14. S. Hustak Use of PSA for Evaluation of I&C Replacement. IAEA Regional Workshop on Application of PSA for Improving the Operational Safety of Nuclear Power Plants, 31 March – 4 April, 2008, Rez, Prague, Czech Republic.

15. Z. Vida Status and Scope of the PSA Application Activities in Paks NPP. IAEA Regional Workshop on Application of PSA for Improving the Operational Safety of Nuclear Power Plants, 31 March – 4 April, 2008, Rez, Prague, Czech Republic.

16. Y. Sheronov Application of PSA at Rivne NPP. IAEA Regional Workshop on Application of PSA for Improving the Operational Safety of Nuclear Power Plants, 31 March – 4 April, 2008, Rez, Prague, Czech Republic.

17. C. Persson Effects of the Power Upgrade Project GREAT on the PSA Study for the Nuclear Power Plant Ringhals 3. PSAM9 Ninth International Probabilistic Safety Assessment and Management Conference, 18-23 May, 2008, Hong Kong, China.

18. Z. Kovacs, R. Spenlinger, H. Novakova Probabilistic Risk Assessment for Spent Fuel Pool Decommissioning in the J.Bohunice V1 NPP. PSAM9 Ninth International Probabilistic Safety Assessment and Management Conference, 18-23 May, 2008, Hong Kong, China.

19. K. Jankala Use of PRA in Risk-Informed Classification of Piping Segments of Loviisa NPP. PSAM9 Ninth International Probabilistic Safety Assessment and Management Conference, 18-23 May, 2008, Hong Kong, China.

20. M. Hladky, A. Veleba Use of PSA Applications in NPP Dukovany. IAEA Regional Workshop on Application of PSA for Improving the Operational Safety of Nuclear Power Plants, 31 March – 4 April, 2008, Rez, Prague, Czech Republic.

21. Г.В. Токмачёв. Мониторинг риска на АЭС, Атомная техника за рубежом, Москва, 2005, № 3, стр. 3-8.

22. P. Gabčo Maintenance Optimization at Bohunice NPP. IAEA Regional Workshop on Application of PSA for Improving the Operational Safety of Nuclear Power Plants, 31 March – 4 April, 2008, Rez, Prague, Czech Republic.

23. R. Matlák Application of PSA at Mochovce NPP. IAEA Regional Workshop on Application of PSA for Improving the Operational Safety of Nuclear Power Plants, 31 March – 4 April, 2008, Rez, Prague, Czech Republic.

24. F. Osorio Practical Application of Risk Monitors to Support Safe Plant Operation. IAEA Regional Workshop on Application of PSA for Improving the Operational Safety of Nuclear Power Plants, 31 March – 4 April, 2008, Rez, Prague, Czech Republic.

25. J. Sedlak Risk Monitoring - Trends and Challenges. IAEA Regional Workshop on Application of PSA for Improving the Operational Safety of Nuclear Power Plants, 31 March – 4 April, 2008, Rez, Prague, Czech Republic.

26. O. Mlady, L. Kucera Use of PSA for Justification of Continued Operation. IAEA Regional Workshop on Application of PSA for Improving the Operational Safety of Nuclear Power Plants, 31 March – 4 April, 2008, Rez, Prague, Czech Republic.

27. F. Osorio Risk Monitor Development Pprocess. IAEA Regional Workshop on Application of PSA for Improving the Operational Safety of Nuclear Power Plants, 31 March – 4 April, 2008, Rez, Prague, Czech Republic.

28. P.V. Varde Development of a Risk-Informed Approach in Support of Maintenance Management for Nuclear Plants. In: Advances in Performance and Safety of Complex Systems, Macmillian India ltd., 2008, pp. 639-645.

29. J. Holy Use of PSA to Improve Human Reliability. IAEA Regional Workshop on Application of PSA for Improving the Operational Safety of Nuclear Power Plants, 31 March – 4 April, 2008, Rez, Prague, Czech Republic.

30. V. Papazov PSA Applications Results at KNPP Units 5 and 6. IAEA Regional Workshop on Application of PSA for Improving the Operational Safety of Nuclear Power Plants, 31 March – 4 April, 2008, Rez, Prague, Czech Republic.

31. T. Homma, M. Kimura, T. Matsubara, J. Ishikawa Technical Considerations for Emergency Preparedness with a Probabilistic Accident Consequence Assessment Model. PSAM9 Ninth International Probabilistic Safety Assessment and Management Conference, 18-23 May, 2008, Hong Kong, China.

32. G. Parry The U.S. Nuclear Regulatory Commission's Approach to Establishing PRA Quality for Regulatory Applications. Technical Meeting on Development of Safety Guides on Level 1 and Level 2 Probabilistic Safety Assessment (PSA) for Nuclear Power Plant, 3-7 December, 2007, IAEA, Vienna, Austria.

АННОТАЦИЯ

УДК 621.039.58

Токмачев Г.В., Федулов М.В. **Применение вероятностного анализа безопасности для решения эксплуатационных проблем на АЭС.** – Атомная техника за рубежом, №12, 2008 г.

В обзоре рассмотрены области применения вероятностного анализа безопасности (ВАБ), используемые для решения эксплуатационных проблем на действующих АЭС. Приведена информация как обо всем возможном спектре применения ВАБ, так и о степени его использования в различных странах. Рассмотрены вопросы оценки мер по модернизации, эксплуатационного контроля, основанного на информации о риске, обоснования изменений регламентных требований, анализа условий функционирования оперативного персонала, мониторинга риска, противоаварийного планирования. Обсуждены вероятностные критерии, используемые для принятия эксплуатационных решений, и необходимый объем ВАБ для различных применений.

Табл. 4, список лит. 32 назв.

Ключевые слова

Атомная станция, эксплуатация, безопасность, вероятностный анализ, применение