

## ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ ОТКАЗОВ ПО ОБЩЕЙ ПРИЧИНЕ В ВЕРОЯТНОСТНОМ АНАЛИЗЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОЕКТОВ НОВЫХ АЭС С ВВЭР-1000

**В.Б. Морозов, Г.В. Токмачев**

*ОАО «Атомэнергoproject», г. Москва*



В статье обсуждаются проблемы моделирования и количественной оценки отказов по общей причине или отказов общего вида (ООВ) при проведении вероятностных анализов безопасности (ВАБ) АЭС повышенной безопасности с реакторами ВВЭР нового поколения. Кратко охарактеризованы причины возникновения ООВ. Рассмотрен подход к учету мер, реализованных в проектах новых АЭС и направленных на уменьшение влияния ООВ. Предложены методические подходы к количественной оценке вероятностей ООВ в стандартных и многоэлементных группах оборудования, подверженного воздействию общих причин, а также случаев с неполным набором признаков общности, характеризующих конструкцию, размещение и режимы работы резервируемого оборудования систем безопасности.

### ВВЕДЕНИЕ

Резервированная система существенно более надежна по сравнению с нерезервированной при условии, что ее каналы отказывают независимо друг от друга. В то же время, если у резервированных элементов могут произойти зависимые отказы, например, из-за общего производственного дефекта, ошибки в конструкции, несовершенства эксплуатационной процедуры, то это приводит к существенному снижению надежности такой системы АЭС. Следует подчеркнуть, что проблема выявления зависимостей между системами и элементами требует внимания на всех стадиях разработки проекта АЭС и, в частности, в выполняемом в его составе вероятностном анализе безопасности (ВАБ), целью которого является оценка вероятностных показателей безопасности, таких как частоты повреждения активной зоны реактора или радиоактивного выброса в окружающую среду. О том, что проблема зависимых отказов (отказов по общей причине) реально существует, говорят многочисленные примеры из опыта эксплуатации АЭС и результаты выполненных ВАБ [1], а также требования отечественных и международных нормативных документов [2,3].

Согласно общепринятому в мире определению, отказы по общей причине, которые в отечественной нормативной документации по ВАБ [2] именуются отказами общего вида (ООВ), – это зависимые отказы группы из нескольких элементов,

происходящие одновременно или в течение короткого промежутка времени (т.е. почти одновременно), вследствие действия одной общей причины. Наличие ООВ существенно снижает возможность повышения надежности системы за счет резервирования. Упомянутый в определении промежуток времени должен быть мал настолько, чтобы события, являющиеся потенциальными составляющими ООВ, могли существовать совместно, т.е. чтобы отказ, наступивший первым, не был устранен к моменту отказа последнего элемента группы.

При выполнении анализа ООВ для резервируемого оборудования новых АЭС с ВВЭР необходимо учитывать ряд особенностей проектов, причем методическая база и исходные данные для рассматриваемых случаев отсутствуют. В частности, элементы систем безопасности (СБ), составляющие резервированную группу, могут находиться в различных эксплуатационных состояниях до возникновения иницирующего события и, в том числе, длительное время уже выполнять ту же функцию, которая требуется в аварийных условиях. В новых проектах АЭС с ВВЭР повышенной безопасности, например, АЭС «Куданкулам» и «Белене», сооружаемых в Индии и Болгарии соответственно, такая конфигурация характерна для резервируемых насосов ряда систем, в которых часть насосов постоянно работают до начала аварии. Другая часть насосов такой резервируемой группы в доаварийный период находится в режиме ожидания и включается в работу по аварийным сигналам.

Следует отметить, что подход к моделированию отказов общего вида для групп однотипных резервированных компонентов, находящихся в различных эксплуатационных состояниях в режиме нормальной эксплуатации, в мировой практике не устоялся.

Другая проблема анализа ООВ состоит в использовании высокорезервируемых систем в новых проектах, например, системы пассивного отвода тепла, состоящей из восьми одинаковых по конструкции теплообменных модулей, т.е. представляющей с точки зрения моделирования ООВ группу большой размерности. Имеются и другие аналогичные группы элементов. Для таких групп отсутствуют обобщенные данные по параметрам применяемых при анализе ООВ моделей. В то же время распространение параметров моделей четырех элементных групп на группы большей размерности, применяемое во многих компьютерных программах и, в частности, в алгоритме наиболее распространенной в мире и аттестованной Ростехнадзором программы Risk Spectrum PSA, приводит к слишком консервативным оценкам.

В статье приводится описание подхода к моделированию ООВ, предлагаемого к использованию при разработке ВАБ проектов новых АЭС с ВВЭР. Подход обобщает существующую в мире практику выполнения подобных анализов для традиционных случаев, отражает многолетний опыт разработки ВАБ для действующих АЭС с реакторами типа ВВЭР и учитывает современные тенденции проектирования новых АЭС, направленные, в том числе, на усиление защиты от отказов общего вида.

### **ПРИЧИНЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ОТКАЗОВ ОБЩЕГО ВИДА**

В основу устоявшейся системы понятий, составляющих принципы моделирования отказов общего вида при разработке ВАБ, положены концепции коренных причин, условий их проявления и факторов общности (т.е. связывающих механизмов, которые обеспечивают распространение действия коренных причин на группу резервированных элементов).

Коренные причины ООВ характерны для всего «жизненного» цикла оборудова-

ния, который включает в себя стадии проектирования, изготовления, монтажа и эксплуатации. Они приводят к появлению скрытых или повторяющихся в процессе эксплуатации дефектов оборудования. Это выражается в снижении функциональных или прочностных характеристик оборудования по сравнению с принятыми в проекте или вызывает его скрытую деградацию. Действие таких причин, как правило, не проявляется в течение длительного времени, но приводит к отказам при возникновении определенных условий.

Примерами таких специальных условий проявления коренных причин являются

- изменение состояния группы элементов, которое сказывается, в том числе, и на изменении параметров нагружения;
- превышение (неэкстремальное) характерных для нормальной эксплуатации значений параметров окружающей среды;
- ухудшение условий сопряжения, т.е. внутренних связей, обеспечивающих работу конструктивных элементов в оборудовании (например, ухудшение свойств смазки, ослабление крепежа в тепломеханическом оборудовании, изменение электрической нагрузки элементов в аппаратуре и т.п.).

В литературе подобные причины часто называются «нелетальными шоками».

К числу коренных причин также относится возникновение экстремальных (превышающих проектные) параметров воздействия окружающей среды, которые приводят к зависимому отказу оборудования («летальные шоки»).

Среди факторов общности наиболее значимым принято считать однотипность, которая характерна для большинства резервированных групп элементов. Строго говоря, под «однотипностью» понимается целый ряд свойств, в разной степени объединяющих элементы с точки зрения влияния общих причин: одинаковые конструктивный тип и принцип действия, общий производитель, одинаковый типоразмер, одинаковое состояние в рассматриваемых режимах работы энергоблока, общие проектные основы (расчетные параметры и внешние нагрузки) и т.д. Первое из перечисленных свойств является основным и рассматривается в качестве необходимого условия. Принято, что применение разных по конструкции и принципу действия элементов позволяет полностью исключить из рассмотрения фактор «однотипности» при анализе ООВ. Другие свойства влияют только на количественную значимость фактора однотипности; при этом максимальное значение вероятности ООВ имеет место для полностью идентичных элементов, включая и одинаковый режим применения.

К числу других факторов общности, помимо однотипности, также относятся компоновочный фактор (расположение элементов в одном помещении или здании) и эксплуатационный (общие процедуры технического обслуживания и проверок). Указанные факторы могут рассматриваться как важные с точки зрения принципиальной возможности ООВ и значения его вероятности, в том числе для элементов, различающихся по конструкции и принципу действия.

Коренные причины, условия их проявления и факторы общности в совокупности образуют механизм, приводящий к возникновению ООВ различных резервированных групп оборудования. Соответственно, меры по уменьшению влияния ООВ на надежность резервированных систем, реализуемые в проектах новых АЭС, могут быть направлены как на исключение самих коренных причин ООВ и (или) ограничение возможности их проявления в процессе эксплуатации, так и на снижение роли факторов общности.

**УЧЕТ МЕР ПО УМЕНЬШЕНИЮ ВЛИЯНИЯ ООВ НА НАДЕЖНОСТЬ СИСТЕМ БЕЗОПАСНОСТИ, РЕАЛИЗОВАННЫХ В ПРОЕКТАХ НОВЫХ АЭС**

Меры, позволяющие добиться заметного снижения возможности проявления коренных причин ООВ, практически связаны исключительно с организацией работы по обеспечению качества в процессе проектирования АЭС, конструирования и монтажа оборудования, а также с внедрением программ по обеспечению качества при эксплуатации АЭС. Программы по обеспечению качества внедрены во всех организациях отрасли, участвующих в разработке проектов и сооружении АЭС. Вместе с тем необходимо отметить, что в условиях отсутствия представительной статистической информации по событиям с ООВ оценить количественно эффективность указанных мер крайне затруднительно. Поэтому при разработке моделей влияния проектных решений на вероятностные характеристики ООВ такие меры пока не учитываются, что является консервативным подходом.

Основной способ уменьшения значимости ООВ в значении вероятностных характеристик безопасности АЭС, который является эффективным на проектной стадии, заключается в применении решений, позволяющих исключить влияние факторов общности или добиться их снижения.

Для количественной оценки эффекта от проектных решений, принятых при разработке новых проектов АЭС и направленных на снижение влияния факторов общности на вероятность возникновения ООВ, может быть применен следующий подход.

1. В качестве групп резервированных элементов, в максимальной степени подверженных действию ООВ, рассматриваются

- идентичные элементы, которые расположены на одной и той же технологической позиции в различных каналах одной и той же системы безопасности, находящиеся в режиме ожидания при нормальной эксплуатации и одинаковым образом изменяющие свое состояние при возникновении ИС;
- резервированные группы, которые состоят из идентичных элементов, расположенных в общем помещении, и относятся к одной системе нормальной эксплуатации.

Для элементов, удовлетворяющих приведенным выше условиям, при разработке ВАБ применяются параметрические модели ООВ, обобщенные данные для которых приведены в литературных источниках [4] и [5].

2. Для групп однотипных резервированных элементов, обладающих меньшим числом факторов общности, применяются модели ООВ с пониженными значениями параметров. В частности, к таким группам относятся идентичные элементы различных каналов одной системы безопасности, находящиеся в разных состояниях (положениях) при нормальной эксплуатации, но в одинаковых состояниях (положениях) после возникновения иницирующего события.

3. Применение разнотипных резервирующих друг друга элементов для выполнения одной и той же функции безопасности позволяет считать их отказы независимыми событиями и не моделировать ООВ.

Обоснование приведенного подхода к моделированию ООВ можно свести к следующим аргументам.

1. Практика зарубежных и отечественных ВАБ показывает, что однотипные элементы, входящие в разные системы, обычно не включают в одну группу ООВ. Это допущение обусловлено несколькими обстоятельствами. Во-первых, в проектах действующих АЭС системы безопасности не дублируют полностью друг друга в функциональном отношении. В этом случае моделирование межсистемных ООВ не

может существенно повлиять на вероятностные показатели безопасности блока. Во-вторых, близкие по типу элементы разных систем (например, насосы, арматура) обычно не являются полностью идентичными, а различаются по мощности привода, весо-габаритным характеристикам, диаметрам присоединений, условиям работы и т.п. Однако для новых проектов АЭС, которые должны соответствовать более высоким требованиям безопасности, применение резервирования на функциональном уровне является одним из способов достижения заданных целевых критериев. Поэтому для достижения высокого уровня надежности и обеспечения защиты от межсистемных ООВ при выполнении основных функций безопасности в проектах новых АЭС реализован принцип разнообразия, т.е. применены системы разного принципа действия (активные и пассивные), которые являются независимыми друг от друга. Примерами таких систем являются пассивные и активные системы отвода остаточных тепловыделений или подачи борированной воды в первый контур. На основании вышесказанного следует, что нет необходимости моделирования межсистемных ООВ для таких проектов.

2. Расположение в одном помещении одинаковых резервированных элементов фактически означает идентичность рабочих условий и внешних нагрузок, а также применение общих для них процедур технического обслуживания. Поэтому, даже если эксплуатационные состояния указанных элементов в каждый момент времени различаются, опасность возникновения ООВ для них остается высокой. В связи с этим следует отметить, что источником обобщенных параметров моделей ООВ, используемых в ВАБ, является эксплуатационная статистика по АЭС США [4], многие из которых построены по старым проектам, где не выдерживались последовательно принципы функционального и физического разделения. Моделирование ООВ для таких групп резервированных элементов производится на основе параметрической модели  $\alpha$ -фактора с применением обобщенных данных, содержащихся в [4] и [5]. Фактор «общего расположения» в условиях решений по компоновке зданий, принятых для новых проектов АЭС, действителен только для систем нормальной эксплуатации.

3. Фактор «общего расположения» не применим к оборудованию систем безопасности разных каналов, которые размещаются в разных, не связанных между собой помещениях. Тем самым исключается возможность возникновения ООВ вследствие немоделируемых явно функциональных зависимостей, а также неблагоприятных условий окружающей среды. Таким образом, обязательными условиями объединения однотипных элементов СБ в группу ООВ со стандартными значениями параметров моделей, представленных в [4] и [5], являются как полная их идентичность (конструкция, принцип действия, типоразмер, привод, изготовитель и т.д.), так и одинаковость режимов применения. Последнее означает, что все элементы СБ, рассматриваемые как кандидаты в указанные выше группы ООВ, должны находиться в режиме ожидания при нормальной эксплуатации, а также одинаковым образом изменять и поддерживать свое рабочее состояние при возникновении иницилирующего события. Для неидентичных элементов СБ ООВ не моделируются, а для одинаковых элементов, находящихся в различных состояниях при нормальной эксплуатации блока, формируется общая группа с уменьшенными значениями параметров моделей. В качестве единственной первопричины ООВ для групп таких элементов могут рассматриваться скрытые летальные проектные ошибки, проявляющиеся в момент начала аварии или после него (в терминах, принятых при анализе ООВ, – летальные или близкие к летальным шоки, которые могут возникнуть при неучете в проекте условий, характерных для аварийного режима). Для частей общей резервированной группы, объединяющей элементы, находящиеся в



одинаковых эксплуатационных состояниях при нормальной работе блока, формируются подгруппы ООВ меньшей размерности с применением к ним стандартных обобщенных данных. В этом случае доминирующим признаком общности остается одинаковое доаварийное состояние резервируемого оборудования. Например, если насосные агрегаты находятся в разных состояниях при нормальной эксплуатации энергоблока (работа или режим ожидания), то существуют следующие факторы, снижающие вероятность возникновения ООВ при запуске/продолжении работы. Во-первых, не требуется срабатывание автоматики и выключателя у постоянно работающего насосного агрегата для продолжения работы по сравнению с оборудованием, включение которого необходимо для выполнения функции. Во-вторых, механизмы отказов и скорость деградационных процессов у подэлементов этих насосных агрегатов, как правило, различны. В частности, для работающих насосов практически исключены механизмы отказов, характерные для режима ожидания, например, связанные с осаждением на внутренних поверхностях насосов боросодержащих или других примесей, а аварийное повышение температуры в их подшипниках из-за низкого качества масла обычно пропорционально длительности работы после запуска.

4. Принимая во внимание сказанное выше, можно также сделать вывод о том, что отсутствует необходимость отдельного моделирования ООВ для подгрупп групп резервированных элементов СБ, состояние которых длительное время оставалось неизменным и, кроме того, не меняется при возникновении аварийного режима. В первую очередь, это относится к тепломеханическим элементам, содержащим постоянно движущиеся или вращающиеся части (насосы, вентиляционные установки, холодильные машины и т.п.), а также к электрооборудованию, постоянно находящемуся под рабочей нагрузкой. Для указанных элементов отказы, в основном, обусловлены деградационными процессами в материалах (износ уплотнений, подшипников, снижение сопротивления изоляции в электрической части и т.п.) и, как правило, проявляются непосредственно в момент их возникновения. При этом следует учитывать, что ООВ нескольких таких элементов может иметь место только в том случае, если период времени между первым и последним отказом не превышает среднего времени восстановления элементов, что для большинства крупного оборудования составляет 24–50 ч, а для отдельного электрооборудования и элементов КИП и А может быть менее восьми часов. Для элементов, безотказно проработавших в течение длительного времени (с наработкой порядка 500 ч и более), подобный механизм реализации ООВ крайне маловероятен в силу естественного разброса скорости деградационных процессов. Этот разброс связан с различиями механических свойств и химического состава материалов изделий и лубрикаторов, а также с отклонениями, присущими любым технологическим процессам обработки. ООВ, вызванные влиянием внешних факторов, для таких подгрупп невозможны из-за полного физического разделения каналов СБ. Подтверждением этого тезиса является эксплуатационная практика энергоблоков АЭС с ВВЭР-1000/320, на которых 3 из 6 насосов технической воды постоянно работают, причем во все время эксплуатации не было выявлено ни одного события ООВ длительно работающих насосов.

## **МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ГРУПП ООВ, МОДЕЛИРУЕМЫХ В СОСТАВЕ ВАБ**

### **Определение значений параметров для стандартных групп ООВ**

Под стандартной группой ООВ здесь и ниже понимается группа одинаковых резервированных элементов, к которой применяются параметрические модели,

содержащие данные известных литературных источников, в соответствии с описанным выше подходом. В качестве источника обобщенных данных был использован отчет NUREG/CR-5497 [4], на основании которого определялись параметры модели  $\alpha$ -фактора, выбранной для оценки вероятности ООВ.

Для получения обобщенных оценок параметров данной модели по каждой стандартной группе ООВ применен следующий подход:

- все стандартные группы событий с ООВ классифицированы в зависимости от их специфических характеристик (наименование системы, размерность группы, тип компонента и вид отказа);
- для каждой группы ООВ первоначальный поиск параметров модели  $\alpha$ -фактора выполнен на основе анализа ее специфических характеристик;
- если указанные данные отсутствовали, то процесс поиска расширился в пределах обобщения функционального и конструкционного типов оборудования для фиксированных вида отказа и размерности группы.

Данный подход можно использовать, когда вид отказа и размерность группы событий с ООВ в модели ВАБ точно соответствуют данным параметрической модели, приведенным в имеющемся источнике информации.

Однако, если тип элемента отсутствует в [4] или его проектные характеристики значительно отличаются от аналога, представленного в данном документе, то используются обобщенные данные из руководства NUREG/CR-5485 [5], которые применимы к любой группе ООВ заданной размерности.

### **Определение значений параметров для групп ООВ большой размерности**

Поиск параметров модели  $\alpha$ -фактора в [4] для групп ООВ, размерность которых больше, чем четыре, часто невозможен в силу того, что информация по указанным группам приведена по небольшой популяции оборудования. Для количественной оценки параметров ООВ указанных групп необходимо использовать данные, отличающиеся максимальной степенью обобщения, например, приведенные в [5].

В программе Risk Spectrum PSA отсутствуют возможности моделирования групп ООВ большой размерности в неявном виде, поэтому при разработке ВАБ был принят подход, в соответствии с которым моделирование этих групп выполняется в явном виде при построении деревьев отказов систем. При этом формируется одно базисное событие с расчетным параметром модели обобщенного  $\beta$ -фактора. Значение  $\beta$ -фактора рассчитывается вручную путем суммирования вероятностей всех минимальных сечений, которые содержат события с ООВ, приводящие к отказу системы, с последующим делением на интенсивность независимых отказов элементов рассматриваемой группы. Для большего удобства при выполнении подобных расчетов параметры таблицы [5] были пересчитаны в параметры универсальной биномиальной модели, которые остаются неизменными для групп любой размерности. Этот выбор обоснован следующими фактами.

В качестве исходных данных для определения параметров биномиальной модели использованы обобщенные данные модели  $\alpha$ -фактора для группы из четырех элементов [4]. Параметры биномиальной модели были рассчитаны с помощью решения системы уравнений, составленных по формулам модели  $\alpha$ -фактора и биномиальной модели для определения вероятностных оценок одинаковых комбинаций отказов. Формулы расчета вероятности различных комбинаций отказов модели  $\alpha$ -фактора и биномиальной модели [5] приведены в табл. 1. Для группы ООВ из четырех элементов число уравнений совпадает с числом параметров бино-

Таблица 1

**Формулы расчета вероятности различных комбинаций отказов модели  $\alpha$ -фактора и биномиальной модели**

Вероятность комбинации отказов	Формула расчета по модели $\alpha$ -фактора	Формула расчета по биномиальной модели
$q_1^4$	$\frac{\alpha_1}{\alpha_t} \cdot q_T$	$q_T + \omega_{нл} \cdot \rho \cdot (1-\rho)^3$
$q_2^4$	$\frac{2}{3} \cdot \frac{\alpha_2}{\alpha_t} \cdot q_T$	$\omega_{нл} \cdot \rho^2 \cdot (1-\rho)^2$
$q_3^4$	$\frac{\alpha_3}{\alpha_t} \cdot q_T$	$\omega_{нл} \cdot \rho^3 \cdot (1-\rho)$
$q_4^4$	$4 \cdot \frac{\alpha_4}{\alpha_t} \cdot q_T$	$\omega_{нл} \cdot \rho^4 + \omega_{л}$
Дополнительная формула	$\alpha_t = \alpha_1 + 2 \cdot \alpha_2 + 3 \cdot \alpha_3 + 4 \cdot \alpha_4$	–

Обозначения:

$q_1^4$  – вероятность независимого отказа элемента;  $q_2^4, q_3^4, q_4^4$  – вероятности ООВ кратностью 2, 3 и 4, соответственно;  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$  – параметры модели  $\alpha$ -фактора для отказов кратности 1, 2, 3 и 4, соответственно;  $q_T$  – полная вероятность отказа одного элемента, учитывающая как независимый отказ, так и отказы общего вида;  $q_T$  – вероятность независимых отказов элемента (в долях от  $q_T$ );  $\rho$  – условная вероятность нелетальных отказов элемента;  $\omega_{нл}$  – частота нелетальных шоков (в долях от  $q_T$ );  $\omega_{л}$  – частота летальных шоков (в долях от  $q_T$ )

миальной модели, что позволяет получить однозначный результат. После получения значений параметров биномиальной модели для данного конкретного случая было выполнено сравнение параметров модели  $\alpha$ -фактора, приведенных в [5], с параметрами этой же модели, полученными обратным пересчетом из биномиальной модели с найденными ранее значениями параметров. Сравнение показывает, что расхождение результатов невелико, причем биномиальная модель более консервативна для полных ООВ (отказов всех элементов группы), которые вносят наибольший вклад в общую вероятность.

Для решения системы уравнений использовались следующие исходные данные для параметров модели  $\alpha$ -фактора и группы отказов из четырех элементов, взятые из руководства по моделированию ООВ [5]:

$$\alpha_1^4 = 0,9500; \alpha_2^4 = 0,0213; \alpha_3^4 = 0,0101; \alpha_4^4 = 0,0186.$$

В результате решения системы уравнений получены относительные значения параметров  $q_L, \omega_{нл}$  и  $\omega_{л}$  в долях от  $q_T$ . Параметры биномиальной модели, пересчитанные из модели  $\alpha$ -фактора для группы из четырех элементов, приведены в табл.2.

Как видно из табл. 2, полученные значения параметров биномиальной модели удовлетворяют основному тождеству этой модели  $q_T + \rho \omega_{нл} + \omega_{л} = 1$  (в долях от  $q_T$ ), что показывает корректность расчетов. В этой же таблице приведены значения параметров универсальной биномиальной модели, дающей наименьшие отклонения от значений обобщенных параметров модели  $\alpha$ -фактора для групп размерностей от четырех до восьми в совокупности. Графики для сравнения оценок вероятностей ООВ различной кратности по моделям  $\alpha$ -фактора и универсальной биномиальной модели для двух случаев (четырёхэлементной и восьмиэлементной групп) представлены на рис. 1 и 2.



Таблица 2

**Параметры биномиальной модели, пересчитанной из четырехэлементной модели  $\alpha$ -фактора, и универсальной биномиальной модели**

Параметр	Значение для четырехкомпонентной модели	Значение в универсальной модели
$q_i$	$8,48 \cdot 10^{-1}$	$8,30 \cdot 10^{-1}$
$\varphi$	0,416	0,47
$\omega_{\text{нл}}$	$2,19 \cdot 10^{-1}$	$2,34 \cdot 10^{-1}$
$\omega_{\text{л}}$	$6,13 \cdot 10^{-2}$	$6,0 \cdot 10^{-2}$

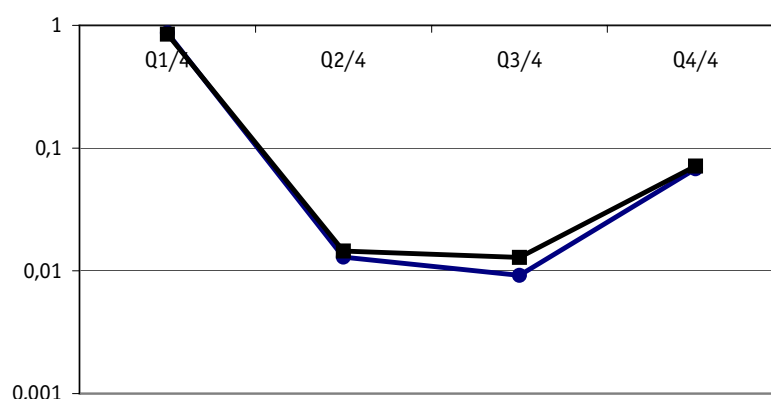


Рис. 1. Сравнение результатов поверочного расчета вероятностей ООВ различной кратности по моделям  $\alpha$ -фактора и биномиальной модели для четырехэлементной группы: ● – модель  $\alpha$ -фактора; ■ – биномиальная модель

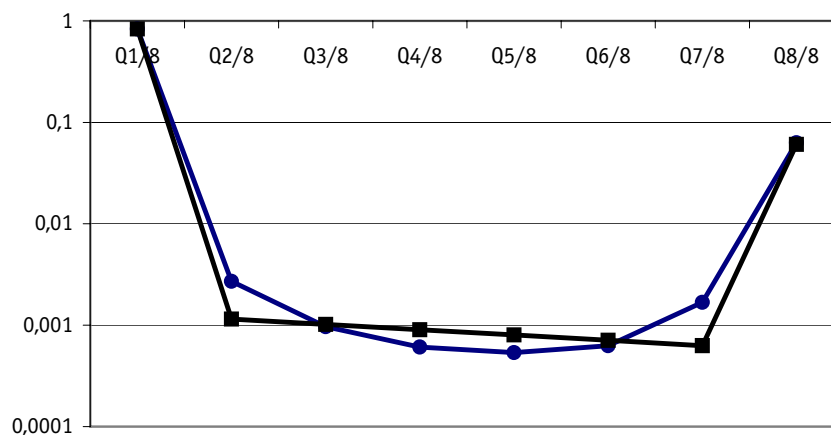


Рис. 2. Сравнение результатов поверочного расчета вероятностей ООВ различной кратности по моделям  $\alpha$ -фактора и биномиальной модели для восьмиэлементной группы: ● – модель  $\alpha$ -фактора; ■ – биномиальная модель

### Определение параметра $\beta$ -фактора для групп ООВ с неполным набором факторов общности

В соответствии с подходом, описанным выше, для указанных групп элементов принимается, что ООВ могут произойти в результате действия летальных либо близких к летальным шоков, связанных с возникновением аварийного режима при

невывявленной серьезной ошибке проекта. Поэтому в качестве исходной информации для оценки значения параметра  $\beta$ -фактора можно воспользоваться значением частоты летальных шоков для универсальной модели, полученным в табл. 2. При этом необходимо отметить, что данное значение отражает частоту летальных шоков для стандартных групп ООВ однотипных элементов, т.е. групп, характеризующихся полным набором факторов общности. Для рассматриваемых групп действие большинства основных факторов общности исключается проектными мерами, а наличие серьезной ошибки в проектах систем АЭС является крайне маловероятным, если вообще возможным событием. Поэтому разумной инженерной оценкой искомого значения параметра будет уменьшенное в 10 раз значение упомянутой выше вероятности летальных шоков из табл. 2, т.е.  $\omega_n = 6,0 \cdot 10^{-3}$ .

С учетом того, что программа Risk Spectrum PSA не позволяет включать один и тот же элемент в разные группы ООВ, моделируемые неявно, принят следующий подход к отображению групп ООВ в логической модели. Для пояснения рассмотрим случай, когда существует большая группа оборудования с неполным набором факторов общности, которая подвержена летальным шокам, и кроме того в рамках этой группы имеется стандартная группа ООВ. Примером такой конфигурации может быть группа насосов, часть из которых постоянно работает до возникновения ИС, а остальные находятся в режиме ожидания. В этом случае глобальный ООВ всей группы, вызванный летальным воздействием, отображение которого на дереве отказов проще, моделируется явно одним базовым событием. С другой стороны, стандартные группы ООВ моделируются неявно с использованием специальных возможностей программы Risk Spectrum PSA. Например, для насосов, находящихся в режиме ожидания и запускающихся по аварийному сигналу, формируются группы ООВ со стандартными параметрами модели для группы этой размерности как для отказа на запуск, так и для отказа при работе. Параметры модели вводятся путем задания значений модели  $\alpha$ -фактора для группы этой размерности из [4] или [5]. Кроме того для всех насосов формируется еще одна глобальная группа ООВ, которая моделирует маловероятные летальные воздействия, распространяющиеся на всю группу и связанные с возникновением аварийных режимов (это может быть как отказ при работе всех насосов, так и отказ на запуск-перезапуск всей группы в случае обесточивания). Для глобальных ООВ, вызванных летальными воздействиями, используется модель бета-фактора с коэффициентом  $\beta = 6,0 \cdot 10^{-3}$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Отказы общего вида часто определяют надежность высокорезервированных систем безопасности АЭС и являются доминантными вкладчиками в частоту повреждения активной зоны реактора. Общепризнанный необходимость и важность их учета при проведении ВАБ. В то же время исключение предпосылок к возникновению ООВ уже на стадии проектирования и строительства АЭС сопряжено с большими трудностями, в том числе и материальными, т.к. приходится дополнять проект АЭС системами, дублирующими друг друга, но основанными на разных физических принципах функционирования. Если использование такого способа невозможно, то в состав АЭС включается аналогичное оборудование, но выпущенное различными производителями, что также приводит к повышению стоимости возводимой АЭС. Отсюда следует, что при проектировании АЭС и выполнении ВАБ важно корректно рассчитать величину вклада ООВ в частоту повреждения активной зоны без ее переоценки или недооценки. Предложенный подход используется при выполнении ВАБ в рамках разработки проектов новых АЭС повышенной безопасности.

### **Литература**

1. Ершов Г.А., Ермакович Ю.Л., Парфентьев М.А., Морозов В.Б., Токмачев Г.В. Моделирование отказов по общей причине при проведении вероятностного анализа безопасности АЭС//Тяжелое машиностроение. – 2008. – №10. – С.2-5.
2. Рекомендации по выполнению вероятностного анализа безопасности атомных станций уровня 1 для внутренних иницирующих событий (при работе блока в режиме выработки электроэнергии во внешнюю сеть). Руководство по безопасности. РБ-024-02. – М.: Госатомнадзор России, 2002.
3. МАГАТЭ. Determining the quality of probabilistic safety assessment (PSA) for applications in nuclear power plants, IAEA-TECDOC-1511. – Вена, Австрия, 2006.
4. Common-Cause Failure Parameter Estimations. NUREG/CR-5497, USNRC, Washington, DC, October 1998.
5. Guidelines on Modeling Common-Cause Failures in Probabilistic Risk Assessment», NUREG/CR-5485, U.S. NRC, Washington, DC, November 1998.

Поступила в редакцию 6.10.2008

## ABSTRACTS OF THE PAPERS

### УДК 621.039.51

*Using ASTEC Code to Model Fission Products and other Elements Releases through Reactor Cooling System during the LWR Severe Accident* \A.A. Bryzgalov, A.A. Natalenko, F. De Rosa, S. Tirini, N. Voukelatou; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2008. – 12 pages, 3 tables, 5 illustrations. – References, 3 titles.

Verification and validation study of ASTEC code on the PHEBUS FPT1 experiment have been performed. The previous investigations showed the deficiency in ASTEC coupled calculations for the aerosols behavior, while CPA stand-alone calculation results have a good agreement with experimental data. Looking for the reasons of wrong prediction of aerosols behavior in the containment was made. The research of fission products and other materials flow rates and evolution of inventory composition that is reaching the containment had been performed with ASTEC V1.3rev2 code. We obtained a rather good prediction for fission products release. There is underestimation of uranium release, but the dominate weaknesses lied in the model of SIC release. The so-called «silver problem» was determined. Silver is very important element from the point of view the significance this element in iodine

### УДК 621.039.58

*The Development of the Methods and Estimation of the Staff Reliability Indications Find on the Statistics of the NPP Incidents at Russia* \Yu.V. Volkov, D.S. Samokchin, A.V. Sobolev, A.N. Shkarovsky; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2008. – 10 pages, 1 table, 5 illustrations. – References, 16 titles.

The paper deals with the techniques for estimation the staff reliability parameters based on the statistical data. Four types of staff errors have been chosen and the techniques to calculate the time-sharing law parameters for the indicated errors are considered. The results of the incident statistics processing for the NPP of the Russia Federation made by two different methods are presented and the analysis on the coincidence of these results is made. The practical results obtained let us affirm that it is Weibull time-sharing law that makes the random time description for the NPP incidents more appropriate and justifiable. The recommendations how to use the drawn conclusions to perform PRA are given.

### УДК 621.039.58

*Optimal NPP Steam Generator Lifetime Management using Stochastic Kalman Filter* \O.M. Gulina, M.N. Pavlova, V.P. Politukov, N.L. Salnikov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2008. – 6 pages, 1 table, 2 illustrations. – References, 6 titles.

The problem of individual prediction of SG HET lifetime is decided by means of stochastic linear Kalman filter. There is suggested the approach to develop optimal algorithm for prediction of ageing process evolution taking into account control data, preventive measures, HET location in tube lattice and also operating information and the number of plugged-off tubes. From this its possible to evaluate the optimal content of the next control and necessary measures for lifetime management. That allows to achieve the maximum of HET lifetime and extremely arise time between preventive works.

### УДК 621.039.58

*Approach to Common Cause Failure Modeling in Probabilistic Safety Assessments for New Designs of NPPs with VVER-1000 Reactors* \V.B. Morozov, G.V. Tokmachev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2008. – 11 pages, 2 tables, 2 illustrations. – References, 5 titles.

The paper discusses problems of modeling and quantification of common cause failures in performing probabilistic safety assessments (PSA) for a new generation of advanced nuclear power plants with VVER-type reactors. The causes of such failures are briefly characterized. The approach to evaluation of defensive measures against common cause failures implemented in the design of new plants is considered. The methodology of common cause failure probability quantification for standard and large redundancy groups of components susceptible to common cause failures as well as for cases

related to reduced sets of common attributes associated with design, location and operation modes of redundant components of safety systems is proposed.

#### УДК 621.039.5

*Automated Breakage Monitoring System of Metal and Binding Steel-Zirconium Fuel Channels RBMK-1000 Nuclear Reactor* \A.I. Trofimov, S.I. Minin, M.G. Kalenishin, A.V. Nakhobov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2008. – 9 pages, 6 illustrations. – References, 1 title.

Automated breakage monitoring system of metal and binding steel-zirconium fuel channels RBMK-1000 nuclear reactor presented uses ultrasonic cylindrical phased array. Working equation allowing to managing cylindrical phased array, monitoring algorithm, and software structure are presented.

#### УДК (504.3+504.4):623.8

*A Comprehensive Radiological and Environmental Investigation of Territories and Water Areas near Nuclear Submarine Operation Bases and Dismantling Sites* \C.M. Vakulovsky, M.V. Propisnova, V.M. Kim, A.I. Nikitin, I.Y. Katrich, V.B. Chumichev, A.A. Volokitin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2008. – 6 pages, 5 tables. – References, 8 titles.

The paper presents information on the system of radiation monitoring in Arkhangelsk, Murmansk, Kamchatka regions and Primorye Territory, where the atomic submarine bases and the sites for their utilization are located. Given also are the generalized results of regular observations of the radiation situation (bulk activity of radioactive substances in the atmospheric boundary layer, their fallout on the underlying surface, tritium contents in precipitation, total activity of  $^{90}\text{Sr}$  in the seas, the gamma radiation exposure dose) in the regions for 2003–2007 in comparison with the data given for the Russian Federation. Besides, given are the data of a radionuclide analysis of the aquatic environment samples (water, bottom sediments, flora and fauna) taken at the Russian station of coastal monitoring (near the settlement of Teriberka) along with the results of annual observations of radionuclide contents in bottom sediments in the water area close to the FSUE PA «Sevmash» in Severodvinsk.

#### УДК 621.039.564

*Justification of Turbine-Neutron Flow Gages usage in a Vessel-Type Boiling Reactor with Natural Coolant Circulation in the Core* \V.P. Sadulin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2008. – 8 pages, 3 illustrations. – References, 7 titles.

The paper presents the calculated and experimental justification of an advanced turbine-neutron flow gage to be used to measure coolant flow rate in fuel assemblies of vessel-type boiling reactor VK-50. A distinctive feature of this flow gage is that a turbine rotation frequency signal is read by a neutron detector of the in-pile heat rate control system. The lifetime of the gage is about 8 months of uninterrupted operation. Calculations of a change of its calibration performance were done at a testing facility under nominal conditions, the temperature of reactor water being raised up to 280°C. A design correction factor for the turbine rotation frequency makes up 1.006–1.01 being in inverse proportion to the water flow rate. The experiment shows that the gage performance remains the same during the above-said period of operation in the reactor.

#### УДК 621.039.51

*Modified Internuclear Cascade-Evaporated Model for Calculation of Interactions between Particles and Nucleus in Intermediate and High Energy Ranges with Matter* \A.Yu. Stankovskiy, A. Yu. Konobeev, I. S. Kuptsov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2008. – 11 pages, 3 illustrations. – References, 33 titles.

The improved intranuclear cascade and evaporation model is discussed. The fast intranuclear cascade stage follows by the de-excitation, which is described using the Hauser-Feshbach statistical model. The model proposed has been validated on radionuclide yields in proton-induced reactions at energies 0.8–1.2 GeV. The results show the advantages of using this approach instead of usual intranuclear cascade and evaporation algorithms.