

Вероятностный анализ безопасности для пожаров на АЭС Куданкулам в Индии

Г.Токмачев

Атомэнергопроект, Москва, Россия

Доклад на Международной конференции по надежности, безопасности и риску 2005, Мумбай, Индия 1-3 декабря 2005 года,

Proceedings of the 3rd International Conference on Reliability, Safety and Hazards ICRESH-05 Conference, Mumbai, India, December 2005, p.375-380

Аннотация

Вероятностный анализ безопасности (ВАБ) для пожаров был выполнен ФГУП Атомэнергопроект (Москва) для проектируемой АЭС Куданкулам в Индии. В ВАБ рассмотрены пожары при работе блока на полной мощности. Анализ пожарной опасности был важной частью пожарного ВАБ, который привел к изменениям в проекте. Были выполнены оценка частоты пожаров для всех критических мест АЭС, а также выявление иницирующих событий и зависимых отказов, вызванных пожаром. Суммарная оценка $9,1E-9$ в год составляет приблизительно 17% от частоты повреждения активной зоны реактора вследствие внутренних иницирующих событий. Описаны методология, использованная в анализе, результаты и выводы.

Введение

ВАБ для пожаров является полезным дополнением детерминистических анализов, на результатах которых основан проект и пожарная защита АЭС Куданкулам. Первая стадия пожарного ВАБ была выполнена на этапе выпуска предварительного отчета по оценке безопасности (ПООБ) в соответствии с контрактными обязательствами. С тех пор был выпущен ряд Российских стандартов по пожарной безопасности. В частности, в 2004 году Российский надзорный орган выпустил документ [1], который предписывает, чтобы пожарный ВАБ проводился на этапе ПООБ. Поэтому теперь это нормативное требование.

Особенности проекта АЭС

Проектные решения АЭС Куданкулам обеспечивают выполнение необходимых функций безопасности при пожаре и после его ликвидации. Эти решения включают:

- физическое разделение ограждающими конструкциями кабелей и систем, резервирующих выполнение функций безопасности;
- высокую степень огнестойкости противопожарных барьеров, ограждающих оборудование систем безопасности и нормальной эксплуатации;

- применение изоляции кабелей, не поддерживающей горение;
- использование пожаростойких схем на пультах управления, где резервируемое оборудование и кабели систем, требующиеся для достижения энергоблоком стабильных условий безопасного останова и поддержания их, расположены в непосредственной близости друг от друга.

В соответствии с установленными критериями противопожарные барьеры должны иметь минимальную огнестойкость 3 часа. Каждый из четырех каналов систем безопасности способен обеспечить отвод тепла от реактора, а также управление и контроль в полном объеме, если возникнет пожар в любом другом канале.

Наиболее важной особенностью проекта АЭС Куданкулам является использование пассивных принципов в работе систем безопасности. Например, аварийный отвод остаточных тепловыделений выполняется двумя резервируемыми системами разного принципа действия, одна из которых функционирует в пассивном режиме. С точки зрения противопожарной защиты наибольшее значение имеет система пассивного отвода тепла (СПОТ). Эта система состоит из четырех независимых контуров естественной циркуляции среды второго контура, предназначенных для долговременного отвода остаточных тепловыделений от реактора при потере всех источников электроснабжения, включая аварийные, как при плотном первом контуре, так и при течах теплоносителя первого контура. Отвод тепла от СПОТ к конечному поглотителю осуществляется воздухом также пассивным способом. СПОТ спроектирован таким образом, что эта система способна функционировать во всех режимах эксплуатации АЭС как независимо, так и в комбинации с другими системами безопасности и нормальной эксплуатации.

Методология

Примененная методология основана на руководствах МАГАТЭ [2,3] и российском опыте подобных работ, которые проводятся с середины 90-х годов [4-8].

Общепринятый подход к выполнению пожарного ВАБ был несколько изменен по сравнению с используемым для действующих АЭС. На начальной стадии проектирования сбор исходных данных, необходимых для выполнения пожарного ВАБ, был значительно осложнен из-за недостатка информации и документации, например, эксплуатационных инструкций. Некоторые типичные задачи, в частности, обход станции, было невозможно выполнить. Поэтому методологию, обычно используемую для выполнения пожарного ВАБ действующих АЭС, было необходимо откорректировать.

С одной стороны, неопределенность, связанная с результатами пожарного ВАБ, является относительно большой. С другой стороны, пожарный ВАБ является полезным инструментом, позволяющим получить ценную информацию о проекте АЭС. Проведение пожарного ВАБ на начальной стадии разработки проекта дает возможность модификации проекта для уменьшения последствий пожаров АЭС без значительных затрат. Поэтому детальный анализ пожаров может обеспечить предельно выгодный (в стоимостном выражении) подход к улучшению противопожарной защиты при проектировании АЭС. Такие выгоды невозможны при проведении пожарного ВАБ для действующих АЭС.

Анализ был выполнен путем нескольких итераций, т.е. определенные задачи необходимо было выполнять заново с целью уточнения после завершения некоторых последующих задач или внесения изменений в проект АЭС.

В рамках выполнения пожарного ВАБ были проведены анализы зданий и помещений (включая анализ пожарной опасности), их просеивание, определение событий, вызванных пожаром, систем, чьи функции могут быть нарушены из-за пожара, а также аварийных последовательностей, связанных с пожаром, расчет частоты повреждения активной зоны (ПАЗ), анализы неопределенности, чувствительности и значимости.

Следует заметить, что всесторонний ВАБ для внутренних пожаров будет выполнен на этапе рабочего проектирования, что обеспечит персонал АЭС обширной документацией для осуществления программы противопожарных работ.

Оценка пожарной опасности

Анализ пожарной опасности заключался во всесторонней оценке потенциальных источников возгорания на всей территории АЭС и влияния потенциальных пожаров на помещения, здания и сооружения АЭС важные для безопасности. Это было важной фундаментальной частью пожарного ВАБ. Она включала определение пожарных зон и отсеков, идентификацию источников пожарной опасности, анализ последствий пожара в помещениях и выявление вызываемых пожаром иницирующих событий. В рамках принятой концепции предполагалось, что все горючие материалы могут сгореть при пожаре в пожарном отсеке, не приводя к отказу ограждающих отсек противопожарных барьеров вне зависимости от работы систем пожаротушения.

Для оценки последствий пожаров АЭС была разбита на пожарные отсеки, которые совпадают с конструктивными элементами и противопожарными барьерами. Для оценки адекватности противопожарных мер в каждом отсеке и возможности распространения пожара в соседние помещения были использованы экспертные оценки и анализ опыта

эксплуатации. Все границы пожарного отсека, считающиеся противопожарными барьерами (стены, пол, потолок, двери, вентиляционные клапаны и проходки) подверглись тщательному анализу. Предполагалось, что пожар будет распространяться через противопожарные барьеры, если продолжительность стандартного пожара будет превышать их огнестойкость, выраженную в часах.

В случае высокой концентрации кабелей проектировалась дополнительная защита такого помещения. Таким образом, результатами детерминистического анализа явились распространенные физические изменения, такие как проектирование дополнительных противопожарных барьеров.

Примерами изменений проекта АЭС являются:

- Сооружение огнестойких стен между резервируемыми кабелями для того, чтобы разделить межоболочечное пространство на помещения меньшего размера.
- Внедрение охлаждения этих помещений.
- Замена избыточных пожарных дверей огнестойкими стенами в кабельных шахтах.
- Повышение огнестойкости некоторых пожарных дверей во вспомогательном реакторном здании.
- Прокладывание определенных кабелей в противопожарных коробах, чтобы исключить их контакт с другим оборудованием в пожарном отсеке.

В последнем случае огнестойкость покрытия коробов предусматривается такой же, как огнестойкость стен, ограждающих пожарный отсек.

При разработке ВАБ для внутренних пожаров использовался двухэтапный подход. На первом этапе был выполнен отбор критических или важных мест возгорания, а места, не являющимися значимыми с точки зрения риска, т.е. не содержащие жизненно важного оборудования, были исключены из дальнейшего рассмотрения. В процессе отбора были выявлены пожарные зоны, в которых размещено оборудование важное для безопасности или связанные с ним кабели и, следовательно, которые требуют дополнительного анализа. Технологические, электрические, кабельные помещения, а также содержащие системы управления, были включены в объем анализа. На втором этапе был проведен детальный анализ для важных пожарных сценариев.

При проведении детерминистического анализа пожарной опасности были затрачены значительные усилия на определение видов отказов оборудования, особенно в электрических контурах из-за отказов кабелей. Анализ контуров был выполнен для выявления силовых, управляющих и измерительных кабелей, которые необходимы для выполнения своих функций активными системами важными для безопасности. Рассматривались следующие виды отказов кабелей: короткое замыкание, замыкание на землю, обрыв кабеля и «ложная» запитка. Отказ последнего типа может привести к срабатыванию обесточенных цепей. При недостатке детальной проектной информации рассматривалась наихудшая ситуация.

Последствия пожара были определены в терминах инициирующих событий и отказов оборудования систем важных для безопасности, вызванных пожаром. Были идентифицированы аварийные последовательности, связанные с пожаром, которые необходимо анализировать. Предполагалось, что только независимые единичные пожары могут возникнуть в каком-либо месте АЭС.

На основании результатов выполненной работы все пожарные зоны были разбиты на следующие группы:

- Пожарные отсеки, пожар в которых ведет к возникновению проектного инициирующего события в комбинации с вызванными пожаром отказами в отдельном канале систем безопасности;
- Пожарные отсеки, пожар в которых ведет к возникновению проектного инициирующего события без вызванных пожаром отказов систем безопасности.
- Пожарные отсеки, пожар в которых не ведет к возникновению проектного инициирующего события, но отказы систем безопасности возможны.
- Пожарные отсеки, пожар в которых не может повлиять на системы важные для безопасности.

Анализ пожарной опасности показал, что при любом постулируемом пожаре имеется адекватная реакция систем АЭС, которая достаточна для достижения состояния безопасного останова.

Частота пожаров

Опыт эксплуатации 18 энергоблоков с реакторами ВВЭР-1000 в России и Украине был использован при проведении пожарного ВАБ в качестве статистической базы для оценки частот пожаров как функции источника возгорания.

Были рассмотрены источники пожаров, перечисленные ниже:

- турбина и турбогенератор;
- насосы;
- вентиляторы, компрессоры и кондиционеры;
- дизель-генераторы;
- арматура с электроприводом;
- кабели;
- щитовые устройства, такие как шкафы управления и управляющие панели;
- электрооборудование, такое как трансформаторы, инверторы и выпрямители;
- выключатели;
- маслобаки;
- перемещаемые источники.

Была собрана информация по нарушениям в работе АЭС, связанным с пожарами и возгораниями, в период с 1986 по 1999 гг. включительно. Период наблюдения составляет 201,8 календарных лет, включая 140,4 лет работы на мощности. Был проведен анализ имеющейся информации по каждому событию с целью оценки частоты будущих пожаров, связанных с возгоранием конкретных источников возгорания, на основе интенсивности возникновения подобных пожаров в прошлом. Частоты, представленные в Таблице 1 для определенных групп элементов, были оценены в размерности «на энергоблок АЭС».

Важно заметить, что с середины 80-х годов были предприняты значительные усилия, чтобы повысить пожарную безопасность АЭС с ВВЭР, которые включали применение огнестойких покрытий кабелей, повышение огнестойкости пожарных барьеров, модернизацию систем пожаротушения, улучшение эксплуатационных инструкций и программ подготовки персонала и т.п. Модернизация АЭС с ВВЭР-1000 привела к значительному снижению риска возникновения ядерно-опасных пожаров [9].

Поэтому оценки, представленные в Таблице 1, могут быть рассмотрены как консервативные для текущего состояния.

Информация по нарушениям в работе АЭС, вызванных пожарами, подтверждает тот факт, что пожары на АЭС с ВВЭР-1000 являются достаточно редкими, а те пожары, которые наблюдались, как правило, или имели небольшое влияние или вообще были незначимы с точки зрения безопасности. Поэтому частота возникновения пожаров в помещениях была оценена, используя данные не только по пожарам, но и по возгораниям на этих АЭС, которые могут рассматриваться как предшественники пожаров. Вероятность перерастания возгорания в пожар была определена по опыту эксплуатации.

Оценка частоты пожаров выполнена путем подсчета числа различных источников (доли общей массы – для кабелей). Результирующие частоты, полученные из опыта эксплуатации для отдельных видов оборудования, были распределены по отсекам АЭС Куданкулам пропорционально числу единиц оборудования в этих отсеках, т.е. эти частоты были «взвешены» по количеству и типам горючих материалов, расположенных в отсеках.

Таблица 1

Статистическая информация по пожарам на АЭС с ВВЭР-1000

Оборудование, ставшее источником возгорания	Частота больших пожаров, 1/год
Турбина, генератор, возбудитель	2,9E-3
Турбопитательный насос	8,3E-4
Электроприводной насос, включая возгорания масла	3,5E-3
Распределительные устройства, включая выключатели	1,4E-3
Электрооборудование (трансформаторы и др.)	1,4E-3
Кабели	1,1E-2
Перемещаемые источники	2,7E-4

Вероятностная модель

При выполнении пожарного ВАБ была использована вероятностная модель, разработанная в рамках ВАБ для внутренних инициирующих событий, которая была модифицирована, чтобы учесть вызванные пожаром отказы и влияние пожара на действия персонала АЭС. Модель пожарного риска включает все оборудование и кабели, необходимые для обеспечения функционирования требуемых систем.

Обработка деревьев событий и отказов и расчет ПАЗ вследствие пожаров проведены, используя программу Риск Спектрум, которая также была применена при проведении ВАБ для внутренних событий. Методология этой программы базируется на методе малых деревьев событий / больших отказов, широко используемом в мировой практике.

Методология модификации моделей деревьев событий/отказов с целью учета сценариев развития пожара включала следующие этапы:

- Проверку всех упрощений и допущений, принятых при разработке ВАБ для внутренних событий, для того, чтобы обосновать их применимость для оценки пожарного риска.
- Модификацию деревьев отказов путем включения в них логических ключей, чтобы обеспечить корректное моделирование отказов АЭС, вызванных пожаром.
- Введение дополнительных отказов, вызванных пожаром, в модель пожарного риска.
- Проверку моделирования отказов по общей причине, поскольку степень резервирования систем безопасности может быть снижена из-за пожара.
- Переоценку вероятностей ошибочных действий персонала, моделируемых на деревьях отказов и деревьях событий, учитывая воздействие пожара на рассматриваемые эксплуатационные сценарии.

При разработке вероятностной модели для пожаров были приняты следующие допущения:

- В момент возникновения пожара станция работает в режиме нормальной эксплуатации на мощности.
- Предполагается, что только единичный пожар возможен в любом помещении АЭС.

- Пожар не может происходить одновременно с независимыми авариями, имеющими низкую частоту, за исключением тех случаев, когда они являются следствием пожара.
- Оборудование, у которого возникает безопасный отказ при пожаре, постулируется как выполняющее возложенные на него функции безопасности.
- Случайные дополнительные отказы, не связанные с пожаром, считаются возможными и рассматриваются так же, как и в ВАБ для внутренних инициирующих событий.
- Пассивные механические элементы, такие как теплообменники, трубопроводная арматура и трубопроводы, которые могут подвергаться воздействию пожаров, сохраняют целостность и остаются барьерами между областями высокого и низкого давления.
- При проведении пожарного ВАБ используются консервативные допущения и игнорируются восстановительные действия персонала в охваченных пожаром помещениях, т.е. любое действие, которое требует доступа персонала в такие помещения, считается невозможным. В случае отказа элементов, не находящихся под воздействием пожара, их восстановление считается возможным.
- Вероятности ошибок персонала при выполнении любых действий при реагировании на инициирующее событие были увеличены в 10 раз по сравнению с ВАБ для внутренних инициирующих событий (кроме невозможных действий), чтобы учесть степень влияния пожара на операторов АЭС.
- Время выполнения функций безопасности предполагалось равным 24 часам.

Результаты

Суммарная частота ПАЗ, вызванная пожарами, оценена как $9,1E-9$ на реакторо-год, что в шесть раз меньше, чем ПАЗ, полученная при проведении ВАБ для внутренних инициирующих событий. На рисунке 1 показаны вклады в частоту ПАЗ от различных вызванных пожаром инициирующих событий. Было определено, что непредусмотренное открытие предохранительных / редуцированных клапанов является доминантным вкладчиком в частоту ПАЗ, так как вызванные пожаром электрические отказы (ложная запитка) в каком-либо месте пролегания трассы контрольных / силовых кабелей может

вызвать непредусмотренный перевод клапана в отказовое открытое положение, ведущее к возникновению инициирующего события при пожаре. Однако, поскольку механизмы, ведущие к ложному срабатыванию оборудования, недостаточно хорошо изучены, то значительная неопределенность связана со сценариями, включающими такие виды отказов. Для выявления специфических отказов в контурах / цепях, вызывающих изменение положения клапанов, будет проведен их детальный анализ контуров на этапе рабочего проектирования.

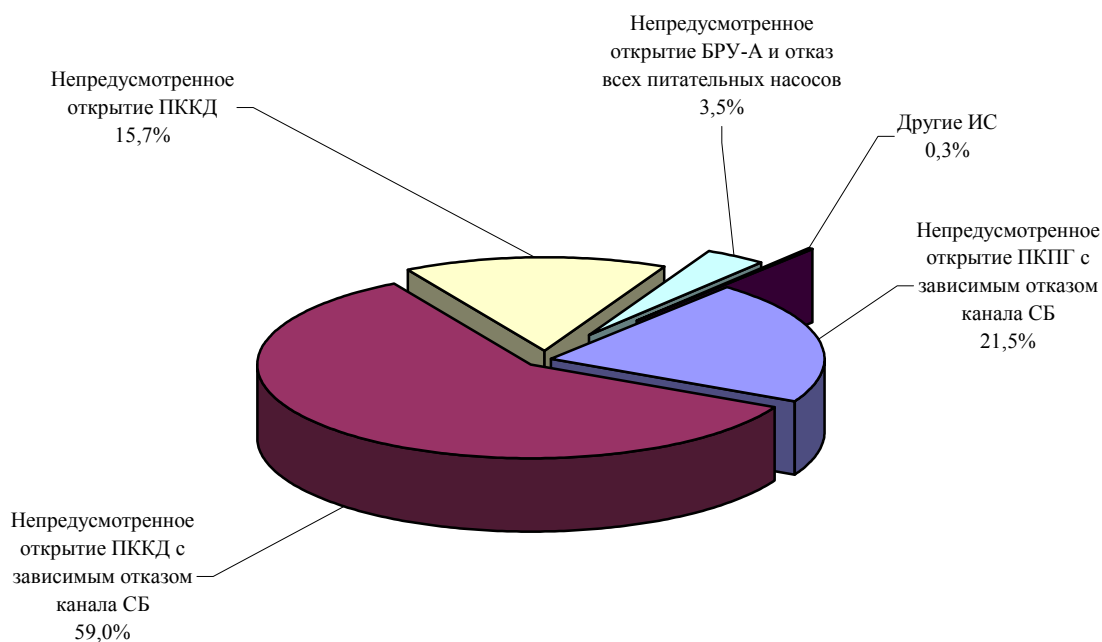


Рисунок 1 Процентный вклад в частоту повреждения активной зоны от инициирующих событий, вызванных пожаром на АЭС Куданкулам

Вклад в ПАЗ от пожаров в различных помещениях АЭС был также оценен. Наибольший вклад в частоту ПАЗ вносят пожары в зданиях дизель-генераторов UKD и соответствующих кабельных туннелях UKZ. Аварийные последовательности, включающие непредусмотренное открытие предохранительного клапана компенсатора давления и отказ канала систем безопасности, вносят приблизительно 59% в суммарную частоту ПАЗ. Аварийные последовательности, включающие непредусмотренное открытие предохранительного клапана парогенератора с его последующей не посадкой и отказ канала систем безопасности, вносят 21,5% в суммарную частоту ПАЗ.

Несмотря на то, что пожарный ВАБ был выполнен с консервативными допущениями, крайне низкое значение полученной частоты ПАЗ показывает, что

пассивные принципы, реализованные в проекте АЭС Куданкулам, обеспечивают надежную защиту станции от пожара.

Заключение

Результаты пожарного ВАБ демонстрируют принципиальную возможность достичь в проекте вероятностные критерии безопасности, сформулированные в требованиях по безопасности к проектам новых АЭС [10].

Несмотря на то, что количественные результаты пожарного ВАБ, выполненного на этапе ПООБ, связаны с большой неопределенностью, пожарный ВАБ, включающий анализ пожарной опасности, может обеспечить экономически эффективный подход к повышению противопожарной защиты.

Список литературы

1. Основные рекомендации по выполнению вероятностного анализа безопасности атомных станций, Федеральная служба по атомному надзору, РБ-032-02, Москва, 2004.
2. Анализ внутренних пожаров в вероятностных анализах безопасности атомных электростанций, МАГАТЭ, Вена, 1998.
3. Процедуры для выполнения вероятностного анализа безопасности атомных электростанций (уровень 1), МАГАТЭ, Вена, 1992.
4. В.Б. Морозов, Г.В. Токмачев. Вероятностный анализ безопасности АЭС с ВВЭР-1000/320 при пожаре. Сборник трудов международной конференции TOPSAFE'98, Валенсия, Испания, 15-17 апреля 1998 г.
5. Х.-А. Карретеро, Ю. Швыряев, Г.Токмачёв и др. Результаты ВАБ для 3-го энергоблока Нововоронежской АЭС, выполненного в рамках Программы ТАСИС-91. Сборник трудов международной конференции TOPSAFE'98, Валенсия, Испания, 15-17 апреля 1998 г.
6. В.Б. Морозов, Г.В. Токмачев, М.А.Азарм, А.Министер. Вероятностный анализ влияния пожаров на безопасный останов 3-го блока Смоленской АЭС. Сборник трудов международной конференции «Пожары и безопасность 2001», 12-14 февраля 2001 г., Лондон, Великобритания.
7. В.Б. Морозов, Г.В. Токмачев, А.Ю. Журавлев. Вероятностный и детерминистический анализы безопасности АЭС с реакторами ВВЭР-1000 при пожаре, Всероссийская

конференция «Практика выполнения ВАБ и его применение для АЭС с реакторами при проектировании и эксплуатации», 18-20 ноября 2002 г., Атомэнергопроект, Москва

8. В.Б. Морозов, Г.В. Токмачев. Анализ влияния пожаров и их последствий на безопасный останов реакторной установки ВВЭР-1000. Теплоэнергетика (Рус) - Thermal Engineering (Англ), Москва, 2005, № 1, стр. 47-50
9. С.П.Ноулен, М.Казарянц, Н.Сью, Х.У.Вудс Опыт, полученный из Fire Risk Insights from Nuclear Plant Fire Incidents. Сборник трудов международной конференции «Пожары и безопасность 2001», 12-14 февраля 2001 г., Лондон, Великобритания.”
10. Основные принципы безопасности для атомных электростанций. 75-INSAG-3 Rev.1 INSAG-12, МАГАТЭ, Вена, 1999