

возникновения определенных внешних воздействий.

В /77/ исключено предположение о независимости отказов при нелетальных воздействиях, и разработана шокковая модель с произвольными вероятностями отказов. В соответствии с этой моделью для каждого значения параметра p число отказов резервируемых элементов описывается биномиальным распределением, а сам параметр p удовлетворяет β -распределению.

Модификации биномиальной модели очень сложны и ориентированы на определение параметров с учетом экспертных оценок, что вносит значительный элемент субъективизма и требует разработки принципов таких оценок.

Анализ методов моделирования отказов по общей причине показывает, что существует ряд задач, требующих решения, а именно:

1. С целью уменьшения неопределенности результатов ВАБ необходимо разработать детальные вероятностные модели отказов по общей причине, которые, с одной стороны, позволяли бы моделировать различные по характеру классы общих причин и эффективность предусмотренных защитных средств, а с другой стороны обеспечивали бы достаточно простую оценку параметров;

2. Необходимо разработать оптимальный алгоритм введения детальных моделей отказов по общей причине в логическую модель надежности системы с целью сокращения ее размеров и адекватной оценки необходимых характеристик таких отказов. Алгоритм должен быть реализован в программном комплексе, обеспечивающем расчет вероятности реализации путей развития аварии.

1.2. Базы данных по отказам по общей причине.

Результаты зарубежных исследований показали, что основным источником неопределенностей при моделировании отказов по общей причине является сбор и обработка исходных данных /6/. Эти неопределенности связаны с редкостью таких событий, трудностью их классификации, несовершенством системы сбора информации, а также с тем, что отказы по общей причине являются проявлением всей совокупности свойств конкретной АС. Поэтому они находятся в сильной зависимости от конкретных особенностей проекта, условий изготовления, монтажа и эксплуатации оборудования. Следовательно, применение данных других объектов, например, зарубежных АС, практически делают проблематичным использование результатов анализа и соответствующих выводов.

Рассмотрим потенциальные источники информации по отечественным АС. Базы данных по АЭС СССР (ССОИН, эксплуатируемая во ВНИИАЭС /78/ и по АЭС стран Восточной Европы (ИСКО АС, эксплуатируемая в МХО "Интератомэнерго" /79/) изначально были ориентированы на сбор данных по отказам оборудования нормальной эксплуатации. Сбор достоверной информации по системам безопасности в них пока не налажен, а отказы по общей причине не выявляются вообще.

Информационная система по нарушениям в работе АС /80/, эксплуатируемая во ВНИИАЭС с 1983 года и с 1989 года в НТЦ БАЭ ГПАН, содержит события множественных отказов систем безопасности с достаточно подробным их описанием. К недостаткам системы следует отнести отсутствие программ поиска событий множественных отказов, недостоверную информацию по единичным отказам, а также, как показывает практика, то, что пока не все события с зависимыми отказами попадают в информационную систему или недостаточно четко идентифицируются.

Отсутствие целенаправленного сбора и обработки информации по отказам по общей причине порождает стремление использовать в отечественной практике непосредственно зарубежные оценки параметров или их пересчет /81/, что может привести к ошибочным результатам по ряду причин:

1) из-за различий в схемных, конструктивных и компоновочных решениях отечественных и зарубежных АЭС;

2) из-за учета в зарубежных оценках параметров отказов, вызванных общими элементами (общими обеспечивающими или управляющими системами) для нескольких рассматриваемых единиц оборудования;

3) из-за неизвестного подхода к классификации зависимых событий, в т. ч. к обработке неклассифицированных зависимостей;

4) из-за неизвестной кратности резервирования систем, по которым получены оценки (для некоторых моделей);

5) из-за различий в стратегиях проверки работоспособности резервируемых элементов;

6) из-за проблем, существующих у зарубежных исследователей с полнотой информации по независимым отказам и точному объему наблюдений;

7) из-за различий в эксплуатационных процедурах и условиях эксплуатации на различных АЭС;

8) из-за нечеткости определения границ рассматриваемого оборудования;

9) из-за неопределенности способа учета корреляции между отказами по общей причине и исходным событием аварии.

Кроме того, зачастую не определена статистическая неопределенность, связанная с объемом выборки, и закон априорного распределения.

Таким образом, проблема получения оценок параметров моделей отказов по общим причинам для отечественных АС является актуальной

задачей, пути решения которой представляются следующими:

1. При проведении ВАБ действующей АС наиболее приемлемым источником данных является эксплуатационная документация этой АС;
2. При проведении ВАБ проектируемой АС исходные данные должны собираться на действующих АС этого типа. Использование данных должно осуществляться после тщательной проверки допустимости их переноса с объекта на объект;
3. При обработке данных должны учитываться изменения, внесенные в конструкцию АС в процессе ее эксплуатации.

1.3. Определение цели и постановка задачи исследования.

Из проведенного выше анализа современного состояния существующих методов исследования зависимых отказов при проведении ВАБ атомных станций и результатов их применения можно сделать следующие выводы:

1. Неучет каких-либо видов зависимых отказов, например, отказов по общей причине, приводит к нереалистичной оценке уровня безопасности АС;
2. Моделирование зависимостей между функциями безопасности осуществляется с помощью функционально-системных деревьев событий. Методика моделирования достаточно отработана и похода в разных странах;
3. Зависимости, вызванные функциональными причинами, моделируются непосредственно на логических диаграммах надежности систем. При этом существуют проблемы, связанные с большими размерами этих диаграмм и с моделированием каскадных отказов;
4. Для определения вероятностей возникновения отказа по общей причине разработан ряд параметрических моделей, которые применяются для обобщенного моделирования сразу всех общих причин. Это не поз-

воляет учитывать из разнообразную специфику;

5. Недостаточно хорошо исследованы вопросы определения вида контроля и времени восстановления отказов по общей причине;

6. Значительную трудность вызывает процесс включения событий отказов по общей причине в логическую диаграмму (дерево отказов). Явное отображение таких событий приводит к многократному увеличению размеров дерева отказов, а неявное моделирование путем расширения числа исходных минимальных сечений с независимыми отказами связано с проблемой их адекватной оценки;

7. Проблемы с исходными данными по отказам по общей причине и с их моделированием вызывают значительное (до нескольких порядков) расхождение результатов при параллельном решении одних и тех же задач;

8. В СССР отсутствует база данных по отказам по общей причине отечественного оборудования. В то же время, использование зарубежной информации не позволяет получать адекватные оценки уровня безопасности отечественных АС;

9. Анализ зависимых отказов является эффективным средством разработки и обоснования мер защиты против таких событий при проектировании АС.

Исходя из уровня разработанности темы и проблем, существующих при исследовании зависимых отказов в процессе проведения вероятностных анализов безопасности АС, ставится следующая цель настоящей работы:

-разработать метод анализа зависимых отказов оборудования АС с доведением его до уровня инженерной методики, реализованном в программном комплексе для выполнения ВАБ и обеспеченной необходимой базой данных.

Для достижения сформулированной цели в данной работе ставятся следующие задачи исследования:

1. Разработать методику построения вероятностных моделей безопасности АС с учетом зависимых отказов;

2. Разработать детальные модели отказов по общей причине и методику оценки вероятностей реализации аварийных последовательностей с учетом этих моделей;

3. Разработать алгоритм и программу расчета вероятностных показателей безопасности АС, реализующие вышеуказанные методики;

4. Разработать принципы сбора и обработки информации по отказам по общей причине на отечественных АС и создать базу данных для проведения анализов таких отказов;

5. Провести качественный и количественный анализ зависимых отказов в рамках выполнения вероятностных оценок безопасности нескольких проектируемых АС с ядерным реактором ВВЭР.

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ АНАЛИЗА ЗАВИСИМЫХ ОТКАЗОВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ВАБ.

2.1. Характеристика атомной станции как объекта исследования.

Атомная станция (АС) - это промышленное предприятие для производства энергии в заданных режимах и условиях применения и располагающееся в пределах определенной проектом территории, на которой для осуществления этой цели используется ядерный реактор (реакторы) и комплекс необходимых систем, устройств, оборудования и сооружений с необходимым персоналом /16/.

Специфика АС заключается в том, что она способна причинить значительный ущерб человеку (персоналу АС и населению) и окружающей среде. Источником ущерба являются радиоактивные продукты, производимые и накапливаемые в больших количествах в процессе эксплуатации АС.

На АС с ВВЭР существуют следующие источники радиоактивности /19/:

- 1) реакторная установка;
- 2) хранилище отработанного ядерного топлива;
- 3) системы перегрузки и транспортировки ядерного топлива внутри АС;
- 4) хранилище радиоактивных отходов.

Первый из перечисленных источников характеризуется наибольшим количеством запасенной радиоактивности, высокими теплофизическими параметрами и наличием цепной реакции деления. Поэтому он является наиболее опасным, и его исследованию должно уделяться первостепенно внимание.

Одним из основных свойств АС, определяющим возможность ее при-

менения в общественном производстве, является безопасностью.

Безопасность АС - свойство АС при нормальной эксплуатации и в случае аварий ограничивать радиационное воздействие на персонал, население и окружающую среду установленными пределами /16/.

Количественно степень радиационного воздействия АС на человека и окружающую среду характеризуется значениями радиационных показателей, в качестве которых используются следующие:

- величины радиоактивных выбросов - количество выбрасываемых в окружающую среду радионуклидов;

- создаваемые за счет выбросов концентрации радионуклидов в окружающей среде (в атмосфере, водоемах, на почве), мощности доз и дозы облучения.

Превышение предельно допустимых значений радиационных показателей, установленных в Нормативных документах /82/, возможно только в случае аварий на АС, имеющих случайный характер. Вероятности реализации аварийных состояний, для которых значения радиационных показателей превышают установленные нормы, представляют собой вероятностные показатели безопасности. Совокупность радиационных и вероятностных показателей, определенная для всего множества возможных состояний АС, является вероятностным распределением размеров радиационных последствий эксплуатации АС /83/. Это распределение можно рассматривать достаточно полной количественной характеристикой уровня безопасности АС.

В качестве эксплуатационных состояний АС, которые рассматриваются при определении показателей безопасности, должны различаться следующие:

- 1) работа на мощности (полной или частичной);
- 2) плановые периоды технического обслуживания (перегрузка ядерного топлива, замена, ремонт основного оборудования реакторной установки и других систем).

Эти эксплуатационные состояния отличаются как состоянием источника радиоактивности, так и систем АС, предназначенных для обеспечения безопасности. Поэтому они должны анализироваться отдельно. При этом следует отметить, что работа реакторной установки на мощности, включая ее пуск и останов, является наиболее опасным режимом вследствие динамизма протекающих процессов и запасенной в реакторе значительной потенциальной энергии.

В отечественной практике нормативно установлены целевые значения для вероятностей аварий с повреждением активной зоны реактора и вероятностей аварий с превышением установленных пределов по нормативным выбросам в окружающую среду. В соответствии с основным нормативным документом ОПБ-88 /16/ суммарные по всему множеству возможных состояний АС значения вероятности повреждения активной зоны для проектируемых энергоблоков не должны превышать 1×10^{-5} на реактор в год, а вероятности превышения предельного аварийного радиоактивного выброса - 1×10^{-7} на реактор в год. Указанные вероятностные показатели безопасности являются общепринятыми в мировой практике, хотя МАГАТЭ рекомендует в качестве ориентиров несколько более мягкие критериальные значения /15/.

АС представляет собой сложную человеко-машинную систему, характеризующуюся различными детерминированными и случайными связями составляющих ее элементов и большим числом возможных состояний. Каждое состояние может возникнуть вследствие реализации определенной совокупности случайных событий. Такими событиями могут быть работоспособные или отказовые состояния различных элементов АС, правильные или ошибочные действия персонала. Значения вероятностей тех или иных состояний, влияющих на безопасность АС, определяются показателями надежности оборудования (в первую очередь, систем безопасности) АС, режимами его использования, стратегиями технического обслуживания, а также различными зависимостями между оборудованием

и системами АС.

Зависимость между объектами может быть вызвана функциональными причинами, имеющими детерминистическую природу, или возникновением случайных событий, имеющих стохастический характер и являющихся следствием человеческих ошибок при проектировании, сооружении и эксплуатации объектов или следствием неблагоприятных воздействий окружающей среды.

Функциональными причинами отказа или неготовности являются отказы других объектов. В качестве объектов могут рассматриваться как отдельные элементы, так и целые системы безопасности или их каналы. Для устранения неготовности, вызванной функциональными причинами, необходимо устранить отказ объекта, ее вызвавшего. Примером неготовности вследствие функциональной зависимости является отказ одного канала технологических систем безопасности из-за незапуска соответствующего дизель-генератора при обесточивании. Для устранения отказов, вызванных функциональными причинами (т.е. каскадных отказов), требуется устранение отказов как минимум двух элементов: элемента, вызвавшего каскадный отказ, и элемента(тов), отказавшего (ших) вследствие возникновения этой функциональной причины. Примером каскадного отказа является отказ центробежного насоса из-за работы на закрытую задвижку вследствие неоткрытия арматуры на его напоре. Еще одним видом каскадных отказов являются зависимые от исходного события аварии отказы.

Особый класс зависимых отказов вызывается проектно-конструкторскими ошибками. Они могут оказывать определяющее влияние на безопасность. Причинами таких зависимостей могут быть следующие /19/:

1. Неполнота проектных анализов, следствием чего является наличие невыявленных значимых функциональных зависимостей, нарушающих проектные требования.

Так, например, во время ППР 5-го блока НВ АЭС был выявлен пе-

регрев электродвигателей насосов ряда систем безопасности при возникновении условий аварии "большая течь" /84/. Причиной этого было неверно выбранное гидравлическое сопротивление трубопроводов системы технической воды;

2. Проектные ошибки при оценке эффективности выполнения функций безопасности системами и при разработке методов и способов их проверки.

В результате такой ошибки система безопасности может адекватно функционировать при нормальной эксплуатации и во время проверок, но отказывает в аварийных условиях, как это произошло с насосами подачи аварийной питательной воды в парогенераторы на ЮУ АЭС /85/. Реализация проектного алгоритма переключения всаса этих насосов с горячего деаэратора на холодные баки приводила к их разрушению из-за кавитации;

3. Ошибки при разработке алгоритмов управления оборудованием средствами автоматики в аварийной ситуации.

Такая зависимость, например, была обнаружена на Кал АЭС между насосами аварийной подачи питательной воды в парогенераторы, имеющими общий напорный коллектор. При одновременном включении трех насосов происходило их ложное отключение технологическими защитами по фактору повышения давления на напоре /86/;

4. Неадекватное проектирование средств диагностики;

5. Отсутствие или некорректность эксплуатационных инструкций для аварийных режимов, приводящие к осуществлению персоналом неверных алгоритмов управления оборудованием.

Последние два вида проектно-конструкторских ошибок, например, были причиной перерастания эксплуатационного нарушения в известную тяжелую аварию на АС "Тримайл-айленд" (США) /87/.

Большую и разнородную группу зависимостей составляют ошибки, совершенные при реализации проектных решений. Их можно объединить в

следующие группы /19/:

1. Повторяющиеся дефекты изготовления и монтажа оборудования (в первую очередь однотипного), которые невозможно выявить имеющимися средствами в период заводских испытаний и пуско-наладочных работ;

2. Аналогичные дефекты, не выявленные из-за некачественных или проведенных в недостаточном объеме проверок в этот период;

3. Плохая настройка оборудования из-за низкого качества пуско-наладочных работ.

Конструктивные дефекты были причиной ряда множественных отказов резервированного однотипного оборудования клапанов БРУ-А /88-90/ и органов регулирования СУЗ /91-104/ на энергоблоках ВВЭР-1000, автоматов питания 0,4 кВ типа А-37 на 1-м, 2-м блоках РАЭС /105/, быстродействующих задвижек баллонной подсистемы САОР на ЧАЭС /106/, 4 из 6 обратных клапанов системы питательной воды АС "Ловииза" (Финляндия) /107/. Показателен случай массовых отказов выключателей 6 кВ на 4 блоке ЗАЭС при отсутствии таких событий на остальных трех блоках /108/. Причиной этого была неправильная технология термообработки при изготовлении партии рабочих пружин привода выключателей.

Множественные отказы из-за монтажных дефектов наиболее часто проявляются на ВВЭР в ложных срабатываниях системы аварийной защиты. Причинами этого события являются непроектные монтажные перемычки в схемах электроснабжения датчиков /109-112/ или ошибочное подключение трех резервированных датчиков, формирующих сигнал аварийной защиты, к одному отбору /113-115/.

Ошибки при эксплуатации, приводящие к зависимым отказам, можно разбить на две категории /19/:

1) Неадекватное выполнение операций при техническом обслужива-

нии и ремонте (однотипного оборудования, в первую очередь), приводящее к отказу каждой единицы оборудования с некоторой условной вероятностью.

Примерами отказов по таким общим причинам являются:

-неоткрытие 6 из 8 задвижек САОР и неполное открытие остальных двух задвижек на 2 блоке ИАЭС из-за неправильной настройки моментных муфт /116/;

-отказ двух дизель-генераторов (помпаж) из-за несвоевременной очистки систем выхлопа дизелей от нагара на 3 блоке Кол АЭС /117/;

-отказ двух насосов САОЗ низкого давления на 1 блоке Бал АЭС сразу после их некачественного ремонта /118/;

-незапуск дизель-генераторов на Арм АЭС из-за истощения аккумуляторных батарей по вине персонала /119/;

2) Выполнение ошибочных или невыявление правильных оперативных действий в аварийной ситуации или в предшествующий ей период эксплуатации.

Причиной этого могут быть плохая связь (обмен устной и письменной информацией), низкая культура безопасности и квалификация персонала или преднамеренные ошибочные действия вопреки требованиям эксплуатационной документации и показаниям контрольно-измерительной аппаратуры, что может быть спровоцировано низким качеством документации или частыми ложными показаниями приборов. Такие действия были совершены в периоды, предшествующие авариям на АЭС "Тримайл-айленд" (США) /87/ и на 4-м блоке ЧАЭС /120/. На 1 блоке ЮУ АЭС зарегистрирован вывод в ремонт всех трех каналов САОЗ высокого давления при работе реактора на мощности /121/, а на 1-ом блоке ХМАЭС все три канала САОЗ высокого давления были неумышленно выведены из состояния оперативной готовности в течение 16 суток при работе реактора на мощности из-за неудовлетворительной организации работ персонала АС при подготовке к пуску энергоблока /122/.

Неблагоприятные условия окружающей среды, вызывающие множественные отказы, можно разделить на два класса - внутренние и внешние по отношению к АС /19/:

1) К внутренним воздействиям относятся пожары; образование летящих предметов или водяных и парогазовых струй при разрушении сосудов и паропроводов под давлением или вращающихся механизмов; затопление или запаривание помещений, повышение в них температуры; взрывы; химическое, радиационное и вибрационное воздействия.

Повышенная вибрация главных паропроводов, например, привела к отказу двух каналов БРУ-А в открытом положении и задвижки на закрытие перед одним из них на 2 блоке Кал АЭС /123/. Среди причин затопления помещений наиболее часто встречается ложное срабатывание системы пожаротушения /124-129/;

2) К внешним воздействиям относятся землетрясения; экстремальные погодные условия (ветер, температура, гроза, образование шуги в пруде-охладителе и т. п.); падение самолета; разрушение плотины пруда-охладителя или соседних вышерасположенных водохранилищ; взрывы на соседних объектах, в т. ч. соседних энергоблоках; воздействия живых организмов.

Экстремальные внешние воздействия могут привести как к возникновению исходных событий аварии, так и к множественным отказам систем безопасности. Так, штормовая погода привела к обесточиванию 1,2 блоков РАЭС /130/, туман и морозящие осадки - к обесточиванию 3 блока РАЭС /131/, буря - к отключению обоих турбогенераторов 5 блока НВ АЭС /132/, а попадание кошки на шины инициировало обесточивание 2 блока РАЭС /133/. В то же время, например, штормовая погода при низких температурах вызвала ложные открытия и дальнейшее неуправляемое функционирование 4-х клапанов БРУ-А и БРУ-К на 5 блоке НВ АЭС из-за замерзания импульсных трубок /134/; производственные взрывы в районе 1 блока ЮУ АЭС привели к ложному срабатыва-

нию аварийной защиты реактора /135/; а на французских АС отмечена подверженность дизель-генераторов отказам по общей причине из-за быстрого развития микроорганизмов в дизельном топливе /136/.

Таким образом, на АС существуют различные источники зависимых отказов. Благоприятным условием для их возникновения (в первую очередь, отказов по общей причине) является структура систем безопасности АС с ВВЭР. Характерной особенностью систем безопасности является наличие в их составе нескольких (чаще всего трех) резервированных каналов, составленных из идентичных по конструкции элементов. Это обстоятельство способствует появлению ряда из рассмотренных выше источников зависимостей. Причина возникновения этих зависимостей заключается в необходимости проведения одинаковых операций при изготовлении, монтаже, наладке, ремонте и эксплуатации однотипных элементов и поэтому в возможности повторения тех или иных ошибок или дефектов в процессе выполнения этих операций.

Другая особенность систем безопасности заключается в режимах их использования. Большинство систем безопасности эксплуатируется в режиме ожидания при нормальной эксплуатации АС и только после возникновения исходного события аварии начинает выполнять заданные функции. Поэтому отказы систем безопасности в режиме ожидания являются скрытыми, а для их выявления предусматриваются периодические проверки работоспособности (испытания) систем безопасности. Стратегия этих проверок, которая может быть различной, оказывает влияние на процесс выявления и устранения зависимых отказов. По ряду причин во время проверок не всегда удается адекватно смоделировать условия работы систем безопасности при аварии. Поэтому важным аспектом является полнота выявления отказов при проверках.

Для уменьшения влияния зависимых отказов на безопасность АС предусматриваются разнообразные защитные меры, степень и способы реализации которых достаточно сильно отличаются в проектах конкретных

АС. В качестве примера ниже приведена характеристика мер, направленных на защиту от зависимых отказов и реализованных в проекте 5,6 блоков Балаковской АЭС с реактором ВВЭР-1000.

В проекте 5,6 блоков Балаковской АЭС предусмотрены трех- и четырехканальные системы безопасности. Их каналы полностью функционально независимы и разделены. В проекте отсутствуют отдельные каналы систем или элементы, отказ или функционирование которых могло бы привести к совместному отказу нескольких каналов любой технологической, обеспечивающей или управляющей системы безопасности. В структуре систем безопасности предусмотрена сквозная канальность, один канал любой обеспечивающей системы (электрообеспечения, технической воды, вентиляции, сжатого воздуха) или управляющей системы (схемы формирования аварийных сигналов, схемы запуска механизмов и управления ими, защиты и блокировки) связан только с одноименными каналами технологических, обеспечивающих и управляющих систем безопасности, поэтому невозможны комбинации отказов в разноименных каналах любых систем из-за отказа, технического обслуживания, ремонта или испытания в одном канале. Каналы систем безопасности не имеют между собой функциональных связей (трубопроводов, силовых или контрольных кабелей), по которым могли бы передаваться возмущения, приводящие к отказу. Например, короткое замыкание в электрических схемах или гидроудары в трубопроводах. Исключение составляют некоторые системы безопасности, или их части, работа которых не требуется на первых этапах аварии. Это система аварийного газоудаления и линия планового расхолаживания системы аварийного охлаждения активной зоны низкого давления, имеющие последовательно-параллельную структуру.

Системы безопасности в максимальной степени функционально отделены от систем нормальной эксплуатации, в том числе управляющих и обеспечивающих систем. Для повышения степени резервирования элект-

ропитания систем безопасности при аварии может использоваться система нормального электроснабжения от рабочего или резервного трансформатора. Однако, отказы этих систем не влияют на работоспособность системы аварийного электроснабжения от дизель-генераторов.

Полное физическое разделение каналов систем безопасности достигнуто путем их размещения в отдельных помещениях АС.

Помещения с оборудованием различных каналов систем безопасности территориально разнесены друг от друга и/или отделены физическими барьерами, например, огнестойкими стенами помещений.

Для ряда наиболее важных функций и систем безопасности применена разнопринципность, снижающая вероятность отказов по общей причине. Так, предусмотрены аварийная механическая (система аварийной защиты) и жидкостные системы (система быстрого ввода бора, система подачи в первый контур высококонцентрированного раствора бора, системы аварийного охлаждения активной зоны высокого и низкого давления) воздействия на реактивность. Защита второго контура от превышения давления и отвод тепла через 2-й контур в течение одного часа за счет выпаривания воды в парогенераторах может осуществляться путем открытия как клапанов с электроприводом БРУ-А, так и предохранительных клапанов парогенератора, которые имеют различные конструкции и срабатывают от электромагнитов или при полном отсутствии электропитания непосредственно как клапаны прямого действия. Длительный отвод тепла от реакторной установки при высоком давлении обеспечивается системами различного принципа действия: активной системой БРУ-А и АПЭН или системой пассивного отвода тепла (СПОТ). Также и при низком давлении используются системы различного принципа действия - САСЗ низкого давления и СПОТ.

Потребители первой группы надежности постоянного тока получают электропитание от секций 6 кВ через трансформатор 6/0,23 кВ и вы-

выпрямитель или от аккумуляторной батареи, а потребители первой группы надежности переменного тока - от секций постоянного тока через инвертор или от секции 0,4 кВ второй группы надежности.

Также и формирование аварийных сигналов на запуск систем безопасности осуществляется различными схемами по любому из нескольких различных физических параметров. Внедрение разнопринципности в наиболее ответственных схемах АС позволяет обеспечить эффективную защиту от отказов по общей причине.

Важным средством выявления как независимых отказов, так и отказов по общей причине являются периодические проверки работоспособности (испытания) систем безопасности при эксплуатации. В то же время сами эти испытания могут быть источником отказов по общей причине из-за совершаемых при их проведении необнаруживаемых сразу множественных ошибок персонала. Для исключения или снижения вероятностей возникновения таких отказов предусмотрено проведение испытаний различных каналов или проверка их автоматики различными группами эксплуатационного персонала. Моменты проверок и испытаний различных каналов разнесены по времени один относительно другого на время 240 часов.

Некоторые виды отказов по общей причине, вызванные дефектами изготовления и монтажа или ошибками при проектировании, могут не выявляться при периодических испытаниях, а обнаруживать себя только в аварийной ситуации. Такие отказы, как правило, являются неповторяющимися, т. е. их причина устраняется после обнаружения такого вида отказов. Для выявления отказов, вызванных такими общими причинами, предусмотрено проведение пуско-наладочных испытаний в условиях, максимально приближенных к аварийным.

Для защиты от землетрясений предусмотрено сооружение оборудования систем безопасности только в сейсмостойком исполнении. Это оборудование должно выполнять свои функции в условиях максимально-

го расчетного землетрясения.

Защита от пожаров обеспечивается путем сокращения до минимума огнеопасных материалов в помещениях систем безопасности, сооружения огнестойких перегородок на границах этих помещений, причем огнестойкость перегородок выше времени выгорания имеющейся в помещении горючей массы. Кроме того, помещения, в которых размещено оборудование систем безопасности различных каналов, помимо перегородок дистанционированы между собой специальными тамбурами, в которых нет горючего вещества. Для тушения пожаров предусмотрены системы пожаротушения, имеющие канальную структуру. Тем самым исключен выход из строя нескольких каналов систем безопасности при ложном срабатывании одного из каналов системы пожаротушения.

При разрушении оборудования и трубопроводов во время аварии возможно образование летящих предметов или реактивных струй. Значительная часть систем безопасности, каналы которых размещены в отдельных помещениях, не подвержены таким аварийным воздействиям. Отдельные элементы систем безопасности, расположенные в непосредственной близости от высокопотенциальных источников таких воздействий, защищены барьерами, которые препятствуют выходу из строя нескольких каналов по общей причине.

Из приведенной выше характеристики АС как объекта исследования видно, что на АС существуют различные источники зависимых отказов. Для защиты от них предусматриваются разнообразные меры, обладающие определенной эффективностью. Однако, полная нейтрализация источников зависимых отказов невозможна, в силу наличия функциональных связей и идентичных элементов в системах безопасности АС. Разнообразие источников зависимых отказов, степени их проявления в различных структурах и мер защиты против таких отказов придает уникальность каждой конкретной АС. Поэтому для учета специфики указанных аспектов необходима разработка детальных моделей.

2.2. Характеристика вероятностного анализа безопасности как метода исследования.

Вероятностный анализ безопасности (ВАБ) представляет собой системное исследование, проводимое с целью оценки вероятностей и размеров радиационных воздействий на население, окружающую среду и персонал АС для случаев возникновения опасных нарушений в работе АС (аварий) /25/. ВАБ является эффективным инженерным средством при исследовании, оценке и принятии решения в области безопасности АС. Он позволяет выявить основные источники тяжелых аварий, разработать необходимые средства и мероприятия для достижения необходимого уровня безопасности на проектной стадии и поддержания его при эксплуатации АС.

ВАБ может выполняться на различных стадиях жизненного цикла АС. Наиболее эффективно и со сравнительно небольшими затратами результаты ВАБ могут использоваться на этапе проектирования АС, где они могут служить основой для выработки технических решений, направленных на повышение безопасности и внедряемых непосредственно в проект АС /7/.

В зависимости от объема, целей и возможного использования результатов различают несколько уровней вероятностных анализов безопасности /5,19,25/. Анализы надежности отдельных объектов и исследование возникновения нарушений в работе АС, требующих выполнения функций систем безопасности (т.е. исходных событий аварий), составляют содержание ВАБ нулевого уровня (ВАБ-0). Пути развития аварий, приводящие к конечным состояниям с серьезным повреждением активной зоны реактора вследствие отказов защитных систем безопасности и с выходом радиоактивных продуктов в герметичный объем, изучаются в ВАБ первого уровня (ВАБ-1). Поведение выделившихся

из активной зоны радионуклидов, исследование работоспособности защитной оболочки и выхода радиоактивных продуктов за ее пределы вследствие отказов в локализующих системах безопасности анализируются в ВАБ второго уровня (ВАБ-2). Указанные уровни ВАБ исследуют внутренние свойства АС как потенциального источника радиационных воздействий на население и окружающую среду.

В целях окончательной оценки последствий аварий для окружающей АС среды и населения результаты ВАБ второго уровня используются для дальнейшего моделирования распространения радионуклидов в районе расположения АС. Результаты данного исследования (ВАБ третьего уровня), однако, существенным образом зависят от особенностей площадки АС (плотности населения в регионе, метеоусловий и т. п.), а также от плана защиты населения при запроектных авариях, т. е. плана противоаварийных мероприятий. Таким образом, с точки зрения собственно уровня безопасности АС наибольший интерес представляют собой показатели, определяемые при выполнении ВАБ первого и второго уровней /25/.

ВАБ представляет собой итеративный процесс (см. рис. 2.1), который может включать несколько стадий, различающихся между собой по объему содержания и глубине выполняемых анализов /19/. Объем и содержание ВАБ определяют его полноту и, в конечном счете, уровень остаточного риска (т. е. риска, который не подвергся анализу), а глубина ВАБ определяет уровень реалистичности разработанных вероятностных моделей поведения АС при тяжелых авариях. Все это, в свою очередь, оказывает определяющее влияние на достоверность получаемых результатов и эффективность их использования в качестве основы для разработки проектных решений по управлению безопасностью.

Разработка моделей АС для проведения ВАБ требует объединения усилий проектировщиков и конструкторов тепломеханических, электрических и управляющих систем со специалистами по техническому обс-

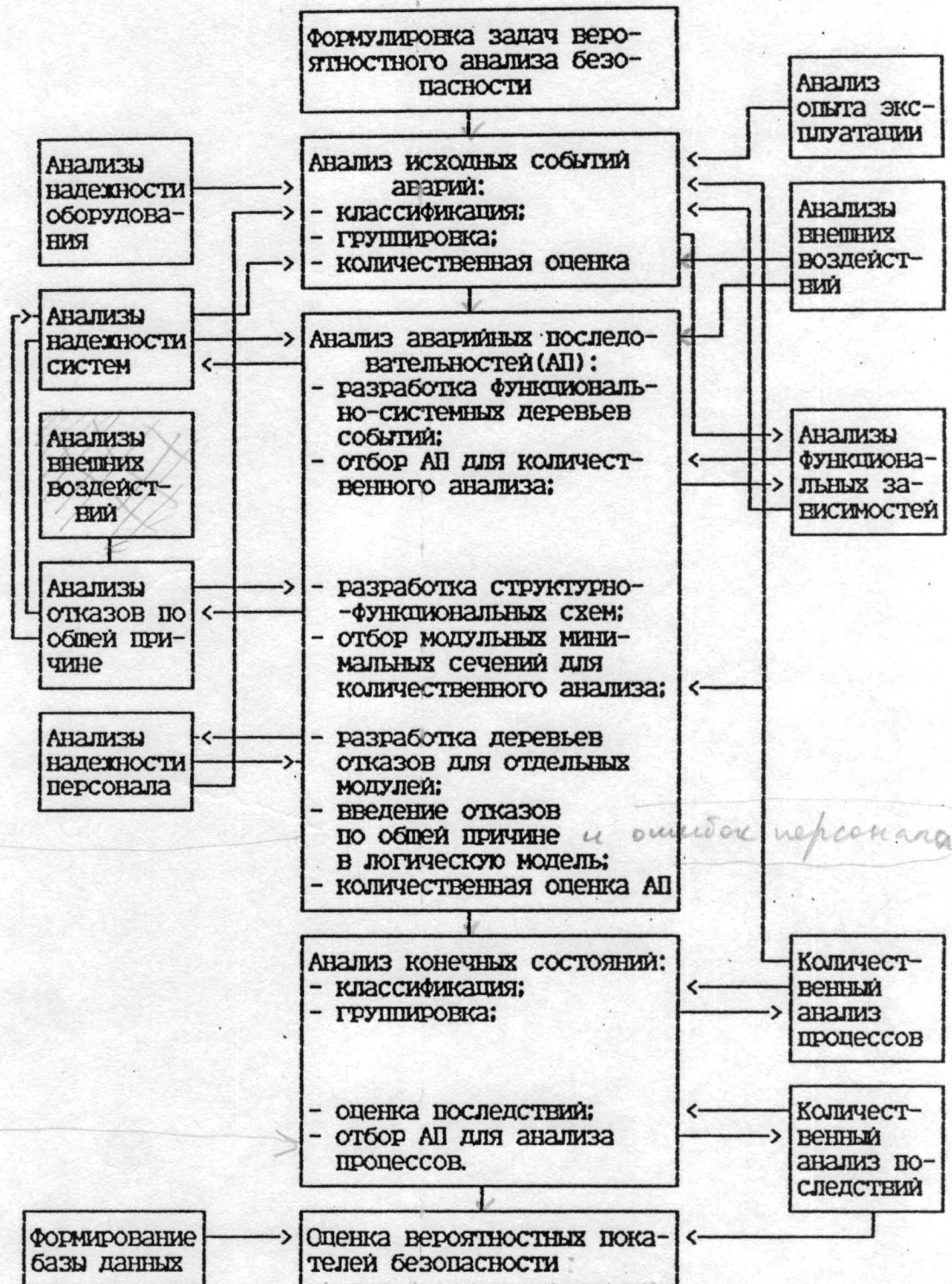


Рис. 2.1. Этапы проведения вероятностного анализа безопасности

луживанию и испытаниям оборудования, пуско-наладочным работам, эксплуатации и надзору. Это позволяет преодолеть основную трудность при анализе современных АС, а именно, невозможность полного понимания АС как целого одним исследователем /137/.

Технология проведения ВАБ основывается на использовании логических диаграмм (деревьев событий, функциональных схем, деревьев отказов, деревьев ошибок) и аналитического аппарата (моделей систем, физических процессов и действий персонала) для исследования и описания эффективности выполнения системами функций безопасности и для анализа реакции АС на различные комбинации исходных событий аварий, граничных условий, отказов оборудования и ошибок персонала. При этом оценивается частота возникновения каждой комбинации (пути развития аварии) и ее последствия.

Исследование зависимостей осуществляется на различных этапах проведения ВАБ, начиная с его ранних стадий. Виды зависимостей и место их моделирования при выполнении ВАБ показаны на рис. 2.2. Настоящая работа ограничена методами моделирования функциональных зависимостей и отказов по общей причине.

2.3. Требования к методике анализа зависимых отказов.

Методика анализа зависимых отказов должна охватывать зависимые события на уровне систем безопасности АС, вызванные отказами других систем и оперативными действиями персонала, а также зависимые события на уровне оборудования, вызванные каскадными отказами и воздействиями общих причин.

Зависимые события на уровне систем безопасности, которые являются функциональными зависимостями, должны моделироваться явно с помощью логических моделей. Эти модели должны удовлетворять следующим требованиям:

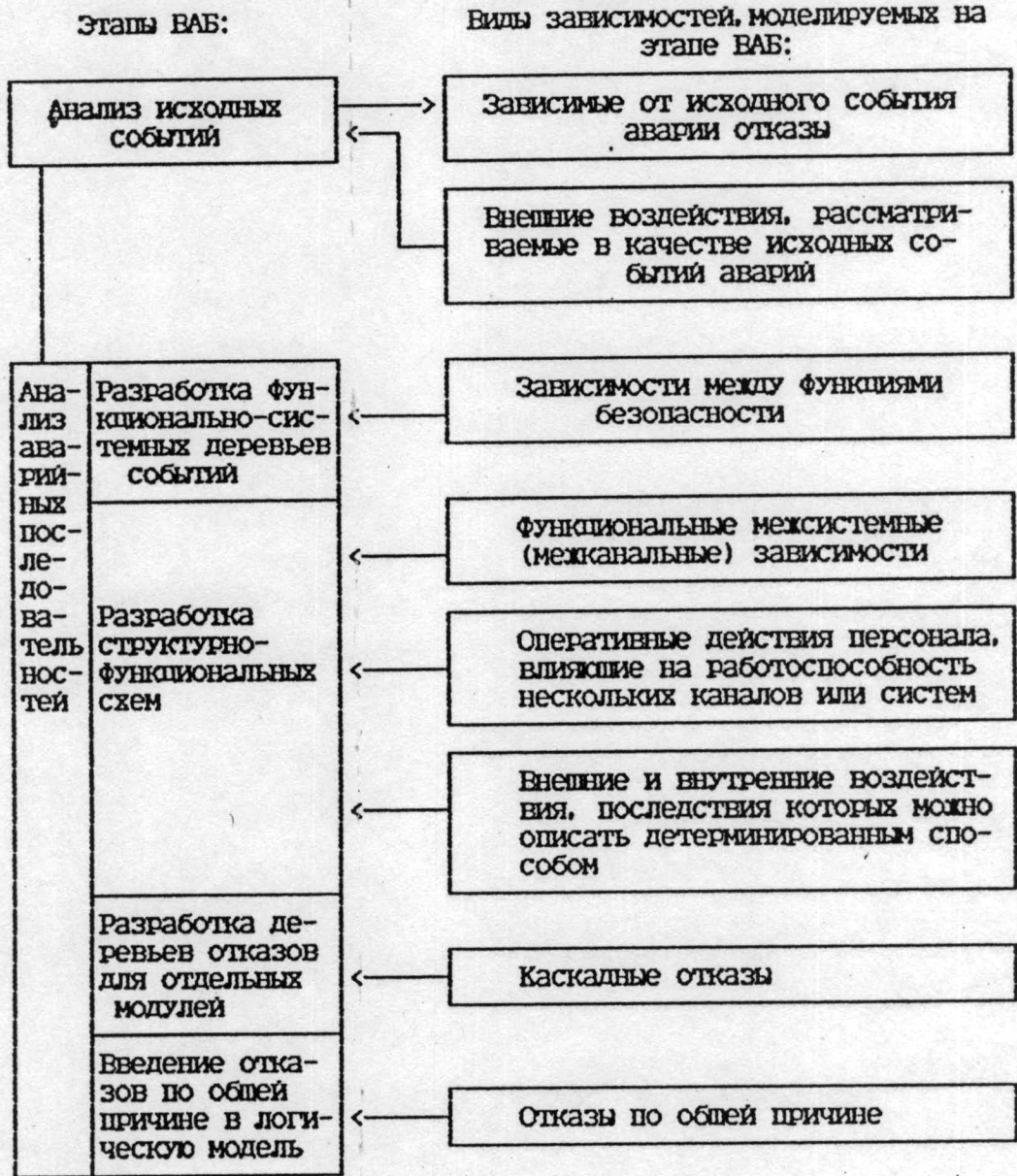


Рис. 2.2. Виды зависимостей, моделируемых на различных этапах проведения вероятностного анализа безопасности АС.

-адекватно отражать все функциональные зависимости при моделировании различных путей развития аварии;

-быть достаточно наглядными для облегчения инженерного анализа путей развития аварии;

-быть компактными, чтобы облегчить возможность их моделирования на персональных ЭВМ без серьезных упрощений.

Методика анализа функциональных зависимостей на уровне систем должна предусматривать принципы выявления таких зависимостей, структуру и порядок построения логической модели, способ ее введения в вероятностную модель безопасности АС, принципы уменьшения объема вычислений до разумного уровня. В поддержку методики должна быть разработана расчетная программа для персональной ЭВМ.

Каскадные отказы также должны моделироваться явно с помощью логических моделей. Эти модели должны адекватно отражать зависимости, приводящие к возникновению каскадных отказов, и все последствия таких событий. Методика разработки модели должна отражать ее вид, способ включения в модель надежности системы и определение значений всех требуемых параметров, характеризующих событие каскадного отказа.

Методика анализа отказов по общей причине должна быть ориентирована на уменьшение неопределенностей результатов их моделирования. С этой целью должны быть разработаны детальные параметрические модели, предназначенные для оценки вероятностей возникновения отказов по общей причине и адекватно отражающие специфические особенности моделируемых объектов. Модели должны учитывать степень защиты объектов от различных общих причин отказов, различия в моментах и периодичности возникновения общих причин, различия в видах контроля отказов по общим причинам. Модели должны быть достаточно просты для облегчения оценки значений их параметров.

Для решения этих задач целесообразно разбиение отказов по об-