

## ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ УПРАВЛЕНИЯ ЗАПРОЕКТНЫМИ АВАРИЯМИ НА АЭС С ВВЭР

© 2010 г. В. И. Скалозубов, Ю. Л. Коврижкин, А. В. Шавлаков<sup>1</sup>,  
Хадж Фараджаллах Даббах А.<sup>2</sup>

*Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Киев*

<sup>1</sup> *НАЭК «Энергоатом», Киев*

<sup>2</sup> *Одесский национальный политехнический университет*

Приведен и обоснован метод формирования алгоритмов по управлению запроектными авариями по критическим конфигурациям систем, обеспечивающих выполнение необходимых функций безопасности.

*Ключевые слова:* алгоритмы управления запроектными авариями, исходные события, аварийные последовательности, событийно-ориентированные аварийные инструкции, симптомно-ориентированные аварийные инструкции.

Управление запроектными авариями (УЗА) основано на регламентировании действий персонала и обеспечении организационно-технических мероприятий для исходного события/группы исходных событий аварий/аварийных ситуаций (событийно-ориентированные подходы) или на признаках исходных событий (симптомно-ориентированные подходы), а также возможных последовательностей процессов их развития.

Эксплуатационная документация по УЗА (инструкции, руководства), основанные на событийно-ориентированных подходах, можно условно определить как событийно-ориентированные аварийные инструкции (СБОУИ); а на симптомно-ориентированных подходах - событийно-ориентированные аварийные инструкции (СОАИ). Такое разделение достаточно условно, так как в инструкциях/руководствах по УЗА могут реализоваться оба подхода, и принято для удобства обоснования методического обеспечения.

Основными задачами разработки СБОУИ являются (рис. 1):

идентификация исходного события (ИС) или группы исходных событий ( $\overline{ИС}$ ) и возможных аварийных последовательностей (АП), для которых должен быть обоснован алгоритм УЗА (т.е. содержание и последовательность действий персонала);

обоснование алгоритма управления запроектными авариями – АУЗА (для единичного ИС) или обобщенного алгоритма ОАУЗА (для группы  $\overline{ИС}$ );

обоснование организационно-технических мероприятий по повышению надежности управления запроектными авариями.

Идентификация ИС в рамках СБОУИ возможна на основе прямых измерений средствами контроля непосредственных характеристик ИС. Например, для аварий с потерей теплоносителя такими средствами контроля могут быть средства измерений размера и местоположения течей, трубопроводов и корпусов оборудования реакторного контура.

В отличие от СБОУИ в СОАИ алгоритмы управления запроектными авариями обосновываются непосредственно на основе косвенного контроля признаков (симптомов), S – по отклонениям технологических параметров или радиационной обстановки (рис. 2).

Целесообразность применения СБОУИ возможна в случае наличия средств контроля, обеспечивающих диагностику всех необходимых характеристик ИС аварии/аварийной ситуации. В СБОУИ признаки аварий/аварийных ситуаций имеют вспомогательное значение для идентификации ИС.

Основным преимуществом СОАИ является возможность применения ограниченных средств диагностики ИС, которые в этом случае имеют вспомогательное значение для идентификации аварийных последовательностей, что особенно важно для доминантной (в отношении безопасности АЭС с ВВЭР) группы запроектных аварий с потерей теплоносителя, так

как создание и внедрение систем контроля, обеспечивающих достаточную диагностику всего многообразия возможных аварий с потерей теплоносителя (в том числе течи из первого контура во второй) является сложной и дорогостоящей технической задачей. Опыт эксплуатации АЭС с ВВЭР показывает, что штатные (проектные) системы контроля течей эту задачу не выполняют в полном объеме.

<b>I</b>	<b>I<sub>1</sub></b>	<b>I<sub>2</sub></b>	<b>...</b>	<b>I<sub>n</sub></b>
<b>АУЗА/ ОАУЗА</b>	<b>ИС<sub>1</sub>/ИС<sub>1</sub></b>	<b>ИС<sub>2</sub>/ИС<sub>2</sub></b>	<b>...</b>	<b>ИС<sub>n</sub>/ИС<sub>n</sub></b>
<b>АП/ИС</b>	<b>АП<sub>1</sub>/АП<sub>1</sub></b>	<b>АП<sub>2</sub>/АП<sub>2</sub></b>	<b>...</b>	<b>АП<sub>n</sub>/АП<sub>n</sub></b>
АУЗА <sub>1</sub> / ОАУЗА <sub>1</sub>	x			...
АУЗА <sub>2</sub> / ОАУЗА <sub>2</sub>		x		
· · ·	· · ·	· · ·	x	
АУЗА <sub>n</sub> / ОАУЗА <sub>n</sub>				x

Рис. 1. Принципиальная структура СБОУИ:  
 ИС – исходное событие, I - идентификаторы исходного события,  
 АУЗА – алгоритмы управления запроектными авариями.

<b>S (ИС/ИС)</b>	<b>S<sub>1</sub></b>	<b>S<sub>2</sub></b>	<b>...</b>	<b>S<sub>n</sub></b>
<b>АУЗА/ ОАУЗА</b>	<b>ИС<sub>1</sub>, АП<sub>1</sub></b>	<b>ИС<sub>2</sub>, АП<sub>2</sub></b>	<b>...</b>	<b>ИС<sub>n</sub>, АП<sub>n</sub></b>
АУЗА <sub>1</sub> / ОАУЗА <sub>1</sub>	x		· ·	
АУЗА <sub>2</sub> / ОАУЗА <sub>2</sub>		x	· ·	
· · ·			x	
АУЗА <sub>n</sub> / ОАУЗА <sub>n</sub>				x

Рис. 2. Принципиальная структура СОАИ.

Однако применение СОАИ по УЗА определяют более «жесткие» требования к обоснованию признаков (симптомов) аварий/аварийных ситуаций. Наборы и последовательности признаков должны:

однозначно соответствовать виду запроектной аварии и отличаться от соответствующих наборов и последовательностей других запроектных аварий (принцип адекватности запроектной аварии);

быть минимальными, но достаточными для идентификации запроектной аварии и оперативных действий по управлению аварийными процессами (*принцип минимальной достаточности*).

Формирование признаков, соответствующих указанным принципам, возможно на основе углубленного анализа безопасности с применением адекватного натурным условиям расчетного и экспериментального моделирования аварийных процессов.

Основные положения методического обеспечения УЗА следующие.

1. Каждому исходному событию  $ИС_i$  (или обобщенной группе исходных событий  $\overline{ИС}_i$ ) аварий/аварийных ситуаций соответствует определенный набор и последовательность реализации критических (минимальных) конфигураций систем (ККС<sub>j</sub>), обеспечивающих выполнение критических функций безопасности (КФБ<sub>j</sub>):

$$ИС_i / \overline{ИС}_i \Rightarrow \sum_j ККС_j (КФБ_j). \quad (1)$$

Соответствие (1) обосновано фактическими конструкционно-техническими и технологическими характеристиками проекта энергоблока АЭС и результатами углубленного анализа безопасности вероятностными и детерминистскими методами.

Проектом АЭС предусмотрены функции безопасности (ФБ), обеспечивающие предотвращение развития и ликвидации последствий потенциально возможных исходных событий аварий/аварийных ситуаций, набор (перечень) которых также определяется проектными характеристиками и опытом эксплуатации. Типовой набор ФБ для серийных энергоблоков АЭС с ВВЭР-1000 для примера приведен в таблице. Выполнение ФБ осуществляется предусмотренными проектом системами безопасности, специально предназначенных для выполнения ФБ, а также системами нормальной эксплуатации. Характерной особенностью проектов ВВЭР является тот факт, что для большинства ФБ их выполнение осуществляется несколькими функционально независимыми системами безопасности, которые являются многоканальными, а каждый канал способен в полном объеме выполнить необходимую ФБ. Такие проектные принципы дублирования, независимости и резервирования определяют высокий уровень безопасности ВВЭР и имеют важное значение при управлении запроектными авариями.

Для каждого потенциального ИС/обобщенной группы ИС вероятностная модель углубленного анализа безопасности (ВАБ) определяет возможные последовательности развития процесса (АП) – «деревья событий» - по оценкам вероятности выполнения системами проектных ФБ – «деревья отказов» (по терминологии ВАБ). Промежуточные и конечные состояния АП, а также соответствия условиям безопасности определяются на основе детерминистских методов («критерии успеха»).

Для управления запроектными авариями значение имеют только те АП, которые могут привести к тяжелому повреждению топлива и недопустимому выбросу радиоактивных веществ за их пределы. К таким последствиям могут привести только отказы критических (минимальных) конфигураций систем (ККС), обеспечивающих выполнение соответствующих КФБ. Остальные АП (не связанные с отказами ККС КФБ, а соответственно априори не приводящие к недопустимым последствиям) для обоснования мер по управлению запроектными авариями могут быть исключены (рассматриваются в проектных режимах).

Таким образом, каждому потенциальному ИС/обобщенной группе ИС соответствует определенный («индивидуальный») набор и последовательность реализации ККС КФБ, отказы которых могут привести к недопустимым последствиям для безопасности, что и отражает условие (1).

2. При симптомно-ориентированном подходе набор и последовательность признаков (симптомов) аварии/аварийной ситуации  $\overline{S}_i$  для исходного события/группы исходных событий  $ИС_i / \overline{ИС}_i$  также соответствует набору и последовательности соответствующей ККС, обеспечивающих выполнение КФБ:

$$\overline{S}_i (ИС_i / \overline{ИС}_i) \Rightarrow \sum_j ККС_j (КФБ_j). \quad (2)$$

**Перечень проектных функций безопасности ВВЭР 1000 (В-320)**

Код	Функции/подфункции безопасности	Требуемые системы и оборудование	Оперативное наименование
ФБ-1	Управление реактивностью		
A <sub>1</sub>	Аварийный останов реактора	СУЗ-А3	А3
B <sub>1</sub>	Ввод бора в первый контур	Система продувки-подпитки и борного регулирования	ТК+ТВ10
B <sub>2</sub>	Ввод бора в первый контур	САОЗ ВД	TQ 13,23,33
B <sub>3</sub>	Ввод бора в первый контур	САОЗ ВД	TQ 14,24,34
B <sub>4</sub>	Ввод бора в первый контур	ГЕ САОЗ	УТ
C	Отключение ГЦН аварийной петли (неуправляемый отбор пара)	ГЦН	УД
ФБ-2	Обеспечение запаса теплоносителя в первом контуре		
D <sub>1</sub>	Обеспечение запаса теплоносителя в первом контуре системой ТК	Система продувки-подпитки и борного регулирования	ТК+ТВ10
D <sub>2</sub>	Обеспечение запаса теплоносителя в первом контуре САОЗ ВД	САОЗ ВД	TQ 13,23,33
D <sub>3</sub>	Обеспечение запаса теплоносителя в первом контуре ГЕ САОЗ	ГЕ САОЗ	УТ
D <sub>4</sub>	Обеспечение запаса теплоносителя в первом контуре САОЗ НД	САОЗ НД в режиме работы через прямок гермозоны	TQ12,22,32
ФБ-3	Отвод тепла по второму контуру		
E <sub>1</sub>	Подпитка парогенераторов	Система вспомогательной питательной воды (ВПЭН)	RL
E <sub>1</sub>	Подпитка парогенераторов	Система аварийной питательной воды (АПЭН)	ТХ10,20,30
E <sub>2</sub>	Поддержание давления во втором контуре	БРУ-А	ТХ
E <sub>2</sub>	Поддержание давления во втором контуре	БРУ-К	RC
E <sub>2</sub>	Поддержание давления во втором контуре (защита второго контура от превышения давления)	ПКПГ	ТХ
E <sub>3</sub>	Расхолаживание по второму контуру	БРУ-А	ТХ
E <sub>3</sub>	Расхолаживание по второму контуру	БРУ-К	RC
ФБ-4	Отвод тепла по первому контуру		
F <sub>1</sub>	Расхолаживание по первому контуру и отвод остаточных тепловыделений	САОЗ НД в режиме планового расхолаживания	TQ12,22,32
F <sub>2</sub>	Расхолаживание по первому контуру и отвод остаточных тепловыделений	САОЗ НД в режиме работы из бака ГА-201	TQ12,22,32
F <sub>3</sub>	Расхолаживание по первому контуру и отвод остаточных тепловыделений	САОЗ ВД в режиме работы из бака ГА-201	TQ13,23,33
ФБ-5	Управление давлением первого контура		
G <sub>1</sub>	Управление давлением первого контура	Система компенсации давления первого контура (впрыск в КД от ГЦН)	УР
G <sub>1</sub>	Управление давлением первого контура	Система компенсации давления первого контура (впрыск в КД от системы ТК)	ТК

G <sub>1</sub>	Управление давлением первого контура	Система аварийного газоудаления	YR
G <sub>2</sub>	Защита первого контура от превышения давления	Система защиты первого контура от превышения давления (ПК КД)	YR
ФБ-6	Изоляция парогенератора		
P <sub>1</sub>	Изоляция парогенератора по пару	БЗОК	TX
P <sub>2</sub>	Изоляция парогенератора по питательной воде	Регуляторы и задвижки основной и аварийной питательной воды	RL + TX
ФБ-7	Обеспечение электроснабжения		
R	Аварийное электроснабжение	Система надежного электроснабжения	DG

Соответствие (2) является следствием (1) и условия однозначного соответствия набора и последовательности реализации симптомов ИС/обобщенной группы ИС с учетом принципов адекватности запроектной аварии и минимальной достаточности:

$$\bar{s}_i (ИС_i / \overline{ИС}_i) \Leftarrow ИС_i / \overline{ИС}_i. \tag{3}$$

3. Наборы возможных АП, которые могут привести к недопустимым последствиям, также определяются соответствующим набором и последовательностей ККС КФБ, так как соответствуют конкретным ИС. С учетом уравнения (1)

$$АП_i (ИС_i / \overline{ИС}_i) \Leftarrow \sum_j ККС_j (КФБ_j). \tag{4}$$

4. АУЗА должны соответствовать каждой последовательности, которая может привести к недопустимым последствиям. Следовательно,

$$\sum_j ККС_j (КФБ_j) \Leftarrow АП_j (ИС_j) \Rightarrow АУЗА_j / ОАУЗА_j. \tag{5}$$

Таким образом, с учетом приведенных положений и условий соответствия (1) – (5) общую структуру метода обоснования АУЗА по критическим конфигурациям систем (УЗА ККС) можно представить в следующем виде (рис. 3).

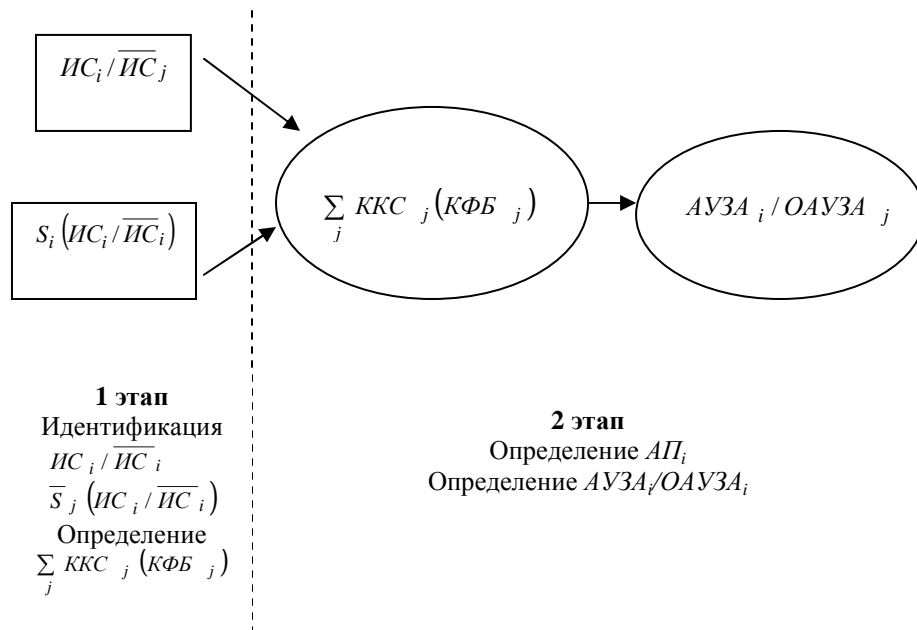


Рис. 3. Общая структура метода идентификации АУЗА по ККС, обеспечивающих выполнение КФБ (метод УЗА ККС).

Ключевым моментом метода УЗА ККС является определение необходимых и достаточных ККС, обеспечивающих выполнение КФБ, которое может быть осуществлено в рамках углубленного анализа безопасности вероятностными и детерминистскими методами. В частности, для АЭС с ВВЭР такие обоснования получены в рамках методологии ВАБ. По ККС, обеспечивающих выполнение КФБ, определяются наборы аварийных последовательностей, которые могут привести к недопустимым последствиям, а также соответствующие им АУЗА. Кроме того, ККС КФБ фактически являются основными критериями обобщения групп ИС и соответствующих признаков аварий.

Реализация метода УЗА ККС может осуществляться в два этапа (см. рис. 2):

- 1) идентификация ИС, симптомов (признаков) и ККС запроектных аварий;
- 2) идентификация АП, которые могут привести к недопустимым последствиям АУЗА.

Построение обобщенного АУЗА основывается на методе УЗА ККС. Согласно этому методу управление запроектными аварийными последовательностями (имеющими условия граничной запроектной последовательности с безопасным конечным состоянием) осуществляется алгоритмами при проектном протекании аварийных процессов. Для запроектных аварий с возможными тяжелыми последствиями *обобщенный АУЗА* для каждой группы ИС и/или симптомов ИС может быть определен по индивидуальному набору и последовательностей ККС, обеспечивающих выполнение, восстановление и дублирование КФБ.

Реализация обобщенного АУЗА поэтапно.

Этап 1. На начальном этапе оператор по контролируемым признакам или прямым методам измерений идентифицирует: принадлежность события к обобщенным симптомам ИС, имеющих общий алгоритм управления аварией; принадлежность события к обобщенным группам исходных аварийных событий, имеющих общий алгоритм управления аварией.

По результатам идентификации ИС и их симптомов определяется соответствующий индивидуальный набор ККС КФБ и алгоритм управления аварией.

Этап 2. Далее оператор осуществляет контроль выполнения ФБ и управление аварий в проектном режиме (по инструкции ликвидации аварий - ИЛА).

Этап 3. В случае невыполнения условий развития проектной аварии возникают условия запроектной аварии и на этом этапе оператор осуществляет контроль выполнения КФБ соответствующими конфигурациями систем, обеспечивающих их выполнение. В случае успешного выполнения КФБ (вплоть до минимальных конфигураций систем, обеспечивающих их выполнение) дальнейшее управление аварией осуществляется в проектном режиме по ИЛА.

Этап 4. В случае отказа на любом этапе развития аварийного процесса системы по обеспечению соответствующей КФБ возникает два одновременных этапа дальнейшего управления аварией: восстановление работоспособности каналов системы (этап 4а) и дублирование выполнения КФБ другими системами безопасности (этап 4б).

Восстановление работоспособности системы может осуществляться как периодическим повторением включения отказавших каналов системы, так и диагностикой и устранением причин отказов. Дублирование выполнения КФБ должно осуществляться, в первую очередь, другими системами, обеспечивающими по проекту выполнение аналогичных ФБ. В случае если по технологическим причинам невозможно одновременное управление аварией по восстановлению отказавших каналов системы и по дублированию выполнения КФБ другими системами, то приоритет отдается действиям по дублированию.

В случае успешных действий по дублированию и/или по восстановлению выполнения КФБ за время, отведенное для осуществления этих действий ( $t_{ii}$ ), алгоритм управления запроектной аварией повторяется для последующих ККС, обеспечивающих выполнение КФБ, вплоть до конечного безопасного состояния аварийного процесса.

Этап 5. В случае невыполнения успешных действий по дублированию и по восстановлению выполнения КФБ за время, отведенное для осуществления этих действий, могут возникнуть недопустимые последствия (тяжелое повреждение топлива, сверхнормативные ра-

диоактивные выбросы). Дальнейшие мероприятия должны осуществляться либо в соответствии с руководством по управлению тяжелыми авариями (РУТА), либо планами чрезвычайных ситуаций.

Одним из основных преимуществ представленного метода является достаточно обоснованное ограничение рассмотрения аварийных последовательностей, а соответственно и разработки АУЗА. Поэтому применение этого метода представляется перспективным для разработки руководств/инструкций по управлению запроектными авариями на АЭС с ВВЭР.

### **ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ МЕТОДИЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ УПРАВЛІННЯ ЗАПРОЕКТНИМИ АВАРІЯМИ НА АЕС З ВВЕР**

**В. І. Скалозубов, Ю. Л. Коврижкін, О. В. Шавлаков, Хадж Фараджаллах Даббах А.**

Наведено та обґрунтовано метод формування алгоритмів по управлінню позапроектними аваріями по критичних конфігураціях систем, що забезпечують виконання необхідних функцій безпеки.

*Ключові слова:* алгоритми управління позапроектними аваріями, вихідні події, аварійні послідовності, подієво-орієнтовані аварійні інструкції, симптомно-орієнтовані аварійні інструкції.

### **MAIN PROVISIONS TECHNIQUE FOR MANAGEMENT SEVERE ACCIDENT AT NPPS WITH VVER**

**V. I. Skalozubov, J. L. Kovrizhkin, O. V. Shavlakov, Haj Farajallah Dabbach A.**

Are presented and justified method of forming algorithms to manage severe accident on critical system configurations, providing the performance necessary security features.

*Keywords:* algorithms of management of beyond design accidents, initiating events, emergency sequences, event-oriented emergency instructions, symptom-oriented emergency instructions.

Поступила в редакцію 09.11.09