

УДК: 621.039.50 + 621.3.015

## ПРИМЕНЕНИЕ ПРИНЦИПА БЕЗОПАСНОГО ОТКАЗА С УЧЕТОМ ИНФОРМАЦИИ О РИСКЕ (ПО СЛЕДАМ УРОКОВ АВАРИИ НА АЭС «ФУКУСИМА-ДАЙИЧИ»)

Ланкин М.Ю., к.т.н. (ФБУ «НТЦ ЯРБ»), Любарский А.В., к.т.н.,  
Кузьмина И.Б., к.т.н. (МАГАТЭ),  
Токмачев Г.В., к.т.н. (ОАО «Атомэнергопроект»)

*В статье на основе анализа соответствия проектных решений АЭС «Фукусима-Дайичи» требованию отказобезопасного проектирования поднимается вопрос, всегда ли однозначно можно сказать, какое состояние является безопасным с точки зрения указанного требования. Для получения обоснованного ответа на данный вопрос предлагается использование риск-ориентированного подхода, приводятся примеры применения такого подхода.*

► **Ключевые слова:** атомная станция, отказобезопасное проектирование, риск-ориентированный подход.

## RISK-INFORMED APPLICATION OF FAIL-SAFE DESIGN PRINCIPLE (BASED ON LESSONS LEARNED FROM FUKUSHIMA-DAIICHI ACCIDENT)

Lankin M., Ph.D. (SEC NRS), Lyubarskiy A., Ph.D.,  
Kuzmina I., Ph.D. (IAEA),  
Tokmachev G., Ph.D. (Atomenergoproject)

*The article raises the question, whether always it is possible to say what the system (or equipment) state is safe from the point of view of the fail-safe design requirements. The paper starts by the analysis of conformity of design solutions of NPP «Fukushima-Daiichi» to the fail-safe design requirements. To reach an informed answer to the question the paper suggests usage of a risk-informed approach. Also examples of the application of this approach are provided.*

► **Key words:** nuclear power plant, fail-safe design, risk-informed approach.

## 1. Введение

Термин «безопасный отказ» определен в ОПБ-88/97 [1] как отказ системы или элемента, при возникновении которого АС переходит в безопасное состояние без необходимости инициировать какие-либо действия через управляющую систему безопасности. Аналогичное по смыслу определение принципа безопасного отказа сформулировано в российских нормативных документах и для исследовательских реакторов [2]. Принцип безопасного отказа упоминается и в различных документах МАГАТЭ. Так, стандарт безопасности МАГАТЭ [3] включает требование, что «системы и элементы, важные для безопасности, должны проектироваться с расчетом на отказобезопасное поведение в надлежащих случаях, чтобы их отказ или отказ вспомогательного устройства не препятствовал выполнению предусмотренной функции безопасности».

Примерами реализации принципа безопасного отказа являются: срабатывание под действием гравитации аварийной защиты реактора при потере электроснабжения приводов системы управления и защиты (СУЗ), закрытие изолирующих устройств с пневмоприводом на границе герметичного ограждения реакторной установки при потере давления сжатого воздуха.

Несмотря на использование в [1–3] термина «безопасный отказ», в настоящее время отсутствуют методические указания, каким же образом должно обеспечиваться выполнение принципа безопасного отказа, и, прежде всего, какое состояние системы (элементов системы) следует расценивать как безопасное при таком отказе, например:

- 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.

Ответ на этот вопрос неоднозначен и требует серьезных инженерных исследований и анализов, в том числе анализов риска. Неверный ответ на него, в свою очередь, может приводить к значимому негативному влиянию на безопасность АС. Как показано ниже, на протекание аварии на АЭС «Фукусима-Дайичи» серьезное влияние оказали

проблемы, связанные с применением принципа безопасного отказа при проектировании систем АС, оказавшихся критичными в ходе аварии.

## 2. Применение принципа безопасного отказа на АЭС «Фукусима-Дайичи»

На блоке № 1 АЭС «Фукусима-Дайичи» наиболее ярко последствия применения принципа безопасного отказа проявились при использовании системы изолирующего конденсатора (Isolation condenser) и системы вентиляции (сброса среды) из защитной оболочки.

### 2.1. Система изолирующего конденсатора

На рис. 1 представлена принципиальная схема системы изолирующего конденсатора блока № 1 АС «Фукусима-Дайичи» (далее – блок № 1), взятая из [4]. Описание попытки использования этой системы в ходе аварии основано на отчете INPO [5]. Дополнительная информация об использовании данной системы была взята также из [4] и [6].

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.

Согласно [4–6], после прохождения землетрясения, приведшего к потере внешнего электроснабжения АС, 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 г. (т.е. после потери внешнего электроснабжения АС, вызванной землетрясением, но до прихода волны цунами к побережью).

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.

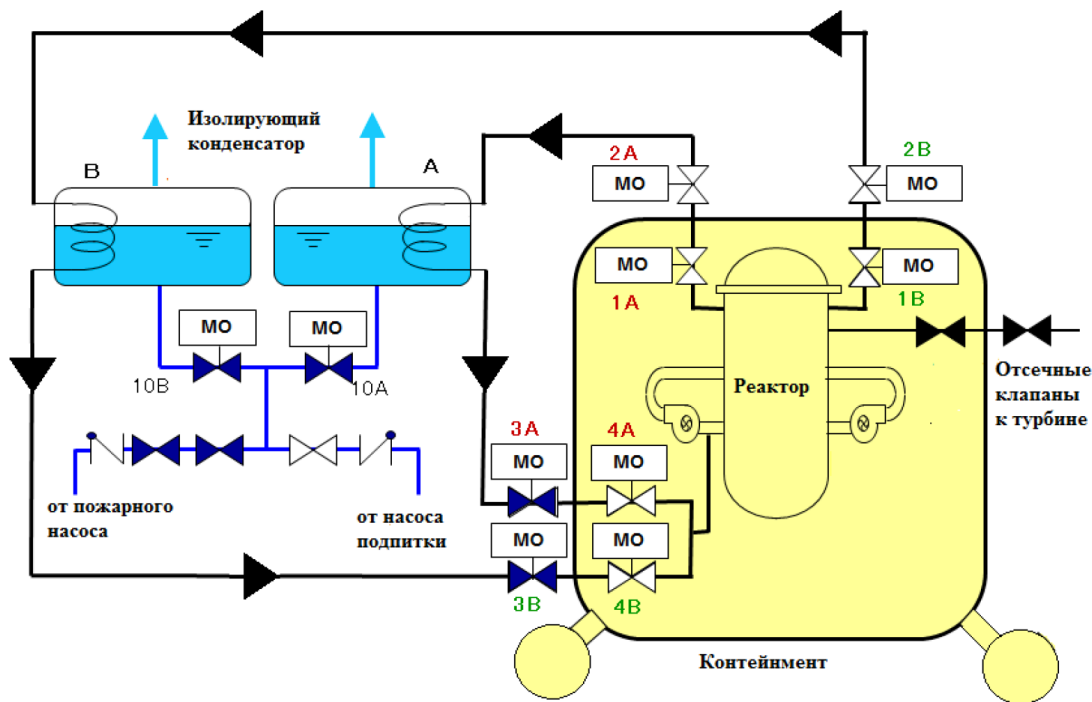


Рис. 1. Схема системы изолирующего конденсатора

К сожалению, несмотря на многочисленные попытки, операторы не смогли подключить систему. Например, по информации из [5] 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 г. [6], показали, что в конденсаторе А уровень воды был около 65 % (при номинальном значении 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 [6] указывается много причин, почему работа изолирующих конденсаторов оказалась неэффективной, наиболее реальной из которых представляется следующая: задвижки 1А и 4А, расположенные внутри контейнента, закрывающиеся, в соответствии с проектом АС, по блокировке при потере электроснабжения от аккумуляторных батарей перешли в закрытое состояние.

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

оставалась последней системой, способной предотвратить повреждение активной зоны на блоке № 1, но задвижки, перешедшие в указанное безопасное положение «закрытое», отключили систему от реактора. Надо также отметить, что согласно [5], невозможность снижения давления в реакторе из-за недоступности изолирующего конденсатора привела к неэффективности использования насосов системы пожаротушения.

## 2.2. Система вентиляции контейнента

На рис. 2 показана схема системы вентиляции контейнента блока № 1 АЭС «Фукусима-Дайичи» [5]. Дальнейшее описание использования этой системы основывается на информации из [5].

Через 9,3 часа после начала аварии начальник смены АС дал указание операторам на организацию вентиляции контейнента. Как выяснилось, на станции не была разработана процедура выполнения этой операции в условиях полного обесточивания АС. Тем не менее, операторы сумели определить порядок выполнения действий по организации сдувки из контейнента, а также необходимые действия по открытию арматуры вручную. В частности, они выяснили, что электроприводный клапан МО-210 на общей линии сдувки перед разрывным диском и малый пневмоприводный клапан АО-90 на линии сдувки и камеры снижения давления (*wetwell*) контейнента могут быть открыты вручную и по месту (см. рис. 2).

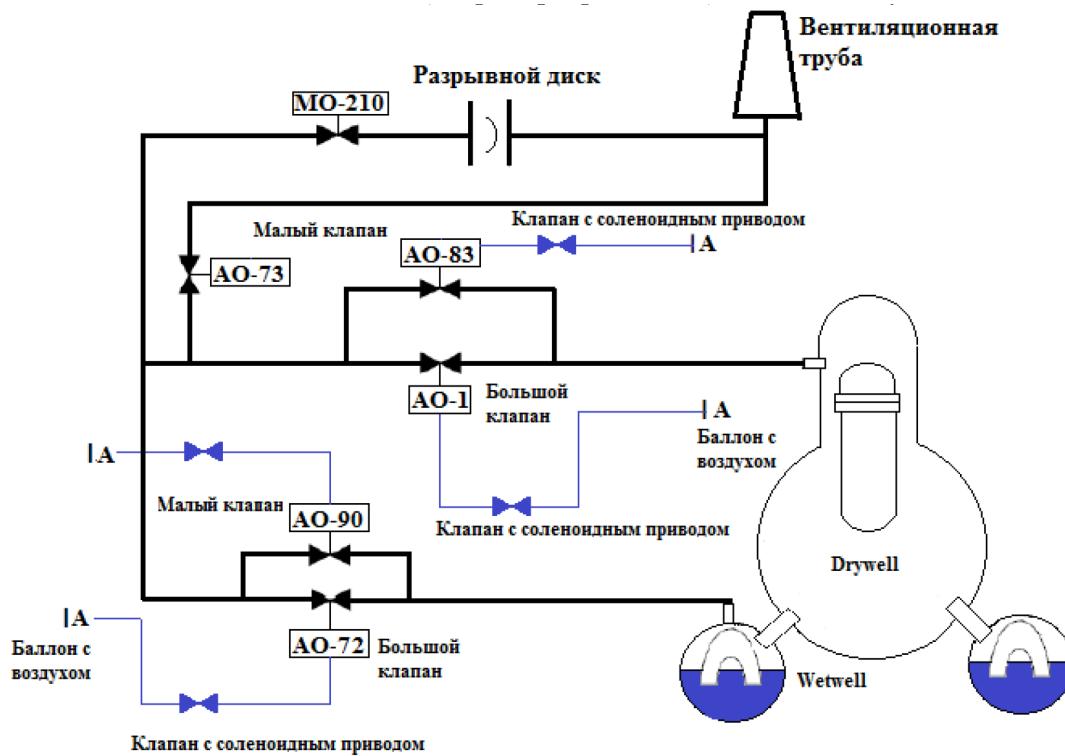


Рис. 2. Схема системы вентиляции контейнента блока № 1 АЭС «Фукусима-Дайичи»

В 9:03 12 марта 2011 г. (через 18,2 часа после начала аварии) клапан MO-210 (см. рис. 2) был открыт, но открыть пневмоприводной клапан AO-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 AO-90 дистанционно. Были установлены временные аккумуляторные батареи для обеспечения клапана AO-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 уровня радиации показали, что, вероятно, при одной из попыток клапан действительно был открыт, но быстро закрылся (по-видимому, из-за истощения давления в системе сжатого воздуха). Поэтому дальнейшие усилия были направлены на открытие большого пневмоприводного клапана AO-72 на линии сдувки из wetwell, который не мог быть открыт вручную, — для его открытия требовался как постоянный ток, так и источник (например, временный) сжатого воздуха.

В результате персоналу удалось обеспечить как питание постоянным током, так и подачу сжатого воздуха от временного компрессора. Большой

пневмоприводной клапан AO-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 контейменте 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, вероятно, было принято с целью предотвратить неконтролируемый выход радиоактивных веществ через систему вентиляции при потере сжатого воздуха в системе пневмоприводных клапанов. Последствия этого решения, в конечном счете, привели к 14-часовой задержке принятия мер по снижению давления в контейменте и в корпусе реактора, выходу значительного количества водорода в здание реактора, взрыву водорода и более тяжелому сценарию протекания аварии.

### 2.3. Охраняемые ворота АС

Согласно [4], после прохождения цунами на АЭС «Фукусима-Дайичи» оставалась работоспособной только одна из трех пожарных машин. Эта машина стояла около блоков № 3 и 4. Из-за того, что одна из дорог была перекрыта тяжелой емкостью с маслом (занесенной цунами), оставалась возможность использовать только второй 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 положении и потребовалось несколько часов [7], чтобы сломать замок и обеспечить перемещение пожарной машины к блоку № 1, что привело к задержке в использовании воды от пожарных машин для организации теплоотвода от активных зон.

Блокировка замка в закрытом положении, по нашему мнению, являлась следствием применения принципа безопасного отказа с точки зрения обеспечения физической защиты АС. Подобное применение этого принципа привело к тому, что в кризисной ситуации единственный доступный путь для подъезда пожарной машины оказался заблокированным из-за потери энергоснабжения.

### 3. Проблемы и методы определения безопасного состояния

Как видно из информации, приведенной выше, конкретное применение принципа безопасного отказа на АЭС «Фукусима-Дайичи» значительно ухудшило возможности персонала по управлению аварией.

Стоит ли на основании того, что мы знаем, как реально разворачивались события на этой АЭС, утверждать, что проект АС должен был быть таким, чтобы задвижки на линиях изолирующего конденсатора оставались в открытом положении при потере электроснабжения; чтобы арматура с пневматическим приводом на линиях вентиляции контейнента открывалась при потере электроснабжения и сжатого воздуха, а замок на охраняемых воротах деблокировался при обесточивании? Конечно, так утверждать нельзя, поскольку можно указать нарушения нормальной эксплуатации АС, при которых такое поведение перечисленного оборудования

негативно повлияет на безопасность станции.

Таким образом, нуждается в подробном осмыслении сам принцип, лежащий в основе принятия решения о том, какое состояние (положение) оборудования действительно является безопасным при потере обеспечивающих систем или других нарушениях, а какое – нет.

Ниже обсуждаются подходы к реализации принципа безопасного отказа в части выбора положения оборудования при потере обеспечивающих систем<sup>1</sup>.

#### 3.1. Детерминистический подход

В сегодняшней проектной практике определение безопасного состояния, в лучшем случае (если такой анализ вообще выполняется), основывается на результатах инженерного анализа систем и использовании детерминистических принципов. Фактически, применение принципа безопасного отказа может просто декларироваться, 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 АС из-за ложных срабатываний при потере обеспечивающих систем, но в то же время должна осуществить подавление пожара при возникновении требования;
- система отсечных клапанов на главных паропроводах АС с реактором типа ВВЭР должна надежно изолировать места разрыва паропровода или аварийного парогенератора, но вероятность ложного отсечения паропровода должна быть минимизирована для предотвращения внеплановых

<sup>1</sup> В дальнейшем положение (состояние) оборудования, выбранное в соответствии с принципом безопасного отказа, мы будем называть безопасным положением (безопасным состоянием).

остановов блоков и исключения возникающих при закрытии отсечных клапанов требований на работу систем безопасности, в частности, предохранительных клапанов парогенераторов;

- система пассивного впрыска в активную зону (гидроемкости системы аварийного охлаждения активной зоны) должна гарантировать 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 (элемента) фактически сводится к инженерному анализу того, как повлияет на безопасность АС отказ системы (элемента) выполнить основную функцию, либо отказ выполнить вторичную функцию системы<sup>2</sup>.

Очевидно, что меры, направленные на повышение надежности выполнения основной функции системы, могут снижать надежность выполнения вторичной функции, и наоборот (примеры приведены в таблице 1).

Зачастую в таких случаях выбор безопасного состояния осуществляется экспертно, примеры осуществления такого выбора представлены в таблице 1. Как видно из указанной таблицы, не во всех случаях принимаемое в проекте безопасное состояние приводит к повышению надежности выполнения основной функции, а в ряде случаев, напротив, препятствует ее выполнению. Отметим разницу в подходах к выбору безопасного состояния системы изолирующего конденсатора для АС с реактором типа BWR и для АС с реактором типа ESBWR (выбраны различные безопасные состояния).

### 3.2. Вероятностные методы

Вероятностные анализы безопасности в принципе позволяют более точно ответить на вопрос, какое состояние элемента при отказе обеспечивающих систем лучше с точки зрения обеспечения безопасности АС. Следует отметить, что, в зависимости от объема ВАБ (ВАБ уровня 1 или же ВАБ уровня 2), могут быть получены разные ответы. Наиболее представительные оценки получаются

при использовании полномасштабного ВАБ уровня 2, включающего внутренние исходные события, внутренние и внешние воздействия, учитывающего как режимы уровни мощности, так и режимы останова. 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 опыт применения результатов ВАБ для выполнения таких анализов достаточно мал и, кроме того, значительная неопределенность результатов ВАБ не всегда позволяет принимать решения, основываясь только на них.

## 4. Использование комплексного риск-ориентированного подхода

### 4.1. Общая характеристика методологии принятия решений на основе комплексного риск-ориентированного подхода

В 2011 г. под эгидой МАГАТЭ был опубликован отчет INSAG-25 [9]. Задачей данного документа являлось донести до понимания международной ядерной общественности (проектантов, изготовителей оборудования, эксплуатирующих организаций, научных институтов 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 АС. Рекомендованный в документе процесс принятия решений на основе комплексного риск-ориентированного подхода (процесс ПРКРП) позволяет обеспечить наглядность и обоснованность решения сложных задач, требующих учета нескольких ключевых факторов, в том числе имеющих принципиально различную природу.

Это делает 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.

<sup>2</sup> Под основной функцией мы понимаем функцию, для выполнения которой спроектирована система (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).

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 АС с реактором типа ВВЭР	Залив активной зоны при течах первого контура	Открытое положение	Открытое положение быстрое действие запорных задвижек на гидроемкостях САОЗ, предназначенных для отключения емкости САОЗ при снижении в ней уровня жидкости до предельной величины с целью предотвращения попадания азота в активную зону	Обеспечение надежного выполнения основной функции залива активной зоны	Повышение надежности выполнения основной функции системы - залива активной зоны	Затруднено выполнение вторичной функции предотвращения попадания азота в активную зону
Воздушная система пассивного отвода тепла АС с реактором типа ВВЭР	Отвод остаточных тепловыделений и расхолаживание РУ	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 АС)
Система защиты первого контура от превышения давления АС с реактором типа ВВЭР	Предотвращение превышения допустимого давления	Закрытое положение клапанов системы и системы в целом	Закрытое положение импульсных клапанов системы и системы в целом	Предотвращение ложного 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 первого контура	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
Быстродействующие запорно-отсечные клапаны на паропроводах острого пара АС с реактором типа ВВЭР	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 ложного срабатывания клапана	Препятствует выполнению основной функции, т.е. при потере обеспечивающих систем быстродействующие запорно-отсечные клапаны остаются открытыми и не выполняют функцию отсечения парогенератора	Предотвращает несанкционированное срабатывание системы при потере обеспечивающих систем, что приводит к снижению частоты исходных событий с нарушением теплоотвода по второму контуру
Быстродействующие запорно-отсечные клапаны на паропроводах острого пара АС с реактором типа BWR (например, АЭС «Лайбштадт», Швейцария)	Отсечение реактора при течах паропроводов	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 ложного срабатывания клапана	Способствует выполнению основной функции, т.е. при потере обеспечивающих систем быстродействующие запорно-отсечные клапаны отсекают реактор от турбины	Приводит к несанкционированному срабатыванию системы при потере обеспечивающих систем и, как следствие, к нарушению теплоотвода от реактора
Изоляция контейнента АС с реактором типа ВВЭР-1000	Предотвращение радиоактивных выбросов	Различные положения, в зависимости от конкретных трубопроводов, проходящих через границу контейнента	Не изменяется (как правило)	Обеспечение надежного выполнения основной функции является вторичным по сравнению с предотвращением возникновения нарушения нормальной эксплуатации АС из-за несанкционированного срабатывания клапана (например, потери главного циркуляционного насоса при закрытии клапанов на трубопроводах системы охлаждения указанных насосов)	Препятствует выполнению основной функции по предотвращению радиоактивных выбросов	Предотвращает несанкционированное срабатывание системы, что приводит к повышению экономических показателей АС 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
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 АС	Препятствует выполнению функции системы по отводу тепла от реактора	Способствует предотвращению несанкционированного срабатывания системы при потере обеспечивающих систем
Изолирующий конденсатор (ESBWR) [8]	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 его	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 расходам ванию РУ, температурным нагрузкам на трубопроводы и оборудование, а также к снижению экономических показателей АС
Система снижения давления под защитной оболочкой (BWR)	Предотвращение превышения допустимого давления в контейнменте	Закрытое положение пневмоводных клапанов на линии фильтрационного газаудаления из контейнмента	Закрытое положение пневмоводных клапанов на линии фильтрационного газаудаления из контейнмента	Обеспечение надежного выполнения функции предотвращения несанкционированных выбросов РВ	Препятствует выполнению функции системы или приводит к невозможности ее выполнения	Предотвращает неконтролируемые выбросы РВ из контейнмента (до момента разрушения защитной оболочки из-за переопрессовки при тяжелых авариях)
Система автоматического пожаротушения	Тушение пожара в помещениях	Закрытое положение приводных клапанов на линии подачи пожарной воды	Открытое положение электроприводных клапанов на линии подачи пожарной воды	Обеспечение надежного выполнения функции тушения пожара	Способствует выполнению функции тушения пожара	Приводит к ложным срабатываниям системы и может привести к повреждению оборудования, важного для безопасности

Основная цель процесса ПРКРП заключается в том, чтобы обеспечить уверенность в оптимальности принимаемого решения по вопросам, влияющим на безопасность АС. В [9] указаны следующие ключевые элементы процесса ПРКРП, которые должны быть приняты во внимание при рассмотрении решений для той или иной проблемы:

- нормативные требования и передовой опыт;
- опыт эксплуатации;
- выполнение детерминистических принципов безопасности;
- вероятностные соображения;
- организационные факторы;
- факторы, связанные с физической защитой АС;
- другие факторы (например, ожидаемые радиационные дозы, экономические факторы).

Рассматривая все факторы, имеющие отношение к проблеме, и учитывая важность конкретных факторов для конкретного решения, можно достичь сбалансированного решения. При этом достигнутое решение будет понятно не только узким специалистам, вовлеченным непосредственно в решение проблемы, но и широкому кругу инженеров. Принцип выполнения процесса ПРКРП проиллюстрирован на схеме, представленной на рис. 3 (процесс ПРКРП может быть применен, в том числе и к рассмотренной нами выше проблеме реализации принципа безопасного отказа).

Согласно указанной схеме, решение любой проблемы (например, определение безопасного состояния) требует учета аспектов, важных с точки зрения и регулирующего органа, и эксплуатирующей организации.

На основании рассмотрения проблемы с учетом этих аспектов формируется предварительный список возможных решений (варианты). Каждый из вариантов проверяется на соответствие ключевым элементам принятия решения, перечисленным выше. На основании такого рассмотрения выбираются варианты решения, соответствующие в той или иной мере ключевым элементам. Если ни одна из предварительно определенных опций не удовлетворяет соответствующим требованиям ключевых элементов, определяются дополнительные опции решений. Если одна или несколько опций удовлетворяют ключевым элементам – выбирается одна опция, для которой степень соответствия всем элементам наиболее высока. Именно эта опция предлагается к внедрению, при этом после внедрения контролируется состояние показателей, характеризующих данную опцию (показатели определяются

для ключевых элементов, учитываемых при определении опции, например, соответствие целевым показателям риска, финансовые затраты на реализацию и поддержание выбранного варианта и т.п.).

Риск-ориентированный подход позволяет принять решение так, чтобы обеспечить, с одной стороны, приемлемые показатели риска (например, связанные с принимаемым решением изменения вероятности повреждения активной зоны, вероятности большого аварийного выброса и, возможно, другие) и, с другой стороны, адекватное выполнение детерминистических требований к затрагиваемым решением системам и элементам АС, а также к АС в целом (таких как обеспечение реализации глубоководной защиты АС, обеспечение целостности физических барьеров и надежности средств их защиты).

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

#### **4.2. Пример принятия решений на основе комплексного риск-ориентированного подхода для обоснования выбора безопасного состояния**

В настоящее время МАГАТЭ готовит к публикации документ серии TECDOC [10]. Документ предназначен, в первую очередь, для представления практического руководства, каким образом следует реализовывать концепции, представленные в [9]. В частности, документ описывает подходы по способам интеграции информации при принятии решения и приводит подробные примеры применения процесса ПРКРП для решения конкретных технических проблем. Согласно [10], процесс ПРКРП выполняется в несколько этапов (этапы из [10], не имеющие прямого отношения к упрощенному примеру, рассматриваемому ниже, опущены):

Этап 1. Формулировка проблемы и определение возможных технических решений;

Этап 2. Выявление основных элементов, влияющих на принятие решения по рассматриваемой проблеме;

Этап 3. Сбор информации по каждому элементу и выявление факторов, учитываемых в процессе ПРКРП;

Этап 4. Оценка значимости каждого учитываемого фактора и степени соответствия им каждого из вариантов решения;

Этап 5. Интеграция результатов и выбор решения.

Ниже приведен иллюстративный и упрощенный пример ПРКРП для решения проблемы определения состояния безопасного отказа для системы быстродействующих запорно-отсечных клапанов на паропроводах острого пара АС для двух типов реактора: гипотетические PWR и BWR (см. таблицу 2).

Не используя все детали рекомендованных в [10] методов, пример демонстрирует 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 величина  $Q$ , полученная по формуле (1), принимает наибольшее значение.

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

Результаты выполнения процесса ПРКРП для рассматриваемого примера приведены ниже. Необходимо отметить, что вся информация, использованная в данном примере, приведена только с иллюстративной целью. Реальный анализ требует детального обоснования на каждом этапе и шаге процесса.

Этап 1. Формулировка проблемы и определения возможных технических решений.

Проблема сформулирована следующим образом: определить положение быстродействующих запорных отсечных клапаны (БЗОК) на паропроводах острого пара АС при потере обеспечивающих систем, наилучшим образом соответствующее принципу безопасного отказа (для АС 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 примера остановимся на этих двух вариантах.

Этап 2. Выявление ключевых элементов, влияющих на принятие решения по рассматриваемой

проблеме.

Рассматриваются все ключевые элементы, они перечислены выше в разделе 4.1.

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

Результаты сбора информации и выбранные учитываемые факторы в процессе ПРКРП приведены в таблице 2. В процессе ПРКРП будут учитываться следующие факторы (УФ):

УФ1. Вероятность аварийных последовательностей, непосредственно ведущих к выбросу РВ за пределы контейнента;

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

УФ3. Средняя оценка экономических потерь за срок эксплуатации.

Этап 4а. Назначение весовых коэффициентов для УФ.

Весовые коэффициенты для УФ по десятибалльной шкале назначаются следующим образом.

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

УФ2 – весовой коэффициент 10. Требования нормативных документов и проектной документации (ограничения по количеству срабатываний БЗОК содержатся в проектной документации) имеют максимальную значимость.

УФ3 – весовой коэффициент 6. Снижение риска потерь приоритетно для владельцев АС, но не является значимым показателем для регулирующего органа. Данному УФ присвоено значение, близкое к среднему.

Этап 4б. Оценка степени соответствия УФ каждого из вариантов решения.

Оценка степени соответствия каждого из вариантов технического решения УФ выполнялась, исходя из рекомендаций [10], с использованием шкалы (-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 выполняется с использованием оцененных значимостей и весов по формуле (1). Результаты интеграции и рекомендованные варианты решения приведены в таблице 3.

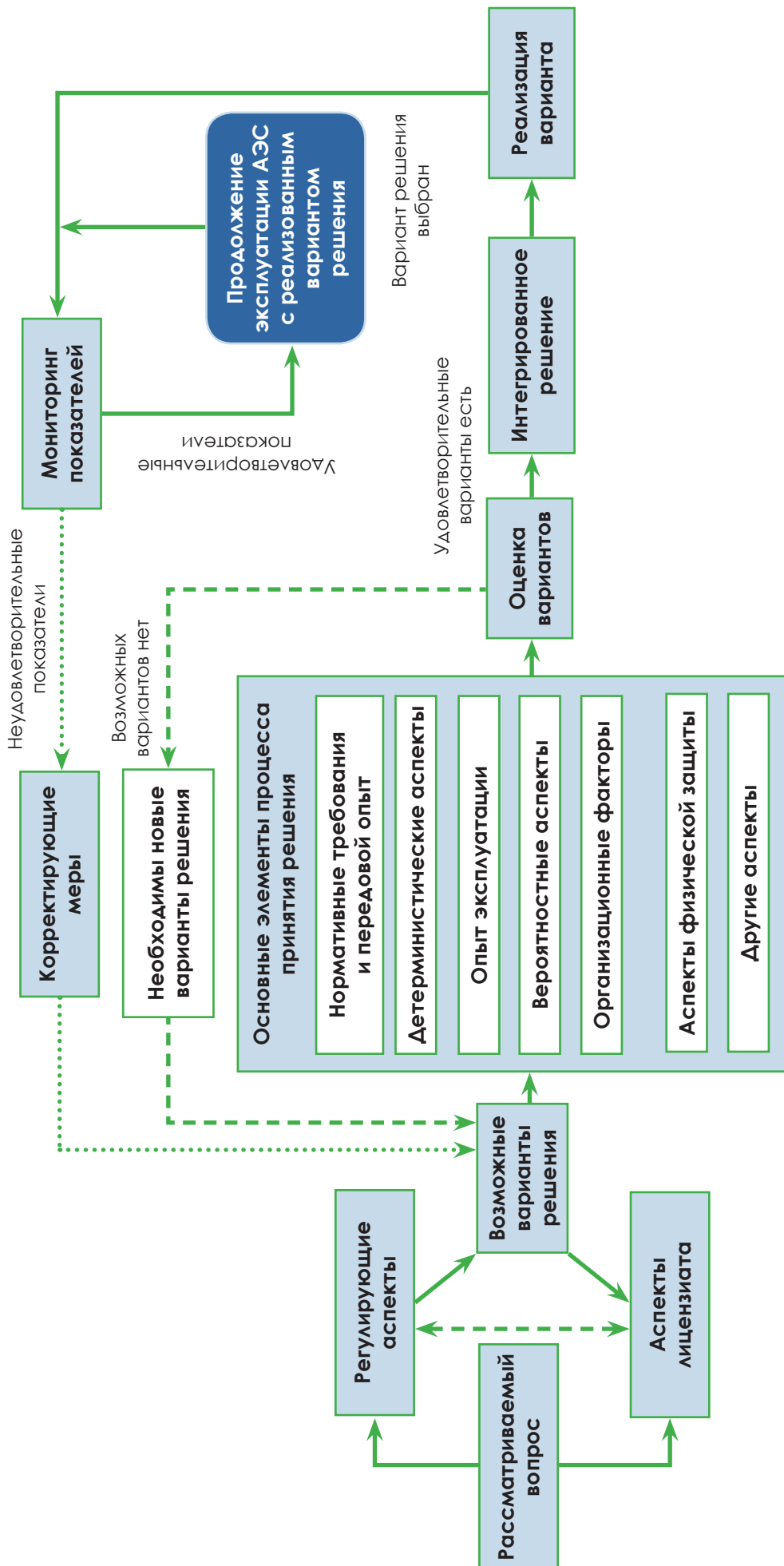


Рис.3. Структура процесса принятия решений на основе комплексного риск-ориентированного подхода (в соответствии с INSAG-25 [9])

Таблица 2

Результаты сбора информации и учитываемые факторы

№	Основные элементы	Информация, необходимая для анализа 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"> <li>1) следует стремиться к тому, чтобы вероятность тяжелой аварии в течение года не превышала <math>10^{-5}</math>;</li> <li>2) следует стремиться к тому, чтобы вероятность большого аварийного выброса в течение года не превышала <math>10^{-7}</math> 1/год;</li> <li>3) следует стремиться к тому, чтобы вероятность аварийных последовательностей, непосредственно ведущих к выходу радиоактивности за пределы контейнента, в течение года не превышала <math>10^{-8}</math> 1/год;</li> <li>4) количество событий с ложным закрытием БЗОК за срок эксплуатации (40 лет) не должно превышать 10</li> </ol> <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 контейнента, отнесенная к периоду в один год.</p> <p>УФ2. Оцененное среднее количество событий с ложным закрытием БЗОК за срок эксплуатации</p>	<p>Для всех вариантов технического решения было показано, что вероятность тяжелой аварии ниже <math>10^{-5}</math> в течение года, и вероятность большого аварийного выброса ниже <math>10^{-7}</math> в течение года и их значения незначительно зависят от принятого решения</p>	
2	Эксплуатационный опыт	<p>На блоках АС, 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)</p>	<p>На блоках АС, где реализован вариант 2, наблюдались ложные срабатывания системы по причинам как не связанным с отказом обеспечивающих систем, так и из-за отказа этих систем. Тем не менее, основные причины ложного срабатывания – ошибки оператора или ложные сигналы</p>	<p>Частота ложного срабатывания БЗОК учтена в УФ2</p>	
3	Результаты детерминистических анализов и выполнение детерминистических принципов	<p>Оба варианта технического решения удовлетворяют в полной мере всем детерминистическим принципам (глубокоэшелонированная защита, учет единичного отказа и другие)</p>		<p>Учет фактора не требуется, так как оба варианта полностью ему удовлетворяют и влияние на принятие решения он не оказывает</p>	<p>Не учитывается в дальнейшем анализе</p>
4	Результаты вероятностных анализов	<p>Вероятность тяжелой аварии: <math>\approx 2.3 \cdot 10^{-6}</math> 1/год</p> <p>Вероятность большого аварийного выброса: <math>\approx 7.3 \cdot 10^{-8}</math> 1/год (для РWR и БWR)</p>	<p>Вероятность большого аварийного выброса <math>\approx 7.3 \cdot 10^{-8}</math> 1/год (для РWR) <math>\approx 6.6 \cdot 10^{-8}</math> 1/год (для БWR)</p>	<p>Отдельно фактор не учитывается в дальнейшем анализе, так как рассчитанные показатели удовлетворяют целевым.</p> <p>Опосредованно учитывается при оценке УФ3</p>	<p>Снижение вероятности большого аварийного выброса для варианта 2 для БWR связано с более надежным отсечением реактора от турбины при авариях с тяжелым повреждением активной зоны</p>

№	Основные элементы	Информация, необходимая для анализа каждого технического решения		Учитываемый фактор	Примечание
		Вариант 1	Вариант 2		
4		<p>Частота ложного срабатывания БЗОК: <math>9.1 \cdot 10^{-2}</math> 1/год.</p> <p>Оцененное среднее количество событий за 40 лет эксплуатации: 3,64</p> <p>Вероятность аварийных последовательностей, непосредственно ведущих к выходу РВ за пределы контейнмента из-за отказа на закрытие БЗОК: <math>1.3 \cdot 10^{-9}</math> 1/год (PWR) <math>8.2 \cdot 10^{-8}</math> 1/год (BWR)</p>	<p>Частота ложного срабатывания БЗОК: <math>9.3 \cdot 10^{-2}</math> 1/год.</p> <p>Оцененное среднее количество событий за 40 лет эксплуатации: 3,72</p> <p>Вероятность аварийных последовательностей, непосредственно ведущих к выходу РВ за пределы контейнмента из-за отказа на закрытие БЗОК: <math>3.7 \cdot 10^{-9}</math> 1/год (PWR) <math>1.8 \cdot 10^{-8}</math> 1/год (BWR)</p>	Частота ложного срабатывания БЗОК учтена в УФ2	Оценивалась с учетом опыта эксплуатации и анализов надежности системы
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	<p>1) Оценка потерь при простое блока после ложного закрытия системы БЗОК: <math>5 \cdot 10^5</math> условных единиц (УЕ);</p> <p>2) оценка потерь при повреждении активной зоны: <math>8 \cdot 10^9</math> УЕ;</p> <p>3) оценка потерь при ранних больших выбросах: <math>2 \cdot 10^{13}</math> УЕ.</p> <p>Других факторов, влияющих на принятие решения по указанной проблеме, не выявлено</p>	<p>Средняя оценка потерь за срок эксплуатации 40 лет:</p> <p>PWR: <math>0.033 \cdot 5.0 \cdot 10^5 \cdot 40 + 2.3 \cdot 10^5 \cdot 8.0 \cdot 10^9 + 7.3 \cdot 10^8 \cdot 2 \cdot 10^{13} = 2304000</math> УЕ;</p> <p>BWR: <math>0.033 \cdot 5.0 \cdot 10^5 \cdot 40 + 2.3 \cdot 10^5 \cdot 8.0 \cdot 10^9 + 6.6 \cdot 10^8 \cdot 2 \cdot 10^{13} = 2164000</math> УЕ</p>	УФ3. Средняя оценка потерь за срок эксплуатации	

Таблица 3

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 аварийных последовательной, непосредственно ведущих к выходу РВ за пределы контейнента из-за отказа на закрытие БЗОК одинакова для обоих вариантов	0	+4	Вероятность аварийных последовательностей, непосредственно ведущих к выходу РВ за пределы контейнента из-за отказа на закрытие БЗОК, в обоих вариантах ниже рекомендуемой нормативными документами, но при этом для варианта № 2 полученное значение намного ниже
УФ2	10	0	- 1	Ожидаемое количество ложных срабатываний за срок эксплуатации значительно ниже допустимого для обоих вариантов, но при этом значение, полученное для варианта № 2, несколько выше	0	- 1	Ожидаемое количество ложных срабатываний за срок эксплуатации АС значительно ниже допустимого для обоих вариантов, но при этом значение, полученное для варианта № 2, несколько выше
УФ3	6	0	-3	Ожидаемые потери при реализации варианта № 2 выше, чем для варианта № 1	0	+2	Ожидаемые потери при реализации варианта № 2 ниже, чем для варианта № 1
$\sum W_i S_{ij}$		0	-28	Вариант № 1 предпочтителен для БЗОК на АЭС с РУ типа PWR	0	38	Вариант № 2 предпочтителен для БЗОК на АЭС с РУ типа BWR

Приведенный выше упрощенный пример иллюстрирует, как процесс ПРКРП может быть использован при принятии технического решения о том, какое состояние элемента (системы) является предпочтительным 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 позволяет достичь большей обоснованности и наглядности технического решения.

Следует 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 АС. Кроме того, возможны одновременная потеря ряда обеспечивающих систем,

а также «необычные» виды отказа обеспечивающих систем, например, осцилляция напряжения и частоты в электрической сети без полной потери электроснабжения (как это имело место, например, при нарушении в работе шведской АЭС «Форсмарк» в 2006 г., см., в частности, раздел 2.10 отчета [11] и раздел 3.6 отчета [12]).

**4.3. Процесс принятия решений на основе комплексного риск-ориентированного подхода и физическая защита АС**

Определение безопасного состояния применительно к техническим и организационным мерам, обеспечивающим физическую защиту АС, также требует вдумчивого рассмотрения. Пример с защитными воротами на АС «Фукусима-Дайичи» (см. раздел 2), когда после обесточивания АС проезд через ворота был полностью заблокирован, показывает, что меры, важные с точки зрения физической защиты АС, могут оказаться исключительно негативными с точки зрения безопасности АС.

Существенным преимуществом процесса ПРКРП является возможность взвешенного и обоснованного рассмотрения взаимного влияния мер по обеспечению физической защиты АС и мер по обеспечению безопасности. В приложении VIII [10] показано, что применение ПРКРП не позволило бы остановиться на том варианте, который был реализован на АЭС «Фукусима-Дайичи». Вместо этого мог бы быть рекомендован вариант, который в условиях блокировки ворот в закрытом положении при потере энергоснабжения предусматривает использование эффективных средств, позволяющих при необходимости перевести замок из закрытого положения в другое положение (например, посредством предоставления авторизованному персоналу, в частности персоналу пожарной части, специальных механических устройств, позволяющих быстро открыть обесточенный замок)<sup>3</sup>. Актуальность анализа взаимовлияния вопросов физической защиты, с одной стороны, и обеспечения безопасности АС, с

другой стороны, в настоящее время общепризнана (в частности, этой проблематике посвящен выпущенный международной консультативной группой по ядерной безопасности отчет INSAG-24 [13]).

### Заключение

Принятие при проектировании АС решений по реализации принципа безопасного отказа в части выбора состояния, в которое система должна переходить при отказе обеспечивающих систем, требует предварительного выполнения анализа. При принятии решения должны быть учтены различные факторы, такие как влияние на выполнение основных и вторичных функций системы, вопросы физической защиты, соответствие требованиям норм и правил, соответствие имеющемуся опыту эксплуатации и другие. Использование процесса ПРКРП позволяет системно и обоснованно выработать соответствующее решение.

### Список литературы

1. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций. ОПБ - 88/97. НП-001-97. М., НТЦ ЯРБ, 1997.
2. Общие положения обеспечения безопасности исследовательских ядерных установок. НП-033-01. М., НТЦ ЯРБ, 2002.
3. Safety of Nuclear Power Plants: Design: Specific Safety Requirements. IAEA Safety Standards Series No. SSR-2/1 — Vienna: IAEA, 2012.
4. 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.
5. Special Report on the Nuclear Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, INPO 11-005, November 2011.
6. Evaluation of Operating Conditions of Isolation Condenser, Unit1, Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, TEPCO, 22 November 2011.
7. E. Strickland, “24 hours at Fukushima”, IEEE Spectrum, November 2011.
8. 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.
9. A Framework for an Integrated Risk Informed Decision Making Process. INSAG-25. A Report by the International Nuclear Safety Group/ International Atomic Energy Agency, Vienna, 2011.
10. Draft IAEA TECDOC: Guidance on Performing Integrated Risk Informed Decision Making, IAEA, March 2015.
11. NEA/CSNI Technical Opinion Papers No. 16. Defence in Depth of Electrical Systems. NEA, OECD, 2013.
12. NEA/CSNI/R(2009)10, Defence in Depth of Electrical Systems and Grid Interaction Final DIDELSYS Task Group Report. NEA, OECD, 2009.
13. The Interface Between Safety and Security at Nuclear Power Plants. INSAG-24. A Report by the International Nuclear Safety Group/ International Atomic Energy Agency, Vienna, 2010.

<sup>3</sup> 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, при необходимости, оперативно переведено (за приемлемое с точки зрения безопасности АС время) 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. Действительно, если бы на блоке № 1 АЭС «Фукусима-Дайичи» были предусмотрены технические и организационные меры, позволяющие перевести в открытое состояние арматуру систем изолирующего конденсатора и вентиляции контейнента, закрывшихся при потере электроснабжения, авария протекала бы существенно мягче и, по всей видимости, не перешла бы в тяжелую стадию.