УДК 621.039.58'

СОСТОЯНИЕ И ПРОБЛЕМЫ ВЕРОЯТНОСТНОГО АНАЛИЗА БЕЗОПАСНОСТИ ДЛЯ АЭС С ВВЭР

Швыряев Ю.В., Морозов В.Б., Барсуков А.Ф., Деревянкин А.А., Токмачев Г.В. (Ин-т «Атомэнергопроект»)

Статус вероятностного анализа безопасности. В соответствии с требованиями основного нормативного документа по безопасности АС в Российской Федерации (ОПБ-88) [1] при проектировании АС следует стремиться к тому, чтобы оцениваемая частота повреждения активной зоны и сверхнормативных выбросов не превышала соответственно $1 \cdot 10^{-5}$ и $1 \cdot 10^{-7}$ на реактор в год. Сверхнормативными считаются выбросы, при которых может потребоваться эвакуация населения на расстоянии от АС, установленном в действующих правилах размещения АС. На практике это соответствует расстоянию от АС до ближайших крупных пунктов с населением в несколько десятков тысяч человек.

Аналогичные требования к частоте повреждения активной зоны содержатся в рекомендациях МАГАТЭ [2] — $1 \cdot 10^{-4}$ и $1 \cdot 10^{-5}$ на реактор в год соответственно для действующих и вновь проектируемых АЭС. В соответствии с этим частота тяжелых аварий с последствиями, требующими принятия быстрых мер за пределами АС, должна быть по крайней мере в 10 раз меньше по сравнению с частотой повреждения активной зоны за счет использования мер по управлению авариями.

Указанные требования ОПБ-88 означают, что в проектах должен выполняться вероятностный анализ безопасности второго уровня с оценками дозовых нагрузок на население на различном расстоянии от АС. По его результатам должна быть оценена суммарная по всем аварийным последовательностям частота повреждения активной зоны и сверхнормативных выбросов и показано, что ее значения меньше приведенных в ОПБ-88. Вероятностный анализ безопасности имеет статус составной части проектов АС, поскольку его наличие в проекте является необходимым условием для лицензирования.

При выполнении конкретного вероятностного анализа безопасности имеются трудности в использовании приведенных в нормативных документах [1, 2] целевых показателей. Это связано с тем, что в них не приведены условия сравнения получаемых результатов вероятностного анализа реальных проектов с целевыми показателями. В частности, неясно, какой смысл имеют целевые показатели — медианные, средние значения или значения определенных уровней доверительных вероятностей. Неясно также, достаточно ли выполнять вероятностный анализ безопасности только для внутренних исходных событий или необходимо учитывать и внешние. Представляется, что для исключения неопределенностей должны быть сделаны соответствующие дополнения, комментарии или разъяснения со стороны Госатомнадзора РФ и МАГАТЭ.

Технология вероятностного анализа безопасности. К настоящему времени в «Атомэнергопроекте» разработана технология, включающая комплексы методик и компьютерных программ на PC AT для выполнения такого анализа первого уровня. По этой технологии разработано руководство, которое содержит несколько разделов.

1. Разработка вероятностных моделей для определения состояний с повреждением активной зоны. В качестве таких моделей используется функционально-системное дерево событий, методология разработки которого аналогична применяемой в западной практике.

2. Анализ надежности систем. Методика анализов надежности основывается на методе дерева отказов и учитывает все важные для надежности особенности систем: структуру, режимы использования, контроль состояния, стратегию технического обслуживания и ремонта. Анализ надежности предусматривает две стадии. На первой стадии выполняется качественный анализ надежности (FMEA) с детальной квалификацией отказов по видам в зависимости от особенностей, присущих отдельным компонентам системы, и разрабатывается дерево отказов системы. На второй стадии по дереву отказов определяется набор минимальных сечений и проводится их количественная оценка, которая основывается на определении для каждого минимального сечения зависящих от времени функций неготовности с их последующим усреднением на рассматриваемых интервалах времени. Методика позволяет детально оценивать различные факторы, влияющие на надежность систем.

3. Моделирование отказов по общей причине. Особенностью методики является неявное отображение событий отказов по общей причине в логической модели и детальное качественное и количественное моделирование различных характеристик отдельных событий.

Неявный метод введения событий отказов по общей причине в логическую модель заключается в анализе базовых минимальных сечений, составленных только из независимых отказов. Если такое сечение содержит отказы двух или более элементов, подверженных воздействию общей причины, то генерируются дополнительные сечения, содержащие отказы по общей причине вместо независимых отказов соответствующих элементов. При этом генерируются и так называемые объемлющие сечения, которые содержат следующее событие: отказ по общей причине элементов базового минимального сечения вместе с другими элементами, входящими в эту группу общей причины. Процедура генерации дополнительных сечений с отказами по общей причине предусматривает их проверку на уникальность и просеивание.

Детальное моделирование отказов по общей причине обеспечивается:

определением вероятностей (интенсивностей) возникновения отказов по общей причине путем раздельного моделирования событий, имеющих различные по происхождению источники. Количественная оценка этих характеристик проводится с помощью моделей базового параметра, биноминальной, греческих букв, α- или β-фактора. Методика предусматривает выделение трех классов групп элементов, подверженных отказам по общей причине. Признаками принадлежности групп элементов к тому или иному классу являются следующие: 1 класс — общность конструкции, 2 класс — общность условий окружающей среды, 3 класс — одинаковые процедуры технического обслуживания и/или проверок;

определением вида и периодичности контроля события отказа по общей причине с учетом вида, периодичности и стратегии контроля отказов отдельных элементов;

определением среднего времени устранения отказа по общей причине с учетом стратегии и среднего времени восстановления отдельных отказавших элементов, их влияния на выполнение системой требуемых функций, регламентных ограничений.

Такое детальное моделирование позволяет как количественно прогнозировать результат воздействия таких отказов на вероятностные показатели безопасности с возможно меньшей неопределенностью, так и гибко реагировать на различные проектные решения, направленные на повышение защищенности оборудования систем безопасности.

4. Моделирование надежности персонала. Методика анализа надежности персонала основывается на методологии дерева ошибок. Рассматриваются три группы ошибок персонала:

ошибки при техническом обслуживании, приводящие к исходным событиям аварий

ошибки при техническом обслуживании, приводящие к неготовности систем безопасности;

ошибки при управлении системами в случае аварий, приводящих к повреждению активной зоны.

Разработка дерева ошибок проводится на основе детальных алгоритмов действий персонала с использованием проектной и эксплуатационной документации и результатов расчетов аварийных процессов.

При количественных оценках дерева ошибок определяются вероятности ошибочных действий персонала с учетом условий их выполнения (располагаемое время для принятия решений, время, необходимое для выполнения действий после принятия решений, уровни стресса и т.п.), которые затем используются для оценки условных вероятностей реализации аварийных последовательностей или вероятностей невыполнения отдельных функций безопасности вследствие ошибочных действий персонала.

5. Количественная оценка аварийных последовательностей. Она основывается на разработке для каждой аварийной последовательности детального (большого) дерева отказов или функционально-структурных диаграмм с последующим моделированием и количественными оценками независимых отказов, отказов по общей причине и ошибочных действий персонала. По результатам такого моделирования и количественных оценок определяются условные вероятности реализации отдельных аварийных последовательностей.

6. Оценка результатов вероятностного анализа безопасности. Она предусматривает

определение суммарных по всем аварийным последовательностям частот повреждения активной зоны и сравнение их значений с целевыми показателями;

определение доминантных вкладчиков в частоту повреждений активной зоны и слабых мест проекта;

анализ значимости и чувствительности;

анализ неопределенности;

оценка проекта и рекомендации по повышению уровня безопасности.

7. Программный комплекс вероятностного анализа безопасности. Программный комплекс VEGA для выполнения такого анализа представляет собой объединение вычислительных модулей, предназначенных для расчета вероятностей аварийных последовательностей методом минимальных сечений, графических редакторов, предназначенных для формирования необходимой исходной информации по дереву отказов и дереву событий, а также базы данных по показателям надежности элементов. Программный комплекс позволяет оценивать вероятности аварийных последовательностей как для независимых отказов элементов, так и с учетом отказов по общей причине и ошибок персонала.

Программный комплекс включает следующие реализованные на PC AT программы

APRA для оценки вероятностей аварийных последовательностей с учетом данных о независимых отказах, отказах по общей причине и ошибках персонала;

VNF для уточняющих расчетов вероятностей аварийных последовательностей с учетом особенностей стратегии технического обслуживания;

ANTES для расчета показателей надежности персонала;

UNAS для анализа неопределенностей результатов вероятностного анализа безопасности первого уровня в зависимости от неопределенностей показателей надежности элементов.

Результаты вероятностного анализа безопасности для АЭС с ВВЭР. К настоящему времени выполнен предварительный анализ для следующих проектов АЭС с ВВЭР-1000:

унифицированный проект с В-320 для Ростовской АЭС, четвертого блока Балаковской АЭС и АЭС «Темелин». Этот же проект с В-320 реализован на действующих блоках Балаковской (блоки 1—3), Запорожской, Хмельницкой, Ровенской АЭС и АЭС «Козлодуй». Он основывается на применении трехканальных активных систем безопасности, выполняющих функции отвода тепла от активной зоны при авариях с потерей и без потери теплоносителя первого контура, железобетонной защитной оболочки;

модернизированный проект с В-320 для пятого и шестого энергоблоков Балаковской АЭС, в котором дополнительно к активным системам безопасности, аналогичным с унифицированным проектом, предусмотрены пассивная система отвода тепла от второго контура и система быстрого ввода бора в теплоноситель. Предусмотрены также системы вывода водорода и фильтров сбрасываемой среды из защитной оболочки;

проект с В-392 для АЭС «Ловиса» (проект АС-91). Он основан на применении четырехканальных активных систем безопасности и двойной защитной оболочки, снабженной системой фильтров;

новый проект АЭС повышенной безопасности с В-392 (проект АС-92). Для выполнения основных функций безопасности в нем предусматриваются взаиморезервирующие многоканальные системы активного и пассивного принципа действия. Приведение реактора в подкритическое состояние и поддержание его в нем выполняется одной из следующих независимых систем: механической системой аварийной защиты со 121 органом СУЗ; жидкостной системой быстрого ввода бора.

Длительный отвод тепла от активной зоны при авариях без потери теплоносителя первого контура может быть обеспечен одной из следующих независимых систем: пассивной системой отвода тепла от парогенераторов; любым из четырех каналов активной системы аварийного расхолаживания по второму контуру. Каждая из этих систем может отводить тепло от парогенераторов в течение неограниченного времени. Поэтому системы аварийного расхолаживания и пассивного отвода тепла в проекте АС-92 резервируют одна другую.

При авариях с потерей теплоносителя запас теплоносителя в активной зоне обеспечивается двумя независимыми системами: пассивной системой аварийного охлаждения с гидроемкостями первой и второй ступеней, которая в состоянии выполнять заданные функции в течение 24 ч после начала аварии, и любым из четырех каналов активной всережимной системы аварийного охлаждения, которая рассчитана на выполнение заданной функции в течение времени, необходимого для приведения блока в безопасное состояние. Применение пассивной системы аварийного охлаждения активной зоны направлено на обеспечение длительного поддержания запаса теплоносителя в активной зоне за счет создания резерва времени (24 ч) для осуществления мер по управлению аварией (например, восстановления работоспособности активной системы аварийного охлаждения в случае ее полного отказа).

Применение взаиморезервирующих пассивных и активных систем безопасности различного принципа действия обеспечивает по сравнению с другими возможными решениями глубокую степень защиты против отказов по общим причинам, поскольку в таких системах либо полностью отсутствуют одинаковые или даже идентичные по конструкции компоненты, либо их число сведено к минимуму. Благодаря таким решениям значительно снижается влияние отказов по общей причине и обеспечивается качественный скачок в повышении надежности выполнения основных функций безопасности.

Применение пассивных систем, а также активной системы аварийного расхолаживания, способной работать в течение длительного времени после начала аварии, исключает необходимость участия персонала в управлении системами безопасности при авариях.

Для повышения готовности активных систем безопасности предусматривается использование их каналов при работе реактора на мощности. Большая часть компонентов

этих каналов (насосы, задвижки, теплообменники и т.д.) находится в таких же состояниях, в которых они должны находиться при работе в режиме аварии. Благодаря такому решению исключаются полные скрытые отказы и снижается влияние отказов по общей причине. Такое решение приводит также к существенному сокращению оборудования и компонентов в системах безопасности и системах нормальной эксплуатации и соответственно к повышению технико-экономических показателей.

Система локализации представляет собой железобетонную защитную оболочку полного давления, снабженную системой удаления водорода, ловушкой для удержания расплавленного ядерного топлива и фильтром сбрасываемой среды из объема защитной оболочки в окружающую среду при запроектных авариях. Концепция безопасности проекта АС-92 основывается на эволюционных принципах, в соответствии с которыми используются отработанные, опробованные и подтвержденные многолетней практикой эксплуатации действующих АЭС решения, а также новые решения, основанные на ясных и достаточно исследованных физических и технологических процессах. Представляется, что такая концепция должна составлять основу для развития ядерной энергетики на ближайшие 15—20 лет.

Вероятностный анализ безопасности в перечисленных проектах выполнен для ограниченного перечня основных групп внутренних исходных событий, включая:

обесточивание АЭС, т.е. потерю внутренних источников нормальной эксплуатации и внешних по отношению к АЭС источников переменного тока на различный период времени: меньше одного часа, до 10, 24, 72 и 720 ч;

длительные нарушения нормального отвода тепла по второму контуру, требующие остановки и расхолаживая блока без обесточивания и разгерметизации трубопроводов второго контура;

разрыв главного парового коллектора;

разрыв паропроводов и трубопроводов питательной воды парогенераторов в неотсекаемой части;

малые, средние и большие течи из первого контура;

течь из первого во второй контур.

Вероятностный анализ безопасности выполнен только для одного эксплуатационного режима — работы АЭС на полной мощности. При выполнении анализа использована в основном общая база данных о надежности компонентов [3], данные [4] и имеющиеся в «Атомэнергопроекте» данные о надежности персонала, данные [5] о параметрах моделей отказов по общей причине, а также предоставленные финскими специалистами данные для некоторых компонентов (дизель-генераторы, клапаны БРУ-А). Оценки частоты повреждения активной зоны для каждой аварийной последовательности выполнены раздельно для независимых отказов; независимых отказов и отказов по общей причине; независимых отказов, отказов по общей причине и ошибочных действий персонала. В вероятностном анализе безопасности АЭС «Ловиса», четвертого блока Балаковской АЭС и проекта АС-92 учтены меры по управлению запроектными авариями.

Вероятностный анализ безопасности выполнялся для достижения следующих основных целей:

оценки вклада в частоту повреждений активной зоны рассматриваемых групп исходных событий;

определения доминантных вкладчиков в частоту повреждений активной зоны (исходных событий, функций, систем и компонентов, отказов по общей причине, ошибочных действий персонала);

разработки мер по повышению безопасности, включая меры по управлению авариями, оптимизацию проектных решений по структуре, техническим средствам и техническому обслуживанию;

оценки и обоснования основных проектных решений по АЭС повышенной

В табл. 1 приведены результаты вероятностного анализа безопасности унифицированного проекта АЭС с В-320 на примере четвертого энергоблока Балаковской АЭС. Суммарная по всем аварийным последовательностям частота повреждения активной зоны для рассмотренного перечня основных внутренних исходных событий составляет $1{,}9\cdot10^{-5}$ и $4{,}2\cdot10^{-4}$ на реактор в год соответственно с учетом и без учета мер по управлению авариями. По результатам анализа в качестве основного выбран вариант, в котором реализуются рекомендуемые меры по управлению запроектными авариями. В качестве таких мер рассмотрены использование режима сброс-подпитка (bleed and feed) и подача воды из системы аварийного снабжения технической водой в баки запаса аварийной системы питательной воды парогенераторов для увеличения времени работы этой системы свыше 10 ч. Введение этих мер по управлению авариями позволяет более чем в 20 раз снизить частоту повреждения активной зоны.

Таблица 1. Распределение вклада доминантных исходных событий в частоту повреждения активной зоны для АЭС с В-320

Название исходного события	Частота исходного события, 1/год	Частота повреждения активной зоны			
		Без учета мер по управлению запроектной аварией		С учетом мер по управлению запроектной аварией	
		абсолютная, 1/год	относительная, %	абсолютная, 1/год	относительная, %
Малая течь первого контура	$3{,}2\cdot10^{-3}$	$3{,}3\cdot10^{-6}$	0,8	$9{,}4\cdot10^{-7}$	5
Течь из первого во второй контур	$1\cdot10^{-3}$	$1{,}1\cdot10^{-6}$	<1	$1{,}1\cdot10^{-6}$	6
Обесточивание:					
до 72 ч	$7\cdot10^{-3}$	$9{,}8\cdot10^{-5}$	23	$1{,}3\cdot10^{-5}$	68
с максимальным расчетным землетрясением	$1\cdot10^{-4}$	$2{,}2\cdot10^{-6}$	<1	$7{,}8\cdot10^{-7}$	4
Нарушение отвода тепла по второму контуру с отказом технологического конденсатора	$3\cdot10^{-2}$	$2{,}9\cdot10^{-4}$	69	$7{,}3\cdot10^{-7}$	4
Разрыв паропроводов второго контура в отсекаемой части	$1\cdot10^{-3}$	$1{,}4\cdot10^{-5}$	3	$4{,}6\cdot10^{-7}$	2
Итого		$4{,}2\cdot10^{-4}$	100	$1{,}9\cdot10^{-5}$	100

Наибольший вклад в частоту повреждения активной зоны (68%) для основного проектного варианта вносят исходные события с длительным обесточиванием, сопровождающиеся отказом всех трех дизель-генераторов. Установлено также, что основной вклад вносят отказы по общей причине.

В табл. 2. приведены результаты анализа по наиболее значимым исходным событиям для АЭС «Ловиса» (проект АС-91) и проекта АС-92, полученные для времени работы систем безопасности после аварии 24 ч. Для проекта АС-91 оценки частоты повреждения активной зоны выполнены с учетом и без учета мер по управлению авариями. В табл. 2. результаты анализа проекта по АС-91 представлены с учетом таких мер, в качестве которых рассматривалось использование режима сброс-подпитка и системы вспомогательных питательных насосов по второму контуру, подключенных к дополнительным дизель-генераторам. Эти меры, как и для проекта АЭС с В-320, выполняет персонал. Введение мер по управлению авариями в проекте АС-91 позволяет более чем в 15 раз снизить частоту повреждения активной зоны. При выполнении оценок частоты повреждения активной зоны для проекта АС-91 предполагалось, что использование разных производителей одинакового по принципу действия и конст-

рукции оборудования (дизель-генераторов, насосов) является достаточной мерой защиты против отказов по общей причине.

Таблица 2. Оценка частоты повреждения активной зоны для проектов АС-91 и АС-92

Проект АЭС	Исходное событие	Частота исходного события, 1/год	Доминантные функции безопасности	Частота повреждения активной зоны 1/год			
				Независимые отказы	Независимые отказы и отказы по общей причине	Независимые отказы, отказы по общей причине и ошибочные действия персонала	%
АС-91	Нарушение нормального отвода тепла по второму контуру, включая разрывы трубопроводов второго контура	$1 \cdot 10^{-1}$	Отвод тепла по второму контуру	$3 \cdot 10^{-9}$	$1{,}6 \cdot 10^{-7}$	$1{,}3 \cdot 10^{-6}$	66
	Большая течь первого контура	$3 \cdot 10^{-3}$	Поддержание запаса теплоносителя в активной зоне	$9{,}3 \cdot 10^{-8}$	$3{,}2 \cdot 10^{-7}$	$3{,}2 \cdot 10^{-7}$	15
	Обесточивание АС	$4{,}4 \cdot 10^{-2}$	Отвод тепла по второму контуру	$3{,}3 \cdot 10^{-9}$	$4{,}3 \cdot 10^{-8}$	$3{,}2 \cdot 10^{-7}$	15
	Итого			$1{,}1 \cdot 10^{-7}$	$5{,}9 \cdot 10^{-7}$	$2{,}1 \cdot 10^{-6}$	100
АС-92	Обесточивание АС	$4{,}4 \cdot 10^{-2}$	Отвод тепла по второму контуру	$1{,}8 \cdot 10^{-10}$	$2{,}3 \cdot 10^{-9}$	$2{,}3 \cdot 10^{-9}$	72
	Течь из первого во второй контур	$1 \cdot 10^{-2}$	Течь аварийного парогенератора и отвод тепла по первому контуру	$1{,}3 \cdot 10^{-10}$	$7{,}9 \cdot 10^{-10}$	$7{,}9 \cdot 10^{-10}$	25
	Итого			$3 \cdot 10^{-10}$	$3{,}2 \cdot 10^{-9}$	$3{,}2 \cdot 10^{-9}$	100

Основной вклад в частоту повреждения активной зоны для проекта АС-91 вносят исходные события с нарушением нормального отвода тепла по второму контуру (66%) и обесточиванием (15%) вследствие отказов по общей причине в системах аварийного отвода тепла по второму контуру и ошибочных действий персонала при осуществлении мер по управлению авариями и исходные события с большой течью вследствие отказов по общей причине в системах аварийного охлаждения активной зоны (15%). При этом ошибочные действия персонала составляют примерно 66%, отказы по общей причине — 28%.

Применение взаиморезервирующих и основанных на разных принципах действия активных и пассивных систем безопасности в проекте АС-92 позволяет более чем в 100 раз снизить частоту повреждения активной зоны по сравнению с проектом АС-91, который основывается на использовании активных систем.

Как видно из табл. 2, частота повреждения активной зоны для проекта АС-92 не зависит от ошибочных действий персонала при управлении аварией, что достигается за счет применения пассивных систем и активных систем, не требующих вмешательства персонала. В то же время результаты анализа показывают, что частота повреждения активной зоны для проекта АС-92 возрастает почти в 100 раз при увеличении времени работы после аварии с 24 до 720 ч. Это объясняется тем, что в этот период при течах из первого контура необходимый запас теплоносителя в реакторе поддерживается с помощью активных систем.

В заключение следует отметить, что выполненный до настоящего времени предварительный вероятностный анализ безопасности первого уровня для АС с ВВЭР-1000 показывает вклад внутренних исходных событий в суммарную для блоков частоту повреждения активной зоны. Для оценки действительного значения этого показателя требуется выполнение полномасштабного вероятностного анализа безопасности.

Проблемы вероятностного анализа безопасности. Для выполнения полномасштабного вероятностного анализа безопасности АЭС с ВВЭР необходимо решить следующие проблемы:

разработать для каждого типа реакторов специфические базы данных о надежности компонентов, параметрах моделей отказов по общей причине и надежности персонала на основе сбора и обработки эксплуатационной информации действующих АЭС;

составить полные перечни внутренних и внешних исходных событий для типовых блоков действующих и проектируемых АЭС;

разработать собственную и/или получить и освоить современную западную технологию, включая технологию для внешних исходных событий (сейсмика, удар самолета, другие внешние воздействия); технологию для моделирования надежности строительных конструкций и систем защитной оболочки для различных условий, в том числе условий при тяжелых авариях; комплексную технологию вероятностного анализа безопасности второго и третьего уровня; технологию для внутренних пожаров и затоплений; технологию анализа надежности пассивных компонентов (трубопроводы, сосуды, теплообменники); технологию анализа надежности АСУ ТП, в том числе анализа надежности программного обеспечения и отказов по общей причине.

Решение большинства проблем находится в начальной стадии, и для более эффективного продвижения в этих областях необходима помощь и поддержка со стороны мирового сообщества. Представляется, что определенную поддержку может оказать МАГАТЭ путем предоставления имеющихся и подготавливаемых материалов и широкого привлечения российских организаций для участия в проводимых МАГАТЭ программах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций при проектировании, сооружении и эксплуатации (ОПБ-88) ПН АЭГ-1-011-89. М: Энергоатомиздат, 1989.
2. Основные принципы безопасности атомных электростанций. Отчет Международной консультативной группы по ядерной безопасности. Сер. по безопасности № 75 INSAG-3. Вена: МАГАТЭ, 1988.
3. IEAE-TEC DOC-508. Survey of Ranges of Component Reliability Date for Use in Probabilistic Safety Assessment, 1989.
4. Swain A., Guttemann H. Handbook of human reliability analisis with emphasis on nuclear power plant applications. NUREG/CR-1278, US. Nuclear Regulator Commission, 1983.
5. Vaurio J. A procedure for parametric common cause failure assessment proposed for IAEA project RER/9/005. Vienna: IAEA, 1990.

Поступила в Редакцию 22.10.92