

Применение принципа безопасного отказа при принятии решений на основе комплексного риск-ориентированного подхода

А.В. Любарский, Г.В. Токмачев

Аннотация

В статье рассматривается, как проектировщики АЭС разрабатывают концепцию «безопасного отказа» и соответствующих «безопасных» состояний. Основное внимание уделено отказам обеспечивающих систем и потенциальному дуализму их последствий. Приводятся также примеры из блока 1 АЭС Фукусима Дайичи и других АЭС. Для определения «безопасных» состояний сравнивается применение детерминированных и вероятностных подходов. Предлагается комплексный процесс принятия решений о рисках для решения вопросов, связанных с «отказобезопасным» проектированием на этапе проектирования систем установки.

1. Введение

Концепция «отказобезопасного» проектирования практикуется проектировщиками АЭС с начала развития ядерной промышленности. Требование о внедрении концепции для важных для безопасности компонентов включено в Стандарты безопасности МАГАТЭ. Концепция «отказобезопасного» проекта охватывает несколько аспектов, которые необходимо решать комплексным образом.

Хотя концепция «безопасного отказа» считается удовлетворительной во многих проектах АЭС, публикации подробного руководства по практическому применению принципов отказобезопасности является относительно редкими; это может привести к неоптимальным проектным решениям. Авария на АЭС «Фукусима» предоставила несколько уроков, которые необходимо изучить в области отказоустойчивых проектных соображений. Поэтому сбалансированный и систематический подход к «отказобезопасным» проектам проекта очень полезен.

2. Определение

Глоссарий МАГАТЭ [1] не дает определения термина «Отказобезопасный проект», хотя сам принцип упоминается в нескольких публикациях по безопасности МАГАТЭ, например, Требование 26 стандарта безопасности МАГАТЭ SSR-2/1 [2] устанавливает, что: «Концепция отказобезопасного проектирования должна быть соответствующим образом включена в проект систем и элементов, важных для безопасности». Параграф 5.41 SSR-2/1 разъясняет: «системы и элементы, важные для безопасности, должны проектироваться с расчетом на отказобезопасное поведение в надлежащих

случаях, с тем чтобы их отказ или отказ вспомогательного устройства не препятствовал выполнению предусмотренной функции безопасности». В соответствии с [2] следующее определение может быть дано термину: «Отказобезопасный проект» - это концепция проектирования систем и элементов, важных для безопасности, что их отказ или отказ от их обеспечивающих систем не препятствуют выполнению намеченных функций безопасности".

В публикациях по безопасности МАГАТЭ нет четких указаний о том, как должно выполняться упомянутое выше требование, и, в частности, нет указаний о том, когда состояния отказов для системы или конкретного компонента следует рассматривать как «безопасные»:

- состояние, которое предотвращает несанкционированное срабатывание системы и, следовательно, может препятствовать выполнению функции системы

ИЛИ

- состояние, которое способствует выполнению основной функции системы, и, соответственно, увеличивает вероятность возникновения несанкционированных срабатываний системы или невозможности прекращения работы системы, когда это требуется.

Может сложиться впечатление, что ответ уже дан в параграфе 5.41 [2] - «безопасное» состояние отказа - это состояние, которое «не мешает выполнению надлежащей функции безопасности», правильное решение может быть менее очевидным в практических приложениях и требует тщательного инженерного анализа, включая оценку риска. Неправильный ответ на вопрос и, в свою очередь, неправильное техническое решение может привести к серьезным недостаткам в разработке системы и, наконец, может оказать значительное негативное воздействие или даже может стать основной причиной серьезной аварии на АЭС.

В следующих разделах статьи будет показано, что тяжелые последствия аварии на АЭС «Фукусима Дайичи-1» частично, если не полностью, были вызваны неправильным применением принципа «отказоустойчивости».

3. Применение принципа «безопасного отказа» на блоке 1 АЭС «Фукусима-Дайичи»

Очевидно, что «отказобезопасный проект» был реализован в проекте блока «Фукусима Дайичи-1», но из-за того, что цунами отключило большинство систем безопас-

ности, последствия конкретных применений этого принципа были выявлены при попытке использовать изолирующий конденсатор и систему вентиляции контейнента. Ниже приводится описание этих применений на блоке 1 АЭС «Фукусима Дайичи». Следует отметить, что цель описания заключается не в критике проекта систем АЭС или конкретных действий, предпринятых персоналом АЭС, а в анализе влияния применяемого «отказобезопасного» принципа проектирования на доступность этих систем в аварийной ситуации, вызванной внешним событием, произошедшим на АЭС «Фукусима-Дайичи».

3.1 Система изолирующего конденсатора

На рис. 1 представлена принципиальная схема системы изолирующего конденсатора блока № 1 АС Фукусима-Дайичи (далее блок 1), взятой из [3]. Описание попытки использования этой системы в ходе аварии взято из отчета [4]. Дополнительная информация об использовании данной системы была получена также из [3] и [5].

Как видно из схемы на рис. 1, в исходном состоянии вся арматура системы находится в открытом состоянии за исключением арматуры на линиях связи с холодной петлей контура рециркуляции реактора (задвижки МО-3А и МО-3В). В аварийной ситуации подключение/отключение системы к контуру охлаждения реактора осуществляется путем открытия/закрытия этой арматуры.

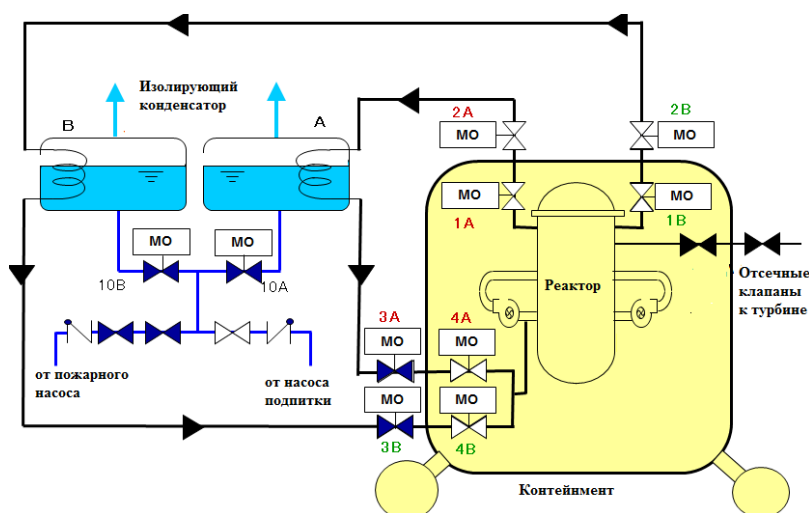


Рис. 1. Схема системы изолирующего конденсатора

Согласно [3-5], после прохождения землетрясения, приведшего к потере внешнего электроснабжения АЭС, оба изолирующих конденсатора обеспечивали допустимую скорость расхолаживания реактора (55 °С в час). Еще через 17 минут операторы отключили оба конденсатора. Операторы пришли к выводу, что для обеспечения отвода

тепла достаточно одного конденсатора А и дальнейший теплоотвод осуществлялся некоторое время путем периодического открытия/закрытия задвижки МО-3А. Такая операция была проделана три раза в интервале времени между 15:10 и 15:34 11 марта 2011 года (т.е. после возникновения потери внешнего электроснабжения АЭС, вызванного землетрясением, но до прихода волны цунами).

Последнее закрытие арматуры произошло в 15:34 практически непосредственно перед приходом цунами, которое привело к потере системы аварийного электроснабжения (как дизель-генераторов, так и аккумуляторных батарей). В отсутствие электроснабжения от аккумуляторных батарей система могла быть подключена только вручную по месту.

К сожалению, несмотря на многочисленные попытки, операторы не смогли подключить систему. Например, по информации из [4] в 18:18 операторы сумели открыть обе задвижки МО-3А и МО-3В, но признаков работы изолирующих конденсаторов обнаружить не удалось.

Факт отсутствия работы системы косвенно подтверждается и тем, что замеры уровня воды в конденсаторах, выполненные ТЕРСО в ноябре 2011 года [5], показали, что в конденсаторе А уровень воды был около 65% (при номинальном уровне 80%), а в конденсаторе В – 85%. То есть вода из конденсатора А была частично использована в первые минуты до закрытия арматуры, а из конденсатора В – не использована вообще.

В отчете [5] указывается много причин, почему работа изолирующих конденсаторов оказалась неэффективной, наиболее реальной из которых представляется следующая: *задвижки 1А и 4А, расположенные внутри контейнента, которые, в соответствии с проектом АС, должны закрываться по блокировке при потере электроснабжения от аккумуляторных батарей, выполнили эту функцию.*

Вероятно, такое техническое решение было принято с целью предотвращения ложного включения системы и расхолаживания реактора при случайной потере электроснабжения от шин постоянного тока.

Последствия этого решения проявились в ситуации, когда система изолирующего конденсатора осталась последней системой, способной предотвратить повреждение активной зоны на блоке 1, но задвижки перешли в наиболее «безопасное» положение – закрытое в соответствии с примененным принципом «безопасного отказа». Надо отметить, что согласно [5], невозможность снижения давления в реакторе из-за недоступности изолирующего конденсатора привела к неэффективности использования насосов системы пожаротушения.

3.2 Система вентиляции защитной оболочки

На рис. 2 показана схема системы вентиляции защитной оболочки блока 1 АЭС «Фукусима-Дайичи», взятая из [4]. Дальнейшее описание использования этой системы, основывается также на информации из [4].

Через 9,3 часа после начала аварии начальник смены АЭС дал указание операторам на организацию вентиляции защитной оболочки. Как выяснилось, на станции не была разработана процедура выполнения этой операции в условиях полного обесточивания АЭС.

Тем не менее, операторы сумели определить порядок выполнения действий по организации сдувки из защитной оболочки, включая определение необходимых действий по открытию арматуры вручную.

В частности, они выяснили, что электроприводной клапан МО-210 на общей линии сдувки перед разрывным диском и малый пневмоприводной клапан АО-90 на линии сдувки и камеры снижения давления (wetwell) защитной оболочки могут быть открыты вручную и по месту (см. рис. 2).

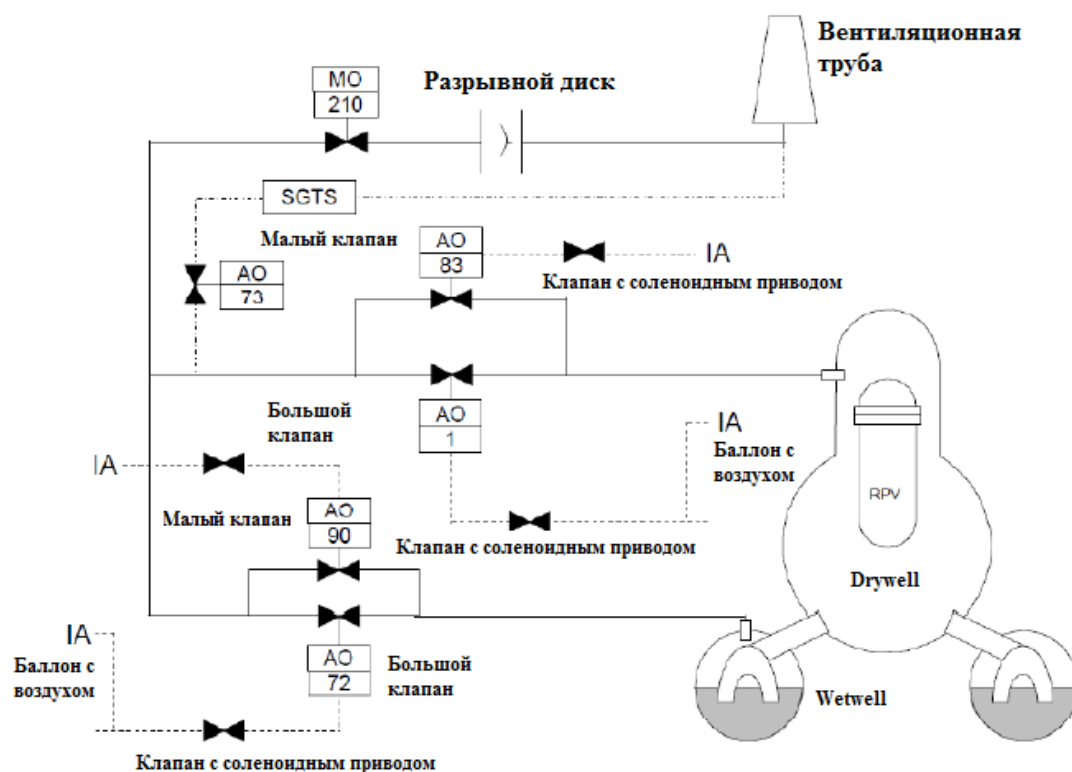


Рис. 2. Схема системы вентиляции контейнента блока 1 АЭС «Фукусима-Дайичи»

В 09:03 12 марта 2012 года (18,2 часа после начала аварии) клапан МО-210 (см. рис. 2) был открыт, но открыть пневмоприводной клапан АО-90 вручную оказалось невозможным из-за высокого расположения клапана и фактической его недоступности.

В 10:17 12 марта (19,5 часа после начала аварии) операторы сделали очередные попытки открыть клапан АО-90 дистанционно. Были установлены временные батареи для обеспечения клапана АО-90 постоянным током, и предприняты три попытки открыть клапан в надежде, что остаточного давления в системе сжатого воздуха будет достаточно для его открытия и удержания в открытом состоянии. Результаты анализа радиационного уровня показали, что, вероятно, при одной из попыток клапан действительно был открыт, но быстро закрылся (*по-видимому, из-за исчерпания давления в системе сжатого воздуха*).

Поэтому дальнейшие усилия были направлены на открытие большого пневмоприводного клапана АО-72 на линии сдувки из wetwell, который не мог быть открыт вручную, и для его открытия требовался как постоянный ток, так и источник (временный) сжатого воздуха.

В результате персоналу удалось обеспечить как питание постоянным током, так и подачу сжатого воздуха от временного компрессора. Большой пневмоприводной клапан АО-72 был открыт в 14:00 (23,2 часа после начала аварии), что обеспечило разрыв диска и, в конечном счете, сдувку из контейнента.

По видимому, к этому времени, из-за высокого давления в контейненте значительный объем водорода уже вышел в здание реактора через уплотнения крышки контейнента, что и привело к взрыву водорода, разрушению здания реактора и нарушению работ по обеспечению подачи воды в реактор.

Аналогично предыдущему случаю, можно предположить, что именно принцип «безопасного отказа», примененный в проекте системы вентиляции контейнента, привел к ситуации, когда арматура системы оставалась закрытой, или закрывалась после открытия при потере обеспечивающих систем. Такое техническое решение, по-видимому, было принято с целью предотвратить неконтролируемый выход радиоактивных продуктов через систему вентиляции при потере сжатого воздуха в системе пневмоприводных клапанов.

Последствия этого решения, в конечном счете, привели к 14-часовой задержке по обеспечению снижения давления в защитной оболочке и в корпусе реактора, выходу значительного количества водорода в здание реактора, взрыву водорода и более тяжелому сценарию протекания аварии.

3.3 Охраняемые ворота АЭС

Согласно [4], после прохождения цунами из трех пожарных машин на АЭС «Фу-

кусима-Дайичи» только одна оставалась работоспособной. Эта машина стояла около блоков 3 и 4. Из-за того, что одна из дорог была заблокирована тяжелой емкостью с маслом (занесенной цунами), оставался только один путь подъезда машины к блоку 1 – через охраняемые ворота между блоками 2 и 3. Однако из-за потери энергоснабжения электронный замок на воротах был заблокирован в закрытом положении¹, и потребовалось несколько часов [6], чтобы сломать замок и обеспечить перемещение пожарной машины к блоку 1. Это также привело к значительной задержке в обеспечении подачи воды в реактор блока 1.

Это еще один пример применения принципа «безопасного отказа», приведшего к тому, что в кризисной ситуации единственный доступный путь для подъезда пожарной машины оказался заблокированным из-за потери энергоснабжения.

4. Проблемы существующих подходов к определению безопасного состояния

Как видно из информации, приведенной в разделе 3, конкретное применение принципа безопасного отказа на АЭС «Фукусима-Дайичи» значительно ухудшило возможности персонала по управлению аварией. После аварии на АЭС «Фукусима-Дайичи» представляется очевидным, что «отказобезопасное» положение задвижек на линиях изолирующего конденсатора должно быть принято как «не открытое» при обесточивании; что арматура с пневматическим приводом на линиях вентиляции контейнмента должны открываться при потере электроснабжения и сжатого воздуха; что электронный замок на охраняемых воротах не должен блокироваться при обесточивании. Однако это не совсем так: закрытие при отказе клапанов системы изолирующего конденсатора, скорее всего, было определено с целью избежать переходных процессов с захлаживанием, если бы произошли отказы в работе отдельных шин постоянного тока (например, в случае локального пожара); «отказовое» положение системы вентиляции контейнмента было направлено на предотвращение непреднамеренного вентилирования контейнмента и неконтролируемых выбросов радиоактивных материалов; и очевидно, что ворота безопасности не должны обеспечивать легкий доступ для террористов при обесточивании.

В следующем разделе статьи рассматривается процесс определения «безопасного» состояния системы.

¹ Блокировка замка в закрытом положении, по нашему мнению, являлась следствием применения принципа «безопасного отказа» с точки зрения обеспечения физической защиты АЭС.

4.1 Детерминистический подход к определению безопасного состояния

В настоящее время определение безопасного состояния, в лучшем случае, основывается на результатах инженерного анализа систем и использовании детерминистических принципов, если такой анализ вообще выполняется. Фактически, применение принципа «безопасного отказа» может просто декларироваться (в противном случае требование 26 из [2] не будет удовлетворено), причем в качестве примера обычно приводится проект системы аварийной защиты, срабатывание которой происходит при потере энергоснабжения.

Однако, подход к определению безопасного состояния не так очевиден для других систем, важных для безопасности, в том числе потому, что должна учитываться не только необходимость выполнения основной функции системы, но и требование на предотвращение ложных срабатываний системы или других негативных воздействий, например:

- система защиты первого контура от превышения давления должна надежно выполнять функцию предотвращения превышения давления первого контура, но при этом не должна приводить к течам первого контура из-за ложного открытия при потере обеспечивающих систем;
- система автоматического пожаротушения не должна приводить к нарушению в работе АЭС из-за ложных срабатываний при потере обеспечивающих систем, но в то же время должна обеспечить подавление пожара, при возникновении требования;
- система отсечных клапанов на главных паропроводах атомной станции реактором типа ВВЭР должна надежно обеспечивать отсечение места разрыва паропровода или аварийного парогенератора (при течах трубчатки и коллекторов ПГ), но вероятность ложного отсечения паропровода должна быть минимизирована для предотвращения внеплановых остановов блоков;
- система пассивного впрыска (гидроемкости) в активную зону должна обеспечивать залив активной зоны в случае большой течи первого контура, но при этом необходимо обеспечить и надежную изоляцию системы после исчерпания воды в гидроемкостях для предотвращения попадания азота в реактор.

Выбор безопасного состояния системы (оборудования системы) фактически сводится к инженерному анализу того, как повлияет на безопасность АЭС отказ системы

выполнить основную функцию, либо отказ выполнить вторичную функцию системы².

Очевидно, что меры, направленные на повышение надежности выполнения основной функции системы, могут снижать надежность выполнения вторичной функции, и наоборот, причем, как правило, существует множество конкурирующих факторов:

а) Необходимость выполнения намеченной функции, например:

а. Вводить воду в реактор при течи теплоносителя (система гидроемкостей)

б. Открыть предохранительные клапаны в условиях повышенного давления (система защиты первого контура от превышения давления)

с. Пассивно удалить тепловыделения (изолирующий конденсатор)

д. Уменьшить давление в защитной оболочке (система вентиляции контейнента)

е. Изолировать защитную оболочку (система изоляции)

ИЛИ

б) Необходимость выполнения требований к системе после завершения намеченной функции, например:

а. Изолировать линии впрыска для предотвращения проникновения азота в активную зону после опустошения гидроемкостей (система гидроемкостей при охлаждении)

б. Предотвратить потерю теплоносителя после уменьшения давления или ложного открытия (система защиты первого контура от превышения давления)

с. Предотвратить переохлаждение реактора (изолирующий конденсатор)

д. Предотвратить неконтролируемый выброс из защитной оболочки (система вентиляции контейнента).

е. Предотвратить исходные события, вызванные ложным закрытием клапанов системы изоляции (система изоляции контейнента)

В зависимости от того, что более подходит для достижения целей безопасности всей АЭС, «безопасное» состояние отказа выбирается либо для выполнения предполагаемой системной функции (первичной функции), либо для требования к системе (вторичная функция).

В качестве примера для упомянутых выше систем состояния, которые обычно

² Под основной функцией мы понимаем функцию, для выполнения которой система спроектирована (например, залив активной зоны пассивной системой САОЗ), под вторичной функцией понимается требование к системе, связанное с предотвращением негативного влияния на безопасность АС, не вызванного непосредственно невыполнением основной функции (например, вторичной функцией является изоляция гидроемкостей пассивной системы САОЗ после их опорожнения).

принимаются как «безопасные» в случае потери обеспечивающих систем, приведены в таблице 1.

Таблица 1. Типичные безопасные состояния арматуры при потере обеспечивающих систем

Система	Основная функция системы (арматуры)	Положение арматуры при работе АС на мощности	Проектное положение арматуры при потере обеспечивающих систем	Аргументы в пользу выбора проектного положения арматуры при потере обеспечивающих систем	Влияние перехода арматуры в проектное положение при потере обеспечивающих систем	
					На основную функцию системы	На вторичную функцию системы
Система пассивного залива активной зоны ВВЭР	Залив активной зоны при течах первого контура	Открытое положение	Открытое положение быстродействующих запорных задвижек на гидроемкостях САОЗ (гидроемкостях первой ступени АЭС с ВВЭР), предназначенных для отключения емкости САОЗ при снижении в ней уровня жидкости до предельной величины для предотвращения попадания азота в активную зону	Обеспечение надежного выполнения основной функции залива активной зоны	Повышение надежности выполнения основной функции системы - залива активной зоны.	При потере обеспечивающих систем невозможно выполнение вторичной функции предотвращения попадания азота в активную зону.
Воздушная система пассивного отвода тепла АЭС с реактором типа ВВЭР	Отвод остаточных тепловыделений и расхолаживание реакторной установки	Закрытое положение шиберов на воздуховодах	Открытое положение шиберов на воздуховодах	Обеспечение надежного выполнения основной функции при обесточивании АС	Повышение надежности выполнения основной функции системы при обесточивании АС	Способствует несанкционированному срабатыванию системы при потере обеспечивающих систем (что приводит к отводу части мощности РУ через СПОТ, т.е. к снижению экономических показателей АЭС).
Система защиты первого контура от превышения давления АС с реактором типа ВВЭР	Предотвращение превышения допустимого давления	Закрытое положение импульсных клапанов системы и системы в целом.	Закрытое положение импульсных клапанов системы и системы в целом.	Предотвращение срабатывания системы, приводящего к течам первого контура	Не влияет на выполнение основной функции системы, которая обеспечивается пассивно и при отсутствии обеспечивающих систем путем принудительного открытия импульсных клапанов давлением	Снижает вероятность несанкционированного срабатывания системы из-за потери обеспечивающих систем.

Система	Основная функция системы (арматуры)	Положение арматуры при работе АС на мощности	Проектное положение арматуры при потере обеспечивающих систем	Аргументы в пользу выбора проектного положения арматуры при потере обеспечивающих систем	Влияние перехода арматуры в проектное положение при потере обеспечивающих систем	
					На основную функцию системы	На вторичную функцию системы
					первого контура	
Быстродействующие запорно-отсечные клапаны на паропроводах острого пара АС с реактором типа PWR	Отсечение парогенераторов по пару при течи второго контура или при течи из первого во второй контур	Закрытое положение управляющих клапанов с электроприводом и открытое состояние быстродействующих запорно-отсечных клапанов	Закрытое положение управляющих клапанов с электроприводом (не меняют положение) и открытое состояние быстродействующих запорно-отсечных клапанов	Обеспечение надежного выполнения основной функции является вторичным по сравнению с предотвращением возникновения исходного события из-за возможного ложного срабатывания клапана	Препятствует выполнению основной функции, т.е. при потере обеспечивающих систем быстродействующие клапаны остаются открытыми, и не выполняют функцию отсечения паропровода	Предотвращает несанкционированное срабатывание системы при потере ОС, что приводит к снижению частоты исходных событий нарушением теплоотвода по второму контур, потенциально приводящих к повреждению активной зоны
Быстродействующие запорно-отсечные клапаны на паропроводах острого пара АС с реактором типа BWR	Отсечение реактора при течах второго контура	Закрытое положение управляющих клапанов и открытое состояние быстродействующих запорно-отсечных клапанов	Открытое положение управляющих клапанов с электроприводом, приводящее к закрытию быстродействующих запорно-отсечных клапанов	Обеспечение надежного выполнения основной функции является первичным, по сравнению с предотвращением возникновения исходного события из-за возможного ложного срабатывания клапана.	Способствует выполнению основной функции, т.е. при потере обеспечивающих систем быстродействующие клапаны отсекают реактор от турбины.	Приводит к несанкционированному срабатыванию системы при потере обеспечивающих систем и, как следствие, к нарушению теплоотвода от ректора.
Изоляция защитной оболочки ВВЭР	Предотвращение радиоактивных выбросов	Различные положения, в зависимости от конкретных трубопроводов, проходящих через защитную оболочку	Не изменяется (как правило)	Обеспечение надежного выполнения основной функции является вторичным по сравнению с предотвращением возникновения исходного события из-за несанкционированного срабатывания клапана (например, потеря ГЦН при закрытии	Препятствует выполнению основной функции по предотвращению выбросов.	Предотвращает несанкционированное срабатывание системы, что приводит к повышению экономических показателей АЭС и снижению частоты исходных событий, потенциально приводящих к повреждению активной зоны.

Система	Основная функция системы (арматуры)	Положение арматуры при работе АС на мощности	Проектное положение арматуры при потере обеспечивающих систем	Аргументы в пользу выбора проектного положения арматуры при потере обеспечивающих систем	Влияние перехода арматуры в проектное положение при потере обеспечивающих систем	
					На основную функцию системы	На вторичную функцию системы
				клапанов системы охлаждения).		
Изолирующий конденсатор (BWR)	Отвод тепла от активной зоны	Открытое положение клапанов, находящихся в контейнменте, закрытое положение клапана, находящегося вне контейнмента	Закрытое положение клапанов, находящихся как в контейнменте, так и вне его.	Предотвращение несанкционированного срабатывания системы, приводящего к резкому снижению температуры и давления реактора, температурным нагрузкам на трубопроводы и оборудование, а также к снижению экономических показателей АЭС	Препятствует выполнению функции системы по отводу тепла из первого контура	Способствует предотвращению несанкционированного срабатывания системы при потере обеспечивающих систем
Изолирующий конденсатор (ESBWR) [7]	Отвод тепла от активной зоны	Открытое положение клапанов, находящихся в защитной оболочке, закрытое положение клапана, находящегося вне контейнмента	Открытое положение клапанов, находящихся как в контейнменте, так и вне ее.	Обеспечение надежного выполнения функции отвода тепла.	Повышает надежность выполнения функции системы по отводу тепла из первого контура	Вызывает несанкционированное срабатывание системы при потере обеспечивающих систем, приводящее к расхолаживанию РУ, температурным нагрузкам на трубопроводы и оборудование, а также к снижению экономических показателей АЭС
Система снижения давления под защитной оболочкой (BWR)	Предотвращение превышения допустимого давления в контейнменте.	Закрытое положение пневмоприводных клапанов на линии фильтруемого газоудаления из контейнмента	Закрытое положение пневмоприводных клапанов на линии фильтруемого газоудаления из контейнмента	Обеспечение надежного выполнения функции предотвращения несанкционированных выбросов радиоактивных веществ.	Препятствует выполнению функции системы или приводит к невозможности ее выполнения	Предотвращает неконтролируемые выбросы радиоактивных веществ из контейнмента (до момента разрушения защитной оболочки из-за переопрессовки при тяжелых авариях)
Система автома-	Тушение по-	Закрытое поло-	Открытое положение	Обеспечение надеж-	Способствует выпол-	Приводит к ложным сраба-

Система	Основная функция системы (арматуры)	Положение арматуры при работе АС на мощности	Проектное положение арматуры при потере обеспечивающих систем	Аргументы в пользу выбора проектного положения арматуры при потере обеспечивающих систем	Влияние перехода арматуры в проектное положение при потере обеспечивающих систем	
					На основную функцию системы	На вторичную функцию системы
тического пожаротушения	жара в помещениях	жение электроприводных клапанов на линии подачи пожарной воды	электроприводных клапанов на линии подачи пожарной воды	ного выполнения функции тушения пожара	нению функции тушения пожара	тываниям системы и может приводить к повреждению оборудования, важного для безопасности

В таблице 1 показано, что не всегда выбранное «безопасное» состояние отказа приводит к повышению надежности выполнения намеченной функции, во многих случаях решение таково, что предполагаемая первичная системная функция подвергается опасности, но соблюдение требований к системам (вспомогательная системная функция) лучше поддерживается (например, для предотвращения ложного срабатывания или увеличения возможности прекращения выполнения системной функции).

Очевидно, что у проектировщика всегда есть причины для выбранного «безопасного» состояния отказа; однако, не всегда эти причины имеют всеобъемлющую основу.

4.2 Вероятностный подход

Вероятностные анализы безопасности (ВАБ) в принципе позволяют более точно ответить на вопрос, какие состояние элемента при отказе обеспечивающих систем лучше с точки зрения безопасности АЭС. Следует отметить, что в зависимости от определения целей безопасности для некоторых систем (например, системы вентиляции контейнента) могут быть получены разные ответы:

а) если цели безопасности определены с точки зрения частоты повреждения активной зоны, функция вентиляции контейнента становится более важной ИЛИ

б) если они определены в терминах частоты большего выброса, возможность более прекращения вентиляции может быть более важной.

Наиболее представительные оценки получаются при использовании полномасштабного ВАБ уровня 2, включающего в объем анализа все внутренние исходные события, внутренние и внешние воздействия, все уровни мощности и режимы останова. В этом случае можно получить вспомогательную информацию для принятия решения о безопасных состояниях отказов для систем и элементов, смоделированных в ВАБ. Процесс выбора безопасного состояния для конкретной системы при использовании ВАБ может быть сведен к моделированию альтернативных безопасных состояний и выбору такого из них, которое обеспечивает наилучшее достижение вероятностных целей безопасности. Однако, существует очень ограниченный опыт использования ВАБ для этой цели, также некоторые важные проблемы не рассматриваются в ВАБ (например, техническая осуществимость принятого решения), что ограничивает его использование для таких целей. Следовательно, существует потребность в принятии решений на основе комплексного риск-ориентированного подхода (ПРКРП).

5. Использование комплексного риск-ориентированного подхода

5.1 Общая характеристика методологии ПРКРП

В 2011 году под эгидой МАГАТЭ был опубликован отчет INSAG-25 [8]. Задачей данного документа являлось донести до понимания международной ядерной общественности (проекти-

ровщиков, изготовителей, операторов АЭС, научно-технических организаций и регулирующих органов) каким образом концепция риска может быть эффективно использована для принятия сложных технических и организационных решений, связанных, в том числе, с обеспечением безопасности АЭС. Рекомендованный в документе принятия решений на основе комплексного риск-ориентированного подхода (ПРКРП) позволяет обеспечить наглядность и обоснованность решений сложных задач, требующих учета нескольких ключевых факторов, в том числе, имеющих принципиально различную природу.

Это позволяет сделать процесс принятия решения структурированным и документированным, в частности, обеспечивает наглядность того, как тот или иной фактор, важный для конкретной проблемы, был учтен в процессе принятия решения.

Основная цель процесса ПРКРП заключается в том, чтобы обеспечить уверенность в оптимальности принимаемого решения по вопросам, влияющим на безопасность объекта использования атомной энергии (например, атомной станции). INSAG-25 указывает следующие ключевые элементы процесса ПРКРП, которые должны быть приняты во внимание при рассмотрении решений:

- требования норм и стандартов;
- эксплуатационный опыт;
- результаты детерминистических анализов и выполнение детерминистических принципов;
- результаты вероятностных анализов;
- организационные факторы;
- факторы, связанные с физической защитой АЭС;
- другие факторы (например, ожидаемые радиационные дозы связанные с реализацией того или иного решения, результаты современных исследований, экономические факторы).

Рассматривая все факторы, имеющие отношение к проблеме, и учитывая важность конкретных факторов для конкретного решения, можно достичь сбалансированного решения. Также важно, чтобы процесс ПРКРП обеспечивал высокую прозрачность и достигнутое решение будет понятно не только специалистам, вовлеченным непосредственно в решение проблемы, но и любым грамотным инженерам. Детали процесса принятия решения с использованием ПРКРП кратко проиллюстрированы ниже с помощью схемы, показанной на Рис. 3 (в частности, процесс ПРКРП может быть применен к проблеме безопасного отказа, рассмотренной выше). Согласно этой схеме, необходимо принимать во внимание аспекты, важные как для регулирующего органа, так и для эксплуатирующей организации при принятии решения по любой проблеме (например, при определении «безопасного» состояния).

На основании рассмотрения проблемы с учетом этих аспектов формируется предварительный список возможных решений (опции). Каждая из опций проверяется на соответствие основным элементам принятия решения: требования нормативных документов и стандартов, опыт эксплуатации, детерминистические и вероятностные требования, требования физической защиты, экономические требования (например, не превышение определенных затрат), требования эксплуатационной безопасности (например, ограничение доз персонала при обслуживании) и т.п. На основании такого рассмотрения выбираются опции решения, соответствующие в той или иной мере основным элементам. Если ни одна из предварительно определенных опций не удовлетворяет соответствующим требованиям – определяются дополнительные опции решений. Если одна или несколько опций удовлетворяют основным элементам – выбирается одна опция, для которой степень соответствия элементам наиболее высока. Именно эта опция предлагается к внедрению и после внедрения контролируется состояние показателей, характеризующих данную опцию (показатели определяются на основании элементов, учитываемых при определении опции – например, соответствие целевым показателям риска, финансовые затраты на ее реализацию и поддержание и т.п.).

Риск-информативный подход позволяет не только выбрать состояние «безопасного отказа», так, чтобы обеспечить достижение требуемых показателей риска (вероятности повреждения активной зоны, вероятности радиоактивных выбросов и т.п.), но и удовлетворить детерминистические требования к системе, блоку и АЭС в целом (например, не превышение допустимого числа циклов срабатывания системы, установленное проектантом и производителем реакторной установки).

При этом, в процессе принятия решения будут учтены как организационно-технические факторы (сложность изготовления, контроля и техобслуживания, опыт эксплуатации аналогичных систем, новейшие разработки в области проектирования систем, требования нормативных документов и документов МАГАТЭ и т.п.), так и другие факторы (экономическая целесообразность, снижение доз обслуживающего персонала и т.п.).

5.2 ПРКРП и отказобезопасный проект на этапе проектирования

Существующие подходы к применению принципа «отказобезопасности» при проектировании систем в настоящее время не имеют прозрачности и обоснованности. Определение неправильного «безопасного» отказавшего состояния может привести к серьезным проблемам безопасности АЭС. Однако, это можно свести к минимуму, если на этапе проектирования используется процесс ПРКРП.

Важно отметить, что подход, использующий некоторые особенности ПРКРП в применении принципа «отказобезопасности», применяется в некоторых странах. Пример такого подхода приведен ниже и на основе информации из [9]. В соответствии с [9] все неисправности систе-

мы/элементов сгруппированы по следующим признакам неисправности: «Безопасный или опасный» и «Выявлено или не раскрыто», как показано в Таблице 2 (извлечено из [9] с редактированием).

Таблица 2 Группировка безопасных, опасных, выявленных и нераскрытых неисправностей

	Тип	
	Выявлено	Не раскрыто
Безопасно	Группа I Отказ либо не влияет на функцию безопасности, либо генерирует сигнал срабатывания систем безопасности	Группа II Отказы в этой группе не препятствуют выполнению функции безопасности, но становятся явными только тогда, когда завершается конкретная проверка или операция. Готовность системы может быть нарушена.
Опасно	Группа III Отказы в этой группе частично или полностью подавляют функцию безопасности. Преимуществом является то, что операторы получают информацию о наличии такого отказа вскоре после его появления. Необходимо искать обоснование того, можно ли устранить отказ в результате перепроектирования и анализировать адекватность средств выявления отказа.	Группа IV Отказы в этой группе частично или полностью блокируют функцию безопасности без указания каких-либо признаков в то время, когда это произошло. Такие отказы должны быть выявлены путем преднамеренных мер по периодическому осуществлению функции безопасности - например, проверки на соответствие требованиям. Эти отказы считаются наибольшей угрозой для функции безопасности

Решение о принятии проекта системы безопасности обычно принимается, когда система/элементы имеют только виды отказа I и II группы, в то время как система безопасности со слишком большим количеством режимов отказа IV группы, вероятно, не будет приемлемой. Другие моменты, которые можно было бы принять во внимание, чтобы рассмотреть адекватность проектирования системы:

- i. Процент показателей «безопасного отказа» (например, достаточный, когда более 90% от общей частоты отказов)
- ii. Общая интенсивность опасных отказов, например:
 - Достаточно, когда доля безопасной и общей интенсивности отказов составляет значительно меньше 90%, но общая опасная интенсивность отказов низкая
 - Неприемлемо, когда слишком высокая.
- iii. Общая частота безопасных отказов (например, чрезмерная частота сама по себе может стать проблемой безопасности).

Однако комплексное применение подхода ПРКРП требует рассмотрения организационных и технических факторов разного характера сбалансированным и взвешенным образом, напри-

мер:

а) трудности, связанные с производством, тестированием и обслуживанием, опытом работы с аналогичными системами,

б) последние достижения в разработке систем,

с) требования применимых стандартов (включая требования МАГАТЭ),

д) экономическая целесообразность;

д) сокращение доз облучения до обслуживания личного и т. д.

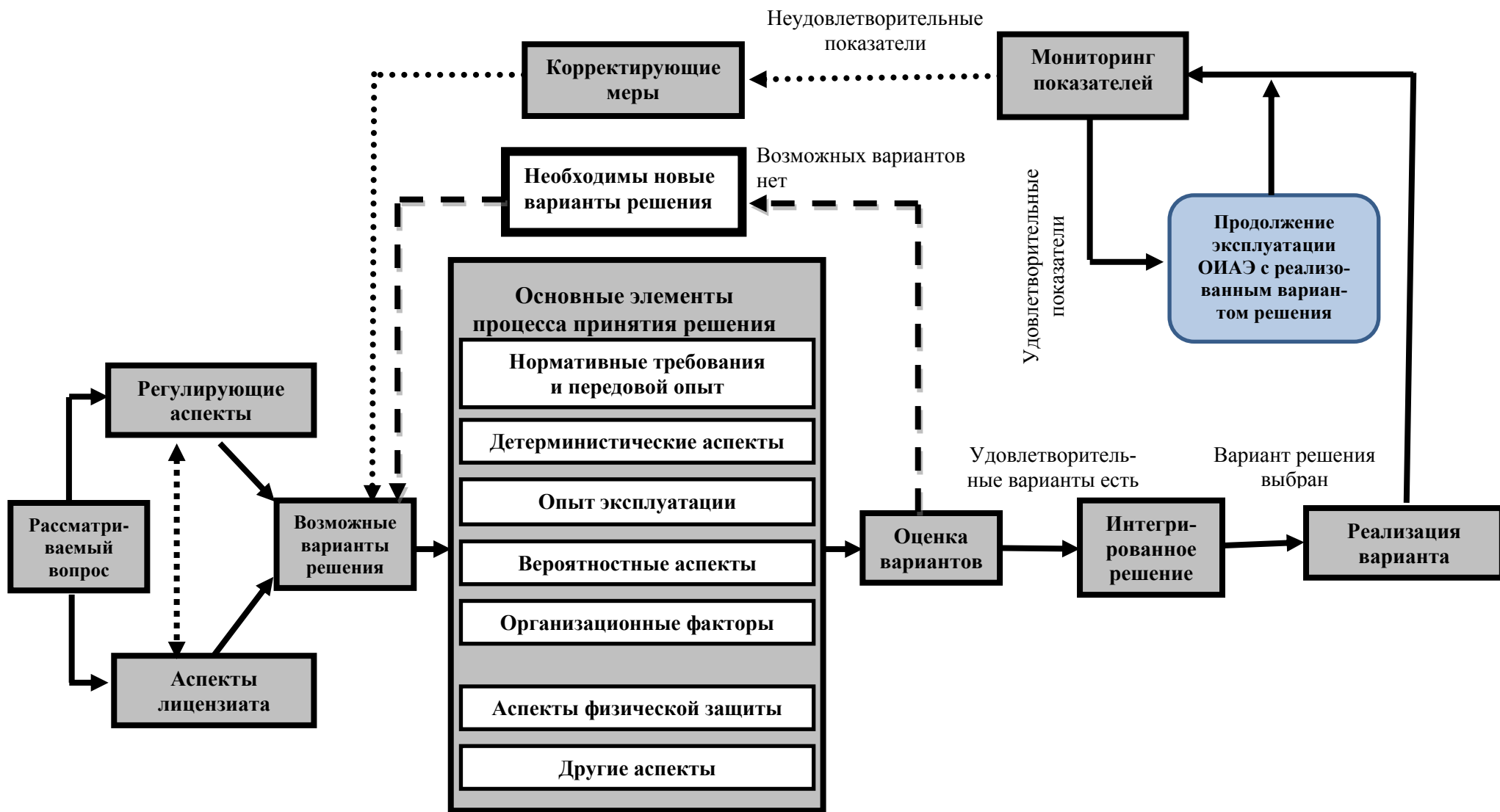


Рис.3 Структура процесса принятия решений на основе комплексного риск-ориентированного подхода (в соответствии с INSAG-25 [8])

5.3 ПРКРП и физическая защита АЭС

Определение безопасного состояния применительно к мерам и устройствам, обеспечивающим физическую защиту блока АЭС, также требует взвешенного и обоснованного рассмотрения. Пример с защитными воротами на АС «Фукусима-Дайичи» (см. раздел 2.3), когда после обесточивания АЭС проезд через ворота был полностью заблокирован, показывает, что меры, важные с точки зрения физической защиты АС, могут оказаться исключительно негативными с точки зрения безопасности АЭС. Важным преимуществом ПРКРП, собственно, и является возможность взвешенного и обоснованного рассмотрения взаимного влияния мер по обеспечению физической защиты АЭС и мер по обеспечению безопасности. Фактически, был бы рекомендован вариант, при котором, при сохранении условия блокировки ворот в закрытом положении при потере энергоснабжения, имелись бы эффективные средства, позволяющие при необходимости перевести замок из положения, соответствующему «безопасному отказу» в другое положение (посредством предоставления авторизованному персоналу – например, персоналу пожарной части - специальных механических устройств, позволяющих быстро открыть обесточенный замок)³. Эта возможность может быть обеспечена за счет предоставления специальных механических приспособлений, направленных на своевременное разблокирование ворот назначенному персоналу, например, персоналу пожарной команды.

5.4 Пример применения ПРКРП для обоснования выбранного «безопасного состояния»

Иллюстративный и упрощенный пример применения ПРКРП для решения проблемы определения состояния «безопасного отказа» для системы быстрых запорных клапанов, расположенных на паропроводах для АЭС двух типов: PWR и BWR, приведен в таблице 3.

Не вдаваясь во все детали рекомендованных в [9] методов, пример использует самый простой метод интеграции информации при принятии решения, основанный на присвоении величины значимости (W_i) каждому из учитываемых факторов и весов (S_{ij}) для степени соответствия j -го варианта решения фактору i . Приоритетным считается вариант решения, для которого значение Q , полученное по формуле (1) принимает наибольшее значение.

$$Q = \sum W_i S_{ij} \quad (1)$$

³ Тут следует сделать важное наблюдение – при реализации принципа безопасного отказа всегда полезно в качестве одной из возможностей рассмотреть такие проектные решения, когда переведенное в безопасное положение оборудование (система) может быть оперативно (за приемлемое с точки зрения безопасности АС время), при необходимости, возвращено персоналом в другое положение, противоположное принятому в проекте АС безопасному положению. Это может во-многих случаях снять остроту проблемы выбора безопасного состояния в проекте АС, что видно и на рассмотренных в настоящей статье примерах. В самом деле, если бы на блоке 1 АЭС Фукусима-Дайичи были бы предусмотрены технические и организационные меры, позволяющие перевести в открытое состояние арматуру систем изолирующего конденсатора и вентиляции контейнмента, закрывшихся при потере электроснабжения, авария протекала бы существенно мягче и, по всей видимости, не перешла бы в тяжелую стадию.

Результаты выполнения процесса ПРКРП для рассматриваемого примера приведены ниже.

Этап 1 Формулировка проблемы и определения возможных технических решений

Проблема сформулирована следующим образом: «Определить положение БЗОК на паропроводах острого пара АЭС при потере обеспечивающих систем, наилучшим образом соответствующее принципу безопасного отказа (для АЭС с РУ двух типов - PWR и BWR)».

Возможные технические решения:

Вариант 1: БЗОК при потере обеспечивающих систем остаются в открытом состоянии без возможности их закрытия до восстановления обеспечивающих систем.

Вариант 2: БЗОК при потере обеспечивающих систем закрываются, без возможности их открытия до восстановления обеспечивающих систем.

Очевидно, что технических решений может быть больше, но для компактности статьи остановимся на этих двух вариантах.

Этап 2 Выявление основных элементов, влияющих на принятия решения по рассматриваемой проблеме: рассматриваются все основные элементы, перечислены выше в разделе 5.1.

Этап 3 Сбор информации по каждому элементу и выявления факторов, учитываемых при ПРКРП.

Результаты сбора информации и выбранные учитываемые факторы в процессе ПРКРП приведены в Таблице 2. При ПРКРП будут учитываться следующие факторы:

УФ1 - Вероятность аварийных последовательностей, непосредственно ведущих к выбросу радиоактивных веществ за пределы контейнмента.

УФ2 - Оцененное среднее количество событий с ложным закрытием БЗОК за срок эксплуатации АС.

УФ3 – Средняя оценка экономических потерь за срок эксплуатации.

Этап 4а Оценка значимости каждого учитываемого фактора

Значимость учитываемых факторов обычно оценивается по шкале от 1 до 10 ([9]), где 1 присваивается фактору, значение которого для принятия решения минимально, а 10- соответственно, максимально. Значимость оценивается экспертами. В рассматриваемом примере приняты следующие значения значимостей:

УФ1 – 9: Требования нормативных документов обычно имеют максимальную значимость (10), в то же время, в данном случае требование сформулировано как целевой ориентир, а не как критерий. Данному УФ присвоено значение близкое к максимальному, но меньшее максимально возможного.

УФ2 – 10: Требования нормативных документов имеют максимальную значимость.

УФ3 - 6: Снижение риска потерь является приоритетным для владельцев АЭС, но не является значимым показателем для регулирующего органа. Данному УФ присвоено значение

близкое к среднему.

Этап 4б Оценка степени соответствия им каждого из вариантов решения;

Оценка степени соответствия каждого из вариантов варианта технического решения учитываемым факторам выполнялась, следуя рекомендациями [9] и шкале (-5,5) (за 0 принят вес для варианта решения №1). Результаты этой оценки и пояснения приведены в Таблице 3.

Этап 5. Интеграция результатов и выбор решения.

Интеграция результатов выполнялась с использованием оцененных значимостей и весов. Результаты интеграции и рекомендованные вариант решений приведены в Таблице 4.

Таблица 3. Результаты сбора информации и учитываемые факторы

№	Основные элементы	Информация, необходимая для анализа для каждого технического решения		Учитываемый фактор	Примечание
		Вариант 1	Вариант 2		
1	Требования норм и стандартов	<p>Выявлены следующие требования нормативных документов:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Следует стремиться к тому, чтобы вероятность тяжелой аварии в течение года не превышала 10^{-5}. 2) Следует стремиться к тому, чтобы вероятность большого аварийного выброса в течение года не превышала 10^{-6} 1/год. 3) Следует стремиться к тому, чтобы частота аварийных последовательностей, непосредственно ведущих к выходу радиоактивности за пределы оболочки, не превышала 10^{-8} 1/год. 4) Количество событий с ложным закрытием БЗОК за срок эксплуатации (40 лет) не должно превышать 10. <p>Других требований норм и стандартов, влияющих на принятие решения по указанной проблеме, не выявлено.</p>		<p>УФ1: Вероятность аварийных последовательностей, непосредственно ведущих к выходу РВ за пределы оболочки, отнесенная к периоду в один год.</p> <p>УФ2: Оцененное среднее количество событий с ложным закрытием БЗОК за срок эксплуатации.</p>	Для всех вариантов технического решения было показано, что вероятность тяжелой аварии ниже 10^{-5} в течение года и вероятность большого аварийного выброса ниже 10^{-6} в течение года и незначительно зависят от принятого решения.
2	Эксплуатационный опыт	На блоках АЭС, где реализован вариант 1, наблюдались ложные срабатывания системы по причинам, не связанным с отказом обеспечивающих систем (в основном из-за ошибок оператора или ложных сигналов)	На блоках АЭС, где реализован вариант 2, наблюдались ложные срабатывания системы, по причинам как не связанным с отказом обеспечивающих систем, так и из-за их отказа. Тем не менее, основные причины ложного срабатывания - ошибки оператора или ложные сигналы.	Частота ложного срабатывания учтена в УФ2 .	-
3	Результаты детерминистических анализов и выполнение детерминистических принципов	Оба варианта технических решений удовлетворяют в полной мере всем детерминистическим принципам (глубокоэшелонированная защита глубину, единственный отказ, и другие.).		Учет фактора не требуется, так как оба варианта полностью ему удовлетворяют, и влияние на принятие решения он не оказывает.	Не учитывается в дальнейшем анализе
4	Результаты вероятностных анализов	Вероятность тяжелой аварии: $\cong 2.3 \cdot 10^{-6}$ 1/год	Вероятность большого аварийного выброса: $\cong 7.3 \cdot 10^{-7}$ 1/год (для PWR и BWR)	Не учитывается в дальнейшем анализе, так рассчитанные показатели удовлетворяют целевым и незначительно зависят от принятого решения.	Снижение вероятности большого аварийного выброса для варианта 2 для BWR связано с более надежным отсечением реактора от турбины при авариях с повреждением актив-
			Вероятность большого аварийного выброса $\cong 7.3 \cdot 10^{-7}$ 1/год (для PWR) $\cong 6.6 \cdot 10^{-7}$ 1/год (для BWR)		

№	Основные элементы	Информация, необходимая для анализа для каждого технического решения		Учитываемый фактор	Примечание
		Вариант 1	Вариант 2		
		Частота ложного срабатывания БЗОК: $9.1 \cdot 10^{-2}$ 1/год Оцененное среднее количество событий за 40 лет эксплуатации: $3.64 (N_1)$	Частота ложного срабатывания БЗОК: $9.3 \cdot 10^{-2}$ 1/год Оцененное среднее количество событий за 40 лет эксплуатации: $3.72 (N_2)$	Частота ложного срабатывания БЗОК учтена в УФ2 .	ной зоны. Оценивалась с учетом опыта эксплуатации и анализов надёжности системы.
		Вероятность аварийных последовательностей, непосредственно ведущих к выходу РВ за пределы контейнента из-за отказа на закрытие БЗОК: $1.3 \cdot 10^{-9}$ 1/год (PWR) $8.2 \cdot 10^{-8}$ 1/год (BWR)	Вероятность аварийных последовательностей, непосредственно ведущих к выходу РВ за пределы контейнента из-за отказа на закрытие БЗОК: $3.7 \cdot 10^{-9}$ 1/год (PWR) $1.8 \cdot 10^{-8}$ 1/год (BWR)	Вероятность аварийной последовательности, непосредственно ведущих к выходу РВ за пределы контейнента из-за отказа на закрытие системы учтена в УФ1 .	-
5	Организационные факторы	Оба варианта технических решений не влияют на организационные факторы.		Учет фактора не требуется, так как оба варианта не влияют на организационные факторы.	Не учитывается в дальнейшем анализе.
6	Факторы, связанные с физической защитой АС	Оба варианта технических решений не влияют на физическую защиту.		Учет фактора не требуется, так как оба варианта не влияют на физическую защиту.	Не учитывается в дальнейшем анализе.
7	Другие факторы	1) Оценка потерь при простое блока после ложного закрытия системы БЗОК: $5.0E+5$ условных единиц (УЕ). 2) Оценка потерь при повреждении активной зоны: $8.0E+9$ УЕ 3) Оценка потерь при ранних больших выбросах: $2.E+12$ УЕ Других факторов, влияющих на принятие решения по указанной проблеме, не выявлено. Средняя оценка потерь за срок эксплуатации 40 лет: PWR и BWR: $N_1 * S_1 + 40 * F_1 * S_2 + F_{21} * 40 * S_3 =$ $3.64 * 5 \cdot 10^{-5} + 40 * 2,3 \cdot 10^{-6} * 8.0 \cdot 10^{+9} +$ $40 * 7.3 \cdot 10^{-7} * 2.0 \cdot 10^{+12} = 60\ 956\ 000$ условных единиц	Средняя оценка потерь за срок эксплуатации 40 лет PWR: $N_2 * S_1 + 40 * F_1 * S_2 + F_{21} * 40 * S_3 =$ $3.72 * 5 \cdot 10^{-5} + 40 * 2,3 \cdot 10^{-6} * 8.0 \cdot 10^{+9} + 40 * 7.3 \cdot 10^{-7} * 2.0 \cdot 10^{+12} = 60\ 996\ 000$ условных единиц BWR: $N_2 * S_1 + 40 * F_1 * S_2 + F_{22} * 40 * S_3 =$ $3.72 * 5 \cdot 10^{-5} + 40 * 2,3 \cdot 10^{-6} * 8.0 \cdot 10^{+9} + 40 * 6.6 \cdot 10^{-7} * 2.0 \cdot 10^{+12} = 55\ 396\ 000$ условных единиц	УФ3: Средняя оценка потерь за срок эксплуатации	-

Таблица 4. Оценка весов и интеграция результатов

Учитываемый фактор УФ _i	Значимость фактора (W _i)	Степень соответствия варианта решения J фактору I (S _{ij})					
		Варианты технических решений для PWR			Варианты технических решений для BWR		
		1	2	Примечание	1	2	Примечание
УФ1	9	0	0	Вероятность АП, непосредственно ведущих к выходу РВ за пределы контейнента из-за отказа на закрытие системы одинакова для обоих вариантов.	0	+4	Вероятность АП, непосредственно ведущих к выходу РВ за пределы контейнента из-за отказа на закрытие системы ниже рекомендуемой нормативными документами, при этом значительно ниже чем для варианта №2
УФ2	10	0	-1	Ожидаемое количество ложных срабатываний за срок эксплуатации значительно ниже допустимого для обоих вариантов, но несколько выше для варианта №2	0	-1	Ожидаемое количество ложных срабатываний за срок эксплуатации значительно ниже допустимого для обоих вариантов, но несколько выше для варианта №2
УФ3	6	0	-1	Ожидаемые потери при реализации варианта № 2 существенно выше, чем для варианта №1.	0	+2	Ожидаемые потери при реализации варианта № 2 ниже, чем для варианта № 1
$\Sigma W_i S_{ij}$		0	-16	Вариант №1 предпочтителен для системы БЗОК на АЭС с PWR	0	38	Вариант №2 предпочтителен для системы БЗОК на АЭС с BWR

Приведенный выше упрощенный пример иллюстрирует каким образом процесс ПРКРП может быть использован при принятии технического решения о том, какое состояние элемента и/или системы является «безопасным» с точки зрения баланса всех учитываемых факторов. В данном примере показано, что типовые технические решения для БЗОК (см. таблицу 1) не противоречат выводам ПРКРП, но при реальном выполнении ПРКРП возможно, что рекомендованные решения будут отличаться от представленных в таблице 1. Важно, то, что использование процесса ПРКРП позволит достичь большей обоснованности и наглядности технического решения.

Необходимо отметить, что при выполнении анализа необходимо учитывать все возможные последствия потери обеспечивающих систем, а не только относящиеся к рассматриваемому оборудованию. В частности, для случая БЗОК, потеря систем, обеспечивающих работу БЗОК, может приводить одновременно к изменению состояния и другого оборудования АЭС. Кроме того, возможны одновременная потеря ряда обес-

печивающих систем, а также «необычные» виды отказа обеспечивающих систем – например, осцилляция напряжения и частоты в электрической сети без полной потери электроснабжения (как это имело место при нарушениях в работе Кольской АЭС в 1993 году и на шведской АЭС Форсмарк в 2006 году).

6. Заключение

На многих АЭС утверждается, что принцип «отказобезопасности» применяется для проектирования систем, важных для безопасности; однако нет четких указаний относительно того, как можно определить «отказобезопасное» состояние для конкретных систем и их элементов. При принятии решения во время проектирования АЭС о том, как применять принцип «отказобезопасности» при выборе состояния системы (или оборудования) в случае отказа обеспечивающих систем, требуется тщательный анализ. При принятии решения необходимо учитывать различные факторы, такие как влияние на выполнение основных и второстепенных функций системы, вопросы безопасности, соответствие требованиям правил и положений, соответствие существующему опыту эксплуатации и другие. Использование процесса ПРКРП позволяет определить «безопасное» состояние сбалансированным, взвешенным и прозрачным способом с учетом многих аспектов, связанных с безопасностью и безопасностью АЭС.

7. Перечень сокращений

АЭС	Атомная электростанция
АП	Аварийная последовательность
БЗОК	Быстродействующий запорно-отсечной клапан
ВАБ	Вероятностный анализ безопасности
ВВЭР	Водо-водяной энергетический реактор
МАГАТЭ	Международное агентство по атомной энергии
ПГ	Парогенератор
ПРКРП	Принятие решений на основе комплексного риск-ориентированного подхода
РВ	Радиоактивное вещество
РУ	Реакторная установка
САОЗ	Система аварийного охлаждения активной зоны реактора
СПОТ	Система пассивного отвода тепла
УЕ	Условная единица

8. Список литературы

1. International Atomic Energy Agency, Terminology used in Nuclear Safety and Radiation Protection. Safety Glossary. 7th Edition, Vienna, 2007
2. International Atomic Energy Agency, Safety of Nuclear Power Plants: Design, Safety Requirements No. SSR 2/1 (Revision of Safety Standards Series No. NS-R-1), 2011
3. IAEA Consultancy Meeting in Preparation of the International Experts Meeting (IEM). Safety Measures based on Fukushima Daiichi Accident Additional Safety Measures at Kashiwazaki Kariwa NPS. Hideki Masui, Seismic Research Manager, Nuclear Asset Management Dept., TEPCO, November 29, 2011
4. Special Report on the Nuclear Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, INPO 11-005, November 2011
5. Evaluation of operating conditions of Isolation Condenser, Unit1, Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, TEPCO, 22 November 2011, Evaluation of operating conditions of Isolation Condenser handouts_111122_03-e.pdf
6. E. Strickland, “24 hours at Fukushima”, IEEE Spectrum, November 2011
7. IAEA Consultancy Meeting in Preparation of the International Experts Meeting (IEM). Individual Perspectives on Fukushima Accident – Reactor. Larry E Fennern, GE Hitachi Nuclear Energy (GEH), Chief Consulting Engineer, ESBWR, November 29, 2011
8. “A Framework for an Integrated Risk Informed Decision Making Process”, INSAG-25, A Report by the International Nuclear Safety Group, Vienna, 2011
9. “Guidance for IRIDM”, Working material for the Technical Meeting, 26-30 March 2012, Vienna.