

УДК 621.039

В. И. Скалозубов¹, И. Л. Козлов², С. В. Клевцов³, Е. Н. Письменный³¹Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, г. Киев²Одесский национальный политехнический университет, г. Одесса³НТУУ “Киевский политехнический институт”, г. Киев

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РЕАЛИЗАЦИИ ПРИНЦИПОВ АДЕКВАТНОСТИ И ДОСТАТОЧНОСТИ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ТЯЖЕЛЫХ АВАРИЙ НА ВВЭР С УЧЕТОМ УРОКОВ ФУКУСИМСКОЙ АВАРИИ

В статье рассмотрены методические основы реализации принципов адекватности и достаточности симптомно-ориентированного подхода идентификации тяжелых аварий с учетом уроков Фукусимской аварии. На примере доминантных для безопасности ВВЭР аварий с течами реакторного контура идентифицированы обобщенные признаки исходных аварийных событий и начала внутрикорпусной стадии тяжелой аварии.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке эффективных стратегий управления тяжелыми авариями.

Ключевые слова: симптомно-ориентированный подход, тяжелая авария, исходное событие аварии (ИСА).

Необходимым и определяющим начальным этапом моделирования, анализа и разработки соответствующих организационно-технических мероприятий по управлению тяжелыми авариями является обоснование и идентификация перечня исходных событий и аварийных последовательностей тяжелых аварий (ИСТА и АП ТА). Идентификация перечня ИСТА для АЭС с ВВЭР определяется:

перечнем ИСА, которые могут при определенных запроектных сценариях АП привести к недопустимому повреждению активной зоны реактора;

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

В общем случае перечень ИСТА тяжелых аварий

$$P(\text{ИСТА}) = \sum_i P(\text{ИСА}_i) \sum_j AP_{ij} \quad (1)$$

где $P(\text{ИСА}_i)$ — перечень первичных i -х ИСА; AP_{ij} — количество j -х запроектных АП в i -й группе ИСА, приводящих к недопустимому повреждению топлива при одинаковых начальных условиях развития тяжелых аварий и состояниях ККС, обеспечивающих выполнение необходимых ФБ.

Проведенный в [1—3] анализ состояния этого вопроса применительно к отечественным энергоблокам с водо-водяными энергетическими реакторами (ВВЭР) определил следующие основные ограничения и недостатки общепринятых в настоящее время подходов.

1. Недостаточная обоснованность и полнота всех возможных ИСТА. Так, до настоящего времени при моделировании и анализе тяжелых аварий на ВВЭР обычно в качестве ИСА рассматриваются большие течи 1-го контура/полное обесточивание/потеря пита-

тельной воды при конечных состояниях с повреждением топлива. Такой подход требует дополнительных обоснований его консервативности, так как при других ИСА (например, межконтурные течи, экстремальные воздействия и т.д.) могут создаться “худшие” условия возникновения и развития тяжелых аварий.

2. Недостаточная обоснованность используемого подхода исключения из перечня ИСТА относительно маловероятных событий по следующим основным причинам: опыт тяжелых аварий на АЭС ТМ-2 (США), Чернобыльской и Fukushima-Daiichi показал, что ИСТА 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 ИСТА: исключение одного ИСТА может незначительно (в пределах погрешностей оценки) повлиять на снижение общих показателей безопасности, но с учетом “накопительного” эффекта таких событий влияние может быть существенным.

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 для идентификации ИСА и АП наборы симптомов не соответствуют, в общем случае, принципу адекватности и минимальной достаточности, согласно которому наборы симптомов при минимальном, но достаточном их количестве должны идентифицировать каждую выделенную группу ИСА индивидуально. В частности, следствием невыполнения этих принци-

пов является тот факт, что разные группы аварий могут иметь одинаковые симптомы, что недопустимо.

Уроки аварии на АЭС Fukushima-Daiichi подтвердили актуальность указанных выше вопросов идентификации ИС ТА [2,3].

1. При одинаковых ИС с полной потерей электропитания 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 подректора теплообменника), что является косвенным подтверждением зависимости ИС и АП ТА от предыстории развития аварийных процессов.

2. В соответствии с результатами углубленного анализа безопасности энергоблока с ВВЭР-1000, выполненного эксплуатирующей организацией ГПНАЭК “Энергоатом”, вероятность возникновения первичного ИСА с полной потерей электроснабжения собственных нужд (аналог ИСА на АЭС Fukushima-Daiichi) порядка 10^{-7} /реактор-год, что является относительно маловероятным событием. Указанное положение подтверждает недопустимость подхода исключения из рассмотрения маловероятных ИС ТА.

3. Отсутствие достаточно эффективного симптомо-ориентированного подхода контроля и управления тяжелыми авариями стало одной из причин неподготовленности персонала АЭС Fukushima-Daiichi.

Таким образом, вопросы идентификации ИС ТА являются актуальными для АЭС Украины с учетом уроков аварии на АЭС Fukushima-Daiichi. Основные положения предлагаемого подхода идентификации ИС ТА заключаются в следующем.

1. Достаточный перечень ИС ТА определяется перечнем всех групп ИСА и запроектных АП, конечным состоянием которых является недопустимое повреждение ядерного топлива.

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

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

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 Δt_{mi} . В качестве признаков 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 детерминистского моделирования развития АП каждой группы ИСА_{*i*}.

3. Набор запроектных АП и признаков начала тяжелых аварий CT определяется по контролируемому факту отказа ККС, обеспечивающих выполнение необходимых ФБ

$$AP_{ij} = AP_{ij}[CT_{ij}(\text{отказ ККС/ФБ})] \quad (3)$$

Перечни ФБ и систем, обеспечивающих их выполнение, для серийного энергоблока ВВЭР-1000 приведены в табл. 1. ККС, обеспечивающие выполнение необходимых ФБ, определяются на основе результатов моделирования запроектных АП.

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

$$P(ИСТА) = \sum_i P_i(\bar{C}_i) \sum_j AP_{ij}(CT_{ij}) \quad (4)$$

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 гермообъем (ГО) и межконтурные течи). Для этих групп аварий определены следующие ККС, обеспечивающие выполнение критических функций безопасности (КФБ).

1. Для ИСА S1 “Большие течи 1-го контура в пределах ГО” КФБ является “Обеспечение запаса теплоносителя” с критическими конфигурациями 1/2 и 1/2 ГЕ САОЗ + 1/3 САОЗ НД или 2/3 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

A3 или + 1/3 САОЗ ВД + (1/2 + 1/2) ГЕ САОЗ + 1/3 САОЗ НД.

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

оценке верхнего граничного диаметра течи, для которого допустима ККС

1/3 САОЗ ВД + 1/4 БРУ-А + 1/2 ВПЭН или 2/3 АПЭН;

оценке максимально допустимого времени начала расхолаживания по 2-му контуру со скоростью 60 °С/ч при граничной конфигурации систем

1/3 САОЗ ВД (ТQ14) + 2/4 ГЕ САОЗ + 1/3 САОЗ НД +

1/4 БРУ-А + 1/2 ВПЭН или 1/3 АПЭН

Таблица 1. Перечень проектных функций безопасности САОЗ-1000/В-320

Код	Функции/подфункции безопасности	Требуемые системы и оборудование	Оперативное наименование
ФБ-1 Управление реактивностью			
A ₁	Аварийный останов реактора	СУЗ — АЗ	АЗ
B ₁	Ввод бора в 1-й контур	Система продувки-подпитки и борного регулирования	ТК + ТВ10
B ₂	Ввод бора в 1-й контур	САОЗ ВД	TQ13,23,33
B ₃	Ввод бора в 1-й контур	САОЗ ВД	TQ14,24,34
B ₄	Ввод бора в 1-й контур	ГЕ САОЗ	УТ
C	Отключение ГЦН аварийной петли (неуправляемый отбор пара)	ГЦН	УД
ФБ-2 Обеспечение запаса теплоносителя в 1-м контуре			
D ₁	Обеспечение запаса теплоносителя в 1-м контуре системой продувки-подпитки	Система продувки-подпитки и борного регулирования	ТК + ТВ10
D ₂	Обеспечение запаса теплоносителя в 1-м контуре САОЗ ВД	САОЗ ВД	TQ13,23,33
D ₃	Обеспечение запаса теплоносителя в 1-м контуре ГЕ САОЗ	ГЕ САОЗ	УТ
D ₄	Обеспечение запаса теплоносителя в 1-м контуре САОЗ НД	САОЗ НД в режиме работы через прямик гермозоны	TQ12,22,32
ФБ-3 Отвод тепла по 2-му контуру			
E ₁	Подпитка ПГ	Система вспомогательной питательной воды (ВПЭН)	RL
		Система аварийной питательной воды (АПЭН)	ТХ10,20,30
E ₂	Поддержание давления во 2-м контуре Поддержание давления во 2-м контуре (защита 2-го контура от превышения давления)	БРУ-А	ТХ
		БРУ-К	RC
E ₃	Расхолаживание по 2-му контуру	БРУ-А	ТХ
		БРУ-К	RC
ФБ-4 Отвод тепла по 1-му контуру			
F ₁	Расхолаживание по 1-му контуру и отвод остаточных тепловыделений	САОЗ НД в режиме планового расхолаживания	TQ12,22,32
F ₂		САОЗ НД в режиме работы из бака ГА-201	TQ12,22,32
F ₃		САОЗ ВД в режиме работы из бака ГА-201	TQ13,23,33
ФБ-5 Управление давлением 1-го контура			
G ₁	Управление давлением 1-го контура	Система компенсации давления 1-го контура (впрыск в КД от ГЦН)	УР
		Система компенсации давления 1-го контура (впрыск в КД от системы продувки-подпитки)	ТК
G ₁	Управление давлением 1-го контура	Система аварийного газоудаления	УР
G ₂	Защита 1-го контура от превышения давления	Система защиты 1-го контура от превышения давления (ПК КД)	УР
P ₁	Изоляция ПГ по пару	БЗОК	ТХ
P ₂	Изоляция ПГ по питательной воде	Регуляторы и задвижки основной и аварийной питательной воды	RL + ТХ
ФБ-7 Обеспечение электроснабжения			
R	Аварийное электроснабжение	Система надежного электроснабжения	DG

Примечание. В таблице и далее по тексту статьи использованы сокращения: СУЗ — система управления и защиты; АЗ — аварийная защита; САОЗ ВД — система аварийного охлаждения активной зоны; ВД — высокое давление; НД — низкое давление; ГЕ — гидроемкость; ГЦН — главный циркуляционный насос; ПГ — парогенератор; ВПЭН — вспомогательный питательный электронасос; АПЭН — аварийный питательный электронасос; БРУ-А — быстродействующая

редукционная установка сброса пара в атмосферу; БРУ-К — быстродействующая редукционная установка сброса пара в конденсатор; ПК — предохранительный клапан; КД — компенсатор давления; БЗОК — быстродействующий запорный отсеочный клапан.

Ключевым вопросом при управлении запроектной аварией 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, также было проведено фактически только два расчетных моделирования для оценки верхнего граничного размера течи и максимально допустимого времени начала 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 системы подпитки-продувки (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,

где ЛСБ — локализирующая система безопасности.

5. Расчетные обоснования АП малой течи из 1-го контура во 2-й (ИСА T41) и средней течи (ИСА T42) 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/м² для предотвращения потери теплоносителя через БРУ-А в случае отказа его закрытия и загрязнения окружающей среды.

6. ККС, обеспечивающих выполнение КФБ, для группы ИСА T42:

АЗ или АТWS + 1/3 TQ13 или 2/3 TQ14 + 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,

где ЛПР — линия планового расхолаживания.

Определенные на основе представленного подхода и результатов расчетного моделирования симптомы первичных ИСА приведены в табл. 2, а конфигурации систем для начала внутрикорпусной стадии тяжелой аварии — в табл. 3. В табл. 2 и 3: ИСА S1, S2, S4 — соответственно большие, средние, малые некомпенсируемые течи 1-го контура; ИСА T41, T42 — соответственно малые и средние межконтурные течи. Достаточный перечень ИС ТА приведен в табл. 4.

Таблиця 2. Обобщенные признаки развития аварий с потерей теплоносителя в соответствии с принципами минимальности, достаточности и адекватности

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

Примечания:

У₁ — уставка срабатывания АЗ “Давление над активной зоной менее 148 кгс/см² при температуре в горячих нитках более 260 °С и мощности реактора более 75 % номинальной мощности”;У₂ — уставка срабатывания АЗ “Уменьшение разности температуры насыщения теплоносителя и температуры теплоносителя в горячей нитке лобой петли менее 10 °С”;У₃ — уставка срабатывания АЗ “Давление над активной зоной менее 140 кгс/см² при температуре теплоносителя в горячих нитках более 260 °С и мощности реактора менее 75 % номинальной мощности”;У₄ — уставка срабатывания САОЗ “Давление под оболочкой более 0,3 кгс/см²”;У₅ — сигнализация “Давление под оболочкой более 0,2 кгс/см²”;У₆ — сигнализация “Давление под оболочкой более 0,003 кгс/см²”;У₇ — уставка закрытия стопорного клапана турбогенератора “Снижение давления перед главной паровой задвижкой менее 52 кгс/см² или отключение двух турбопитательных насосов”;У₈ — уставка срабатывания ГЕ САОЗ “Давление в 1-м контуре ниже 60 кгс/см²”;У₉ — уставка отключения ГЦН “Снижение давления масла менее 0,6 кгс/см²”.

Таблица 3. Конфигурации отказа систем для начала внутрикорпусной стадии тяжелой аварии при запроектной аварии с “неплотным” реакторным контуром

СТ	Конфигурации отказа систем для начала тяжелой аварии	Группа 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 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 ИС ТА на ВВЭР-1000/В-320

Идентификатор ИС ТА	Условия возникновения ИС ТА	Признаки ИСА	Признаки начала повреждения топлива
ИСТА-S1-СТ1	ИСА S1 “Большие течи 1-го контура в ГО” при отказе пассивной части САОЗ	C ₀ , C ₁ , C ₄ , C ₉ , C ₁₂ , C ₁₇	СТ1
ИСТА-S1-СТ2	ИСА S1 “Большие течи 1-го контура в ГО” при отказе активной части САОЗ	C ₀ , C ₁ , C ₄ , C ₉ , C ₁₂ , C ₁₇	СТ2
ИСТА-S2-СТ31	ИСА S2 “Средние течи 1-го контура в ГО” при отказе АЗ и функции управления давлением	C ₀ , C ₂ , C ₅ , C ₉ , C ₁₃ , C ₁₇	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 ₀ , C ₂ , C ₅ , C ₉ , C ₁₃ , C ₁₇	СТ32
ИСТА-S2-СТ33	ИСА S2 “Средние течи 1-го контура в ГО” при отказе АЗ и функции управления реактивностью	C ₀ , C ₂ , C ₅ , C ₉ , C ₁₃ , C ₁₇	СТ33
ИСТА-S2-СТ2	ИСА S2 “Средние течи 1-го контура в ГО” при отказе САОЗ ВД или активной части САОЗ	C ₀ , C ₂ , C ₅ , C ₉ , C ₁₃ , C ₁₇	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 ₀ , C ₂ , C ₇ , C ₉ , C ₁₃ , C ₁₇	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 ₀ , C ₂ , C ₇ , C ₉ , C ₁₃ , C ₁₇	СТ32
ИСТА-S3-СТ33	ИСА S3 “Малые некомпенсируемые ТК течи 1-го контура в ГО” при отказе АЗ и функции управления реактивностью	C ₀ , C ₂ , C ₇ , C ₉ , C ₁₃ , C ₁₇	СТ33
ИСТА-S3-СТ5	ИСА S3 “Малые некомпенсируемые ТК течи 1-го контура в ГО” при отказе САОЗ НД или активной части САОЗ	C ₀ , C ₂ , C ₇ , C ₉ , C ₁₃ , C ₁₇	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 ₀ , C ₂ , C ₇ , C ₉ , C ₁₃ , C ₁₇	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 ₀ , C ₃ , C ₇ , C ₁₁ , C ₁₃ , C ₁₇	СТ8
ИСТА-S4-СТ5	ИСА S4 “Малые компенсируемые ТК течи 1-го контура в ГО” при отказах САОЗ НД или активной части САОЗ	C ₀ , C ₃ , C ₇ , C ₁₁ , C ₁₃ , C ₁₇	СТ5 или СТ2
ИСТА-T41-СТ8	ИСА T41 “Малые течи из 1-го контура во 2-й” при	C ₀ , C ₃ , C ₈ , C ₁₁ ,	СТ8

	отказах ТК, САОЗ ВД, АЗ и функций, обеспечивающих АТWS	C ₁₃ , C ₁₈	
ИСТА-Т41-СТ5	ИСА Т41 “Малые течи из 1-го контура во 2-й” при отказах САОЗ НД или активной части САОЗ	C ₀ , C ₃ , C ₈ , C ₁₁ , C ₁₃ , C ₁₈	СТ5 или СТ2
ИСТА-Т42-СТ31	ИСА Т42 “Средние течи из 1-го контура во 2-й” при отказе АЗ и функции управления давлением	C ₀ , C ₂ , C ₆ , C ₁₀ , C ₁₃ , C ₁₈	СТ31
ИСТА-Т42-СТ32	ИСА Т42 “Средние течи из 1-го контура во 2-й” при отказе АЗ и функции отвода тепла по 2-му контуру	C ₀ , C ₂ , C ₆ , C ₁₀ , C ₁₃ , C ₁₈	СТ32
ИСТА-Т42-СТ33	ИСА Т42 “Средние течи из 1-го контура во 2-й” при отказе АЗ и функции управления реактивностью	C ₀ , C ₂ , C ₆ , C ₁₀ , C ₁₃ , C ₁₈	СТ33
ИСТА-Т42-СТ4	ИСА Т42 “Средние течи из 1-го контура во 2-й” при отказе САОЗ ВД или активной части САОЗ	C ₀ , C ₂ , C ₆ , C ₁₀ , C ₁₃ , C ₁₈	СТ4 или СТ2
ИСТА-Т42-СТ6	ИСА Т42 “Средние течи из 1-го контура во 2-й” при отказе функции отвода тепла по 2-му контуру	C ₀ , C ₂ , C ₆ , C ₁₀ , C ₁₃ , C ₁₈	СТ6
ИСТА-Т42-СТ7	ИСА Т42 “Средние течи из 1-го контура во 2-й” при отказе функции управления давлением 1-го контура	C ₀ , C ₂ , C ₆ , C ₁₀ , C ₁₃ , C ₁₈	СТ8

Выводы

1. Рассмотрены методические основы реализации принципов адекватности и достаточности симптомно-ориентированного подхода идентификации тяжелых аварий с учетом уроков Фукусимской аварии.

2. На примере доминантных для безопасности

ВВЭР аварий с течами реакторного контура идентифицированы обобщенные признаки исходных аварийных событий и начала внутрикорпусной стадии тяжелой аварии.

3. Полученные результаты могут быть использованы при разработке эффективных стратегий управления тяжелыми авариями

Список использованной литературы

1. Скалозубов В. И. Основы управления запроектными авариями с потерей теплоносителя на АЭС с ВВЭР / В. И. Скалозубов, А. А. Ключников, В. Н. Колыханов // Чернобыль : ИПБ АЭС НАНУ, 2010. — 400 с.
2. Nuclear Safety in Light Water Reactors: Severe Accident Phenomenology. SARNET/ Ed. by Bal Raj Sehgal. — Support provided by the SARNET (Severe Accident Network) in the Framework Programmes of Research of the European Commission, 2012. — 714 p.
3. Скалозубов В. И. Анализ причин и последствий аварии на АЭС Fukushima как фактор предотвращения тяжелых аварий в корпусных реакторах / В. И. Скалозубов, А. А. Ключников, В. Н. Ващенко, С. С. Яровой // Чернобыль : ИПБ АЭС НАНУ, 2012. — 280 с..

Получено 09.06.2015