

К ВОПРОСАМ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПЕРЕЧНЕЙ ЗАПРОЕКТНЫХ АВАРИЙ НА АЭС С ВВЭР (ОБЗОР)

© 2010 г. В. В. Богодист, Н. И. Власенко, В. И. Скалозубов¹, А. В. Шавлаков

НАЭК «Энергоатом», Киев

¹Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Киев

Проведен анализ известных подходов при формировании перечней запроектных аварий с исходными внутренними событиями в условиях работы реактора на мощности. Предложен подход формирования перечней запроектных аварий на АЭС с ВВЭР по критическим конфигурациям систем, обеспечивающих выполнение необходимых функций безопасности.

Ключевые слова: водо-водяной энергетический реактор, запроектные аварии, исходные аварийные события, частота повреждения активной зоны.

Первоначальным этапом разработки мероприятий и алгоритмов управления запроектными авариями является идентификация соответствующего их перечня.

Возможные отказы элементов систем, обеспечивающих выполнение функций безопасности и/или ошибочные действия персонала в конечном итоге определяют многообразие аварийных последовательностей при одних и тех же исходных событиях, а соответственно и многочисленность перечня запроектных аварий. В связи с этим возникает вполне понятное стремление ограничить перечень учитываемых запроектных аварий на основе установленных вероятностных критериев безопасности и оценках вероятности возникновения разных запроектных аварий. Так, для части запроектных аварий степень ограничения радиационного воздействия обусловлена критерием радиационной безопасности: ограничивается величина предельного аварийного выброса таким образом, чтобы дозы облучения части населения (критической группы) на границе зоны планирования защитных мероприятий и за ее пределами не превышали установленных санитарных норм на все тело и на отдельные органы за первый год после аварии. П. 1.2.16 и 1.2.17 ранее действовавших ОПБ-88 и российских ОПБ-88/97 фактически определен вероятностный принцип в отношении разработки дополнительных технических решений по управлению запроектными авариями: в случае, если оцененная вероятность аварийного выброса для конкретной запроектной аварии не превышает 10^{-7} на реактор в год, то дополнительные технические решения по управлению этой аварией могут не разрабатываться.

Еще менее консервативный принцип формирования перечня запроектных аварий был определен в ОПБУ-2000 (п. 3.11): «...в число исходных событий не включаются другие события, для которых доказано, что их вероятность не превышает 10^{-6} на реактор в год...». В определенном отношении это условие соответствует известным рекомендациям IAEA – NRC [1, 2] по регулированию безопасности решений по внесению изменений в проект АЭС: при минимальной зависимости от базового значения частоты повреждения активной зоны (ЧПАЗ) и учете тенденции накопительного влияния разных причин приращений оценки суммарной ЧПАЗ допустимы небольшие приращения ЧПАЗ (не более 10^{-6} на реактор в год). В данном случае в качестве таких допустимых приращений ЧПАЗ выступают «дефициты» безопасности, вызванные исключением исходных событий запроектных аварий, имеющих вероятность возникновения не более 10^{-6} на реактор в год.

Основные ограничения применения нормируемых вероятностных критериев безопасности для формирования представительного перечня запроектных аварий, на наш взгляд, заключается в следующем:

1. Вероятностный принцип исключения из перечня запроектных аварий не является достаточным. Те же ОПБ-88/97 (п. 1.2.14) фактически устанавливает и детерминистский принцип: если запроектная авария не исключена на основе внутренних свойств самозащи-

ценности реактора и принципов его устройства, то она должна быть рассмотрена на предмет разработки мер по управлению такой аварии, *независимо от вероятности ее возникновения*.

2. Исключение дополнительных технических решений и мероприятий для запроектных аварий с вероятностью возникновения меньше критериев безопасности не означает отсутствие необходимости организационных мероприятий и действий персонала по управлению такими авариями [11]. Управление запроектными авариями является одним из уровней глубокоэшелонированной защиты и исключение алгоритмов управления не-доминантных аварий фактически приводит к снижению безопасности (пусть даже к малому), что недопустимо нормами и правилами ядерной энергетики Украины, так как изменения эксплуатационной документации по управлению и ликвидации авариями относится к модификациям, важным для безопасности (п. 1.12, 1.6.1 [4]).

3. Исключение отдельных запроектных аварий по установленным критериям безопасности не учитывает «накопительный эффект», связанный с тем, что исключение нескольких исходных событий с вероятностью менее оценки критериев безопасности может привести в общей сумме к превышению допустимого критерия. Так, для примера в ОАБ [5] для выбора доминантных запроектных аварий был использован вероятностный принцип (см. выше) при условии вклада в ЧПАЗ более 1 %. При суммарной оценке ЧПАЗ $4,7 \cdot 10^{-5}$ на реактор в год это условие соответствует критерию исключения одной запроектной аварии, имеющей вероятность возникновения менее 10^{-6} на реактор в год, но суммарный вклад всех исключенных запроектных аварий (в [5] около 22 %) превышает этот критерий.

4. Отсутствует однозначная определенность в численных оценках нормируемого критерия исключения из перечня запроектных аварий. Так, например, в ОПБ-88/97 и ВАБ российских АЭС с ВВЭР [6] используется критерий по вероятности предельного аварийного выброса не более 10^{-7} на реактор в год; в ОПБУ-2000 определена вероятность исходного события менее 10^{-6} на реактор в год, а в ОПБУ-2008 подобные условия вообще исключены; в ОАБ [5] критерием является не превышение вклада в ЧПАЗ более 10^{-6} на реактор в год, а в международной практике – 10^{-9} на реактор в год [7].

Определенные рекомендации по формированию перечня запроектных аварий, необходимого для разработки мер по управлению такими авариями, содержатся в российских требованиях к отчету по обоснованию безопасности [8]: перечень запроектных аварий должен содержать аварии, приводящие к превышению доз облучения персонала и населения и нормативов по выбросам и содержанию радиоактивных продуктов в окружающей среде, установленных для проектных аварий; перечень должен содержать представительные сценарии групп аварий с одинаковым откликом станционных систем, требуемых для предотвращения развития аварий. Конечно, эти указания сужают круг запроектных аварий, входящих в перечень, однако перечень остается достаточно неопределенным [9 - 11].

В руководящем документе [12], содержащем основные требования к отчетам по анализу безопасности, определен следующий перечень запроектных аварий на АЭС с ВВЭР:

полное обесточивание (потеря питания переменным током от внешних и внутренних источников, включая резервную дизель-электростанцию - РДЭС);

малая течь с отказом системы аварийного охлаждения зоны высокого давления (САОЗВД);

малая течь с отказом САОЗВД и системы аварийного охлаждения зоны низкого давления (САОЗНД);

малая течь с полным обесточиванием;

средняя течь с отказом САОЗВД;

средняя течь с отказом САОЗВД и САОЗНД;

большая течь с отказом САОЗВД;

большая течь с отказом САОЗВД и САОЗНД;

большая течь с отказом спринклерных систем;

отказ аварийной защиты реактора;

потеря питательной воды с отказом аварийной подпитки парогенератора (ПГ);
течь из 1-го во 2-й контур (отрыв крышки коллектора ПГ) с незакрытием паросбросных устройств;

разрыв паропроводов (в отсекаемой и неотсекаемой части).

В этот перечень вошли запроектные аварии, которые наиболее существенно могут повлиять на безопасность энергоблока. Однако практическое применение такого перечня для разработки руководств (инструкций) по управлению запроектными авариями связано со следующими ограничениями:

1. Перечень запроектных аварий [12] был недостаточно обоснован результатами углубленного анализа безопасности энергоблоков с ВВЭР. В частности, при формировании перечней запроектных аварий не учтены отказы всех критических систем и функций безопасности, характерных для каждой группы аварий.

2. Исходные события перечня запроектных аварий не были идентифицированы ни по признакам, ни по группам, объединяющим исходные события (например, для аварий с потерей теплоносителя).

В разработанных отчетах по анализу безопасности (ОАБ) серийных энергоблоков АЭС Украины с ВВЭР-1000 указанный перечень запроектных аварий был использован за основу и проанализирован на предмет дополнения доминантными вкладчиками в вероятностные оценки суммарной ЧПАЗ. При этом для выбора доминантных аварийных последовательностей использовался критерий вклада в ЧПАЗ (более 1 %). Дополнительные к [12] аварийные сценарии для включения в перечень запроектных аварий (на примере ОАБ [5]) следующие:

малая течь 1-го контура с невыполнением функции управления давлением 1-го контура;

средняя течь из 1-го контура во 2-й с отказом расхолаживания по 2-му контуру;

малая течь 1-го контура с отказом системы продувки-подпитки и систем 2-го контура;

неизолируемый разрыв трубопроводов 2-го контура с отказом отвода тепла по 2-му контуру;

переходные процессы, приводящие к срабатыванию аварийной защиты с отказом функции отвода тепла по 2-му контуру;

малая течь с невыполнением функции поддержания запаса теплоносителя 1-го контура;

обесточивание энергоблока с отказом аварийной подпитки ПГ;

малая течь из 1-го контура во 2-й с отказом функции изоляции аварийного ПГ.

В международной практике широкое распространение при формировании перечней исходных событий запроектных аварий/аварийных ситуаций получил подход, основанный на методологии вероятностного анализа безопасности (ВАБ), например, [3, 6, 7 и др.]. Так, в работе [6] при разработке противоаварийных процедур/инструкций для АЭС с ВВЭР-1000 (блоки № 1 и 2 Калининской АЭС, блоки № 1 - 4 Балаковской АЭС, блоки № 3 - 5 Нововоронежской АЭС, блоки № 1 - 4 Кольской АЭС, блок № 1 Волгодонской АЭС) формирование перечня исходных событий осуществлялось в два этапа. На первом этапе были исключены режимы, вероятность реализации которых достаточно мала (не более 10^{-7} на 1 реактор/год). На втором этапе путем анализа оставшихся режимов были исключены те, в которых не ожидается срабатывание аварийной защиты или срабатывание систем безопасности. Окончательный перечень режимов запроектных аварий, объединенный по группам, следующий [6]:

1. Увеличение отвода тепла 2-м контуром.

1.1. Непреднамеренное открытие предохранительного клапана (ПК) ПГ с последующей его непосадкой.

1.2. Непреднамеренное открытие быстродействующей редуцирующей установкой сброса пара в конденсатор (БРУ-К) или быстродействующей редуцирующей установкой сброса пара в атмосферу (БРУ-А) с их последующей непосадкой.

- 1.3. Спектр разрывов паропроводов внутри и вне контайнмента вплоть до максимального диаметра парового трубопровода.
- 1.4. Разрыв паропровода в изолируемой от ПГ части с незакрытием быстродействующим запорно-отсечным клапаном (БЗОК) на 2, 3 или 4 ПГ.
 - 1.5. Ложное открытие 2, 3 или 4 БРУ-А.
 - 1.6. Нарушение нормального отвода тепла по 2-му контуру (например, закрытие БЗОК на одном ПГ) с незакрытием после открытия ПК ПГ и неизоляцией аварийного ПГ по подаче питательной воды.
 - 1.7. Обесточивание с незакрытием после открытия 2, 3 или 4 БРУ-А.
 - 1.8. Ложное открытие всех ПК ПГ.
 2. Уменьшение отвода тепла 2-м контуром.
 - 2.1. Обесточивание с отказом системы подачи аварийной питательной воды аварийными электропитательными насосами (АЭПН) в ПГ.
 - 2.2. Непреднамеренное закрытие отсечного клапана на паропроводе.
 - 2.3. Потеря собственных нужд электропитания АЭС.
 - 2.4. Потеря нормального расхода питательной воды (за исключением разрыва трубопроводов питательной воды).
 - 2.5. Полное прекращение подачи питательной воды.
 - 2.6. Разрывы трубопровода питательной воды вне герметичной оболочки (ГО), в ГО на участке между обратным клапаном и ПГ, в ГО на участке до обратного клапана.
 - 2.7. Нарушение нормального отвода тепла по 2-му контуру (например, закрытие БЗОК на одном ПГ) с отказом на открытие обоих ПК на одном ПГ.
 - 2.8. Обесточивание с отказом на открытие обоих ПК на одном ПГ.
 - 2.9. Обесточивание с частичным отказом подачи аварийной питательной воды АЭПН в ПГ и отказом на открытие линии аварийного газоудаления.
 - 2.10. Закрытие всех БЗОК.
 3. Уменьшение расхода теплоносителя 1-го контура.
 - 3.1. Частичная потеря принудительного расхода теплоносителя реактора.
 - 3.2. Аварийное отклонение частоты в сети.
 - 3.3. Полная потеря принудительного охлаждения реактора в исходном режиме с быстрым падением частоты (до 4 Гц/с).
 - 3.4. Мгновенное заклинивание вала главного циркуляционного насоса (ГЦН).
 - 3.5. Разрыв вала ГЦН.
 - 3.6. Самопроизвольное закрытие главной запорной задвижки (ГЗЗ) на одной петле.
 - 3.7. Закрытие ГЗЗ на всех петлях.
 4. Аномалии реактивности и распределения мощности.
 - 4.1. Неуправляемый вывод группы органов регулирования системы управления и защиты (ОР СУЗ) в подкритическом состоянии или при пуске на низком уровне мощности.
 - 4.2. Нарушение в системах подпитки и борного регулирования, приводящее к уменьшению концентрации борной кислоты в теплоносителе реактора.
 - 4.3. Неправильное включение циркуляционной петли.
 - 4.4. Выброс сборки регулирующих стержней с разрывом чехла СУЗ.
 5. Увеличение количества теплоносителя 1-го контура.
 - 5.1. Непреднамеренное срабатывание системы аварийного охлаждения зоны.
 - 5.2. Ложный впрыск в компенсатор давления от системы подпитки и борного регулирования с температурой воды 20 °С.
 6. Уменьшение количества теплоносителя 1-го контура.
 - 6.1. Непреднамеренное открытие и непосадка импульсного предохранительного устройства компенсатора давления (ИПУ КД).
 - 6.2. Компенсированная течь 1-го контура внутри контайнмента.

- 6.3. Авария с течью теплоносителя в результате спектра разрывов труб диаметром до 100 мм включительно в границах давления 1-го контура.
 - 6.4. Авария с течью теплоносителя в результате спектра разрывов труб диаметром от 100 до 850 мм.
 - 6.5. Малая течь с незакрытием изолирующих клапанов на проходках вентиляционных систем с отказом и без отказа спринклерной системы.
 - 6.6. Большая течь с незакрытием изолирующих клапанов на проходках вентиляционных систем с отказом и без отказа спринклерной системы.
 - 6.7. Большая течь с отказом спринклерной системы.
 - 6.8. Большая течь с отказом гидроаккумуляторов.
 - 6.9. Большая течь с неотсечением азота в гидроаккумуляторах.
 - 6.10. Большая течь с блокировкой рециркуляции теплоносителя.
 - 6.11. Малая течь с отказом САОЗ ВД.
 - 6.12. Средняя течь с отказом САОЗ ВД.
 - 6.13. Малая течь с отказом систем нормального и аварийного отвода тепла по 2-му контуру.
 - 6.14. Малая течь с блокировкой рециркуляции теплоносителя.
 - 6.15. Малая течь с отказом спринклерной системы.
 7. Течи из 1-го контура во второй.
 - 7.1. Разрыв трубки ПГ.
 - 7.2. Отрыв крышки коллектора ПГ 1-го контура.
 - 7.3. Отрыв крышки коллектора ПГ 1-го контура с незакрытием после открытия БРУ-А на аварийном парогенераторе.
 - 7.4. Отрыв крышки коллектора ПГ 1-го контура с незакрытием БЗОК на аварийном ПГ.
 - 7.5. Отрыв крышки коллектора ПГ 1-го контура с отказом САОЗ ВД.
 - 7.6. Разрыв коллектора парогенератора по 1-му контуру.
 - 7.7. Отрыв крышки коллектора ПГ 1-го контура с отказом работы САОЗ ВД и САОЗ НД.
 - 7.8. Отрыв крышки коллектора ПГ 1-го контура с отказом линии аварийного газоудаления.
 - 7.9. Отрыв крышки коллектора ПГ 1-го контура с отказом на закрытие ГЗЗ на аварийной петле.
 8. Течи из 1-го контура за пределы контайнмента
 - 8.1. Разрыв трубопровода системы продувки 1-го контура за пределами защитной оболочки (ЗО) с незакрытием отсечной арматуры на трубопроводе продувки.
 - 8.2. Разрыв трубопровода системы продувки 1-го контура за пределами ЗО с отказом САОЗ ВД.
 9. Комбинированные течи.
 - 9.1. Спектр разрывов паропроводов внутри и вне контайнмента вплоть до максимального диаметра парового трубопровода с разрывом одной или нескольких трубок в ПГ.
 - 9.2. Отрыв крышки коллектора ПГ 1-го контура и последующее повреждение крышки ПГ по 2-му контуру.
- Отмечая высокую степень представительности приведенного перечня исходных событий, необходимо отметить ряд замечаний:
- 1) использованный принцип формирования перечней запроектных аварий по вероятностным критериям безопасности не во всех случаях был обоснован. Так, в группе «уменьшение количества теплоносителя 1-го контура» приведено событие «Большая течь с отказом ГЕ». Однако для аварий с большой течью критической конфигурацией для отвода остаточных тепловыделений является также САОЗ НД, которая в перечне [6] отсутствует. Учитывая, что вероятность отказа САОЗ НД больше чем вероятность отказа пассивной части САОЗ,

следует ожидать и большее значение вероятности повреждения активной зоны при исходном событии «Большая течь с отказом ГЕ». Для средних течей 1-го контура должны быть также учтены исходные события с отказами САОЗ НД и локализирующих СБ. Для малых течей должны быть учтены события с отказами системы подпитки-продувки 1-го контура;

2) целый ряд режимов сформулированы как проектные аварии. Например, события "Отрыв крышки коллектора ПГ с незакрытием БРУ-А" или "БЗОК на аварийном ПГ" и т.п. попадают под термин проектных аварий: исходное аварийное событие с учетом единичного отказа [13].

Более обоснованным и перспективным является подход формирования перечней за-проектных аварий по критическим (минимальным) конфигурациям систем (ККС), обеспечивающих выполнение критических функций безопасности (КФБ). Суть подхода заключается в том, что рассматриваются только те исходные события и их последствия, которые связаны с отказами ККС и КФБ, так как именно эти события могут привести к превышению пределов безопасности, связанных с тяжелым повреждением топлива и/или выбросам радиоактивных продуктов в окружающую среду. Соответствующие наборы ККС и КФБ для каждого исходного события аварии или группы таких аварий определяются по результатам углубленного анализа безопасности вероятностными и детерминистскими методами. События и их последствия, несвязанные с отказами ККС и КФБ не могут приводить к событиям с тяжелым повреждением топлива и/или выбросам радиоактивных продуктов за пределы физических барьеров безопасности, и поэтому могут быть исключены из рассмотрения при управлении за-проектными авариями. При этом следует отметить, что в исключенный перечень могут входить и исходные события за-проектных аварий, имеющие относительно высокую вероятность возникновения, но несвязанные с отказами ККС КФБ.

Так, например, для исходного аварийного события при двухстороннем разрыве реакторного контура (ИСА S1) на АЭС с ВВЭР ККС, обеспечивающих выполнение КФБ, являются системы гидроемкостей САОЗ и насосов низкого давления САОЗ. В таком случае для этой группы ИСА S1 необходимый перечень за-проектных аварий: ИСА S1 с отказом ГЕ САОЗ и/или САОЗ НД. Отказы других систем не являются критическими для обеспечения безопасного конечного состояния.

Таким образом, подход формирования перечней событий для управления за-проектными авариями по ККС КФБ позволяет:

1. Существенно сократить общий перечень всего многообразия исходных событий и их последствий для формирования алгоритмов управления за-проектными авариями без нарушения установленных критериев безопасности и без возникновения дефицитов безопасности, вызванных исключением за-проектных аварий, имеющих определенный (пусть и относительно малый) вклад в суммарные показатели безопасности.

2. Отказаться от традиционного, но не вполне обоснованного подхода формирования перечней за-проектных аварий по относительному вкладу в суммарные показатели безопасности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *NRC. An Approach for Using PRA Assessment in Risk – Informed Decisions on Plant Specific Changes to the licensing Basis // Regulatory Guide 1.177 US NRC. – 1998.*
2. *Applications of PRA for NPP / IAEA. TECDOC.V1, 1999.*
3. *Антропов В.Н., Букринский А.М., Кузнецов М.В. О необходимости разработки рекомендаций к составлению руководства по управлению за-проектными авариями на АС / НТЦ ЯРБ Госатомнадзора РФ. – М., 2000.*
4. *НП 306.2.106-2005. Требования к проведению модификаций ядерных установок и порядку оценки их безопасности / ГКЯР Украины, 2005.*
5. *Хмельницкая АЭС. Энергоблок № 2. Отчет по анализу безопасности (ОАБ). - Т. 19. ВАБ. Часть 3. Количественная оценка – 43-923.203.254.ОБ.19.03-2003.*

6. *Шкаровский А.Н., Аксенов В.И., Колеватых А.П. и др.* Расчетно-техническое обоснование противоаварийных процедур АЭС с ВВЭР-1000» // Изв. вузов. Ядерная энергетика. - 2007. - № 3, вып. 1. – С. 54 - 63.
7. *Власкин В., Кривошеин Г., Дизик Б. и др.* Разработка руководства по управлению запроектными авариями для реакторов РБМК-1500 // Энергетика - Т. 53, № 2, 2007.
8. *Требования к содержанию отчета по обоснованию безопасности атомной станции с реактором типа ВВЭР (ТС ООБ), ПНАЭ Г-01-036-95, 1995.*
9. *Bukrinsky A.,* Development of Deterministic Approach to the Beyond Design Basis Accident Management in Application to NPP units with WWER-1000. SAM-99 Information Exchange Forum on "Severe Accident Management", 18 - 22 Oct. 1999, Obninsk, Russia.
10. *Antropov V., Bukrinsky A., Shvyryaev Yu.* Development of Methodology and List of BDBA for WWER-1000 for Quantitative Analysis. SAM-99 Information Exchange Forum on "Severe Accident Management", 18 - 22 Oct. 1999, Obninsk, Russia.
11. *Антропов В.Н., Букринский А.М., Кузнецов М.В.* О необходимости разработки рекомендаций к составлению руководства по управлению запроектными авариями на АС / НТЦ ЯРБ Госатомнадзора РФ. – М., 2000.
12. *Руководящий нормативный документ "Требования к содержанию отчета по анализу безопасности АС с реакторами типа ВВЭР на стадии выдачи разрешения на ввод в эксплуатацию", КНД 306.302-96.*
13. *НП 306.2.141-2008.* Загальні положення безпеки АС (ОПБУ-2008).

ДО ПИТАНЬ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПЕРЕЛІКІВ ЗАПРОЕКТНИХ АВАРІЙ НА АЕС З ВВЕР (ОГЛЯД)

В. В. Богодист, М. І. Власенко, В. І. Скалозубов, О. В. Шавлаков

Проведено аналіз відомих підходів при формуванні переліків позапроектних аварій з висхідними внутрішніми подіями в умовах роботи реактора на потужності. Запропоновано підхід формування переліків позапроектних аварій на АЕС з ВВЕР по критичних конфігураціях систем, що забезпечують виконання необхідних функцій безпеки.

Ключові слова: водо-водяний енергетичний реактор, позапроектні аварії, вихідні аварійні події, частота пошкодження активної зони.

FOR THE IDENTIFICATION LISTS-STANDARD ACCIDENTS AT NPPS WITH VVER (REVIEW)

V. V. Bogodist, M. I. Vlasenko, V. I. Skalozubov, A. V. Shavlakov

In this paper we analyzed the known approaches in the formation of lists of design accidents with the original internal developments in terms of reactor power. The approach of forming the lists of design accidents at nuclear power plants with VVER configurations on critical systems to ensure implementation of necessary security features.

Keywords: water-moderated reactor, beyond design based accident, initiating event, core damage frequency.

Поступила в редакцію 09.11.09