

ВЕРОЯТНОСТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АВАРИЙНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ ДЛЯ АЭС С ВВЭР-440

Швыряев Ю.В., Деревянкин А.А., Токмачев Г.В. («Атомэнергопроект»)

В 1988 г. МАГАТЭ инициировало программу координированных исследований по вероятностному моделированию путей развития аварий (аварийных последовательностей) на АЭС разных типов. Целью программы является освоение специалистами стран Восточной Европы и Азии применяемой в западных странах технологии вероятностного анализа безопасности АЭС, для чего МАГАТЭ распространяет в этих странах соответствующие методики, вычислительные программы, базы данных и проводит экспертизы анализов. Освоение проводится в процессе выполняемого разными группами специалистов вероятностного моделирования аварии с выбранным исходным событием для АЭС с ВВЭР, PWR или CANDU.

Организации пяти стран (Венгрии, Германии, Польши, ЧСФР и нашей страны) выполняют вероятностный анализ аварии с течью теплоносителя первого контура условным диаметром 25 мм и одновременным обесточиванием АЭС с ВВЭР-440. В качестве базовой станции для проведения работы определена АЭС «Пакш» (Венгрия), которая сооружена по унифицированному проекту АЭС с реактором В-213, аналогичному проектам Ровенской (первые два блока) и Кольской АЭС (3-й, 4-й блоки).

В настоящей статье изложены результаты выполненных институтом «Атомэнергопроект» анализов по программе МАГАТЭ. Основные цели участия в программе состояли в представлении на экспертизу специалистов МАГАТЭ разработанной и приме-

няемой в институте технологии вероятностного анализа безопасности, сравнении ее с зарубежной технологией, обработке объема и содержания вероятностных анализов для отдельных исходных событий, совершенствовании методик и комплекса вычислительных программ по результатам экспертизы МАГАТЭ.

В качестве исходной информации использованы следующие материалы: проект и результаты обследования АЭС «Пакш», эксплуатационная документация и аварийные инструкции АЭС «Пакш» и Кольской АЭС, результаты выполненного НТЦ ЯРБ Госатомнадзора Российской Федерации анализа процессов в реакторной установке; база данных МАГАТЭ по показателям надежности оборудования АЭС с ВВЭР-440.

Работа выполнена на основе разработанного институтом «Атомэнергoproject» комплекса методик и вычислительных программ, который включает методику для разработки обобщенных (в форме функционально-системного дерева событий) и детальных (в форме структурно-функциональных схем и элементного дерева отказов) вероятностных моделей, методики для учета отказов по общей причине и влияния персонала, комплекс вычислительных программ VEGA для количественных расчетов показателей надежности и вероятностных показателей безопасности (вероятностей и/или частот реализации аварийных последствий, связанных с повреждением активной зоны или выбросом радиоактивных продуктов в окружающую среду).

Приведенное ниже описание показывает последовательное применение методики вероятностного анализа безопасности к разработке вероятностных моделей и оценке вероятностных показателей безопасности для отдельного исходного события.

Вероятностное моделирование аварий. Оно в соответствии с разработанной методикой включает следующие этапы:

- характеристику исходного события;

- определение функций безопасности, выполнение которых необходимо для приведения АЭС в безопасное состояние, а также набора и структуры систем, влияющих на выполнение функций безопасности;

- формулировку критериев выполнения отдельных функций;

- разработку функционального дерева событий для определения множества состояний или аварийных последовательностей с повреждением активной зоны;

- анализ причин реализации и отбор аварийных последовательностей для дальнейшего детального анализа (отбираются те, которые представляют собой так называемые функциональные минимальные сечения функционального дерева событий, реализуемые при минимальном по сравнению с другими числе невыполненных функций или отказавших систем (элементов);

- разработку для каждой из выбранных аварийных последовательностей детальных вероятностных моделей в форме структурно-функциональных схем и/или элементного дерева отказов. В качестве элементов дерева отказов используются отказы технических средств и ошибочные действия персонала;

- расчет условных вероятностей реализации аварийных последовательностей.

Выбранное для моделирования исходное событие — течь Ду 25 мм с одновременным длительным (на весь послеаварийный период) обесточиванием — является комплексным событием. Оно состоит из двух событий: первичного, представляющего собой течь размером Ду 25 мм из первого контура, и зависящего от него вторичного, заключающегося в потере напряжения переменного тока на шинах систем безопасности от внутренних источников нормальной эксплуатации и внешних по отношению к АЭС источников. Одной из причин такого комплексного исходного события явилось наличие на АЭС «Пакш» (на момент начала работ по программе МАГАТЭ) алгоритма принудительного отключения шин систем безопасности от источников переменного тока нормальной эксплуатации, которое осуществляется по сигналам, характеризующим течь из первого контура.

Выполненные НТЦ ЯРБ Госатомнадзора Российской Федерации теплофизические расчеты протекания аварии показали, что:

исследуемый размер разгерметизации первого контура относится к средним течениям, при которых осушение активной зоны может происходить при давлении, превышающем напор насосов системы аварийного охлаждения активной зоны (САОЗ) низкого давления, а выносимая с истекающим теплоносителем энергия больше генерируемой в активной зоне за счет остаточного тепловыделения;

эффективность одного канала САОЗ высокого давления достаточна для поддержания запаса теплоносителя первого и расхолаживания первого и второго контуров через течь до низких параметров за 10 ч при остановленном реакторе;

при отказе САОЗ высокого давления такое расхолаживание можно проводить через второй контур (если оно начнется не позднее чем через 5 ч после возникновения исходного события, то позволит предотвратить повреждение активной зоны).

Результаты теплофизических расчетов использованы для определения набора функций безопасности, выполнение которых требуется для приведения АЭС в безопасное состояние, и критериев их выполнения (см. таблицу), а также выявления функциональных зависимостей и построения вероятностной модели в форме функционального дерева событий. Последнее представляет собой логическую диаграмму, устанавливающую множество конечных состояний АЭС и условия их реализации при аварии в зависимости от промежуточных событий — выполнения или невыполнения функций безопасности (рис. 1). Графически дерево событий изображается в виде таблицы состояний и собственно логической диаграммы событий в форме разомкнутого графа или дерева. В заголовках колонок таблицы состояний слева направо размещаются название исходного и промежуточных событий и характеристика конечных состояний. Траектории от начала дерева (графа), т.е. от исходного события до конечного состояния, отображают пути развития аварии, или аварийные последовательности. Сплошная линия, исходящая из узла ветвления графа, означает выполнение, штриховая — невыполнение функции.

Для дальнейшего анализа отобраны аварийные последовательности, приводящие к повреждению активной зоны при высоком (тип конечного состояния R1) или низком давлении (тип R2). Аварийные последовательности с отказом системы аварийной защиты являются специфическим классом аварий и требуют специального рассмотрения.

Для каждого конечного состояния на функциональном дереве событий с повреждением активной зоны разработана детальная вероятностная модель в виде структурно-функциональной схемы и/или дерева отказов. Первые применяются для сложных несимметричных структур и поэтому представляют наибольший интерес с методической точки зрения. На рис. 2 показана упрощенная для наглядности структурно-функциональная схема для конечного состояния № 5 функционального дерева событий (см. рис. 1), реализующегося при совместном невыполнении функций безопасности f , p . На структурно-функциональной схеме моделируются межсистемные функциональные зависимости, а также наиболее значимые функции персонала. Дальнейшая детализация модели проведена путем построения дерева отказов и/или ошибок для каждого функционального блока на системном дереве событий.

Проведенный предварительно качественный анализ позволил адекватно учесть особенности структуры систем безопасности, режим их функционирования, стратегию испытаний и технического обслуживания, виды отказов элементов, возможность их устранения и ремонтпригодность, отказы по общей причине и ошибки эксплуатационного персонала.

В результате детального моделирования был получен набор элементарных минимальных сечений, характеризующих соответствующие конечные состояния на функциональном дереве событий. Методика расчета вероятностей реализации минимальных сечений, составленных из независимых отказов, подробно описана в работах [1—3]. Анализ отказов по общей причине базировался на неявном способе их отображения в структурно-логической модели (дереве отказов), на которой в явном виде представлялись только независимые первичные события. В этом случае исходной логической

Критерии и условия выполнения функций безопасности

Название системы	Название функции	Условия выполнения функции	Критерии успешного выполнения функции	Способ управления
Система аварийной защиты реактора (АЗ)	Приведение реактора в подкритическое состояние (<i>a</i>)	Начальный момент аварии. Номинальные значения параметров в реакторной установке	Ввод в активную зону всех, кроме одного, исполнительных органов	Автоматический
Система аварийного охлаждения активной зоны с насосами высокого давления (САОЗ ВД)	Поддержание запаса теплоносителя в активной зоне при высоком давлении (<i>л</i>)	Давление в активной зоне в диапазоне от 12,5 до 0,1 МПа	Подача раствора борной кислоты в активную зону от одного из трех насосов САОЗ ВД	Автоматический
Система аварийного расхолаживания по второму контуру, состоящая из системы аварийной подачи питательной воды в парогенераторы и систем аварийного отвода пара из парогенераторов (САР)	Отвод тепла от реакторной установки через второй контур в режиме поддержания давления в нем Аварийное расхолаживание реакторной установки с заданной скоростью (<i>p</i>)	Мощность реактора на уровне остаточного тепловыделения. Давление пара во втором контуре от 5,7 до 0,36 МПа	Подача питательной воды хотя бы в один парогенератор от одного из двух аварийных питательных или от одного из двух дополнительных аварийных питательных насосов и отвод пара из этого парогенератора через один из четырех клапанов БРУ со сбросом пара в атмосферу или технологический конденсатор	Автоматически в режиме поддержания давления во втором контуре Оператором в режиме расхолаживания
Система гидроаккумуляторов (ГА)	Поддержание запаса теплоносителя в активной зоне при снижении давления в первом контуре ниже 6 МПа (<i>g1</i>)	Давление в первом контуре ниже 6 МПа	Подача раствора борной кислоты от четырех ГА	Автоматический
Система аварийного охлаждения активной зоны с насосами низкого давления (САОЗ НД)	Поддержание запаса теплоносителя в активной зоне при давлении ниже 0,7 МПа (<i>g2</i>)	Давление в первом контуре ниже 0,7 МПа	Подача теплоносителя в активную зону от одного из трех насосов САОЗ НД	Автоматический

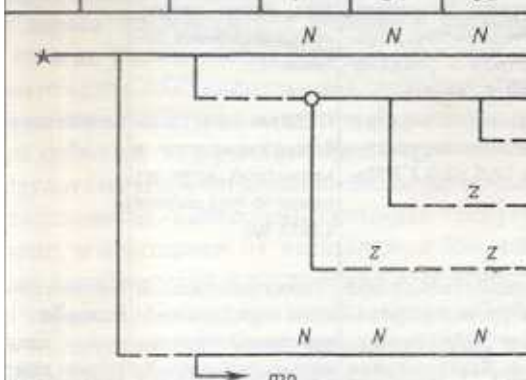
информацией, необходимой для выполнения анализа отказов по общей причине, являются элементные минимальные сечения. Если рассматриваемое сечение содержит независимые отказы двух или более элементов, подверженных воздействию одной или нескольких общих причин, то генерируются дополнительные сечения, для количественного анализа которых используются параметрические модели отказов по общей причине:

В работе проведено раздельное моделирование общих причин, разбитых на три класса. Признаками принадлежности групп элементов к тому или иному классу являются следующие:

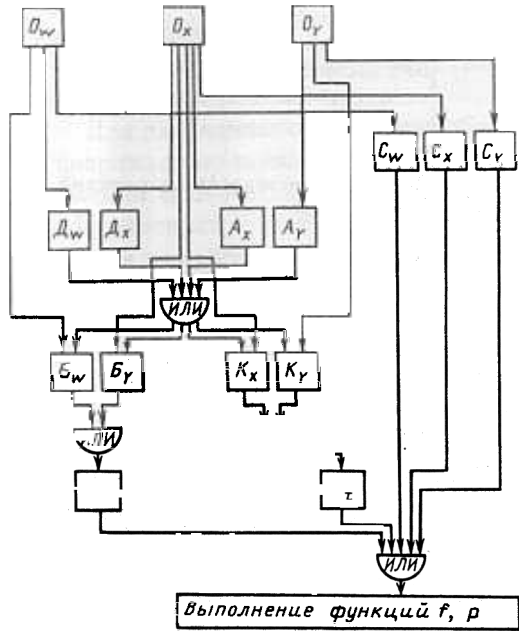
1-й класс — общность конструкции резервируемых элементов;

2-й — размещение резервируемых элементов или элементов разных каналов в одном помещении;

3-й — одинаковые для разных элементов процедуры технического обслуживания и/или проверок, которые проводятся одной группой лиц за небольшой период времени и сопровождаются или могут сопровождаться изменением состояния элемента.

Исходное событие: течь Д., 25	Системы/функции безопасности (см. таблицу)					Характеристика аварийной последовательности		
	АЗ	САОЗ ВД	САР	ГА	САОЗ НД	N	Тип конечного состояния	Булева функция
	α	f	p	g_1	g_2			
						1	S	
						2	S	
						3	R2	fg_2
						4	R1	fg_1
						5	R1	fp
						6	ATWS	α

Р и с. 1. Функциональное дерево событий для аварии со средней течью и обесточиванием энергоблока с ВВЭР-440: S — безопасное состояние; R1, R2 — плавление активной зоны при высоком и низком давлении соответственно; ATWS — отдельный класс аварий без срабатывания аварийной защиты реактора; tr — маловероятная последовательность; N — выполнение функции не требуется; z — зависимое невыполнение функции; о — функция выполняется с участием персонала



Р и с. 2. Структурно-функциональная схема совместного выполнения функций f, p : О — обеспечивающие системы; Д — дополнительная система аварийной питательной воды; А — система аварийной питательной воды; Б, К — система расхолаживания через клапаны БРУ-А и технологические конденсаторы соответственно; С — система аварийного охлаждения активной зоны высокого давления; Φ_0, Φ_1 — функция персонала по управлению клапанами БРУ-А и подготовке к работе технологических конденсаторов соответственно; x, y, w — индекс каналов систем

Параметры отказов по общим причинам для каждого класса оценены на основании зарубежных данных [4, 5] в предположении консервативного подхода.

Действия персонала учитывались в явной и неявной форме на разных уровнях анализа. Моделирование действий персонала включало следующие этапы:

- определение функций персонала, выполнение которых влияет на протекание рассматриваемой аварии (рассматривались две группы ошибочных действий персонала, совершаемых как в процессе нормальной эксплуатации, так и при аварии);
- определение места событий, связанных с невыполнением выделенных функций персонала в разработанных структурно-логических моделях (функциональном дереве событий, структурно-функциональной схеме и дереве отказов);

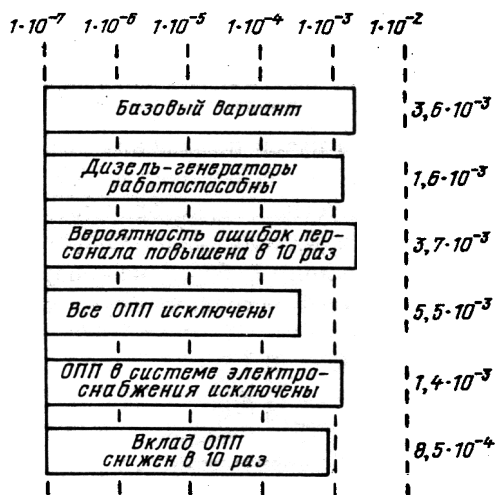
выбор итоговых показателей надежности выполнения функций персонала, необходимых для последующего количественного анализа вероятностей реализации аварийных последовательностей;

подготовка исходных данных для проведения анализа надежности персонала, для чего были использованы рекомендации [6] и данные, полученные на тренажере Нововоронежской АЭС;

анализ алгоритмов (инструкций) выполнения рассматриваемых функций персонала с учетом особенностей его деятельности;

разработка структурно-логических моделей надежности выполнения рассматриваемых функций персонала в форме дерева ошибок и анализ исходов (конечных состояний) на этом дереве. Дерево ошибок представляет собой разновидность дерева событий, которое дополнительно учитывает логико-временную последовательность операций при выполнении функций персонала. Событиями на дереве ошибок являются ошибочные действия или успешное выполнение операций. Диаграмма определяет множество исходов (последствий) при выполнении функций персонала в зависимости от правильной или ошибочной реализации отдельных операций.

Результаты анализа. Количественный анализ аварийных последовательностей при рассматриваемом исходном событии выполнен с помощью разработанного в институте «Атомэнергопроект» программного комплекса VEGA. Учитывая неопределенность некоторых исходных данных, а также в целях анализа чувствительности в настоящей работе варьировались вероятность ошибочных действий персонала и параметры моделей отказов по общей причине. На рис. 3 приведены некоторые результаты анализа чувствительности для представленной на рис. 2 аварийной последовательности, связанной с совместным невыполнением функций безопасности f , p .



Р и с. 3. Результаты анализа чувствительности оценки условной вероятности реализации аварийной последовательности f , p на АЭС «Пакш»: ООП — отказы по общей причине

Основные выводы, полученные в процессе настоящего исследования, следующие:

режим аварийного расхолаживания энергоблока через клапаны БРУ-А, который оказывает заметное влияние на повышение безопасности, является в настоящее время непроектным поэтому необходимо внести соответствующие изменения в инструкцию по ликвидации аварии на АЭС «Пакш»;

основной вклад в вероятность плавления активной зоны вносят отказы обеспечивающих систем безопасности и в первую очередь системы аварийного электроснабжения (это доказывает целесообразность исключения алгоритма искусственного обесточивания секций систем безопасности при аварии на энергоблоке);

отказы оборудования по общей причине по сравнению с независимыми оказывают доминирующее влияние на вероятность повреждения активной зоны. Причем конечный результат чувствителен к параметрам моделей отказов по общей причине. Поэтому их выбор должен быть предельно тщательным для снижения неопределенности результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клемин А.И., Швыряев Ю.В., Морозов В.Б., Барсуков А.Ф. Количественный анализ надежности систем безопасности атомных станций при проектировании. — Известия АН СССР, Энергетика и транспорт, 1986, № 1, с. 28—36.
2. Швыряев Ю.В., Барсуков А.Ф., Деревянкин А.А. Обеспечение надежности наиболее ответственных систем АЭС. — Электрические станции, 1982, № 1, с. 4—8.
3. Швыряев Ю.В., Барсуков А.Ф., Деревянкин А.А. Влияние технического обслуживания на надежность систем безопасности атомных станций. — Там же, 1984, № 6, с. 62—64.
4. Fleming K., Mosleh A., Deremer R. A systematic procedure for the incorporation of common cause events into risk and reliability models. — Nucl. Engng Design, 1986, v. 93, p. 245—273.

5. Vaurio J. A procedure for parametric common cause failure assessment proposed for IAEA project RER/9/005. — In: Proc. IAEA Workshop on Methodology and Data Base for VVER-PSA. Rez. CSFR, June 1988.
6. Swain A., Guttman H. Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plants Applications. USA, NUREG/CR-1278, 1982.

Поступила в Редакцию 31.07.91