

ПОДХОД К ПРИМЕНЕНИЮ ВЕРОЯТНОСТНОГО АНАЛИЗА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ АЭС С РЕАКТОРАМИ ВВЭР НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Г.В. Токмачев

ФГУП «Атомэнергопроект», г. Москва



В статье обсуждается практика применения вероятностных анализов безопасности (ВАБ) для оценки и совершенствования проектов АЭС повышенной безопасности с реакторами ВВЭР нового поколения. Кратко охарактеризована концепция новых проектов АЭС с ВВЭР и решения по повышению безопасности, которые реализованы в проектах новых АЭС на основании принципов глубоко эшелонированной защиты и результатов ВАБ, выполненных для действующих АЭС. На качественном уровне проведена оценка соответствия проектов АЭС с реакторами ВВЭР нового поколения детерминистическим принципам с применением результатов ВАБ. Охарактеризован подход к количественной оценке уровня безопасности АЭС, достигнутого при проектировании, на основе результатов ВАБ.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие атомной энергетики базируется на применении энергоблоков с высокими показателями безопасности и экономичности. Значительная часть вновь вводимых мощностей будет покрываться за счет атомных электрических станций (АЭС) с реакторами ВВЭР.

К настоящему времени проекты ряда энергоблоков АЭС нового поколения разработаны и лицензированы в надзорном органе Российской Федерации, и уже ведется сооружение энергоблока 1 Нововоронежской АЭС-2 в России и энергоблоков АЭС Куданкулам в Республике Индия. Сейчас разрабатывается проект АЭС-2006, который будет типовым проектом АЭС нового поколения.

Основными разработчиками этих проектов являются ФГУП «Атомэнергопроект» (г. Москва), ФГУП ОКБ «Гидропресс» и РНЦ «Курчатовский институт».

В качестве инструмента для выработки, оценки и обоснования решений по безопасности в проектах АЭС с реакторами ВВЭР нового поколения и определения основных инженерных принципов и мер, необходимых для достижения качественно нового уровня безопасности по сравнению с действующими АЭС, широко используются вероятностные анализы безопасности (ВАБ). Для их проведения применяются методики, общепринятые в мировом сообществе, что подтвердили

проведенные экспертизы МАГАТЭ и современное программное обеспечение, в частности, широко распространенная программа Риск Спектрум.

Накопленный опыт показывает целесообразность установления единых подходов к выполнению ВАБ и особенно к использованию результатов ВАБ для оценки проектных решений.

ПРОЕКТНЫЕ РЕШЕНИЯ ПО БЕЗОПАСНОСТИ

Концепция новых проектов АЭС с ВВЭР [1-5] направлена на достижение двух основных целей:

- повышения уровня безопасности;
- повышения экономичности выработки электроэнергии и снижения затрат на сооружение и эксплуатацию.

Разработка проектных решений по повышению безопасности в проектах новых АЭС основывается на реализации концепции глубоко эшелонированной защиты, которая предусматривает создание ряда физических барьеров на пути выхода радиоактивных веществ в окружающую среду и обеспечение высокого уровня надежности по защите этих барьеров от повреждений. Общий риск от эксплуатации АЭС нового поколения должен быть настолько мал, насколько это разумно достижимо. При этом должны, безусловно, выполняться требования действующих в России нормативных документов по безопасности [6], а также рекомендации МАГАТЭ [7].

Задание целевых значений вероятностных показателей безопасности для новых проектов основывается на требовании п. 1.2.17 ОПБ88/97 [6], в соответствии с которым оцененное значение частоты предельного аварийного выброса не должно превышать величину $1,0 \cdot 10^{-7}$ на реактор в год. Предельный аварийный выброс – это выброс такого количества радиоактивных продуктов, при котором может потребоваться эвакуация населения за пределами расстояний, определенных действующими нормами размещения АЭС. Вторым целевым показателем, установленным для АЭС с ВВЭР нового поколения, является значение общей частоты повреждения активной зоны, которое не должно превышать $1,0 \cdot 10^{-6}$ на реактор в год [8] и является более жестким (на один порядок) требованием по сравнению с п.4.2.2 ОПБ-88/97 [6].

Достижение высокого уровня надежности выполнения функций безопасности в проектах АЭС с реакторами ВВЭР нового поколения основывается на применении основных инженерных принципов и требований к структуре и конструкции систем безопасности, изложенных в ОПБ-88/97 [6] и INSAG-12 [7], включая следующие.

- **Принцип единичного отказа**, в соответствии с которым система должна выполнять заданные функции при любом требующем ее работы исходном событии и при независимом от исходного события отказе одного из активных элементов (например, насоса) или пассивных элементов, имеющих механические движущие части (например, обратного клапана), или ошибке персонала.

Реализация принципа единичного отказа требует, чтобы число резервированных элементов в системе было не менее двух по отношению к любым исходным событиям, при которых требуется функционирование системы, включая исходные события, которые могут вызвать зависимые отказы одного или нескольких резервированных элементов системы.

- **Принцип физического разделения**, в соответствии с которым оборудование и элементы отдельных каналов систем безопасности должны размещаться в отдельных помещениях, разделенных между собой расстоянием и/или физическими барьерами.

- **Принцип разнообразия**, включая функциональное и конструктивное разнообразие и разнообразие эксплуатационных состояний. Применение принципа разнообразия необходимо для защиты от отказов по общей причине, характерных для одинаковых по конструкции элементов систем. Следует отметить, что эффект повышения надежности резервированных систем зависит от вида разнообразия.

Наибольшая эффективность достигается при применении функционального разнообразия, что предусматривает использование взаимно резервирующих элементов (каналов или систем), основанных на различных (пассивных или активных) принципах действия. Достаточно хорошую защиту от отказов по общей причине обеспечивает конструктивное разнообразие, которое предусматривает применение элементов (насосов, дизель – генераторов, арматуры и т.п.) различной конструкции. Применение разнообразия эксплуатационных состояний наиболее эффективно, когда предусматривается использование части резервированных элементов или каналов системы безопасности для выполнения функций нормальной эксплуатации.

- **Расширенное применение систем пассивного принципа действия.** Реализация этого принципа обеспечивает достижение высокого уровня надежности выполнения функций безопасности, что достигается за счет

- простоты конструкции таких систем;
- небольшого числа высоконадежных элементов в их составе;
- полного отсутствия зависимостей их функционирования от обеспечивающих систем (например, систем электропитания и снабжения охлаждающей средой);
- практически полного отсутствия зависимостей от управляющих систем и действий персонала, поскольку пассивные системы безопасности вводятся в действие и выполняют заданные функции, как правило, вследствие изменения параметров технологических процессов.

- **Обеспечение защиты от ошибочных действий эксплуатационного персонала.** Наиболее эффективными мерами для выполнения этого принципа являются использование упомянутых выше пассивных систем безопасности, функционирование которых не требует каких-либо действий персонала, а также применение высокого уровня автоматизации по управлению активными системами безопасности с целью исключения каких-либо действий персонала на начальных периодах развития аварий.

- **Обеспечение защиты от внутренних воздействий** (пожаров, затоплений, пароводяных струй, летящих предметов, биений трубопроводов, неблагоприятных изменений условий окружающей среды в помещениях АЭС).

- **Обеспечение защиты от характерных для площадки АЭС внешних воздействий** природного (землетрясений, смерчей, ураганов, высоких и низких уровней воды, высоких и низких температур и т.п.) и техногенного (аварий на воздушном, водном и наземном транспорте, аварий на магистральных трубопроводах, внешних пожары, прорывов плотин и др.) характера.

- **Обеспечение более высокого уровня надежности для функций безопасности** с большей частотой требований на их выполнение. В частности, это относится к функции приведения реактора в подкритическое состояние и поддержания его в этом состоянии во всем диапазоне рабочих параметров, а также функции отвода тепла от реакторной установки при нарушениях нормальной эксплуатации и переходных процессах при плотном первом контуре. Следует отметить, что, как правило, значения частот таких событий на два и более порядков выше значений частот течей из первого контура [9, 10].

• **Снижение (насколько это возможно) значений частот или вероятностей отказов оборудования и элементов**, приводящих к возникновению исходных событий аварий.

Несомненным достоинством приведенных выше детерминистических принципов является простота их понимания и подкрепление практикой использования в различных областях техники.

Не подвергая сомнению необходимость выполнения детерминистических принципов, следует отметить, что они, являясь основой при обосновании безопасности, имеют и вероятностную природу. Практически все эти принципы имеют безусловную направленность на снижение риска от использования АЭС за счет снижения размеров радиационных последствий при авариях и/или за счет снижения вероятностей или частот реализации таких аварий. При этом уровень безопасности конкретной АЭС существенно зависит от реального обеспечения показателей надежности оборудования/систем и культуры безопасности АЭС. К тому же, детерминистические принципы не устанавливают критерии допустимого риска (частот повреждения активной зоны и предельного аварийного выброса) при использовании АЭС, что во многом определяет принятие или неприятие обществом атомной энергетики.

При использовании ВАБ обеспечивается рассмотрение расширенного (по отношению к детерминистическим подходам) числа исходных событий и отказов, анализ безопасности АЭС для всех режимов ее работы и эксплуатационных состояний и определение показателей риска. Поэтому применение ВАБ позволяет оценить безопасность АЭС на качественно новом уровне, повышает общественную приемлемость использования АЭС, а с учетом определения вклада систем и мероприятий в показатели риска (т.е. их эффективности) существенно оптимизировать соотношение безопасность/экономика. Особенно ярко и полно преимущества применения ВАБ проявляются при сравнении конкретных проектов АЭС и разработке мероприятий по повышению безопасности АЭС. Все это определило практическую необходимость использования ВАБ для оценки проектных и эксплуатационных решений, что отражает международная практика разработки требований по безопасности АЭС, даже в документах детерминистической направленности.

Результаты ВАБ первого и второго уровней [5,11] для действующих АЭС с реакторами ВВЭР1000/320 показали, что значения частот повреждения активной зоны и предельного аварийного выброса превышают критерии, установленные в новых нормативных документах Российской Федерации, причем существенные вклады в эти значения вносят нарушения в энергосистемах, отказы по общей причине и ошибочные действия персонала. Это предопределило необходимость разработки и внедрения дополнительных мероприятий по повышению безопасности АЭС с практическим достижением ее уровня до требований норм.

Для коренного решения этих проблем в проектах АЭС нового поколения применяются взаимно резервирующие активные и пассивные системы безопасности, выполняющие основные функции безопасности по приведению реактора в подкритическое состояние, отводу тепла от активной зоны и локализации выделяющихся в процессе аварии радиоактивных продуктов в пределах защитной оболочки.

Примерами таких систем являются:

- активная и пассивная системы аварийного отвода тепла по 2-му контуру, причем обе системы способны отводить тепло в течение неограниченного периода времени;
- активная система аварийного охлаждения активной зоны и гидроемкости 1 и 2-й ступеней, используемых для поддержания запаса теплоносителя в активной

зоне при течах из 1-го контура. При этом гидроемкости 2-й ступени совместно с гидроемкостями 1-й ступени резервируют систему аварийного охлаждения активной зоны по функции поддержания запаса теплоносителя в активной зоне в течение длительного времени после начала аварии, что обеспечивает расширение времени по управлению запроектными авариями, связанными с авариями с потерей теплоносителя реактора. В частности, это время может быть использовано для восстановления работоспособности активных элементов в случае их отказа.

В проекте активных систем безопасности применены дополнительные меры по снижению влияния отказов по общей причине, в качестве которых предусматривается использование отдельных каналов аварийного охлаждения активной зоны и системы аварийного отвода тепла через 2-ой контур для целей нормальной эксплуатации. Поэтому некоторые каналы этих систем непрерывно работают, а остальные находятся в режиме ожидания при работе блока на мощности. При этом большая часть элементов активных систем безопасности находится в состояниях, которые аналогичны состояниям при выполнении требуемых функций во время аварии.

Применение концепции течи перед разрывом должно обеспечить снижение значений частот больших течей из 1-го контура и разрушения коллекторов парогенераторов и корпусного оборудования до пренебрежительно низких значений.

Применение двойной железобетонной защитной оболочки с пассивной системой удаления водорода, системой вентиляции и очистки среды из объема кольцевого зазора между первичной и вторичной защитными оболочками, спринклерной системой и системой удержания расплавленной активной зоны (ловушкой для расплавленного ядерного топлива) обеспечивает снижение выбросов, уменьшение размеров санитарно-защитной зоны для проектных аварий и предотвращение превышения размеров предельного аварийного выброса для запроектных аварий, включая тяжелые аварии с полным расплавлением ядерного топлива.

Реализация приведенных выше проектных решений позволила создать АЭС с качественно новым уровнем безопасности, характеризуемым количественно такими значениями частот повреждения активной зоны и предельного аварийного выброса, которые ниже целевых значений вероятностных показателей безопасности, установленных для новых проектов.

ПРИМЕНЕНИЕ ВАБ ДЛЯ ОЦЕНКИ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОЕКТОВ АЭС

Практика применения ВАБ

В соответствии с существующими в России требованиями надзорного органа [12] ВАБ при проектировании АЭС выполняется в несколько этапов, а окончательный отчет по ВАБ включает

- ВАБ 1-го уровня для внутренних исходных (инициирующих) событий, а также внутренних и внешних воздействий, который рекомендуется выполнять для всех режимов работы энергоблока – номинального и пониженных уровней мощности, режимов пуска и останова, стояночных режимов (при проведении перегрузки ядерного топлива, технического обслуживания и ремонта);
- ВАБ 2-го уровня для внутренних исходных событий, а также внутренних и внешних воздействий, который рекомендуется выполнять для режимов работы энергоблока на номинальном и пониженных уровнях мощности.

Процесс проектирования состоит из трех основных этапов:

- обоснование инвестиций, включая разработку концептуального (эскизного) проекта;

- разработка технического проекта;
- разработка рабочей документации.

На стадии обоснования инвестиций демонстрируется возможность сооружения АЭС с требуемыми характеристиками. ВАБ, проводимый на этом этапе, позволяет доказать, что резервирование и разнообразие систем адекватны установленным требованиям. Для этого, как правило, выполняется сокращенный ВАБ для внутренних исходных событий и работы реактора на мощности.

На стадии разработки технического проекта проводится более детальная оценка проектных решений, включая предварительный анализ защиты против внутренних и внешних воздействий. Для этого проводится доработка ВАБ с учетом этих воздействий, а также эксплуатационных состояний с остановленным реактором, хотя и с определенными упрощениями. На этом этапе обычно выполняется ВАБ 1 и 2-го уровней. Следует отметить, что ВАБ 1-го уровня входит в комплект документов, необходимых для получения лицензии (разрешения) на сооружение АЭС [13].

Результаты полномасштабного ВАБ, проводимого на стадии рабочего проектирования в процессе выпуска окончательного отчета по оценке безопасности, используются для обоснования достигнутого в проекте уровня безопасности и получения лицензии на эксплуатацию АЭС [13].

Результаты ВАБ содержат необходимую информацию для проведения всесторонних комплексных обоснований достигаемого в проекте уровня безопасности. В ВАБ проводится качественная и количественная оценки эффективности проектных решений и/или предлагаемых мер по их совершенствованию для снижения вероятностей реализации запроектных аварий с тяжелыми радиационными последствиями и/или тяжелыми повреждениями источников радиоактивности.

Обоснование безопасности опирается на совокупность результатов детерминистического и вероятностного анализов безопасности, и эти цели не могут быть достигнуты при использовании одностороннего подхода. Применение ВАБ дополнительно к детерминистическим анализам позволяет обеспечить цельную технологию анализа и оценки уровня безопасности АЭС при проектировании.

Важным преимуществом проектируемых АЭС является возможность достаточно быстрого и дешевого изменения проекта с целью исключения слабых мест, выявленных в результате проведения ВАБ. Опыт показывает, что разработка проекта и ВАБ проводятся параллельно, причем оба процесса оказывают взаимное влияние и имеют итеративный характер – рекомендации, разрабатываемые на основе результатов ВАБ и касающиеся изменений компоновки, технологических схем, режимов работы оборудования, эксплуатационных состояний энергоблока, перечня защит и блокировок и т.п., оперативно внедряются в проект. В свою очередь, любые изменения проекта, в том числе и по результатам ВАБ, вызывают необходимость корректировки моделей и документации по ВАБ. Таким образом, анализ проводится в несколько итераций, т.е. определенные его этапы выполняются заново с целью их уточнения после завершения некоторых последующих задач ВАБ и/или внесения изменений в проект АЭС.

При выполнении ВАБ в процессе проектирования новой АЭС особое внимание уделяется этой повышенной «изменчивости» объекта исследования по сравнению с аналогичными анализами, проводимыми для действующих АЭС. Для того чтобы достичь высокого качества ВАБ, разрабатываемого итеративно для меняющегося проекта АЭС, были разработаны специфические программы и процедуры обеспечения качества. В этих организационных документах особое внимание уделяется вопросам отслеживания всех вносимых в проект изменений, а также взаимодействию выполняющих ВАБ аналитиков, как между собой, так и со специалистами,

занимающимися конструированием, проектированием, изготовлением оборудования и проведением детерминистических анализов.

Технология проведения ВАБ на этапе проектирования новых АЭС имеет определенные особенности по сравнению с общепринятым подходом к выполнению ВАБ, который был разработан для действующих АЭС и отражен в документах МАГАТЭ [1418]. Поэтому методология, обычно применяемая для выполнения ВАБ действующих АЭС, подверглась определенной корректировке.

На начальной стадии проектирования сбор исходных данных, необходимых для выполнения ВАБ, значительно осложнен из-за недостатка информации и документации, например, эксплуатационных инструкций. Некоторые типичные задачи, в частности, обход станции при выполнении анализа внутренних и внешних воздействий, просто невозможно выполнить [19]. Кроме того, анализ АЭС со значительным использованием пассивных систем вызывает необходимость моделирования времени выполнения функции, превышающего обычно рассматриваемые 24 ч. Анализ надежности пассивных систем и отказов по общей причине для этих систем также отличается от аналогичных анализов активных систем. Дополнительные особенности вносит рассмотрение программируемых технических средств [10, 20], т.к. согласно требованиям ОПБ-88/97 [6] (пп. 4.4.4.5 и 4.4.5.9) проекты управляющих систем безопасности и нормальной эксплуатации должны содержать анализ надежности функционирования программного обеспечения.

Качественная оценка безопасности

Основные задачи качественного анализа безопасности состоят в установлении степени соответствия проектных решений основным принципам современной концепции глубокоэшелонированной защиты, изложенным в ОПБ88/97 [6] и отчете МАГАТЭ INSAG12 [7] и охарактеризованным выше.

Оценка соответствия проектов АЭС с реакторами ВВЭР нового поколения приведенным выше детерминистическим принципам с применением результатов ВАБ проведена на функционально-системном и элементном уровне.

Качественная оценка безопасности на функционально-системном уровне выполнена на основе анализа аварийных последовательностей, в рамках которого

- определен детализированный перечень функций безопасности и критерии успеха для выполнения каждой функции безопасности,
- проведен анализ зависимостей между отдельными функциями безопасности и системами безопасности,
- определено участие оперативного персонала в управлении систем безопасности,
- проведена предварительная оценка соответствия проекта детерминистическим принципам.

Как показал анализ деревьев событий, на большинстве из них отсутствуют аварийные последовательности с повреждением активной зоны, которые реализуются при отказе только одной системы безопасности, а подавляющее число аварийных последовательностей с повреждением активной зоны обусловлено совместным отказом двух или более систем. В частности, аварийные последовательности, возникающие вследствие невыполнения функций отвода тепла через второй контур, реализуются при совместном отказе активных и пассивных систем отвода тепла по второму контуру. Другим примером являются сценарии с повреждением активной зоны при течах из первого контура, которые возникают при совместном отказе активной системы аварийного охлаждения активной зоны и одной из пассивных систем.

Исключение составляют аварийные последовательности при течах из первого контура за пределы защитной оболочки, которые реализуются при неизоляции течи (незакрытии локализирующей арматуры на разгерметизированном трубопроводе). Следует, однако, отметить, что снижение частот таких аварийных последовательностей достигается за счет применения принципа конструкционного разнообразия, в соответствии с которым предусмотрена установка на этих трубопроводах изолирующих задвижек различной конструкции – с пневмо- и электроприводами.

Качественная оценка безопасности на элементарном уровне выполнена на основе анализа перечня минимальных сечений. Минимальные сечения представляют собой комбинации минимального числа базовых (первичных) событий функционально-системных деревьев отказов. Их реализация приводит к последствиям, размеры которых превышают установленные в проекте пределы. В состав минимальных сечений могут входить совместно с исходными событиями независимые отказы и отказы по общей причине элементов систем важных для безопасности, ошибочные действия персонала и события, связанные с осуществлением мер по управлению запроектными авариями (например, использованием временного резервирования для восстановления критических функций безопасности).

Анализ перечня минимальных сечений позволяет сделать следующие выводы о влиянии различных факторов на безопасность АЭС нового поколения:

- по всему проекту в целом отсутствуют минимальные сечения, содержащие дополнительно к исходному событию только один независимый отказ элемента систем безопасности или только одно ошибочное действие персонала, учет которых требуется в соответствии с ОПБ-88/97 [6]; исключением является такое запроектное исходное событие, как катастрофический разрыв корпуса реактора, который непосредственно ведет к повреждению активной зоны, но имеет очень низкую вероятность; это показывает, что проект систем безопасности соответствует принципу единичного отказа, и в проекте обеспечена защита от ошибочных действий эксплуатационного персонала на должном уровне;

- отсутствуют минимальные сечения, содержащие дополнительно к исходному событию отказы по общей причине одной группы однотипных элементов; это подтверждает достаточный уровень защиты от зависимых отказов, отказов по общей причине и множественных зависимых ошибок персонала.

Анализ качественных результатов ВАБ на системно-функциональном и элементарном уровнях показывает, что концепция безопасности, принятая в проектах АЭС с реакторами ВВЭР нового поколения, обеспечивает выполнение приведенных выше инженерных (детерминистических) принципов современной концепции глубокоэшелонированной защиты.

Количественная оценка безопасности на основе результатов ВАБ

Для проведения количественной оценки безопасности использованы следующие результаты, полученные при выполнении ВАБ:

- значения суммарных по всем исходным событиям вероятностей или частот повреждения активной зоны;

- вклады в значение вероятностных показателей безопасности от отдельных исходных событий, отдельных аварийных последовательностей, отдельных функций безопасности и важных для безопасности систем, оборудования и элементов;

- вклады в значение вероятностных показателей безопасности от отказов по общей причине и ошибочных действий персонала;

- результаты анализов неопределенностей, значимости и чувствительности.

Общая количественная оценка уровня безопасности, достигнутого при проектировании, проведена на основе сравнения полученной частоты повреждения активной зоны с целевыми значениями, приведенными в действующих нормативных документах и технических заданиях на разработку проектов АЭС с реакторами ВВЭР нового поколения.

Результаты ВАБ, полученные к настоящему времени, показали, что в проектах АЭС с реакторами ВВЭР нового поколения достигнут более высокий уровень безопасности по сравнению с действующими АЭС, который полностью удовлетворяет жестким требованиям, предъявляемым к будущим АЭС. В частности, для внутренних исходных событий при работе энергоблока на мощности обеспечено снижение частоты повреждения активной зоны примерно на 2 порядка по сравнению с действующими АЭС с реакторами ВВЭР-1000. Такое снижение обеспечено применением новых проектных решений. Следует отметить, что результаты оценок частот повреждения активной зоны по различным энергоблокам получены с применением, в основном, одинаковых исходных данных по показателям надежности оборудования, вероятностям ошибочных действий персонала и частотам исходных событий. Поэтому сравнительный анализ результатов является вполне корректным и отражает, главным образом, принципиальные различия в проектных решениях по структуре, принципам действия и режимам использования систем безопасности.

По результатам анализов вкладов от отказов по общей причине и ошибочных действий персонала проведены оценки эффективности предусмотренных в проекте мер по защите от влияния таких событий и использованных в проекте инженерных принципов безопасности. Анализ вкладчиков в частоту повреждения активной зоны показал, что применение принципа функционального и конструктивного разнообразия в системах безопасности позволяет обеспечить глубокую защиту от отказов по общей причине, а применение пассивных систем и активных систем, не требующих для своего функционирования вмешательства персонала – от ошибочных действий персонала.

ВЫВОДЫ

Результаты ВАБ демонстрируют, что технические решения, заложенные в проект АЭС с реакторами ВВЭР нового поколения, обеспечивают достижение качественно нового по сравнению с действующими АЭС с ВВЭР-1000/320 уровня безопасности, который удовлетворяет требованиям современной концепции глубоководной защиты и установленным в действующей нормативной документации требованиям к целевым значениям вероятностных показателей безопасности. Результаты ВАБ подтверждают, что в проектах АЭС нового поколения обеспечено выполнение основных инженерных принципов концепции глубоководной защиты, включая принципы функционального и конструктивного разнообразия, защиты от отказов по общей причине и от ошибочных действий персонала, физического разделения и обеспечения более высокой надежности выполнения функций безопасности.

Литература

1. Копытов И.И., Алякринский А.Н. Энергоблоки с ВВЭР-1500 – новый этап в развитии ядерной энергетики России // Теплоэнергетика. – 2005. – № 1. – С. 4-8.
2. Ноздрин Г.Н., Воронцов В.В. Технические решения по повышению безопасности в проекте АЭС с ВВЭР-1500/Международная школа по «Ядерной физике, нейтронной физике и ядерной энергетике» (Республика Болгария, Варна, 9-13 сентября 2003 г.).

3. Беркович В.М., Копытов И.И., Швыряев Ю.В. Проектные решения по безопасности для энергоблоков АЭС с реакторами ВВЭР нового поколения – краткое описание энергоблоков АЭС с реакторами ВВЭР нового поколения/Сб. трудов Международной конф. по надежности, безопасности и риску ICRESH-2005 (Мумбай, Индия, декабрь 2005 г.) «Advances in Risk Informed-Technology». – Narosa Publishing House, 2006. – С. 403-409.
4. Беркович В.М., Копытов И.И., Таранов Г.С., Мальцев М.Б. Особенности проекта АЭС нового поколения с реактором ВВЭР-1000 повышенной безопасности//Теплоэнергетика. – 2005. – № 1. – С. 9-15.
5. Беркович В.М., Малышев А.Б., Швыряев Ю.В. Проектные решения по безопасности и экономичности энергоблоков АЭС с реакторами ВВЭР нового поколения//Теплоэнергетика. – 2003. – № 11.
6. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций ОПБ-88/97. ПНАЭ Г-01-011-97. – М.: Госатомнадзор Российской Федерации, 1997.
7. МАГАТЭ. Basic Safety Principles for Nuclear Power Plants. IAEA-Safety Series No. 75-INSAG-3 Rev.1, INSAG-12, Вена, Австрия, 1999 г.
8. АЭС-2006. Техническое задание на разработку базового проекта. – М.: Федеральное агентство по атомной энергии, 2006.
9. Mishra A., Chauhan A. Probabilistic Safety Assessment of KK-NPP. Сборник трудов Международной конференции по надежности, безопасности и риску ICRESH-2005 (Мумбай, Индия декабрь 2005 г.) «Advances in Risk Informed-Technology». – Narosa Publishing House, 2006. – С. 339-345.
10. Швыряев Ю.В., Токмачев Г.В., Байкова Е.В. Результаты ВАБ, пересмотренного для усовершенствованного ВВЭР-1000/VII Международного форума по обмену информации в области анализов безопасности (Forum-7) (Пьештяны, Словакия 28-30 октября 2003 г.).
11. Морозов В.Б., Глуценко А.В. Сравнительные результаты вероятностного анализа безопасности второго уровня для АЭС с реакторами ВВЭР-1000/II Международный семинар «Проблемы снижения риска при использовании атомной энергии» (Москва, 7–9 июня 2004 г.).
12. Основные рекомендации по выполнению вероятностного анализа безопасности атомных станций. РБ-032-04. – М.: Федеральная служба по атомному надзору Российской Федерации, 2004.
13. Требования к составу комплекта и содержанию документов, обосновывающих обеспечение ядерной и радиационной безопасности ядерной установки, пункта хранения, радиационного источника и /или заявленной деятельности (для атомных станций). РД 04-27-2006. – М.: Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору Российской Федерации, 2006.
14. МАГАТЭ. Procedures for Conducting Probabilistic Safety Assessments of Nuclear Power Plants (Level 1). IAEA- Safety Series No. 50-P-4, Вена, Австрия, 1992.
15. МАГАТЭ. Human Reliability Analysis in Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants. IAEA-Safety Series No. 50-P-10, Вена, Австрия, 1995.
16. МАГАТЭ. Treatment of Internal Fires in Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants. IAEA-Safety Series Report No. 10, Вена, Австрия, 1998.
17. МАГАТЭ. Probabilistic Safety Assessments of Nuclear Power Plants for Low Power and Shutdown Modes. IAEA-TECDOC- 1144, Вена, Австрия, 2000.
18. МАГАТЭ. Procedures for Conducting Probabilistic Safety Assessments of Nuclear Power Plants (Level 2). IAEA- Safety Series No. 50-P-8, Вена, Австрия, 1995.
19. Токмачев Г. Вероятностный анализ безопасности для пожаров на АЭС Куданкулам в Индии/Сб. трудов Международной конф. по надежности, безопасности и риску ICRESH-2005 (Мумбай, Индия декабрь 2005 г.) «Advances in Risk Informed-Technology». – Narosa Publishing House, 2006. – С. 375-380.
20. Токмачев Г.В., Токмачев И.Г. Надежность программного обеспечения систем безопасности АЭС//Атомная техника за рубежом. – 2004. – № 12. – С. 3-14.

Поступила в редакцию 23.01.2007

ABSTRACTS OF THE PAPERS

УДК 621.039.546

Example of Application Markovs Process with Incomes at Acceptance of Engineering Decisions Concerning Objects of Nuclear Technologies in Conditions of Uncertainty on an Example of Object «Shelter» Chernobyl NPP\ Yu. V. Volkov, A. V. Sobolev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 7 pages, 3 tables, 1 illustration. – References – 4 titles.

Application of markovs process with incomes for search of optimum strategy of «behavior» in conditions of uncertainty is considered. The technique of construction adequate markov is offered to model of process for objects of nuclear technologies, on an example of object «Shelter» Chernobyl NPP.

УДК 621.039.58

NPP Equipment Life Time Prediction Methods\ O.M. Gulina, N.L. Salnikov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 7 pages, 3 tables, 4 illustrations. – References – 4 titles.

Its shown that problem of NPP equipment life time prediction is based on the estimation of moment the parameter observed or calculated achieves limited level. There are considered some mathematical models for different kinds of degradation processes and information obtained. Some results are presented.

УДК 621.039.58

Method for Processing of Statistical Data on Equipment Reliability During NPP Operation\ S.P. Saakian, V.A. Ostreikovskiy, V.A. Chepurko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 8 pages, 6 illustrations. – References – 3 titles.

The records of failures during NPP operation are one of the highest importance for determination of NPP equipment reliability performance. These records however due to objective and subjective reasons are no more than the homogeneous stream of events, the fact that brings difficulties into the process of calculating the equipment reliability characteristics. The given paper proposes the new methods of data handling for heterogeneous stream of statistical data on equipment failures which gives the possibility of getting more truthful information about NPP equipment and systems reliability performance.

УДК 621.039.58

The Residual Life Time Estimation for the Nonrestorable Elements of the RBMK-1000 PCS Electrical Equipment of the Smolensk NPP's First Power Unit\ S.V. Sokolov, A.V. Antonov, V.A. Chepurko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 6 pages, 2 tables, 3 illustrations. – References – 3 titles.

In the paper the statistical methods of residual life time estimation for nuclear power plants' (NPP) electrical equipment are considered. The mathematical model of the reliability characteristics calculation for the nonrestorable elements is given. The results of the residual life time calculations for elements of the protection control system's electrical equipment are represented in the paper. As a basis for calculation the statistical data about failures of the RBMK-1000 protection control system equipment of the Smolensk NPP's first power unit were used.

УДК 621.039.5

Application of PSA for NPPs with VVER-type Reactors of New Generation under Design\ G.V. Tokmachev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 10 pages. – References – 20 titles.

The paper discusses the use of probabilistic safety assessments (PSA) to support design evaluation for a new generation of advanced nuclear power plants with VVER-type reactors. The concept of the new VVER plants is briefly described. The design solutions to improve safety, which are based on in-depth principles and results of PSAs performed for operating VVER plants, are characterized. The evaluation whether the advanced VVER plant design meets deterministic principles is performed at a qualitative level using the PSA results. The approach to quantitative assessment of safety of the NPPs in design is described that is based on the PSA results.

УДК 621.039.524

Technical and Numerical Substantiation of Procedures Preventing Accident at VVER-1000 Based NPP\ A.N. Shkarovskiy, V.I. Aksenov, A.P. Kolevatykh, N.P. Serdun, A.A. Roslyakov; Editorial board of journal «Izvestia