

Вероятностный анализ безопасности проекта ВВЭР-ТОИ

Е.С. Шишина, В.Б. Морозов, Г.В. Токмачев, Е.В. Байкова, В.Р. Чулухадзе, М.В. Федулов
ОАО «Атомэнергопроект», г. Москва, Россия

Аннотация

Вероятностный анализ безопасности первого уровня (ВАБ-1) разрабатывается для комплексной качественной и количественной оценки уровня безопасности блока АЭС, подтверждения ее соответствия установленным в ОПБ-88/97 и Техническом задании на разработку проекта АЭС «ВВЭР-ТОИ» вероятностным целевым показателям и выявления факторов, вносящих наибольший вклад в количественные показатели безопасности блока проекта «ВВЭР-ТОИ».

В качестве одного из вероятностных показателей безопасности рассматривается значение вероятности повреждения ядерного топлива в активной зоне реактора за год.

ВАБ-1 является инженерным итерационным анализом, при проведении которого выполняется ряд взаимосвязанных задач.

В данном докладе представлено описание основных этапов проведения ВАБ-1 и приведены результаты количественной оценки безопасности блока проекта «ВВЭР-ТОИ»:

- представлены результаты оценки вероятности повреждения активной зоны для всех групп иницирующих событий во всех режимах работы энергоблока и суммарное значение вероятности повреждения активной зоны;
- определены режимы работы энергоблока и иницирующие события, вносящие наибольший вклад в суммарную вероятность повреждения активной зоны;
- оценен вклад в вероятность повреждения активной зоны от отказа отдельных систем безопасности и важных для безопасности систем, оборудования и элементов, а также вклад от отказов общего вида и ошибочных действий персонала.

На основе полученных результатов сделаны выводы о достигнутом уровне безопасности блока проекта «ВВЭР-ТОИ» при проектировании и об эффективности принятых в проекте решений и мер по обеспечению основных инженерных принципов современной концепции глубокоэшелонированной защиты.

Проведено сравнение полученных результатов по вероятности повреждения активной зоны с аналогичными значениями для других АЭС и сделан вывод о том, что для проекта «ВВЭР-ТОИ» обеспечен более высокий уровень безопасности относительно других проектов.

Введение

В рамках проекта «ВВЭР-ТОИ» предусматривается разработка типового оптимизированного информатизированного (ТОИ) проекта двухблочной АЭС технологии ВВЭР, выполненного в современной информационной среде и имеющего повышенные показатели безопасности и экономичности, т.е. относящегося к поколению 3+. Каждый энергетический блок мощностью 1255 МВт включает четырехпетлевую реакторную установку типа В-510 и тихоходную одновальную конденсационную турбину ARABELLE™ производства ООО «АЛЬСТОМ Атомэнергомаш» по лицензии «Alstom». Проект ВВЭР-ТОИ является эволюционным и выполнен с максимальным учетом опыта, который был получен при разработке последних проектов (Нововоронежской АЭС-2, АЭС «Куданкулам», АЭС «Белене»).

Свойства внутренней самозащищенности реактора направлены на самоограничение энерговыделения и самоглушение, ограничение давления и температуры в реакторе, скорости разогрева, масштабов разгерметизации первого контура и темпа истечения, масштабов повреждения ядерного топлива.

В соответствии с концепцией глубоко эшелонированной защиты в проекте АЭС предусмотрены взаимно резервирующие активные и пассивные системы безопасности для выполнения следующих основных функций безопасности:

- аварийной остановки реактора и поддержания его в подкритическом состоянии;
- аварийного отвода тепла от реактора;
- удержания радиоактивных веществ в установленных границах.

Структура, компоновка и принципы функционирования систем безопасности разработаны на основе принципов резервирования, разнообразия, физического разделения и защиты от ошибочных действий персонала. Наличие пассивных систем значительно повышает эффективность использования этих принципов.

Одним из вероятностных критериев безопасности, установленном в Техническом задании на проект [1], является среднее значение вероятности (частоты) повреждения активной зоны, которое должно быть менее $1E-5$ на АЭС за год. Учитывая то, что критерий относится к двухблочной АЭС, то он в два раза более жесткий, чем критерий, установленный российским надзорным органом [2] и МАГАТЭ [3] и относящийся к одному энергоблоку.

Позитивные характеристики безопасности базового проекта «ВВЭР-ТОИ» исследовались в рамках вероятностного анализа безопасности, который выполнен в объеме, определенном Техническим заданием на проект [1], а также в соответствии с рекомендациями руководств РБ-32-2 [4], РБ-24-11 [5] и с учетом положений документов МАГАТЭ (IAEA Specific Safety Guide No.SSG3 [6], IAEA-TECDOC-1511 [7], IAEA-TECDOC-749 [8], IAEA Safety Series 5-P-10 [9]).

Характеристика ВАБ-1

В качестве методологической основы для разработки вероятностного анализа безопасности первого уровня (ВАБ-1) для внутренних инициирующих событий использована широко применяемая в мировой практике методология деревьев событий и деревьев отказов. ВАБ-1 является инженерным итерационным анализом, при проведении которого выполняется ряд взаимосвязанных задач. Процесс разработки ВАБ-1 начинается в самом начале проектирования, ход которого влияет на разработку и корректировку интегральной модели ВАБ-1. В свою очередь, промежуточные результаты ВАБ-1 оказывают влияние на принятие решений в ходе проектирования. Схема и взаимосвязь основных задач, выполняемых при проведении ВАБ-1 АЭС, охарактеризованы на рисунке 1. Следует отметить, что анализ зависимостей проводится на протяжении всего процесса выполнения ВАБ-1, т.е. эта задача распределена между другими задачами.

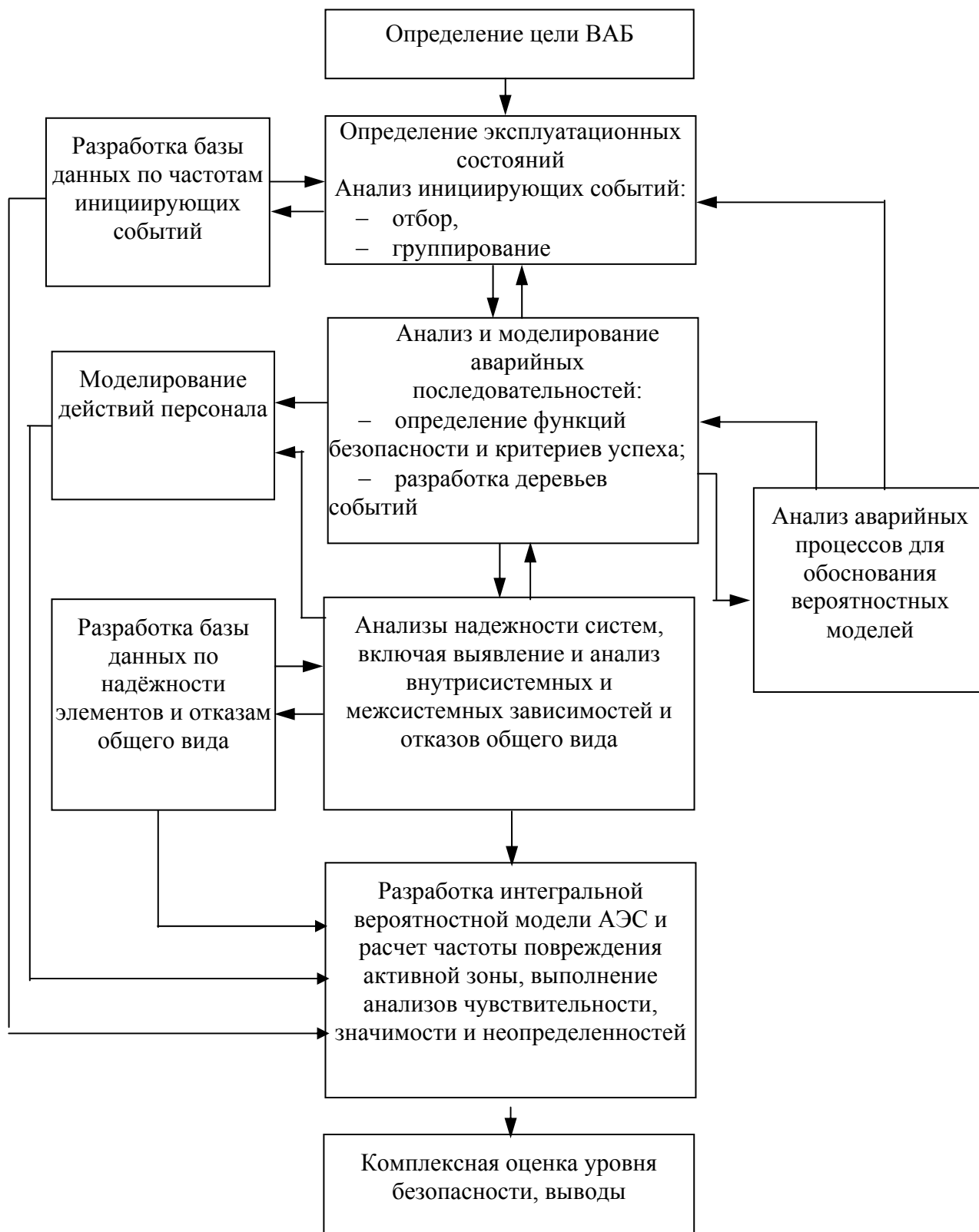


Рисунок 1 - Основные задачи ВАБ-1

Основными целями ВАБ-1 являются:

- оценка достигнутого в проекте уровня безопасности на основе определения значения частоты повреждения ядерного топлива в активной зоне реактора;
- определение доминантных факторов, вносящих наибольшие вклады в указанную частоту, и анализ основных причин реализации доминантных аварийных последовательностей (инициирующие события, отказы оборудования и систем, включая отказы общего вида¹, ошибки персонала и т.п.).

Кроме того, при разработке ВАБ-1 в качестве источника радиоактивности рассмотрено ядерное топливо в бассейне выдержки и выполнена предварительная оценка частоты его повреждения. Основная проблема здесь заключается в отсутствии нормативных требований к вероятностному показателю безопасности для такого источника.

Всего рассмотрено 48 различных типов инициирующих событий для двенадцати эксплуатационных состояний (ЭС), в том числе:

- 41 инициирующее событие для ЭС при работе блока на мощности, включая работу на минимально контролируемом уровне с остановленной турбиной;
- от 3 до 33 инициирующих событий для различных ЭС с остановленным реактором (11 групп ЭС).

При оценке вероятностных показателей безопасности рассмотрены в том числе, и не учитываемые в проекте события запроектных аварий с катастрофическим разрывом корпуса реактора, корпуса и коллектора парогенератора, а также аварии при избыточном дренировании первого контура и аварии с падением тяжелых предметов в реактор в стояночных режимах.

Перечень инициирующих событий разработан с учетом особенностей проекта, а также на основе следующих источников:

- обобщенного перечня МАГАТЭ для АЭС с легководными реакторами;
- перечней инициирующих событий, рассматриваемых в ВАБ-1 для реакторов ВВЭР-1000;
- перечня событий, выявленных на основе анализа эксплуатационного опыта АЭС с ВВЭР-1000 (за период с 1986 по 2011 г);
- инженерного анализа проекта;
- результатов детерминистического анализа.

Модели аварийных последовательностей разрабатывались с учетом необходимости достижения безопасных конечных состояний. В соответствии с общепринятым подходом, критерием таких состояний является стабильное выполнение основных функций безопасности (поддержание реактора в подкритическом состоянии и отвод остаточного тепла от ядерного топлива), которое может быть обеспечено в течение неограниченного времени за счет применения средств, предусмотренных в проекте. В качестве количественного приемочного критерия принималось непревышение максимальной температуры оболочки твэлов 1200 °С с учетом критериев по окислению оболочек твэлов.

Для определения критериев успеха выполнения функций безопасности использовались результаты детерминистических анализов и теплогидравлических расчетов, специально проведенных в поддержку ВАБ-1.

Для инициирующих событий, существующих в течение длительного времени, работа пассивных систем, длительность которой ограничена ресурсами (например, запасом воды в гидроемкостях), рассматривалась с точки зрения обеспечения запаса времени, необходимого для принятия мер по приведению блока в одно из безопасных конечных состояний. К таким мерам относятся:

- восстановление выполнения функций безопасности штатными работоспособными

¹ отказы общего вида являются разновидностью отказов по общей причине. Факторами, способствующими возникновению отказов общего вида, являются одинаковость конструкции, режимов использования, технического обслуживания и условий окружающей среды.

активными системами с использованием альтернативных конфигураций систем, предусмотренных проектом;

- подключение альтернативного оборудования, предусмотренного проектом: мобильной дизельной установки, воздушного теплообменника, альтернативного насоса промежуточного контура с воздушным охлаждением;
- восстановление и включение в работу отказавшего оборудования.

Минимальный учитываемый в ВАБ-1 период времени, который отвечает штатной работе систем безопасности в соответствии с критериями успеха, определенными по теплогидравлическим расчетам, принят равным 24 ч.

Максимальный учитываемый в ВАБ-1 период времени определяется для конкретных последовательностей запроектных аварий (с учетом отказов основных активных систем безопасности, предусмотренных в проекте, и работы пассивных систем до исчерпания их ресурса) и составляет не менее 72 часов.

Всего в модели ВАБ-1 разработано 135 основных и трансферных деревьев событий, включая 76 деревьев событий для активной зоны в режимах работы на мощности, 44 дерева событий для активной зоны в стояночных режимах и 15 деревьев событий для бассейна выдержки в разных режимах.

В рамках анализа систем выполнена разработка детальных моделей надежности всех технологических и обеспечивающих систем в форме деревьев отказов. Деревья отказов были разработаны с учетом отказов общего вида, ошибок персонала, неготовности оборудования из-за испытаний или выводов в ремонт.

Для разработки базы данных ВАБ-1 использовался опыт эксплуатации АЭС с ВВЭР-1000, методы механики разрушения, логические модели и обобщенные данные в случае невозможности применения указанных ранее подходов.

Особенностью анализа надежности персонала АЭС «ВВЭР-ТОИ» является то, что данный анализ выполнен на стадии проектирования, когда отсутствует эксплуатационная документация. Поэтому анализ выполнен с определенным консерватизмом, а его результаты имеют значительную степень неопределенности, характеризуемой фактором ошибки 10. Анализ надежности персонала проведен с учетом требований руководства МАГАТЭ [9]. В объем анализа включены предаварийные и послеаварийные ошибки персонала (включая ошибки при восстановлении), а также зависимости между ошибками персонала. Для решения задачи оценки вероятности ошибок человека, как независимых, так и зависимых, использована методика THERP [10].

Разработка интегральной вероятностно-логической модели энергоблока и проведение количественных расчетов значений вероятностных показателей безопасности выполнены с применением программного комплекса Risk Spectrum PSA (версия 1.1.3), аттестованного российским надзорным органом.

Расчетная интегральная модель ВАБ-1 включает полный комплекс логически связанных между собой деревьев событий, функциональных деревьев отказов, отказов деревьев отказов систем, а также баз данных по показателям надежности элементов, параметрам моделей отказов по общей причине, частотам инициирующих событий и значений вероятностей ошибочных действий персонала и особых событий. Интегральная модель ВАБ-1 разработана для всех эксплуатационных состояний энергоблока.

Расчеты частот повреждения ТВЭЛов выполнены для активной зоны и (отдельно) для бассейна выдержки для полугодового топливного цикла. Кроме того, проведены анализы чувствительности, значимости и неопределенности полученных результатов.

Результаты ВАБ-1

Точечная оценка значения общей (т.е. суммарной по всем группам внутренних инициирующих событий для всех режимов работы энергоблока) частоты повреждения активной зоны (ПАЗ) для полуторогодичного топливного цикла составляет $2,9E-7$ на реактор в год, что в 16 раз ниже требования технического задания [1].

В таблице 1 представлены результаты оценок значений частот (вероятностей за год) ПАЗ для доминантных инициирующих событий в отдельных ЭС, суммарный вклад которых составил 90 % от общей частоты ПАЗ.

Таблица 1 - Результаты оценки частоты ПАЗ для групп инициирующих событий, возникающих в различных режимах работы энергоблока

Иницирующее событие	Эксплуатационное состояние	Частота инициирующего события, 1/год	Частота ПАЗ, 1/год	Вклад, %
Разрыв корпуса реактора	Работа реактора на мощности	$6,7E-8$	$6,7E-8$	23,2
Падение тяжелых предметов (запроектная авария)	Разборка реактора, сборка реактора при полной перегрузке	$2,6E-8$	$2,6E-8$	8,9
Падение тяжелых предметов (запроектная авария)	Разборка реактора, сборка реактора при частичной перегрузке	$2,6E-8$	$2,6E-8$	8,9
Малая течь ($20 < D_y \leq 40$ мм)	Работа реактора на мощности	$3,0E-3$	$2,5E-8$	8,7
Обесточивание	Разборка реактора, сборка реактора при частичной перегрузке	$9,7E-4$	$1,7E-8$	5,8
Разбавление бора	Разборка реактора, сборка реактора при частичной перегрузке	$2,3E-5$	$1,5E-8$	5,0
Очень малая течь из первого во второй контур	Работа реактора на мощности	$1,0E-1$	$1,3E-8$	4,3
Потеря отвода тепла от активной зоны из-за отказов системы аварийного и планового расхолаживания	Разборка реактора, сборка реактора при частичной перегрузке	$2,7E-4$	$1,2E-8$	4,0
Потеря отвода тепла от активной зоны из-за отказов системы аварийного и планового расхолаживания	Разборка реактора, сборка реактора при полной перегрузке	$2,9E-4$	$1,1E-8$	3,6
Потеря промконтра или техводы ответственных потребителей	Разборка реактора, сборка реактора при частичной перегрузке	$6,5E-6$	$9,7E-9$	3,3
Разрыв линии планового расхолаживания внутри защитной оболочки	Расхолаживание через первый контур, «холодное» состояние и ремонт оборудования	$3,6E-6$	$9,3E-9$	3,2

Иницирующее событие	Эксплуатационное состояние	Частота иницирующего события, 1/год	Частота ПАЗ, 1/год	Вклад, %
Течь первого контура, компенсируемая системой подпитки-продувки	Работа реактора на мощности	1,1E-1	4,8E-9	1,7
Средняя течь ($80 \leq D_y < 100$ мм)	Работа реактора на мощности	2,6E-5	4,7E-9	1,6
Очень малая течь из первого контура во второй контур	Расхолаживание через первый контур, «холодное» состояние и ремонт оборудования	4,7E-5	4,3E-9	1,5
Обесточивание	Работа реактора на мощности	2,0E-1	4,0E-9	1,4
Потеря отвода тепла от активной зоны из-за отказов системы аварийного и планового расхолаживания	Расхолаживание через первый контур, «холодное» состояние и ремонт оборудования	1,1E-4	4,0E-9	1,4
Потеря нормального отвода тепла	Работа реактора на мощности	2,2E-1	2,9E-9	1,0
Течи первого контура	Разогрев до температуры гидроиспытаний	1,5E-7	2,8E-9	1,0
Переопрессовка первого контура (запроектная авария)	Расхолаживание через первый контур, «холодное» состояние и ремонт оборудования	2,5E-9	2,5E-9	0,9
Малая течь из первого контура во второй контур	Работа реактора на мощности	5,0E-3	2,4E-9	0,8
Другие иницирующие события	-	-	-	9,7
Все иницирующие события во всех режимах	-	-	2,9E-7	100

Наибольшие вклады в значение общей частоты ПАЗ вносят режимы работы энергоблока на мощности ($1,3E-7$ 1/год, 45 %) и стояночные режимы с разборкой, сборкой реактора при останове с частичной перегрузкой топлива ($7,9E-8$ 1/год, 27 %) или с полной перегрузкой топлива ($3,8E-8$ 1/год, 13 %).

Среди иницирующих событий значительный вклад (43%) вносят не учитываемые в проекте иницирующие события (иницирующие события запроектных аварий), для которых предполагается повреждение топлива в активной зоне как следствие самого иницирующего события. Самыми значительными вкладчиками из таких событий являются иницирующие события с катастрофическими разрывами корпуса реактора при работе блока на мощности ($6,7E-8$ на реактор в год,) и падение тяжелых предметов в состояниях с разборкой и сборкой реактора при полной или частичной перегрузке ядерного топлива ($5,2E-8$ на реактор в год).

Высокий вклад от запроектных аварий объясняется, в первую очередь, консерватизмом в оценке частот таких событий (детальные вероятностно - прочностные анализы для данных инициирующих событий не завершены). Основные категории инициирующих событий, вносящих наибольший вклад в полученное значение частоты ПАЗ, представлены также на рисунке 2. На рисунке 3 приведена значимость отдельных систем и некоторых других событий.

Результаты анализов чувствительности показывают, что применение пассивных систем значительно влияет на значение общей частоты ПАЗ.

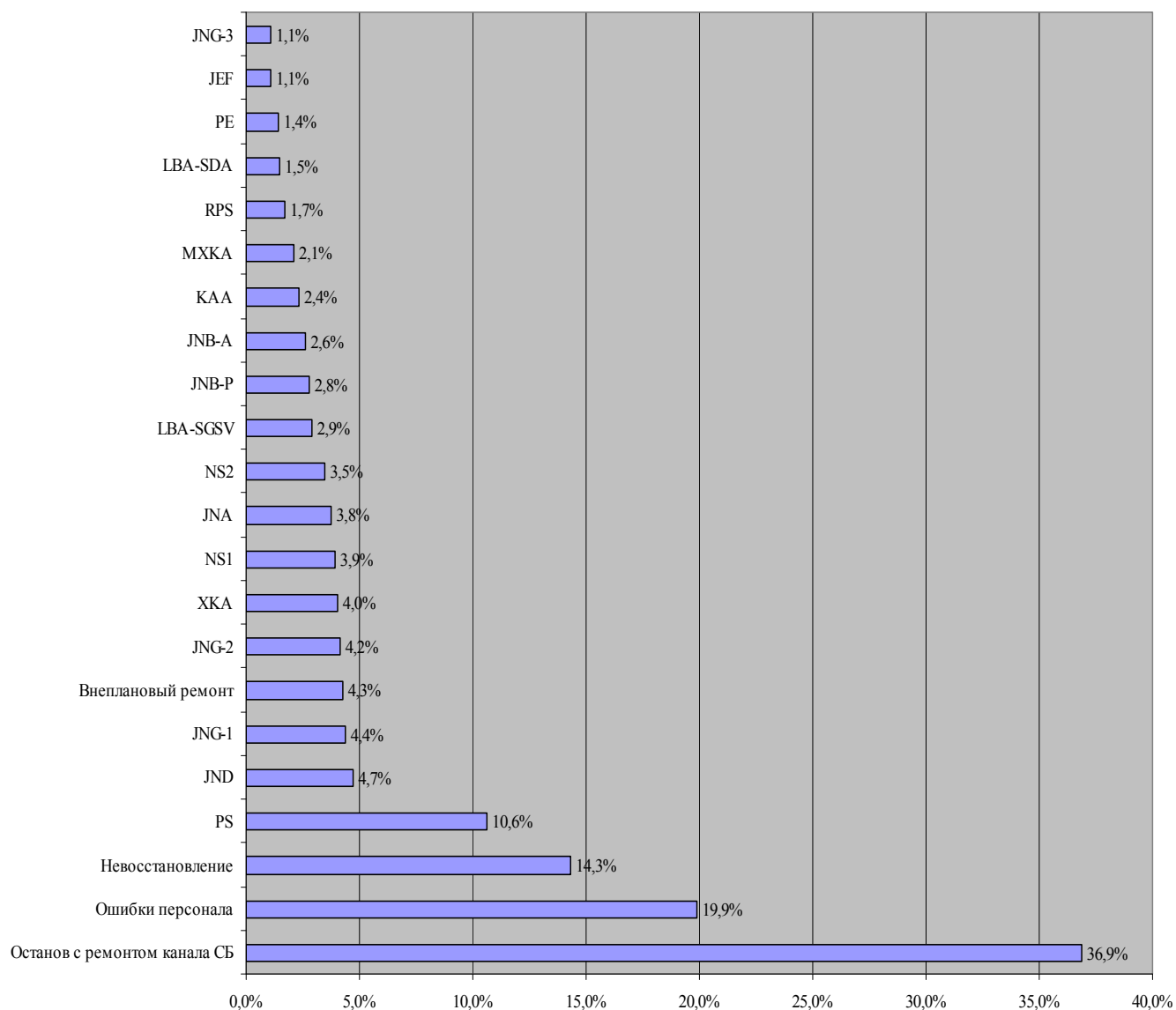
Предусмотренные проектом меры по предотвращению или ослаблению последствий запроектных аварий также проанализированы в рамках анализа чувствительности:

- применение мобильного дизель-генератора позволило снизить частоту ПАЗ в 5 раз;
- применение сухой градирни в качестве автономного теплообменника расхолаживания позволило снизить частоту ПАЗ в 1,3 раз;
- применение процедуры «сброс-подпитка» по первому контуру при отказе теплоотвода через второй позволило снизить частоту ПАЗ в 1,6 раз.

Среднее значение суммарной частоты повреждения твэлов в бассейне выдержки, оцененной по группам внутренних инициирующих событий, составляет $4,6E-7$ на реактор в год. Наибольший вклад вносят инициирующие события с течью бассейна выдержки при работе реактора на мощности и инициирующие события с отказом систем промежуточного контура или технической воды для всех рассматриваемых ЭС. Основные категории вкладчиков в этот вероятностный показатель безопасности представлены на рисунке 4.



Рисунок 2 - Распределение общей частоты ПАЗ по категориям инициирующих событий



- КАА - система промежуточного контура ответственных потребителей
- JNG-3 - система гидроемкостей третьей ступени
- NS2 - системы нормальной эксплуатации, второй контур
- JNA - система аварийного и планового расхолаживания первого контура и охлаждения бассейна выдержки
- MXKA - мобильный дизель-генератор
- JNG-1 - система гидроемкостей первой ступени
- JND - система быстрого ввода бора
- NS1 - системы нормальной эксплуатации, первый контур
- XKA - дизель-генераторы
- JNG-2 - система гидроемкостей второй ступени
- PS - системы электроснабжения (без дизель-генераторов)
- JEF - импульсно-предохранительные устройства компенсатора давления
- PE - система технической воды
- LBA-SDA - быстродействующие редуцирующие устройства со сбросом пара в атмосферу
- RPS - система аварийной защиты
- JNB-P - система пассивного отвода тепла
- JNB-A - система аварийного расхолаживания
- LBA-SGSV - импульсно-предохранительные устройства парогенераторов

Рисунок 3 – Весовой фактор для наиболее значимых систем (более 1 %) и других значимых групп событий модели ВАБ-1

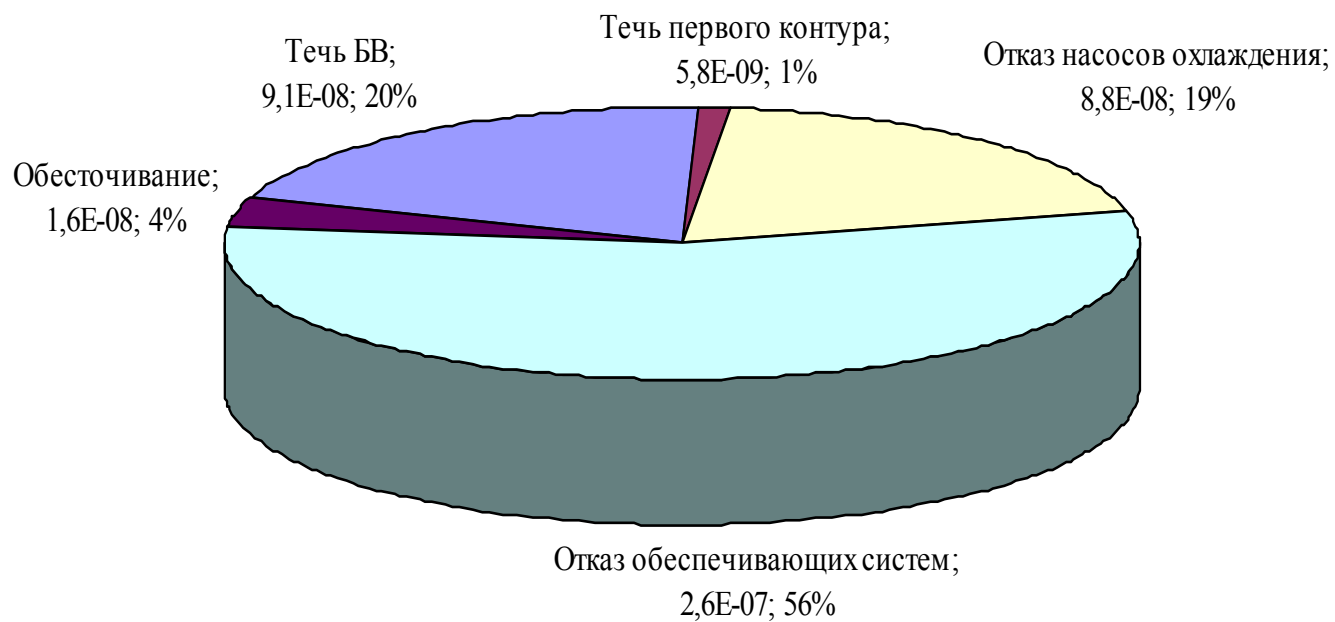


Рисунок 4— Частота повреждения твэлов в бассейне выдержки для категорий инициирующих событий

Сравнение с другими проектами

В таблице 2 приведены для сравнения значения частот ПАЗ для проекта «ВВЭР-ТОИ», проекта AP-1000 компании Westinghouse Electric, южнокорейского APR1400, EPR компании AREVA, АЭС «Куданкулам» в Индии, Ленинградской АЭС-2 (данные 2007 г.) и Нововоронежской АЭС-2. Выбор зарубежных объектов для сравнения обусловлен большой степенью их готовности (идет сооружение АЭС и, следовательно, проведены экспертизы ВАБ-1 надзорными органами и другими организациями). Отличительной чертой проекта «ВВЭР-ТОИ» по сравнению с референтным проектом Нововоронежской АЭС-2 является требование обеспечить автономность энергоблока (возможность поддержания контролируемого состояния без привлечения внешних ресурсов) в течение 72 ч после возникновения инициирующего события и использование дополнительной пассивной системы гидроемкостей третьей ступени, что оказало влияние на снижение частоты ПАЗ.

Следует отметить, что различия в результатах ВАБ-1 для разных проектов определяются как принятыми при их разработке объемом анализа, исходными данными, допущениями и ограничениями, так и проектными решениями по конфигурации систем безопасности. Вместе с тем, объем и консерватизм допущений, принятых при разработке ВАБ-1 проекта «ВВЭР-ТОИ», позволяют считать, что положительное «сальдо» в пользу данного проекта только увеличится при использовании идентичной шкалы оценок.

Таблица 2 - Значения частот ПАЗ разных проектов

Эксплуатационные режимы	Частота ПАЗ, 1/год						
	«ВВЭР-ТОИ»	AP-1000 [11, 12]	APR1400 [13]	EPR [14]	АЭС Куданкулам	Ленинградская АЭС-2	Нововоронежская АЭС-2
При работе на мощности с учетом запроектных аварий	1,3E-7	2,4E-7	-	-	2,7E-7	2,2E-7	1,7E-7
Общая частота ПАЗ для всех ЭС с учетом запроектных аварий	2,9E-7	3,4E-7	2,25E-6 ²	6,1E-7	1,1E-6	5,9E-7	7,3E-7

² Объем ВАБ-1 не сообщается.

Заключение

Результаты ВАБ-1 подтверждают, что в проекте обеспечено выполнение всех основных инженерных принципов современной концепции глубоководной защиты, включая принципы функционального и конструктивного разнообразия, защиты от отказов общего вида, защиты от ошибочных действий персонала. По полученному значению частоты повреждения активной зоны можно сделать вывод о том, что для проекта «ВВЭР-ТОИ» обеспечен более высокий уровень безопасности по сравнению с другими проектами, в особенности принимая во внимание консерватизм в оценке частот инициирующих событий запроектных аварий. Этот результат достигнут за счет применения следующих решений:

- эффективного сочетания активных и пассивных систем, обеспечивающих функциональное резервирование, длительную автономность блока в условиях аварий (не менее 72 ч), защиту от отказов общего вида и пониженное влияние человеческого фактора;

- применения дополнительных мер на указанном расширенном периоде автономности для восстановления критических функций безопасности, в том числе подключение к потребителям мобильной дизель-генераторной станции (при полном обесточивании), установку автономного теплообменника и подключение его к теплообменникам систем безопасности (для аварий с полной потерей технической воды или потерей промежуточного контура).

Результаты ВАБ-1 подтверждают, что требование технического задания на проект «ВВЭР-ТОИ» и нормативных документов по частоте ПАЗ выполнено со значительным запасом.

На основе результатов ВАБ-1 для внутренних инициирующих событий разрабатывается ВАБ-1 для площадочных и внешних воздействий и ВАБ уровня 2.

Литература

1. «Техническое задание на разработку проекта ВВЭР-ТОИ», 2010.С.120.&&&&&&&&&.000.МВ.0001. Москва, 2011.
2. «Общие положения обеспечения безопасности атомных станций. ОПБ-88/97», НП-01-97 (ПНАЭ Г-1-11-97), Госатомнадзор России, Москва, 1997.
3. «Basic Safety Principles for Nuclear Power Plants 75.INSAG-3 Rev.1», INSAG-12. International Atomic Energy Agency, Vienna, 1999.
4. «Основные рекомендации по выполнению вероятностного анализа безопасности атомных станций», РБ-32-2, Федеральная служба по атомному надзору, Москва, 2004.
5. «Положение об основных рекомендациях к разработке вероятностного анализа безопасности уровня 1 для внутренних инициирующих событий для всех режимов работы энергоблока атомной станции.» РБ-24-11. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, Москва, 2011.
6. Руководство по безопасности МАГАТЭ – «Development and application of level 1 probabilistic safety assessment for nuclear power plants», Specific Safety Guide No. SSG-3, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2010.
7. Технический документ МАГАТЭ – «Determining the Quality of Probabilistic Safety Assessment (PSA) for Applications in Nuclear Power Plants», IAEA-TECDOC-1511, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2006.
8. Технический документ МАГАТЭ - «Generic initiating events for PSA for WWER reactors», IAEA-TECDOC-749, International Atomic Energy Agency, Vienna, 1994.
9. Руководство по безопасности МАГАТЭ - «Human Reliability Analysis in Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants», Safety Series 50-P-10, International Atomic Energy Agency, 1995 (на английском языке).
10. A.D.Swain, H.E. Guttman, «Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications», NUREG/CR-1278.
11. «AP1000 Design Control Document. Revision 17. Chapter 19. Probabilistic Risk Assessment. Section 19.59 PRA Results and Insights».
12. Г.В. Токмачев. АЭС AP1000 компании Westinghouse, обладающая повышенной экономичностью и безопасностью. Атомная техника за рубежом, Москва, 2006 г., № 5, стр. 17-23
13. Jong Tae Seo «Experience on APR1400 Construction», IAEA TWG-LWR, Vienna, July 26-28, 2011. [http://www.iaea.org/NuclearPower/Downloads/Technology/meetings/2011-Jul-26-28-TWG-LWR-HWR/Session-IV/Experience-APR1400-Construction-\(Seo\).pdf](http://www.iaea.org/NuclearPower/Downloads/Technology/meetings/2011-Jul-26-28-TWG-LWR-HWR/Session-IV/Experience-APR1400-Construction-(Seo).pdf)
14. «Assessment Report. New Reactor Build. EDF/AREVA EPR. Step 2. PSA Assessment», Health & Safety Executive Nuclear Directorate. <http://www.hse.gov.uk/newreactors/reports/eprpsa.pdf>