

**AES-2006 Design Safety Justification for Novovoronezh Plant-2 Site
Using Probabilistic Safety Assessment Methodology**

**Yu.V. Svyriaev, V.B. Morozov, G.V. Tokmachev, E.V. Baykova, V.R.
Chulukhadze, M.V. Fedulov**

The paper discusses the use of a probabilistic safety assessment study for safety justification of AES-2006 design as applied to the Novovoronezh plant-2 site. The requirements to the AES-2006 design are addressed. Specific features of the AES-2006 design for the Novovoronezh Plant-2 site are considered. Important issues to be resolved in the probabilistic safety assessment of new design plants are discussed. The results of the probabilistic safety assessment carried out are described. Some open issues are outlined.

УДК 621.039.58

**Обоснование безопасности проекта АЭС-2006 для условий
площадки Нововоронежской АЭС-2 методами
вероятностного анализа безопасности**

*Ю.В. Швыряев, д-р техн. наук; В.Б. Морозов, канд. техн. наук;
Г.В. Токмачев, канд. техн. наук; Е.В. Байкова; В.Р. Чулухадзе;
М.В. Федулов*

ОАО «Атомэнергопроект»

Введение. В связи с принятием государственной программы развития атомной энергетики России возрастает ее доля в общем энергетическом балансе страны. Прогнозируемый ввод мощности атомных электростанций (АЭС) до 2020 года на территории основных энергозон составляет 32,3 млн. кВт [1]. Новые АЭС должны быть конкурентоспособными по сравнению с другими источниками энергии, но при этом удовлетворять все более ужесточающимся

требованиям безопасности. Поэтому проблема разработки проектов экономических и безопасных АЭС (базовый проект АЭС-2006) приобрела особую актуальность.

В соответствии с ОПБ-88/97 [2], в качестве одного из вероятностных показателей безопасности рассматривается вероятность тяжелых запроектных аварий, которая не должна превышать $1 \cdot 10^{-5}$ за год. Однако в Техническом задании на разработку проекта АЭС-2006 для условий площадки Нововоронежской АЭС-2 эксплуатирующая организация ОАО «Энергоатом» установила значительно более жесткое требование, а именно: вероятность тяжелого повреждения активной зоны для всех эксплуатационных режимов должна быть менее $1 \cdot 10^{-6}$ за год. Это положение ужесточает как отечественные, так и современные международные требования.

Достижение высокого уровня надежности выполнения функций безопасности в проекте Нововоронежской АЭС-2 основывается на использовании функционального и конструктивного разнообразия для отвода остаточных энерговыделений от реактора, в том числе и при течах теплоносителя, и поддержания запаса теплоносителя в активной зоне при течах из первого контура, а также разнообразия режимов использования и/или разнообразия эксплуатационных состояний резервированных элементов и систем безопасности.

Применение принципа разнообразия позволяет обеспечить глубокую защиту от отказов по общей причине, а использование пассивных систем, функционирующих без вмешательства персонала, является надежной защитой от его ошибочных действий.

Надежность выполнения функций безопасности зависит от длительности послеаварийного периода времени, в течение которого требуется их выполнение для приведения блока в стабильное безопасное состояние. Важной особенностью проекта является то, что

для систем, выполняющих функции отвода тепла от активной зоны, предусмотрена принципиальная возможность их работы в течение неограниченного времени.

Помимо пассивных систем те же функции безопасности могут независимо выполняться активными каналами систем безопасности, имеющих двухканальную структуру. Каждый канал может выполнить функции системы с эффективностью 100 %. При этом обеспечивается внутреннее резервирование основных активных элементов каждого канала и соответствие проекта принципу единичного отказа.

К экономичности проекта АЭС-2006 также предъявляются повышенные требования. Одной из последствий этого является рассмотрение в вероятностном анализе безопасности (ВАБ) плановых ремонтов систем безопасности при работе энергоблока на мощности вместо обычного подхода к их ремонту во время останова блока, а также проведение вероятностных оценок как для годичной топливной кампании, так и для более эффективной двухгодичной.

Цель работы. Основная цель разработки ВАБ состояла в комплексной качественной и количественной оценке уровня безопасности блока АЭС, подтверждении его соответствия вероятностным целевым показателям, установленным в [2] и техническом задании на разработку проекта Нововоронежской АЭС-2, а также в выявлении факторов, вносящих наибольший вклад в количественные показатели безопасности блока. ВАБ уровня 1 - инструмент, позволяющий провести оценку безопасности АЭС как целостного объекта и доказать, что уровень ее безопасности является высоким с учетом всех в совокупности мер, реализуемых на проектной стадии – необходим для получения лицензии на сооружение энергоблока АЭС [3]. Поэтому в настоящее время

существенно возросла роль ВАБ при лицензировании проектов новых АЭС.

Методика исследования. ВАБ был разработан в соответствии с методологией, отраженной в нормативных документах [4,5]. Важно отметить, что при выполнении ВАБ для проектов новых АЭС были выявлены важные проблемы методологического характера, которые не были значимыми при анализе действующих сейчас АЭС. Эти проблемы включают моделирование отказов по общей причине многоканальных систем со сниженным влиянием факторов общности, увеличение расчетного интервала моделирования работы систем при аварии (более 24 ч после возникновения инициирующего события) и оценку неготовности из-за вывода во внеплановый ремонт оборудования систем безопасности, эксплуатирующихся в соответствии с новыми регламентными требованиями.

Для уменьшения вклада отказов по общей причине в значения вероятностных показателей безопасности АЭС на проектной стадии применены решения (разнообразие, физическое разделение и др.), позволяющие исключить или добиться снижения влияния факторов общности резервированного оборудования. Одним из подходов, снижающих влияние факторов общности, заключается в том, что элементы систем безопасности, составляющие резервированную группу, могут находиться в различных эксплуатационных состояниях до возникновения инициирующего события, в том числе, длительное время выполнять ту же функцию, которая требуется в аварийных условиях. В новых проектах АЭС с ВВЭР повышенной безопасности, такая конфигурация характерна для ряда систем, в которых часть насосов постоянно работает до начала аварии. Остальные насосы такой резервируемой группы находятся в режиме ожидания в доаварийный период и включаются в работу по аварийным сигналам.

Следует отметить, что метод моделирования отказов по общей причине групп однотипных резервированных элементов, находящихся в различных эксплуатационных состояниях в режиме нормальной эксплуатации, в мировой практике окончательно не разработан. Поэтому был использован следующий подход, подробно описанный в [6]. Для количественной оценки эффекта от проектных решений, принятых при разработке новых проектов АЭС с ВВЭР и направленных на снижение влияния факторов общности, все группы элементов, потенциально подверженных отказам по общей причине, разбиваются на две категории. В качестве групп резервированных элементов, в максимальной степени подверженных воздействию общих причин, при разработке ВАБ рассматриваются:

- идентичные по конструкции элементы, расположенные на одной и той же технологической позиции в различных каналах одной и той же системы безопасности, находящиеся в одинаковом режиме при нормальной эксплуатации и одинаковым образом изменяющие свое состояние при возникновении инициирующего события;

- идентичные резервированные элементы нормальной эксплуатации, расположенные в одном помещении и относящиеся к одной системе.

Для элементов, удовлетворяющих приведенным выше условиям, используются параметрические модели отказов по общей причине, обобщенные данные для которых приведены в литературных источниках.

Группы однотипных резервированных элементов, для которых проектными мерами исключены основные факторы общности, моделируются с использованием моделей отказов по общей причине с пониженными значениями их параметров. В частности, к ним относятся идентичные элементы разных каналов одной системы

безопасности, находящиеся в разных состояниях (положениях) при нормальной эксплуатации, но в одинаковых состояниях (положениях) после возникновения инициирующего события.

Для новых проектов АЭС с ВВЭР большое значение имеет выбор расчетного интервала моделирования работы систем при аварии. Как правило, в ВАБ, выполненных для действующих АЭС, указанный интервал ограничен 24 ч после возникновения инициирующего события. В новых проектах применены пассивные системы отвода тепла и залива активной зоны (гидроемкости второй ступени), что позволило существенно снизить вероятность тяжелого повреждения активной зоны на данном интервале времени. Однако время эффективной работы некоторых пассивных систем при авариях с течами теплоносителя первого контура ограничено (например, запасом воды в гидроемкостях второй ступени), поэтому необходимо показать, что увеличение расчетного интервала времени не приведет к существенному изменению полученных для периода 24 ч вероятностных показателей безопасности. Для достижения указанной цели был разработан специальный метод, позволяющий моделировать аварийные последовательности за пределами указанного интервала.

Основные положения этого метода состоят в следующем:

- выполняется анализ аварийных последовательностей моделей ВАБ на периоде 24 ч с успешным конечным состоянием с целью определения тех из них, которые учитывают работу систем с ограниченными ресурсами;
- уточняется фактическое время работы указанных систем (в зависимости от типа инициирующего события);
- определяются эффективные корректирующие меры, позволяющие возобновить неограниченное по времени выполнение функций безопасности в рассматриваемых условиях (подключение

дополнительных систем, восстановление оборудования и т.п.), и оценивается вероятность их успешной реализации;

– моделируется дальнейшая работа всех участвующих в преодолении аварии систем АЭС с целью определения вероятности повреждения активной зоны на расширенном интервале времени.

Применение данного подхода для обоснования безопасности Нововоронежской АЭС-2 показало, что при увеличении интервала моделирования работы систем при аварии свыше 24 ч учет только одной из возможных корректирующих мер позволяет ограничить относительное увеличение вероятности повреждения активной зоны значением $1,5 \cdot 10^{-7}$ за год.

К числу методических вопросов, решение которых было необходимо для учета в ВАБ особенностей как проекта Нововоронежской АЭС-2, так и других новых АЭС с ВВЭР, относится оценка вероятности событий с выводом во внеплановый ремонт оборудования каналов систем безопасности. К сожалению, для достижения данной цели нельзя использовать прямые статистические данные с эксплуатирующихся блоков по следующим причинам:

– различны структура и конфигурация систем безопасности (например, число каналов систем безопасности);

– различны режимы работы систем и стратегии проведения испытаний (в соответствии с проектными решениями часть систем безопасности выполняет также функции нормальной эксплуатации, и проверка работоспособности каналов выполняется путем их циклического включения в работу).

Из сказанного следует, что вероятности событий с неготовностью каналов систем безопасности в связи с их выводом ремонт необходимо определять расчётно-аналитическим путём на основе использования статистических данных по показателям надежности

элементов действующих АЭС, являющихся аналогами для применяемого в проектах оборудования.

При выполнении ВАБ для Нововоронежской АЭС-2 был разработан подход, позволяющий выполнить расчеты с учетом всех особенностей новых проектов. Подход предполагает рассмотрение полного эксплуатационного цикла оборудования, т.е. наряду с периодом ожидания он учитывает интервалы времени, в течение которых часть оборудования систем безопасности работает [7].

Результаты вероятностного анализа безопасности. Разработка вероятностной модели и проведение количественных расчетов было выполнено для нескольких вариантов. Среди варьируемых факторов рассматривались: время непрерывной работы энергоблока между перегрузками топлива (один или два года); режимы, в которых проводятся плановые ремонты систем безопасности (работа энергоблока на мощности или остановленный реактор); расчетный интервал моделирования работы систем при аварии (24 часа или более) и другие. Ниже результаты представлены для экономически обоснованного варианта с проведением плановых ремонтов оборудования систем безопасности в режиме работы энергоблока на мощности. Для сравнимости полученных результатов с ВАБ, выполненными для других АЭС, приведены оценки для варианта с годичным периодом между перегрузками и 24-часовым расчетным временем работы систем безопасности после возникновения инициирующего события.

Средние значения суммарной частоты повреждения активной зоны для 24-часового послеаварийного периода для всех рассматриваемых внутренних инициирующих событий и режимов эксплуатации, включая режимы останова, составило $4,3 \cdot 10^{-7}$ год⁻¹.

Наибольшие вклады в значение суммарной частоты повреждения активной зоны (см. рис. 1) вносят стояночные режимы с частичной или полной перегрузкой и внеплановые остановки для проведения ремонта петель первого контура. Это объясняется следующими причинами: во-первых, необходимостью управляющих действий персонала вследствие отсутствия автоматических сигналов на введение в действие систем безопасности и, во-вторых, консерватизмом, принятым при разработке ВАБ для стояночных режимов.

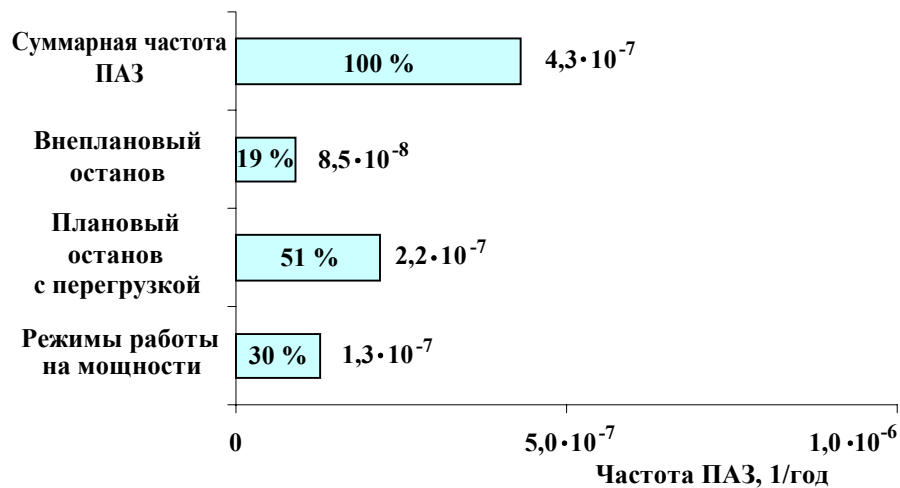


Рис. 1. Результаты количественных оценок частоты повреждения активной зоны, полученные для всех режимов эксплуатации блока

Иницирующие события, вносящие наибольший вклад в вероятность повреждения активной зоны в режимах с работающим и остановленным реактором, приведены на рис. 2 и 3.

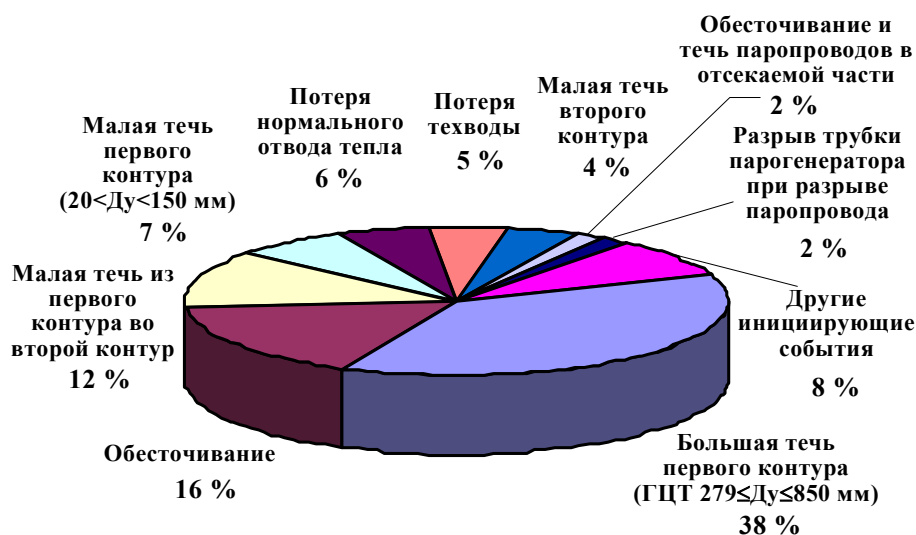


Рис. 2. Распределение вкладов в частоту повреждения активной зоны для работы блока на мощности



Рис. 3. Распределение вкладов в частоту повреждения активной зоны для стояночных режимов эксплуатации блока

Выводы. Результаты ВАБ демонстрируют высокий уровень безопасности разрабатываемого проекта АЭС-2006 для условий площадки Нововоронежской АЭС-2 и позволяют сделать вывод, что требования к проекту АЭС-2006 по вероятности тяжелых запроектных аварий выполняются со значительным запасом ($4,3 \cdot 10^{-7}$ против $1 \cdot 10^{-5}$ за год по нормативным требованиям).

Экспертиза надзорного органа установила, что ВАБ уровня 1 энергоблока №1 Нововоронежской АЭС-2 выполнен на приемлемом техническом уровне [8]. Ее выводы свидетельствуют об отсутствии недостатков, препятствующих сооружению энергоблока №1 Нововоронежской АЭС-2.

По результатам ВАБ уровня 1 можно сделать вывод о том, что высокий уровень безопасности достигнут за счет применения новых проектных решений для Нововоронежской АЭС-2:

- применение системы пассивного отвода тепла;
- применение автоматических сигналов течи из первого во второй контур;
- использование в одном канале системы аварийного и планового расхолаживания первого контура насосов, разных по конструкции и способных резервировать друг друга при низком давлении первого контура;
- применение концепции проекта с резервированием активного оборудования в рамках одного канала обеспечивающих систем с автоматическим запуском резерва и совмещение для этих систем функций нормальной эксплуатации и функций безопасности;
- применение концепции проекта с резервированием активного оборудования в рамках одного канала;
- проведение плановых ремонтов элементов и оборудования систем безопасности, доступных для ремонта при работе реактора на мощности.

Для дальнейшего развития технологии ВАБ применительно к новым проектам требуется решение следующих задач:

- разработка методологии получения вероятностно обеспеченных оценок вероятностных показателей безопасности, т.е. оценок, которые характеризуют определенные граничные значения показателей,

полученные с некоторым «вероятностным запасом», для обоснованного и эффективного применения результатов ВАБ;

– создание достоверных баз данных по показателям надежности оборудования, устройств и элементов, важных для безопасности, которые являются исходными данными для разработки логико-вероятностных моделей ВАБ и выполнения расчетов. В первую очередь, это проблема относится к впервые разрабатываемым элементам;

– разработка консолидированной методологии для определения показателей надежности пассивных элементов (корпусного оборудования, трубопроводов, теплообменников, строительных конструкций и т.п.). Решение этой задачи имеет особую важность для новых АЭС, проекты которых основываются на применении пассивных элементов и систем;

– разработка баз данных для моделирования отказов по общей причине большой размерности, когда число резервируемых элементов в группе превышает четыре элемента. Решение этой задачи особенно важно в процессе разработки ВАБ для вновь проектируемых АЭС при моделировании пассивных элементов (обратных клапанов, теплообменников, воздушных затворов и т.п.). Представляется актуальным вступление ОАО «Концерн Энергоатом» в существующую международную программу по созданию интегрированной базы данных в части событий с отказами по общей причине;

– разработка моделей для учета временного резервирования, т.е. имеющихся у персонала запасов времени, которые могут быть использованы им для восстановления критических функций безопасности при отказе систем безопасности с целью предотвращения тяжелых последствий;

– анализ надежности программного обеспечения. В настоящее время разработано достаточно большое число моделей оценки надежности программного обеспечения. Основной проблемой является поддержка этих моделей адекватными исходными данными.

Список литературы

1. **Генеральная схема** размещения объектов электроэнергетики до 2020 года. - Одобрена распоряжением Правительства Российской Федерации от 22 февраля 2008 г. № 215-р. – 260 с.
- НП-001-97 (ПНАЭ Г-01-011-97).** Общие положения обеспечения безопасности атомных станций. - М.: Госатомнадзор России, 1997 г. – 41 с.
2. **Административный регламент** исполнения Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору государственной функции по лицензированию деятельности в области использования атомной энергии. - М.: Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации, 2009. – 171 с.
3. **РБ-032-04.** Основные рекомендации по выполнению вероятностного анализа безопасности атомных станций. – М.: Федеральная служба по атомному надзору, 2004. – 11 с.
4. **РБ-024-02.** Рекомендации по выполнению вероятностного анализа безопасности атомных станций уровня 1 для внутренних иницирующих событий (при работе блока в режиме выработки электроэнергии во внешнюю сеть). - М.: Госатомнадзор России, 2002. – 24 с.
5. **Морозов В.Б., Токмачев Г.В.** Подход к моделированию отказов по общей причине в ВАБ проектов новых АЭС с ВВЭР-1000 // Известия ВУЗов. Ядерная энергетика. 2008, №4. - С. 31-41.
6. **Морозов В.Б., Федулов М.В.** Оценка вероятности состояний оборудования систем безопасности, связанных с выводом его в ремонт для проектов новых АЭС с ВВЭР - ОАО «Атомэнергопроект». Сборник трудов. Выпуск 9. Москва, 2009. - С. 24-28.

7. **ДНП-5-1220-2008.** Экспертное заключение о безопасности энергоблока № 1 Нововоронежской АЭС-2 на этапе сооружения. Часть 2. Концепция обеспечения безопасности. Системы и элементы АС. Анализ аварий. Вероятностный анализ безопасности. – М.: Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности (НТЦ ЯРБ), 2008. – 622 с.