

**В. И. Скалозубов\*, В. Н. Ващенко, В. В. Злочевский, С. С. Яровой**

*\*Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Киев  
Государственная экологическая академия последипломного образования, Киев*

## **СИМПТОМНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ ПОДХОДЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПЕРЕЧНЕЙ ИСХОДНЫХ СОБЫТИЙ ТЯЖЕЛЫХ АВАРИЙ НА ВВЭР**

Предложены симптомно-ориентированные методы формирования перечней исходных событий тяжелых аварий. На основе этих подходов сформулированы и обоснованы достаточные перечни исходных событий тяжелых аварий.

*Ключевые слова:* тяжелая авария, исходное событие, критическая конфигурация системы, функция безопасности.

Необходимым и определяющим начальным этапом моделирования, анализа и разработки соответствующих организационно-технических мероприятий по управлению тяжелыми авариями (ТА) является обоснование и идентификация перечня исходных событий (ИС) с недопустимым повреждением ядерного топлива. Идентификация перечня ИС ТА для АЭС с ВВЭР определяется:

перечнем первичных ИС аварий (ИСА – течи реакторного контура и паропроводов, межконтурные течи, потеря электроснабжения и отказы систем, важных для безопасности), которые могут при определенных запроектных сценариях аварийных последовательностей привести к недопустимому повреждению активной зоны реактора;

перечнем и конечным состоянием запроектных аварийных последовательностей с возможными отказами критических конфигураций систем (ККС), обеспечивающих выполнение функций безопасности (ФБ) для предотвращения возникновения тяжелых аварий.

В общем случае перечень ИС ТА определяется в виде

$$P(\text{ИС ТА}) = \sum_i P(\text{ИСА}_i) \sum_j A_{P_{ij}}, \quad (1)$$

где  $P(\text{ИСА}_i)$  – перечень первичных  $i$ -х ИСА;  $A_{P_{ij}}$  – количество  $j$ -х запроектных аварийных последовательностей в  $i$ -й группе ИСА, приводящих к недопустимому повреждению топлива при одинаковых начальных условиях развития ТА и состояниях ККС, обеспечивающих выполнение необходимых ФБ.

Проведенный в [1] анализ состояния этого вопроса применительно к отечественным энергоблокам с ВВЭР определил следующие основные ограничения и недостатки общепринятых в настоящее время подходов.

1. *Недостаточная обоснованность и полнота всех возможных ИС ТА.* Так, до настоящего времени при моделировании и анализе тяжелых аварий на ВВЭР обычно в качестве ИСА рассматриваются большие течи 1-го контура или потеря питательной воды при конечных состояниях с повреждением топлива (см., например, [2, 3 и др.]). Такой подход требует дополнительных обоснований его консервативности, так как при других ИСА (например, межконтурные течи, экстремальные воздействия и т.д.) могут создаваться «худшие» условия возникновения и развития тяжелых аварий. При первичных ИСА с большими течами 1-го контура создаются более благоприятные условия для безопасности в отношении дефлаграции и детонации водорода в реакторе (повышенная концентрация водяного пара – нейтрализатора горения и взрыва водорода), а также разрушения корпуса реактора и выхода в контейнер топливосодержащих масс (пониженное давление в реакторном контуре). В итоговом отчете ВАБ-2 Запорожской АЭС [4] при анализе уязвимости серийного энергоблока с ВВЭР-1000 при ТА определен более широкий перечень первичных ИСА с отказами ККС, однако, недостаточный в соответствии с формулой(1).

© В. И. Скалозубов, В. Н. Ващенко, В. В. Злочевский, С. С. Яровой, 2012

2. *Недопустимость используемого подхода исключения из перечня ИС ТА относительно маловероятных событий* по следующим основным причинам: опыт ТА на ТМІ-2 (США), Чернобыльской АЭС и АЭС Фукусима-1 показал, что ИС ТА также являлись маловероятными, но произошли и существенно повлияли на экологическую безопасность и возможность дальнейшего существования ядерной энергетики. При этом недостаточно обоснован и сам подход исключения из рассмотрения относительно маловероятных ИС ТА: исключение одного ИС ТА может незначительно (в пределах погрешностей оценки) повлиять на снижение общих показателей безопасности, но с учетом «накопительного» эффекта таких событий влияние может быть существенным; в действующие перечни ИС ТА на ВВЭР входит большая течь 1-го контура с двусторонним разрывом главного циркуляционного трубопровода (МПА), которая имеет нулевую по статистике событий вероятность, а также другие несоответствия.

3. *Недостаточная эффективность реализации симптомно-ориентированных подходов при идентификации ИСА*, применение которых наиболее актуально для доминантных по безопасности ВВЭР групп аварий с разгерметизацией реакторного контура (течи 1-го контура и межконтурные течи). Используемые в руководствах/инструкциях по управлению запроектными авариями (РУЗА/СОАИ) наборы симптомов не соответствуют, в общем случае, принципам идентичности и минимальной достаточности, согласно которым наборы симптомов при минимальном, но достаточном их количестве должны идентифицировать каждую выделенную группу ИСА индивидуально [1]. В частности, следствием невыполнения этих принципов является тот факт, что разные группы аварий могут иметь одинаковые симптомы, что недопустимо.

Опыт большой аварии на АЭС Фукусима-1 подтвердил актуальность указанных выше вопросов идентификации ИС ТА.

1. При одинаковых ИС с полной потерей электроснабжения парогазовые взрывы и разрушения защитных барьеров безопасности произошли в разные моменты времени (12 марта на блоке № 1, 14 марта на блоке № 3 и 15 марта на блоке № 2) и в разных местах (на блоках № 1 и 3 взрывы произошли над защитной оболочкой, а на блоке № 2 – в районе тороидального подректорного теплообменника), что является косвенным подтверждением зависимости ИС ТА от предыстории развития аварийных процессов.

2. В соответствии с результатами углубленного анализа безопасности энергоблока с ВВЭР-1000 [5] вероятность возникновения первичного ИСА с полной потерей электроснабжения собственных нужд (аналог ИСА на АЭС Фукусима-1) порядка  $10^{-7}$  1/реакторо-лет, что является относительно маловероятным ИС ТА. Указанное положение подтверждает недопустимость подхода исключения из рассмотрения маловероятных ИС ТА.

3. Отсутствие достаточно эффективного симптомно-ориентированного подхода контроля и управления ТА стало одной из причин неподготовленности персонала АЭС Фукусима-1.

Таким образом, вопросы идентификации ИС ТА симптомно-ориентированными подходами являются актуальными для АЭС Украины с учетом опыта большой аварии на АЭС Фукусима-1.

*Основные положения предлагаемого симптомно-ориентированного подхода идентификации ИС ТА* заключаются в следующем.

1. Достаточный перечень ИС ТА определяется перечнем всех групп первичных ИСА и запроектными аварийными последовательностями, конечным состоянием которых является недопустимое повреждение ядерного топлива – выражение (1).

2. Каждой  $i$ -й группе ИСА соответствуют определенные набор и последовательность симптомов (признаков)  $\bar{C}_i$ , удовлетворяющие принципам идентичности и минимальной достаточности

$$P(\text{ИСА}_i) = P_i[\bar{C}_i(\Delta t_{mi})], \quad (2)$$

где набор и последовательность симптомов  $i$ -й группы ИСА

$$\bar{C}_i = \text{col}\{C_{1i}(\Delta t_{1i}), C_{2i}(\Delta t_{2i}), \dots, C_{ni}(\Delta t_{ni})\}$$

реализуется в определенные временные интервалы начала развития аварийного процесса  $\Delta t_{mi}$ .

В качестве симптомов первичных ИСА могут быть отклонения от условий нормальной эксплуатации (нейтронно-физических, теплогидродинамических, химических параметров), которые определяют автоматические срабатывания технологических защит/блокировок, а также действия операторов, характеризующие факт и условия возникновения конкретного ИСА. Набор и последовательность  $\bar{C}_i$  определяются на основе моделирования развития аварийных последовательностей каждой группы ИСА<sub>i</sub> (например, [1, 5]).

3. Набор запроектных аварийных последовательностей (СТ), приводящих к повреждению активной зоны, определяется по контролируемому факту отказа ККС, обеспечивающих выполнение необходимых ФБ:

$$АП_{ij} = АП_{ij}[СТ_{ij}(\text{отказ ККС/ФБ})]. \quad (3)$$

Перечни ФБ и систем, обеспечивающих их выполнение, для аварийного энергоблока ВВЭР-1000 приведены в табл. 1 [5].

Таблица 1. Перечень проектных функций безопасности ВВЭР-1000 (В-320)

Код	Функции/подфункции безопасности	Требуемые системы и оборудование	Оперативное наименование
<i>ФБ-1 Управление реактивностью</i>			
A <sub>1</sub>	Аварийный останов реактора	СУЗ – АЗ	АЗ
B <sub>1</sub>	Ввод бора в 1-й контур	Система продувки-подпитки и борного регулирования	ТК + ТВ10
B <sub>2</sub>	Ввод бора в 1-й контур	САОЗ ВД	TQ13,23,33
B <sub>3</sub>	Ввод бора в 1-й контур	САОЗ ВД	TQ14,24,34
B <sub>4</sub>	Ввод бора в 1-й контур	ГЕ САОЗ	УТ
C	Отключение ГЦН аварийной петли (неуправляемый отбор пара)	ГЦН	УД
<i>ФБ-2 Обеспечение запаса теплоносителя в 1-м контуре</i>			
D <sub>1</sub>	Обеспечение запаса теплоносителя в 1-м контуре системой ТК	Система продувки-подпитки и борного регулирования	ТК + ТВ10
D <sub>2</sub>	Обеспечение запаса теплоносителя в 1-м контуре САОЗ ВД	САОЗ ВД	TQ13,23,33
D <sub>3</sub>	Обеспечение запаса теплоносителя в 1-м контуре ГЕ САОЗ	ГЕ САОЗ	УТ
D <sub>4</sub>	Обеспечение запаса теплоносителя в 1-м контуре САОЗ НД	САОЗ НД в режиме работы через приямок гермозоны	TQ12,22,32
<i>ФБ-3 Отвод тепла по 2-му контуру</i>			
E <sub>1</sub>	Подпитка ПГ	Система вспомогательной питательной воды (ВПЭН)	RL
E <sub>1</sub>	Подпитка ПГ	Система аварийной питательной воды (АПЭН)	ТХ10,20,30
E <sub>2</sub>	Поддержание давления во 2-м контуре	БРУ-А	ТХ
E <sub>2</sub>	Поддержание давления во 2-м контуре	БРУ-К	RC
E <sub>2</sub>	Поддержание давления во 2-м контуре (защита 2-го контура от превышения давления)	ПК ПГ	ТХ
E <sub>3</sub>	Расхолаживание по 2-му контуру	БРУ-А	ТХ
E <sub>3</sub>	Расхолаживание по 2-му контуру	БРУ-К	RC

Продолжение табл. 1

Код	Функции/подфункции безопасности	Требуемые системы и оборудование	Оперативное наименование
<i>ФБ-4 Отвод тепла по 1-му контуру</i>			
F1	Расхолаживание по 1-му контуру и отвод остаточных тепловыделений	САОЗ НД в режиме планового расхолаживания	TQ12,22,32
F2	Расхолаживание по 1-му контуру и отвод остаточных тепловыделений	САОЗ НД в режиме работы из бака ГА-201	TQ12,22,32
F3	Расхолаживание по 1-му контуру и отвод остаточных тепловыделений	САОЗ ВД в режиме работы из бака ГА-201	TQ13,23,33
<i>ФБ-5 Управление давлением 1-го контура</i>			
G1	Управление давлением 1-го контура	Система компенсации давления 1-го контура (впрыск в КД от ГЦН)	УР
G1	Управление давлением 1-го контура	Система компенсации давления 1-го контура (впрыск в КД от системы ТК)	ТК
G1	Управление давлением 1-го контура	Система аварийного газоудаления	УР
G2	Защита 1-го контура от превышения давления	Система защиты 1-го контура от превышения давления (ПК КД)	УР
<i>ФБ-6 Изоляция ПГ</i>			
P1	Изоляция ПГ по пару	БЗОК	ТХ
P2	Изоляция ПГ по питательной воде	Регуляторы и задвижки основной и аварийной питательной воды	RL + ТХ
<i>ФБ-7 Обеспечение электроснабжения</i>			
R	Аварийное электроснабжение	Система надежного электроснабжения	DG

ККС, обеспечивающих выполнение необходимых ФБ, определяются на основе результатов моделирования запроектных аварийных последовательностей [1, 5].

Таким образом, достаточный перечень ИС ТА определяется по формуле (1) с учетом формул (2) и (3):

$$П(ИС ТА) = \sum_i П_i(\bar{C}_i) \sum_j АП_{ij}(СТ_{ij}). \quad (4)$$

Углубленный анализ безопасности энергоблоков с ВВЭР показывает, что доминантными вкладчиками в общие показатели безопасности являются ИСА с разгерметизацией реакторного контура (течи 1-го контура в ГО и межконтурные течи). Для этих групп аварий определены следующие ККС, обеспечивающих выполнение критических ФБ (КФБ) [5].

1. Для ИСА S1 «Большие течи 1-го контура в пределах ГО» КФБ является «Обеспечение запаса теплоносителя» с критическими конфигурациями

$$1/2 \text{ и } 1/2 \text{ ГЕ САОЗ} + 1/3 \text{ САОЗ НД или } 2/3 \text{ САОЗ ВД.}$$

2. Для ИСА S2 (средние неизолируемые течи 1-го контура эквивалентным диаметром от 50 до 200 мм) КФБ являются управление реактивностью и обеспечение запаса теплоносителя при ККС

$$АЗ \text{ или } АТWS + 1/3 \text{ САОЗ ВД} + (1/2 + 1/2) \text{ ГЕ САОЗ} + 1/3 \text{ САОЗ НД.}$$

3. Для идентификации диапазонов размеров и соответствующих ККС малых течей 1-го контура, не компенсируемых системой подпитки-продувки ТК (ИСА S3), в [5] выполнены два расчетных обоснования:

по оценке верхнего граничного диаметра течи, для которого допустима ККС (сценарий № 2)

$$1/3 \text{ САОЗ ВД} + 1/4 \text{ БРУ-А} + 1/2 \text{ ВПЭН или } 2/3 \text{ АПЭН;}$$

по оценке максимально допустимого времени начала расхолаживания по 2-му контуру со скоростью 60 °С/ч при граничной конфигурации систем (сценарий № 9)

$$1/3 \text{ САОЗ ВД (TQ14)} + 2/4 \text{ ГЕ САОЗ} + 1/3 \text{ САОЗ НД} + 1/4 \text{ БРУ-А} + 1/2 \text{ ВПЭН или } 1/3 \text{ АПЭН.}$$

Ключевым вопросом для УЗА ИСА S3 является срабатывание САОЗ ВД (TQ13) для управления реактивностью и обеспечения запаса теплоносителя: в случае срабатывания ККС САОЗ ВД (TQ13) отвод тепла по 2-му контуру осуществляется в режиме поддержания постоянного давления, а в случае отказа ККС САОЗ ВД (TQ13) – в режиме расхолаживания по 2-му контуру. В первом случае ККС ИС S3 фактически является

АЗ или АТWS + 1/3 САОЗ ВД (TQ13) + 1/2 ВПЭН, или 2/3 АПЭН + 1/4 БРУ-А,  
или 1/4 БРУ-К (P = const).

Во втором случае (при полном отказе САОЗ ВД (TQ13) ККС ИС S3:

АЗ или АТWS + 1/2 ВПЭН, или 2/3 АПЭН + 1/4 БРУ-А,  
или 1/4 БРУ-К (в режиме расхолаживания) + 2/3 TQ14 + YR + 2/4 ГЕ САОЗ + 1/3 САОЗ НД.

4. Для идентификации верхней границы малых течей 1-го контура, компенсируемых системой подпитки-продувки ТК (ИСА S4) и соответствующих ККС, в [5] также было проведено фактически только два расчетных моделирования для оценки верхнего граничного размера течи и максимального допустимого времени начало расхолаживания со скоростью 60 °С/ч по 2-му контуру.

Для управления этой запроектной группой аварий ключевым вопросом является срабатывание хотя бы одного канала системы подпитки-продувки. При этом в случае успешного подключения насосов борного концентрата ТВ10 работоспособность ТК не более 25 ч. Однако для ИСА S4 отказы ТК могут дублироваться САОЗ ВД (1/3 TQ13 или 2/4 TQ14). В случае выполнения функций управление реактивностью и обеспечение запасом теплоносителя высоконапорными системами отвод тепла по 2-му контуру осуществляется в режиме поддержания постоянного давления. В противном случае перевод реактора в безопасное состояние осуществляется в режиме расхолаживания.

Эти результаты расчетного моделирования определяют две основные ККС для ИСА S4:

при срабатывании ККС высоконапорных систем

1/3 ТК + ТВ10 или 1/3 TQ13, или 2/3 TQ14 + 1/2 ВПЭН, или 1/3 АПЭН + 1/4 БРУ-А,  
или 1/4 БРУ-К (в режиме поддержания давления) + ЛСБ;

при полном отказе ККС высоконапорных систем

АЗ или АТWS + 1/2 ВПЭН, или 2/3 АПЭН + 1/4 БРУ-А, или 1/4 БРУ-К + YR +  
+ 2/4 ГЕ САОЗ + 1/3 САОЗ НД (в режиме расхолаживания) + ЛСБ.

5. Расчетные обоснования АП малой течи из 1-го контура во 2-й (ИСА T41) и средней течи (ИСА T42) в [5] выполнены в основном для оценки максимально допустимого времени начала расхолаживания через 2-й контур со скоростью 60 °С/ч и для перевода САОЗ НД на плановое расхолаживание при полном открытии и заклинивании БРУ-А на аварийном ПГ.

ККС, обеспечивающих выполнение КФБ, для группы ИСА T41:

1/3 ТК + (ТВ10) или 1/3 TQ13, или 2/3 TQ14 + АЗ, или АТWS + 1/2 ВПЭН,  
или 2/3 АПЭН + 1/4 БРУ-А, или БРУ-К (в режиме расхолаживания) +  
+ 1/1 БЗОК + изоляция RL + закрытие БРУ-А (после открытия) + YR,  
или впрыск в КД от ТК, или закрытие после открытия САОЗ ВД +  
+ 2/4 ГЕ САОЗ + 1/3 САОЗ НД на ЛПР.

В основе стратегии управления аварией с малой течью из 1-го контура во 2-й находятся действия персонала по снижению давления в 1-м и 2-м контурах (аварийный ПГ) ниже 70 кгс/м<sup>2</sup> для предотвращения потери теплоносителя через БРУ-А в случае отказа его закрытия и загрязнения окружающей среды. После снижения давления 1-го контура ниже 70 кгс/м<sup>2</sup>

необходимо закрыть БЗОК и не допускать роста давления в аварийном ПГ выше уставок открытия ПСУ.

6. ККС, обеспечивающих выполнение КФБ, для группы ИСА Т42:

АЗ или АТWS + 1/3 ТQ13, или 2/3 ТQ14 + 1/1 БЗОК + изоляция RL (по питательной воде) + 1/1 БРУ-А (закрытие после открытия) + 1/2 ВПЭН, или 2/3 АПЭН + 1/4 БРУ-А, или 1/4 БРУ-К (в режиме расхолаживания) + YR, или закрытие САОЗ ВД после открытия + 2/4 ГЕ САОЗ + 1/3 САОЗ НД на ЛПР.

Определенные на основе представленного подхода и результатов расчетного моделирования [5] симптомы первичных ИСА приведены в табл. 2, а в табл. 3 – симптомы начала внутрикорпусной стадии ТА.

Достаточный перечень ИС ТА, идентифицированных по симптомно-ориентированному подходу, приведен в табл. 4.

Таблица 2. Обобщенные признаки (симптомы) ИС аварий с потерей теплоносителя в соответствии с принципами минимальности, достаточности и адекватности

С	Симптомы (признаки) первичных ИСА	Группа первичных ИСА					
		S1	S2	S3	S4	T41	T42
C <sub>0</sub>	Снижение уровня КД и давления 1-го контура, стабильное открытие регуляторов ТК (начало ИСА)						
<i>Формирование сигнала срабатывания АЗ</i>							
C <sub>1</sub>	не более 2 с с начала ИСА по уставкам У <sub>1</sub> и/или У <sub>2</sub> и/или У <sub>3</sub>						
C <sub>2</sub>	2 – 50 с с начала ИСА по уставкам У <sub>1</sub> и/или У <sub>2</sub> и/или У <sub>3</sub>						
C <sub>3</sub>	более 50 с с начала ИСА по уставкам У <sub>1</sub> и/или У <sub>2</sub> и/или У <sub>3</sub> или без автоматического срабатывания АЗ						
<i>Формирование сигнала срабатывания САОЗ</i>							
C <sub>4</sub>	не более 10 с с начала ИСА по уставкам У <sub>2</sub> и У <sub>4</sub>						
C <sub>5</sub>	10 – 200 с с начала ИСА по уставкам У <sub>2</sub> и У <sub>4</sub>						
C <sub>6</sub>	10 – 200 с с начала ИСА по уставке У <sub>2</sub>						
C <sub>7</sub>	200 – 4000 с с начала ИСА по уставкам У <sub>2</sub> и У <sub>5</sub> или У <sub>6</sub>						
C <sub>8</sub>	200 – 4000 с с начала ИСА по уставке У <sub>2</sub>						
<i>Формирование сигнала на закрытие СК ТГ</i>							
C <sub>9</sub>	не более 1 с с начала ИСА по уставке У <sub>7</sub>						
C <sub>10</sub>	10 – 100 с с начала ИСА по уставке У <sub>7</sub>						
C <sub>11</sub>	более 100 с с начала ИСА по уставке У <sub>7</sub>						
<i>Формирование условий срабатывания ГЕ САОЗ</i>							
C <sub>12</sub>	1 – 200 с с начала ИСА по уставке У <sub>8</sub>						
C <sub>13</sub>	более 200 с с начала ИСА по уставке У <sub>8</sub>						
<i>Формирование условий отключения ГЦН</i>							
C <sub>14</sub>	не более 30 с с начала ИСА по уставке У <sub>9</sub>						
C <sub>15</sub>	30 – 300 с с начала ИСА по уставке У <sub>9</sub>						
C <sub>16</sub>	более 300 с с начала ИСА по уставке У <sub>9</sub>						
C <sub>17</sub>	Повышение давления и активности под оболочкой						
C <sub>18</sub>	Повышение активности на выходе эжекторов турбины, в паропроводах и продувочной воды ПГ						

Примечания:

У<sub>1</sub> – уставка срабатывания АЗ «Давление над активной зоной менее 148 кгс/см<sup>2</sup> при температуре в горячих нитках более 260 °С и мощности реактора более 75 % номинальной мощности»;

У<sub>2</sub> – уставка срабатывания АЗ «Уменьшение разности температуры насыщения теплоносителя и температуры теплоносителя в горячей нитке любой петли менее 10 °С»;

У<sub>3</sub> – уставка срабатывания АЗ «Давление над активной зоной менее 140 кгс/см<sup>2</sup> при температуре теплоносителя в горячих нитках более 260 °С и мощности реактора менее 75 % номинальной мощности»;

У<sub>4</sub> – уставка срабатывания САОЗ «Давление под оболочкой более 0,3 кгс/см<sup>2</sup>»;

У<sub>5</sub> – сигнализация «Давление под оболочкой более 0,2 кгс/см<sup>2</sup>»;

У<sub>6</sub> – сигнализация «Давление под оболочкой более 0,003 кгс/см<sup>2</sup>»;

У7 – уставка закрытия СК ТГ «Снижение давления перед ГПЗ менее 52 кгс/см<sup>2</sup> или отключение двух ТПН»;

У8 – уставка срабатывания ГЕ САОЗ «Давление в 1-м контуре ниже 60 кгс/см<sup>2</sup>»;

У9 – уставка отключения ГЦН «Снижение давления масла менее 0,6 кгс/см<sup>2</sup>».

**Таблица 3. Симптомы (признаки) начала внутрикорпусной стадии тяжелой аварии для запроектных аварий с «неплотным» реакторным контуром**

СТ	Симптомы (признаки) начала тяжелой аварии	Группа первичных ИСА					
		S1	S2	S3	S4	T41	T42
СТ1	Отказы (2 + 2) каналов ГЕ САОЗ						
СТ2	Отказы всех каналов САОЗ НД и САОЗ ВД						
СТ3	Отказ аварийной защиты (АЗ) ⇒ АТWS						
СТ31	Отказы трех ПК КД + АЗ						
СТ32	Отказы отвода тепла по 2-му контуру: (2 ВПЭН + 3 АПЭН + 4 БРУ-А + 4 БРУ-К) + АЗ						
СТ33	Отказы по управлению реактивностью борного раствора: (ТQ13 + ТQ14) + АЗ						
СТ4	Отказы всех каналов САОЗ ВД						
СТ5	Отказы всех каналов САОЗ НД						
СТ6	Отказы систем по отводу тепла по 2-му контуру: (ВПЭН + АПЭН + БРУ-А + БРУ-К)						
СТ7	Отказы систем по управлению давлением 1-го контура						
СТ8	Отказы: (ТК + ТВ10) + все каналы САОЗ ВД + АЗ + АТWS						
СТ9	Отказы: БЗОК + изоляция RL						

**Таблица 4. Перечень идентифицированных по симптомно-ориентированному подходу исходных событий тяжелых аварий на ВВЭР-1000/В-320**

Идентификатор исходного события ТА	Условия возникновения исходного события ТА	Симптомы первичных ИСА	Симптомы начала повреждения топлива
ИСТА-S1-СТ1	ИСА S1 «Большие течи 1-го контура в ГО» при отказе пассивной части САОЗ	C <sub>0</sub> , C <sub>1</sub> , C <sub>4</sub> , C <sub>9</sub> , C <sub>12</sub> , C <sub>17</sub>	СТ1
ИСТА-S1-СТ2	ИСА S1 «Большие течи 1-го контура в ГО» при отказе активной части САОЗ	C <sub>0</sub> , C <sub>1</sub> , C <sub>4</sub> , C <sub>9</sub> , C <sub>12</sub> , C <sub>17</sub>	СТ2
ИСТА-S2-СТ31	ИСА S2 «Средние течи 1-го контура в ГО» при отказе АЗ и функции управления давлением	C <sub>0</sub> , C <sub>2</sub> , C <sub>5</sub> , C <sub>9</sub> , C <sub>13</sub> , C <sub>17</sub>	СТ31
ИСТА-S2-СТ32	ИСА S2 «Средние течи 1-го контура в ГО» при отказе АЗ и функции отвода тепла по 2-му контуру	C <sub>0</sub> , C <sub>2</sub> , C <sub>5</sub> , C <sub>9</sub> , C <sub>13</sub> , C <sub>17</sub>	СТ32
ИСТА-S2-СТ33	ИСА S2 «Средние течи 1-го контура в ГО» при отказе АЗ и функции управления реактивностью	C <sub>0</sub> , C <sub>2</sub> , C <sub>5</sub> , C <sub>9</sub> , C <sub>13</sub> , C <sub>17</sub>	СТ33
ИСТА-S2-СТ2	ИСА S2 «Средние течи 1-го контура в ГО» при отказе САОЗ ВД или активной части САОЗ	C <sub>0</sub> , C <sub>2</sub> , C <sub>5</sub> , C <sub>9</sub> , C <sub>13</sub> , C <sub>17</sub>	СТ4 или СТ2
ИСТА-S3-СТ31	ИСА S3 «Малые некомпенсируемые ТК течи 1-го контура в ГО» при отказе АЗ и функции управления давлением	C <sub>0</sub> , C <sub>2</sub> , C <sub>7</sub> , C <sub>9</sub> , C <sub>13</sub> , C <sub>17</sub>	СТ31
ИСТА-S3-СТ32	ИСА S3 «Малые некомпенсируемые ТК течи 1-го контура в ГО» при отказе АЗ и функции отвода тепла по 2-му контуру	C <sub>0</sub> , C <sub>2</sub> , C <sub>7</sub> , C <sub>9</sub> , C <sub>13</sub> , C <sub>17</sub>	СТ32
ИСТА-S3-СТ33	ИСА S3 «Малые некомпенсируемые ТК течи 1-го контура в ГО» при отказе АЗ и функции	C <sub>0</sub> , C <sub>2</sub> , C <sub>7</sub> , C <sub>9</sub> , C <sub>13</sub> , C <sub>17</sub>	СТ33

	управления реактивностью		
--	--------------------------	--	--

Идентификатор исходного события ТА	Условия возникновения исходного события ТА	Симптомы первичных ИСА	Симптомы начала повреждения топлива
ИСТА-S3-СТ5	ИСА S3 «Малые некомпенсируемые ТК течи 1-го контура в ГО» при отказе САОЗ НД или активной части САОЗ	C <sub>0</sub> , C <sub>2</sub> , C <sub>7</sub> , C <sub>9</sub> , C <sub>13</sub> , C <sub>17</sub>	СТ5 или СТ2
ИСТА-S3-СТ6	ИСА S3 «Малые некомпенсируемые ТК течи 1-го контура в ГО» при отказе функции отвода тепла по 2-му контуру	C <sub>0</sub> , C <sub>2</sub> , C <sub>7</sub> , C <sub>9</sub> , C <sub>13</sub> , C <sub>17</sub>	СТ6
ИСТА-S4-СТ8	ИСА S4 «Малые компенсируемые ТК течи 1-го контура в ГО» при отказах ТК, САОЗ ВД, АЗ и функций, обеспечивающих АТWS	C <sub>0</sub> , C <sub>3</sub> , C <sub>7</sub> , C <sub>11</sub> , C <sub>13</sub> , C <sub>17</sub>	СТ8
ИСТА-S4-СТ5	ИСА S4 «Малые компенсируемые ТК течи 1-го контура в ГО» при отказах САОЗ НД или активной части САОЗ	C <sub>0</sub> , C <sub>3</sub> , C <sub>7</sub> , C <sub>11</sub> , C <sub>13</sub> , C <sub>17</sub>	СТ5 или СТ2
ИСТА-T41-СТ8	ИСА T41 «Малые течи из 1-го контура во 2-й» при отказах ТК, САОЗ ВД, АЗ и функций, обеспечивающих АТWS	C <sub>0</sub> , C <sub>3</sub> , C <sub>8</sub> , C <sub>11</sub> , C <sub>13</sub> , C <sub>18</sub>	СТ8
ИСТА-T41-СТ5	ИСА T41 «Малые течи из 1-го контура во 2-й» при отказах САОЗ НД или активной части САОЗ	C <sub>0</sub> , C <sub>3</sub> , C <sub>8</sub> , C <sub>11</sub> , C <sub>13</sub> , C <sub>18</sub>	СТ5 или СТ2
ИСТА-T42-СТ31	ИСА T42 «Средние течи из 1-го контура во 2-й» при отказе АЗ и функции управления давлением	C <sub>0</sub> , C <sub>2</sub> , C <sub>6</sub> , C <sub>10</sub> , C <sub>13</sub> , C <sub>18</sub>	СТ31
ИСТА-T42-СТ32	ИСА T42 «Средние течи из 1-го контура во 2-й» при отказе АЗ и функции отвода тепла по 2-му контуру	C <sub>0</sub> , C <sub>2</sub> , C <sub>6</sub> , C <sub>10</sub> , C <sub>13</sub> , C <sub>18</sub>	СТ32
ИСТА-T42-СТ33	ИСА T42 «Средние течи из 1-го контура во 2-й» при отказе АЗ и функции управления реактивностью	C <sub>0</sub> , C <sub>2</sub> , C <sub>6</sub> , C <sub>10</sub> , C <sub>13</sub> , C <sub>18</sub>	СТ33
ИСТА-T42-СТ4	ИСА T42 «Средние течи из 1-го контура во 2-й» при отказе САОЗ ВД или активной части САОЗ	C <sub>0</sub> , C <sub>2</sub> , C <sub>6</sub> , C <sub>10</sub> , C <sub>13</sub> , C <sub>18</sub>	СТ4 или СТ2
ИСТА-T42-СТ6	ИСА T42 «Средние течи из 1-го контура во 2-й» при отказе функции отвода тепла по 2-му контуру	C <sub>0</sub> , C <sub>2</sub> , C <sub>6</sub> , C <sub>10</sub> , C <sub>13</sub> , C <sub>18</sub>	СТ6
ИСТА-T42-СТ7	ИСА T42 «Средние течи из 1-го контура во 2-й» при отказе функции управления давлением 1-го контура	C <sub>0</sub> , C <sub>2</sub> , C <sub>6</sub> , C <sub>10</sub> , C <sub>13</sub> , C <sub>18</sub>	СТ8

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Скалозубов В. И., Ключников А. А., Колыханов В. Н. Основы управления запроектными авариями с потерей теплоносителя на АЭС с ВВЭР. – Чернобыль: ИПБ АЭС НАН Украины, 2010. – 400 с.
2. Обеспечение локализирующих функций защитной оболочки НВАЭС-2 при запроектной аварии с течами из реакторной установки (ФГУП «Атомэнергопроект» – ИПБЯЭ РНЦ «Курчатовский институт») // Материалы конф. «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». – Подольск (Россия): ФГУП ОКБ «ГП», 2008.
3. Звонарев Ю., Будаев М., Кобзарь В., Волчек А. Валидация компьютерного кода ASTEC и применение для анализа безопасности АЭС с ВВЭР // Code application and PSA methodologies. Paper No 1. The first European Review Meeting on Severe Accident Research (ERMSAR-2005). – Aix-en-Provence (France), 14 – 16 Nov. 2005.
4. Вероятностный анализ безопасности 2-го уровня энергоблока № 5 ЗАЭС. Итоговый отчет Запорожской АЭС. – Энергодар, 2009.
5. Отчет по анализу безопасности энергоблока № 5 ЗАЭС. – 10054DL13R. – ГП НАЭК «Энергоатом»,

2000.

**В. І. Скалозубов, В. М. Ващенко, В. В. Злочевський, С. С. Яровой****СИМПТОМНО-ОРИЄНТОВАНИ ПІДХОДИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПЕРЕЛІКІВ  
ВИХІДНИХ ПОДІЙ ВАЖКИХ АВАРІЙ НА ВВЕР**

Запропоновано симптомно-орієнтовані методи формування переліків вихідних подій важких аварій. На основі цих підходів сформульовано та обґрунтовано достатні переліки вихідних подій важких аварій.

*Ключові слова:* важка аварія, вихідна подія, критична конфігурація системи, функція безпеки.

**V. I. Skalozubov, V. M. Vashchenko, V. V. Zlochevsky, S. S. Jarovoj****SYMPTOM-INFORMED APPROACHES FOR IDENTIFICATION OF LISTS OF INITIAL  
EVENTS OF SEVERE ACCIDENTS AT VVER**

The symptom-informed methods to form lists of initial events of severe accidents are offered in the paper. Based on these approaches sufficient lists of initial events of severe accidents are formulated and proved.

*Keywords:* severe accident, initial event, critical system configuration, safety function.

Надійшла 10.08.2011

Received 10.08.2011