

Применение вероятностного анализа безопасности для обоснования возможности продления срока эксплуатации энергоблока № 4 Нововоронежской АЭС

Швыряев Ю.В., Токмачев Г.В., кандидаты техн. наук

Атомэнергoproject¹

Представлены результаты вероятностного анализа безопасности (ВАБ) 1 уровня, включенного в состав отчета по углубленной оценке безопасности (ОУОБ) энергоблока № 4 Нововоронежской АЭС.

Энергоблоки Нововоронежской АЭС (НВАЭС) с реакторами ВВЭР-440 (проект В-179) были введены в эксплуатацию в начале 70-х годов. Их проектные сроки службы составляли 30 лет и для энергоблока № 3 исчерпывались в 2001 г., а для энергоблока № 4 — в 2002 г. В рамках разработки ОУОБ энергоблока № 4 НВАЭС был проведен вероятностный анализ безопасности. Объем ВАБ был ограничен внутренними иницирующими событиями (ИС) и исходным состоянием энергоблока, соответствующим работе на мощности с полной структурой систем. Этот анализ разрабатывался на основе материалов ВАБ для ОУОБ энергоблока № 3 НВАЭС, а также с учетом дополнительных мероприятий первого этапа модернизации энергоблока № 4, которые реализованы в 2002 г., и с учетом замечаний экспертизы Госатомнадзора РФ по ВАБ энергоблока № 3.

Отчет по углубленной оценке безопасности энергоблока № 4 был выпущен в 2002 г. Он содержал оценку текущего уровня безопасности энергоблока с учетом реализации мер по ее повышению. Отчет был разработан эксплуатирующей организацией с привлечением предприятий-разработчиков проектной и конструкторской документации. Материалы по ВАБ использовались концерном Росэнергоатом, чтобы получить лицензию Госатомнадзора РФ для продления назначенного срока эксплуатации этого энергоблока.

Экспертиза ВАБ в составе ОУОБ для энергоблока № 4 была проведена специалистами НТЦ Госатомнадзора РФ. В экспертизе не отмечено замечаний, которые бы препятствовали выдаче лицензии на продление срока эксплуатации. Вероятностный анализ безопасности I уровня по внутренним исходным событиям для НВАЭС был разделен на семь основных задач:

1. Определение и группировка ИС. Разработка перечней и группировка ИС основываются на следующем

определении этого понятия: «Иницирующие события — это такие события, которые либо непосредственно вызывают повреждения источников радиоактивности, либо могут привести к таким событиям в случае невыполнения функций безопасности, предусмотренных для предотвращения таких повреждений или их ограничения». Был разработан полный перечень, включающий 44 ИС для работы энергоблока на мощности. Они были объединены в 33 группы. Перечень иницирующих событий разрабатывался на основе обобщенного перечня МАГАТЭ, инженерных оценок конструкции исследуемого энергоблока, опыта эксплуатации энергоблоков № 3, 4 НВАЭС и № 1, 2 Кольской АЭС, а также разработанных ранее ВАБ для энергоблоков НВАЭС, АЭС Богунце VI в Словакии, № 1, 2 АЭС Козлодуй в Болгарии.

2. Анализ критериев успеха. На основе имеющихся и специально выполненных анализов аварийных процессов были определены критерии успеха в терминах минимальной конфигурации систем и действий персонала, необходимых и достаточных для выполнения отдельных функций безопасности, включенных в анализ. Для обоснования этих критериев были проведены теплогидравлические расчеты по проекту НОВИСА² (РНЦ «Курчатовский институт», ОКБ «Гидропресс»), а также дополнительные специальные анализы изменения температуры в баке аварийного запаса раствора бора Б-8/3 и параметров в герметичных помещениях при течах из I контура размером Dy100 (Атомэнергoproject, Москва).

3. Анализ аварийных последовательностей. Для их моделирования в каждой группе иницирующих событий использовались основные и трансферные (при необходимости) деревья событий. В пределах этой задачи была выявлена, описана и документально оформлена каждая аварийная последовательность, которая может привести к повреждению активной зоны. Деревья событий разрабатывались на основе анализа критериев успеха.

4. Анализ систем, включающий разработку их деревьев отказов, анализ видов отказов элементов систем и их последствий, а также выпуск окончательных вари-

105005, Москва, ул. Бакунинская, д. 7. Атомэнергoproject.

²НОВИСА — проект по углубленной оценке безопасности энергоблоков № 3 и 4 НВАЭС, который финансировался Департаментом энергетики США.

антов описаний систем. Были проанализированы 23 системы, включая новые: дополнительную систему аварийной питательной воды, передвижную насосную установку с дизельным приводом, мобильный дизель-генератор.

5. Анализ данных, который содержал:

сбор и анализ информации по частотам инициирующих событий, требуемой для количественной оценки моделей ВАБ НВАЭС. Для расчета частот переходных процессов были собраны данные по истории эксплуатации с остановами энергоблоков № 3 и 4 этой АЭС за период с 1986 по 2001 г. включительно. Остановы разделялись по категориям в соответствии с определенными группами ИС. Частоты ряда течей из I контура оценивались с учетом концепции «течь перед разрушением», внедренной на энергоблоке № 4;

анализ данных по надежности оборудования, собранных за последние 6 лет (с 1992 по 1998 г.) эксплуатации энергоблоков № 3 и 4, включая показатели надежности оборудования и данные по его неготовности вследствие испытаний, техобслуживания и ремонта;

адаптацию оценок параметров отказов по общей причине для энергоблока № 4, с учетом опыта эксплуатации США. При моделировании указанных отказов использована многопараметрическая модель альфа-фактора. Поэтому были получены параметры модели для отказов различной размерности в группах элементов, подверженных отказам по общей причине;

оценку вероятности особых событий таких, как забивание приемка герметичного бокса при течах I контура различного размера.

6. Анализ надежности персонала. Эта задача включала в себя: определение, моделирование, отбор и количественную оценку событий, связанных с ошибками персонала. Были проанализированы существующие станционные эксплуатационные инструкции, а также проведены собеседования с оперативным персоналом для лучшего понимания предполагаемого поведения энергоблока в конкретных аварийных условиях, определенных в процессе разработки ВАБ. Кроме того, были проанализированы как доаварийные, так и послеаварийные ошибки персонала, включая восстановительные действия и зависимые ошибки. Доаварийные ошибки моделировались с помощью методологии THERP, послеаварийные — с использованием дерева решений.

7. Количественная оценка аварийных последовательностей, анализ неопределенности, значимости и чувствительности. Эта задача содержала предварительную и окончательную количественную оценку значений общей частоты повреждения активной зоны (ПАЗ), а также анализ неопределенностей, значимости и чувствительности. Для разработки интегральной вероятностной модели, включающей деревья событий и деревья отказов, а также базу данных по надежности оборудования, отказам оборудования по общим причинам и надежности персонала, использовалась компьютерная

программа RiskSpectrum PSA Professional, версия 1.10. Программа прошла верификацию и аттестацию в Госатомнадзоре РФ. При подготовке модели к расчету была осуществлена и документирована процедура разрыва логических петель. Зависимые ошибки персонала были включены в модель посредством специальной опции расчетной программы — восстановительных правил для минимальных сечений. Взаимно исключающие события моделировались на дереве отказов явно с использованием специального логического оператора отрицания. С помощью анализа чувствительности/значимости была проведена оценка эффективности мероприятий по модернизации. В качестве параметров значимости применялись факторы Фусселля-Весели, понижения и повышения риска. Для анализа чувствительности рассматривалось влияние увеличения или уменьшения в 10 раз значения вероятности реализации базовых событий на изменение частоты ПАЗ.

При подготовке вероятностного анализа безопасности в составе ОУОБ были выполнены оценки значений общей частоты ПАЗ, которые соответствовали состоянию энергоблока после проведения модернизации. Наиболее сильно повлияли на результаты анализов следующие мероприятия:

- установка дополнительной системы подпитки парогенераторов и передвижной насосной установки с собственным дизельным приводом;
- создание двухканальной структуры систем безопасности, включая модернизацию: систем аварийной подпитки I контура и спринклерной системы, системы надежного электроснабжения второй категории (два дизель-генератора и аккумуляторная батарея в каждом канале), системы технического водоснабжения;
- замена клапанов ручного управления на электроприводные клапаны на трубопроводах продувки I контура и на возврате продувки и обеспечение возможности дистанционного закрытия этих задвижек оператором с блочного щита управления при течах из I контура, включая течи внутри герметичных помещений, за пределы герметичных помещений и из контура I в контур II. Действия персонала выполняются на основе имеющихся на НВАЭС симптомно-ориентированных инструкций;
- введение автоматических сигналов на: открытие задвижек на линиях подвода технической воды к теплообменникам спринклерной системы; запуск систем аварийной питательной воды и дополнительной аварийной питательной воды; закрытие секционирующей арматуры на главном паровом коллекторе;
- модернизация системы расхолаживания реактора через технологические конденсаторы, что позволяет использовать эту систему для одновременного расхолаживания энергоблоков № 3 и 4.

Реализация всех этих мер обеспечила снижение значений частоты повреждения активной зоны до $5,12 \cdot 10^{-5}$ 1/год (см. таблицу).

Частота повреждения активной зоны энергоблока № 4 НВАЭС для групп инициирующих событий

Группы ИС	Частота ИС, 1/год	Частота ПАЗ, 1/год	Вклад в частоту ПАЗ, %
Иницирующие события с течью I контура	$4,21 \cdot 10^{-2}$	$3,12 \cdot 10^{-5}$	61
Разрыв коллектора парогенератора (> 100 мм)	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$1,00 \cdot 10^{-5}$	19,5
Малая течь I контура	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$6,59 \cdot 10^{-6}$	12,7
Средняя течь I контура (32 мм < Ду < 100 мм)	$8,3 \cdot 10^{-4}$	$5,49 \cdot 10^{-6}$	10,6
Очень малая течь I контура	$2,1 \cdot 10^{-2}$	$1,98 \cdot 10^{-6}$	3,8
Разрыв чехла привода органа регулирования системы управления и защиты реактора	$8,3 \cdot 10^{-4}$	$1,75 \cdot 10^{-6}$	3,4
Разрыв трубки парогенератора	$4,2 \cdot 10^{-3}$	$1,17 \cdot 10^{-6}$	2,2
Разрыв корпуса реактора	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$1,00 \cdot 10^{-6}$	2,0
Большая течь теплоносителя I контура (> 100 мм)	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$1,00 \cdot 10^{-6}$	2,0
Средняя течь теплоносителя I контура (20...32 мм)	$8,3 \cdot 10^{-4}$	$7,41 \cdot 10^{-6}$	1,4
Разрыв коллектора парогенератора ≤ 100 мм	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$7,31 \cdot 10^{-7}$	1,4
Несанкционированное открытие предохранительного клапана компенсатора давления	$3,3 \cdot 10^{-4}$	$6,80 \cdot 10^{-7}$	,3
Течь теплоносителя I контура за пределы:			
гермообъема через систему его нормальной подпитки	$2,9 \cdot 10^{-5}$	$5,35 \cdot 10^{-8}$	0,1
гермообъема через промконтур системы управления и защиты реактора	$2,1 \cdot 10^{-6}$	$3,24 \cdot 10^{-8}$	< 0,1
гермообъема через промконтур главных циркуляционных насосов	$5,8 \cdot 10^{-4}$	$3,92 \cdot 10^{-8}$	< 0,1
Переходные процессы и разрывы II контура	$6,11 \cdot 10^{-1}$	$2,0 \cdot 10^{-5}$	39
Непредусмотренное закрытие паровой задвижки	$2,1 \cdot 10^{-2}$	$4,09 \cdot 10^{-6}$	8,0
Общие переходные процессы на энергоблоке	$4,3 \cdot 10^{-1}$	$2,93 \cdot 10^{-6}$	5,6
Потеря питательной воды	$4,3 \cdot 10^{-2}$	$2,82 \cdot 10^{-6}$	5,5
Избыточная подача питательной воды в парогенераторы	$2,1 \cdot 10^{-2}$	$2,56 \cdot 10^{-6}$	5,0
Разрыв паропроводов в неизолируемой от парогенератора части вне гермообъема	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$2,36 \cdot 10^{-6}$	4,6
Непредусмотренное открытие предохранительного клапана парогенератора	$3,0 \cdot 10^{-3}$	$2,17 \cdot 10^{-6}$	4,2
Разрыв главного парового коллектора	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$1,07 \cdot 10^{-6}$	2,1
Обесточивание энергоблока № 4	$4,3 \cdot 10^{-2}$	$6,91 \cdot 10^{-7}$	1,3
Разрыв паропроводов в неизолируемой от парогенератора части внутри гермообъема	$6,4 \cdot 10^{-4}$	$4,62 \cdot 10^{-7}$	0,9
Разрыв паропровода парогенератора в изолируемой от парогенератора части	$1 \cdot 10^{-3}$	$2,43 \cdot 10^{-7}$	0,5
Потеря циркуляционной воды	$2,1 \cdot 10^{-3}$	$1,99 \cdot 10^{-7}$	0,4
Разрыв всасывающего коллектора питательной воды	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$1,77 \cdot 10^{-7}$	0,3
Разрыв напорного коллектора питательной воды	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$1,75 \cdot 10^{-7}$	0,3
Обесточивание энергоблоков № 3 и 4	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$2,00 \cdot 10^{-7}$	0,3
Потеря отвода тепла через конденсаторы турбин	$2,1 \cdot 10^{-2}$	$1,52 \cdot 10^{-7}$	0,3
Разрыв питательного трубопровода парогенератора	$6,1 \cdot 10^{-5}$	$5,03 \cdot 10^{-8}$	0,1
Непредусмотренное открытие быстродействующей редукиционной установки со сбросом пара в атмосферу БРУ-А	$2,2 \cdot 10^{-4}$	$7,23 \cdot 10^{-8}$	< 0,1
Потеря технической воды	$1,3 \cdot 10^{-6}$	$3,34 \cdot 10^{-11}$	< 0,1
Частота ПАЗ		$5,12 \cdot 10^{-5}$	

Результаты анализа неопределенностей расчета числовых характеристик повреждения активной зоны представлены ниже, 1/год:

Среднее значение частоты ПАЗ	$5,12 \cdot 10^{-5}$
Медиана	$3,85 \cdot 10^{-5}$
Квантиль уровня 0,05	$1,66 \cdot 10^{-5}$
Квантиль уровня 0,95	$1,30 \cdot 10^{-4}$

Отсюда видно, что среднее значение частоты ПАЗ примерно в 2,5 раза ниже верхней границы для 95 %-ной доверительной вероятности. Такие результаты свидетельствуют о сравнительно небольшом влиянии неопределенностей при определении значений показателей надежности оборудования, параметров отказов по общим причинам, вероятностей ошибочных действий персонала и значений частот иницирующих событий на оценку значений общей частоты ПАЗ.

Результаты вероятного анализа безопасности, выполненного в рамках ОУОБ позволяют сделать определенные выводы и дать соответствующие рекомендации.

Уровень безопасности, характеризуемой значением частоты повреждения активной зоны $5,12 \cdot 10^{-5}$ 1/год, оценивается как приемлемый на основании рекомендаций МАГАТЭ к действующим АЭС, в соответствии с которыми это значение не должно превышать $1 \cdot 10^{-4}$ 1/год*.

Как видно из таблицы, вклады в значение общей частоты ПАЗ от течей I контура и переходных процессов составляют соответственно $3,12 \cdot 10^{-5}$ 1/год ($\approx 61\%$) и $2,0 \cdot 10^{-5}$ 1/год ($\approx 39\%$). Таким образом, течи из I контура продолжают существенно влиять на частоту повреждения активной зоны. При этом наибольшее воздействие оказывают ИС с разрывом коллектора парогенератора размером более 100 мм (19,5 %), малые $7 < D_y \leq 20$ мм (12,7 %) и средние течи $32 < D_y \leq 100$ мм (10,6 %) теплоносителя I контура.

Разрыв коллектора питательной воды или паропроводов может привести к запариванию или затоплению помещений машзала, что, в свою очередь, может вызывать зависимые от этих событий отказы оборудования и элементов систем отвода тепла через II контур. Такие

взаимодействия систем, как биение трубопровода (хлыст) или ударная сила струи, также могут быть важными факторами, способствующими появлению зависимых отказов оборудования и трубопроводов.

Учет влияния зависимых отказов оборудования машзала вследствие влияния эффектов запаривания не привел к существенному увеличению значений общей частоты ПАЗ, несмотря на использование большого значения условной вероятности таких зависимых отказов (0,5). Слабое влияние запаривания объясняется наличием на энергоблоках № 3 и 4 систем дополнительной аварийной питательной воды и передвижных питательных насосов, которые размещены в отдельных помещениях, изолированных от машзала.

Из результатов анализов чувствительности можно сделать выводы о том, что наибольшее влияние на значение общей частоты ПАЗ оказывают значения вероятностей: засорения прямка, отказов по общей причине предохранительных клапанов парогенераторов на открытие, отказов аварийной защиты реактора, возникновения течей в неизолируемой части I контура, ошибочных действий персонала в послеаварийном периоде.

Анализ результатов по значимости показал, что вклад всех ошибок персонала, включая его зависимые действия, составил 22 %, а отказов оборудования по общим причинам — 25 %.

Дальнейшее снижение значений общей частоты повреждения активной зоны может быть достигнуто путем:

модернизации конструкции прямка гермообъема для исключения его засорения в случае аварии с потерей теплоносителя;

совершенствования аварийных инструкций по управлению проектными и запроектными авариями;

снижения влияния ряда консервативных предположений, принятых при разработке ВАБ.

В первую очередь необходимо проведение вероятностно-прочностных расчетов для уточнения значений частот крупномасштабных разрывов коллектора парогенератора и частот разрывов трубопроводов I контура.

На основе изложенных результатов вероятностного анализа безопасности энергоблока № 4 НВАЭС можно сделать вывод о том, что его проведение для разработки мер по модернизации действующих АЭС является эффективным средством повышения их безопасности. Последовательное применение ВАБ позволило снизить среднее значение частоты ПАЗ с $1,8 \cdot 10^{-3}$ до $5,1 \cdot 10^{-5}$ 1/год при работе реактора на мощности.

* Основные принципы безопасности атомных электростанций. Международное агентство по атомной энергии. Серия изданий по безопасности № 75-INSAG-3. Вена, 1989.