

## АНАЛИЗ ПРИОРИТЕТНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ МОДЕРНИЗАЦИЙ И МЕРОПРИЯТИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ БЕЗОПАСНОСТИ АЭС РИСК-ОРИЕНТИРОВАННЫМИ МЕТОДАМИ

© 2011 г. Ю. А. Комаров, В. И. Скалозубов

*Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины Киев*

Рассмотрены общие вопросы приоритизации модернизаций и мероприятий по повышению безопасности АЭС с применением риск-ориентированных подходов. Применение подходов показано на примере анализа целесообразности внедрения модернизации системы автоматизированного контроля и управления для автоматического управления авариями с межконтурными течами.

*Ключевые слова:* безопасность, показатели безопасности, риск-ориентированные методы, аварии с межконтурными течами, система автоматизированного контроля и управления.

Ключевыми вопросами при модернизации систем, важных для безопасности (СВБ), и внедрении организационно-технических мероприятий (ОТМ) по повышению безопасности является оценка их приоритетности и целесообразности в соответствии с общепринятым в международной и отечественной практике принципом ALARA – повышение безопасности настолько, насколько это разумно достижимо с учетом технических, экономических и социальных факторов [1]. Поэтому для оптимизации затрат необходимо первоначально изучить вопрос о степени влияния модернизации СВБ на общий уровень безопасности.

На качественном уровне можно выделить несколько характерных областей приоритетности внедрения модернизации/ОТМ по повышению безопасности:

*область высокой приоритетности (ОВП)* – значительный эффект для повышения безопасности при относительно небольших экономических затратах;

*область средней приоритетности (ОСП)* – значительный эффект для повышения безопасности при относительно больших экономических затратах;

*область умеренной приоритетности (ОУП)* – незначительный эффект для повышения безопасности при относительно небольших экономических затратах;

*область низкой приоритетности (ОНП)* – незначительный эффект для безопасности при относительно больших экономических затратах.

Характерными примерами ОТМ в ОВП являются: совершенствование руководств/инструкций по управлению авариями на основе результатов углубленного анализа безопасности; внедрение режима «Feed&Bleed» при управлении авариями с потерей теплоносителя и т.п. Характерными примерами ОТМ в ОСП являются: внедрение в проекты реакторов нового поколения ВВЭР дополнительных систем безопасности (системы пассивного отвода тепла, двухкорпусная система герметичного ограждения, подреакторная система локализации кориума, модернизированные системы дожигания водорода и др.), модернизация систем аварийного охлаждения активной зоны и аварийной питательной воды, совершенствование и развитие систем контроля, повышение надежности и целостности конструкций парогенераторов и др. Характерными примерами ОТМ в ОУП являются: совершенствование эксплуатационной и ремонтной документации, повышение культуры безопасности и др. Внедрение мероприятий в ОНП нецелесообразно и требует технических обоснований альтернативных мероприятий при относительно небольших экономических затратах.

Эффективным инструментом для количественных оценок приоритизации модернизаций СВБ и ОТМ является применение риск-ориентированных подходов, которые определяют вероятностные показатели риска/безопасности в зависимости от частоты возникновения исходных событий аварий (ИСА) (исходных событий, которые могут привести к негативным для безопасности последствиям) и условных вероятностей событий, приводящих к негативным для безопасности последствиям (обычно связаны с вероятностью отказов СВБ и персонала, управляющего СВБ).

В настоящее время нормативно закреплено, что критериями безопасности АЭС являются [2]:

оценочное значение частоты тяжелого повреждения активной зоны (ЧПАЗ), оценочное значение частоты предельного аварийного выброса радиоактивных продуктов в окружающую среду (ЧПАВ);

уровни облучения персонала и населения, уровни выбросов и сбросов радиоактивных веществ и их состав в окружающую среду.

Для таких критериев (показателей) безопасности как ЧПАЗ и ЧПАВ возможно применение риск-ориентированного подхода. Общепринятым инструментом оценки данных показателей выступает вероятностный анализ безопасности (ВАБ). В рамках методологии ВАБ нормируемые показатели безопасности ЧПАЗ и ЧПАВ (в общем случае обозначим их через  $\Pi$ ) определяются следующим образом:

$$\Pi = \{ \text{ЧПАЗ}, \text{ЧПАВ} \} = \sum_{k=1}^{\theta} \lambda_{ИСАk} \left( 1 - \prod_{j=1}^{M_k} \prod_{i=1}^{N_{kj}} (1 - P_{МСijk}) \right), \quad (1)$$

где  $\theta$  – количество деревьев событий (ДС), для которых определяется соответствующий показатель безопасности;  $M_k$  – количество аварийных последовательностей (АП) в  $k$ -м ДС;  $N_{kj}$  – количество минимальных сечений (МС) в  $j$ -й АП  $k$ -го ДС;  $\lambda_{ИСАk}$  – частота исходного события аварии для  $k$ -го ДС;  $P_{МСijk}$  – вероятность  $i$ -го МС в  $j$ -й АП  $k$ -го ДС.

Вероятность реализации минимального сечения в общем случае зависит от вероятности отказа элементов/оборудования (оборудования непосредственно выполняющего функции безопасности, а также обеспечивающих его работу элементов/подсистем) и вероятности ошибочных действий персонала:

$$P_{МСijk} = \prod_{v_1 \in V_1} P_{Cv_1} \prod_{v_2 \in V_2} P_{OPv_2} \prod_{v_3 \in V_3} P_{v_3}, \quad (2)$$

где  $P_{Cv_1}$  – вероятности отказа отдельных базовых событий систем/элементов (в основном определяемые надежностью системы/элементов) из множества  $V_1$ , которые в результате оценки соответствующего дерева отказов (ДО) методом минимальных сечений попали в  $i$ -е МС в  $j$ -й АП  $k$ -го ДС;  $P_{OPv_2}$  – вероятности ошибочных действий персонала по подготовке и управлению системами/элементами из множества  $V_2$ , которые в результате оценки соответствующего ДО методом минимальных сечений попали в  $i$ -е МС в  $j$ -й АП  $k$ -го ДС;  $P_{v_3}$  – остальные вероятности, логические операторы, неразработанные события и т.д., которые не вошли во множества  $V_1$  и  $V_2$ , но которые в результате оценки соответствующего ДО методом минимальных сечений попали в  $i$ -е МС в  $j$ -й АП  $k$ -го ДС и составили множество  $V_3$ .

Ожидаемые изменения нормируемых показателей безопасности в зависимости от модернизации СВБ и ОТМ имеет вид

$$\Delta \Pi = \frac{\Pi_n(P_{Cv_1}^n, P_{OPv_2}^n, P_{v_3}^n)}{\Pi_0(P_{Cv_1}, P_{OPv_2}, P_{v_3})}, \quad (3)$$

где  $\Pi_0$  – базовое значение показателя безопасности при базовых значениях вероятности отказа систем, вероятности ошибочных действий персонала и пр.;  $\Pi_n$  – новое значение показателя безопасности при измененных в связи с модернизацией систем и/или внедрением оргтехнических мероприятий по управлению авариями значениях вероятности отказа систем, вероятности ошибочных действий персонала, а так же логических связей и пр.

Таким образом, применение риск-ориентированных подходов позволяет оценить вклад каждого отдельного планируемого мероприятия и/или модернизации СВБ в общие показатели безопасности. На основе такого подхода можно предложить следующие условные границы между областями приоритетности мероприятий для повышения безопасности: раз-

ница между областями ОВП и ОСП (со значительным эффектом для повышения безопасности) и областями ОУП, ОНП (с незначительным эффектом для повышения безопасности) составляет около 10 % от базового значения показателя безопасности. Более точную оценку граничному значению изменения областей с точки зрения влияния на безопасность можно получить на основании обобщенного анализа результатов значимости, чувствительности и неопределенности ВАБ различных энергоблоков. Такая оценка границ областей приоритетности определяется, в частности, погрешностью и неопределенностью вероятностных оценок показателей безопасностей.

Рассмотрим применение указанного подхода на примере реализации ОТМ [3] по внедрению системы контроля поглощенной дозы гамма-излучения для формирования сигналов срабатывания аварийной защиты (АЗ) и технологических защит и блокировок управляющей системы безопасности (далее - система) в авариях с межконтурными течами для реакторной установки с ВВЭР-1000. При относительно большой стоимости указанной системы данное ОТМ в зависимости от влияния на повышение безопасности относится либо к ОСП, либо к ОНП.

Окончательный вывод о целесообразности внедрения системы можно сделать на основе представленного риск-ориентированного подхода и результатов ВАБ (на примере пилотного энергоблока с ВВЭР-1000/В320 [4]).

В соответствии с [3], основные факторы от внедрения системы по отношению к проектной системе контроля, влияющие на повышение безопасности, при управлении авариями с малыми (ИСА Т41) и средними (ИСА Т42) межконтурными течами являются:

1. Автоматическое срабатывание АЗ по сигналу появления радиоактивности во 2-м контуре (1-й фактор).

2. В перспективе возможно осуществление автоматизированных алгоритмов управления авариями с межконтурными течами (с минимизацией действий операторов) – 2-й фактор.

Поэтому проанализируем влияние указанных факторов на повышение безопасности для серийных энергоблоков ВВЭР-1000 на основе вероятностных моделей и результатов ВАБ [4].

*1-й фактор.* Анализ ДС и критериев успеха расчетных моделей ВАБ 1-го уровня [4] для межконтурных течей ИСА Т41 и ИСА Т42 позволяет сделать следующие выводы:

1) для ИСА Т41 автоматическое срабатывание АЗ по сигналу системы не является критичным, так как при работоспособности системы подпитки 1-го контура (ТК) отсутствует необходимость срабатывания АЗ, а при отказе ТК срабатывание АЗ осуществляется автоматически по проектным уставкам (срабатывание АЗ по факту снижения давления 1-го контура менее  $148 \text{ кгс/см}^2$  и мощности более 75 % от номинальной);

2) для ИСА Т42 автоматическое срабатывание АЗ осуществляется по проектным уставкам (срабатывание АЗ по факту снижения давления 1-го контура менее  $148 \text{ кгс/см}^2$  и мощности более 75 % от номинальной, или по снижению уровня в компенсаторе давления менее 4600 мм).

Таким образом, система фактически не влияет на показатели безопасности в отношении автоматизации срабатывания АЗ по сигналу радиоактивности во 2-м контуре.

*2-й фактор.* Качественный анализ влияния на безопасность автоматизации ряда процедур управления авариями с межконтурными течами показал, что данные процедуры оказывают влияние на безопасность посредством устранения ряда ошибок персонала (табл. 1).

Следует отметить, что операции по прекращению подачи питательной и аварийной питательной воды в аварийный парогенератор (ПГ) автоматизировать в рамках данной модернизации не предполагается. Поэтому действия персонала по изоляции аварийного ПГ по питательной воде остаются в модели ВАБ без изменений. Для корректного анализа влияния этого фактора отсутствует необходимая информация о надежности системы и о реальной возможности реализации полностью автоматизированных алгоритмов управления авариями с межконтурными течами.

**Таблица 1. Влияние на функции безопасности и ошибки персонала алгоритма автоматического управления локализацией течи в пределах ПГ в соответствии с концептуальным техническим решением (КТР) №ТР.1.0011.1640**

№ шага	Операция алгоритма КТР	Краткое содержание/пояснение	Влияние на модели ВАБ ВВЭР-1000/В-320	Влияние на БС и ВОП (код БС)
<i>Фаза 1</i>				
1	Отключение ГЦН аварийной петли	Автоматическое отключение ГЦН петли с аварийным ПГ (и наличие принудительной циркуляции по остальным петлям) приводит к изменению направления движения циркуляции теплоносителя в петле. Это приводит к снижению теплоподвода к аварийному ПГ и поэтому сдерживает повышение давления в данном ПГ	Отсутствует в моделях ВАБ	–
2	Запрет на ручное управление арматурой закрытия БЗОК аварийного ПГ на период действия Фазы 1	Запрет исключает ошибочные действия персонала по закрытию БЗОК аварийного ПГ на начальной стадии аварии. Ошибочное закрытие приведет к росту давления в аварийном ПГ и срабатыванию БРУ-А и ПК ПГ	Отсутствует в моделях ВАБ	–
3	Запрет на автоматическое открытие БРУ-А аварийного ПГ	Отключение автоматического срабатывания БРУ-А при давлении в аварийном ПГ более 73 кгс/см <sup>2</sup>	Отсутствует в вероятностных моделях ВАБ в явном виде	–
4	Запрет на работу БРУ-К при уровне в аварийном ПГ более 3,8 м	Предназначена для исключения поступления воды из аварийного ПГ в БРУ-К	Отсутствует в моделях ВАБ	–
5	Вывод блокировок на отключение ГЦН по конечным выключателям закрытого положения БЗОК	Наличие принудительной циркуляции в петлях с неаварийными ПГ обеспечивает обратный ток теплоносителя в петле с аварийным ПГ (см. также пояснения к операции 1 Фазы 1)	Отсутствует в моделях ВАБ	–
6	Перевод уставки работы БРУ-А неповрежденных ПГ на поддержание давления в ПГ 50 – 52 кгс/см <sup>2</sup>	Выбор более низкой уставки срабатывания БРУ-А приводит к снижению температуры теплоносителя, что приблизит ее к температуре борного раствора, подаваемого от САОЗ ВД (уменьшит возможный градиент температур на корпусе реактора)	Отсутствует в моделях ВАБ	–
7	Закрытие БЗОК неповрежденных ПГ	Предназначена для разделения паровых объемов неповрежденных ПГ о паропроводов ГЦК и аварийного ПГ, заполненных радиоактивным теплоносителем	Отсутствует в вероятностных моделях ВАБ в явном виде	–

№ шага	Операция алгоритма КТР	Краткое содержание/пояснение	Влияние на модели ВАБ ВВЭР-1000/В-320	Влияние на БС и ВОП (код БС)
<i>Фаза 2</i>				
1	Управляемое снижение и поддержание предельно допустимого давления теплоносителя в системе 1-го контура на уровне 77 – 79 кгс/см <sup>2</sup>	Снижение давления 1-го контура снижает величину межконтурной течи, обеспечивает несрабатывание БРУ-А и ПК аварийного ПГ В автоматическом режиме выполняются следующие переключения: открывается арматура ТК32S01 от насоса подпитки 1-го контура в КД при давлении в 1-м контуре более 79 кгс/см <sup>2</sup> и закрывается при давлении менее 77 кгс/см <sup>2</sup> ; регулятор впрыска в КД с напора ГЦН поддерживает давление в 1-м контуре в диапазоне 77 – 79 кгс/см <sup>2</sup> ; ТЭН КД отключаются при давлении в КД более 77 кгс/см <sup>2</sup> ; автоматический регулятор гидромурфты насоса подпитки 1-го контура поддерживает работу подпиточного насоса таким образом, чтобы давление 1-го контура было в диапазоне 77 – 79 кгс/см <sup>2</sup>	Представлена ФБ «Управление давлением 1-го контура» Для ИСА Т41 управление давлением 1-го контура обеспечивается: впрыском от системы подпитки; впрыском с напора ГЦН; открытием задвижек системы аварийного газоудаления Для обеспечения ФБ требуются действия персонала: МД2 – открытие впрыска в КД; МД1 – открытие САГ Для ИСА Т42 управление давлением 1-го контура обеспечивается только системой аварийного газоудаления. Выполняется действием персонала	HEP2-T42-22-YR-D HEP2-T42-22-YR-C HEP2-T42-1-YRTQ-DC HEP2-T41-1-INJ-C HEP2-T41-1-YR-C HEP2-T41-5-YR-C HEP2-T41-9-YR-C
2	Снижение уставки поддержания давления на БРУ-А неповрежденных ПГ	Уставка снижается ниже выбранной ранее для Фазы 1 (операция б). Уставка в диапазоне 45 – 46 кгс/см <sup>2</sup> обеспечивает безопасные условия планового расхолаживания, не допустит вскипания теплоносителя 1-го контура в условиях естественной циркуляции с отключением всех насосов САОЗ ВД	Отсутствует в моделях ВАБ	–
3	Перевод насосов САОЗ ВД на рециркуляцию при контролируемом запасе теплоносителя в КД и давлении в системе 1-го контура менее давления срабатывания ПСУ аварийного ПГ	Исключает повышение давления в 1-м контуре более давления срабатывания БРУ-А и ПК аварийного ПГ В алгоритме предлагается предусмотреть следующую логику: при достижении уровня в КД более 4 м и $P_{1к} > 79$ кгс/см <sup>2</sup> насосы САОЗ ВД автоматически переводятся на работу по линии рециркуляции	Является составляющей ФБ «Управление давлением 1-го контура». Для ИСА Т41 и Т42 представлена в явном виде как действие персонала по отключению САОЗ ВД	HEP2-T41-5-TQCL-C HEP2-T42-1-YRTQ-DC
4	Локализация аварийного ПГ по пару	Закрытие БЗОК аварийного ПГ снижает количество радиоактивного теплоносителя в паропроводы 2-го контура. Слишком раннее закрытие БЗОК аварийного ПГ	Для ИСА Т41 является составляющей ФБ «Управление давлением 1-го контура и изоляция аварийного ПГ». Для	HEP2-T41-1-ISOL1-D HEP2-T41-1-

№ шага	Операция алгоритма КТР	Краткое содержание/пояснение	Влияние на модели ВАБ ВВЭР-1000/В-320	Влияние на БС и ВОП (код БС)
		приведет к росту давления до уставок срабатывания БРУ-А аварийного ПГ Предлагается предусмотреть автоматическое закрытие БЗОК аварийного ПГ после запуска Фазы 2 алгоритма (не менее 400 с от начала действия Фазы 1)	ИСА Т42 представлена в явном виде как ФБ «Изоляция аварийного ПГ по пару» В обоих ИСА выполняются оператором	ISOMSIV-C HEP2-T41-5-ISOL2-D HEP2-T41-9-ISOMSIV-C HEP2-T41-9-ISOL3-D HEP2-T41-9-ISOMSIV-C HEP2-T42-1-ISOMSIV-DC
5	Ограничение по предельному давлению в аварийном ПГ	Предлагается автоматическое открытие по блокировке арматур аварийного газоудаления сброса из КД в ББ при давлении в 1-м контуре более 80 кгс/см <sup>2</sup> и закрытие при давлении менее 78 кгс/см <sup>2</sup> . Это дополнительно обеспечит несрабатывание БРУ-А и ПК аварийного ПГ	Отсутствует в моделях ВАБ	–

Примечание. ББ – барботажный бак; БЗОК – быстродействующий запорно-отсечной клапан; БРУ-А – быстродействующая редуцирующая установка сброса пара в атмосферу; БРУ-К – быстродействующая редуцирующая установка сброса пара в конденсатор; БС – базовое событие; ВОП – вероятность ошибки персонала; ГЦК – главный циркуляционный контур; ГЦН – главный циркуляционный насос; КД – компенсатор давления; МД – механические действия; ПК – предохранительный клапан; ПСУ – паросбросные устройства; САГ – система аварийного парогазоудаления; САОЗ ВД – система аварийного охлаждения активной зоны с насосами высокого давления; ФБ – функции безопасности.

В случае, если система не вносит дополнительных критических отказов, то внедрение системы равносильно исключению влияния базовых событий (БС) с вероятностью ошибок персонала (ВОП), перечисленных в табл. 1. Влияние на ЧПАЗ исключения данных ошибок персонала проведено на основании интервала снижения риска (по результатам анализа чувствительности ВАБ) и представлено в табл. 2.

**Таблица 2. Максимальный эффект с точки зрения безопасности от внедрения автоматического управления локализацией течи в пределах ПГ в соответствии с КТР №ТР.1.0011.1640**

ИСА	Интервал снижения риска, 1/год (RRI)	Снижение суммарной ЧПАЗ, %
T41 «Малые течи из 1-го во 2-й контур»	$1,306 \cdot 10^{-7}$	0,30
T42 «Средние течи из 1-го во 2-й контур»	$8,101 \cdot 10^{-6}$	18,73
T41 и T42	$8,232 \cdot 10^{-6}$	19,03

В общем случае влияние внедрения системы на изменение показателей безопасности по 2-му фактору (перспективная реализация полностью автоматизированного режима управления авариями с межконтурными течами) можно оценить на основе анализа изменения показателей надежности системы по отношению к ВОП в проектных условиях. В этом случае относительное изменение суммарной ЧПАЗ оценивается в виде

$$\Delta \text{ЧПАЗ} = \frac{\text{RRI}}{\text{ЧПАЗ}_Б} (K - 1) \cdot 100\% , \quad (4)$$

где ЧПАЗ<sub>Б</sub> – базовое значение ЧПАЗ без внедрения системы (ЧПАЗ<sub>Б</sub> =  $4,326 \cdot 10^{-5}$  1/год); RRI – максимальный интервал снижения риска от внедрения системы; K – отношение вероятности отказа системы к ВОП при базовом значении ЧПАЗ<sub>Б</sub>.

Расчетный анализ по формуле (4) при изменении K в диапазоне значений от 1 (предельно пессимистичный случай, соответствующий гарантированному отказу системы) до 0 (предельно оптимистичный случай, соответствующий гарантированной безотказности системы) показывает:

1) для малых межконтурных течей (ИСА T41) даже в предельно оптимистичном случае суммарная ЧПАЗ уменьшается менее чем на 1 %;

2) для средних межконтурных течей (ИСА T42) уменьшение суммарной ЧПАЗ происходит более чем на 10 % уже при значениях  $K < 0,5$ .

Таким образом, внедрение системы можно отнести к области средней приоритетности для безопасности только в случае реализации полностью автоматизированного алгоритма управления авариями со средними межконтурными течами при условии общей надежности системы как минимум в два раза выше, чем надежность доминантных действий персонала для данных аварий (ИСА T42).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Скалозубов В.И., Ключников А.А., Колыханов В.Н. Основы управления запроектными авариями с потерей теплоносителя на АЭС с ВВЭР. - Чернобыль: Ин-т проблем безопасности АЭС НАН Украины, 2010.
2. Общие положения безопасности атомных станций, НП 306.2.141-2008, 2008.
3. Концептуальное техническое решение №ТР.1.0011.1640 «О разработке алгоритма автоматизации управления течами 1-го контура во 2-й для энергоблока № 1 с РУ В-302» // ГП НАЭК «Энергоатом», 2008.
4. Отчет по анализу безопасности (ОАБ). Блок № 5 Запорожской АЭС. 21.5.70.ОБ.00 // ГП НАЭК «Энергоатом», 2006.

## **АНАЛІЗ ПРІОРИТЕТНОГО ВПРОВАДЖЕННЯ МОДЕРНІЗАЦІЇ І ЗАХОДІВ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ АЕС РИЗИК-ОРІЄНТОВАНИМИ МЕТОДАМИ**

**Ю. О. Комаров, В. І. Скалозубов**

Розглянуто загальні питання пріоритетизації модернізацій та заходів з підвищення безпеки АЕС із застосуванням ризик-орієнтованих підходів. Застосування підходів показано на прикладі аналізу доцільності впровадження модернізації системи автоматизованого контролю та управління з автоматичного управління аваріями з поміжконтурними течями.

*Ключові слова:* безпека, показник безпеки, ризик-орієнтований метод, аварії з поміжконтурними течями, система автоматизованого контролю та управління.

## **PRIORITY ANALYSIS OF NPP MODERNIZATION AND SAFETY IMPROVE MEASURES BY RISK-BASED METHODS**

**Y. A. Komarov, V. I. Skalozubov**

The article deals with general issues of prioritization of modernization and safety improve measures of NPP by use of RISK-assessment approaches. Approaches apply to the expediency analyses of the implantation of I&C system modernization for automated control to interfacing LOCA are demonstrated.

*Keywords:* safety, safety criteria, risk-assessment methods, interfacing loss of coolant accident (LOCA), control and instrumentation (C&I) system.

Поступила в редакцію 11.03.11