

УДК: 621.039

DOI: 10.26277/SECNRS.2026.119.1.002

© 2026. Все права защищены.

## АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ВЕРОЯТНОСТНОГО АНАЛИЗА БЕЗОПАСНОСТИ УРОВНЯ 1 В ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ВЕРОЯТНОСТНОГО АНАЛИЗА БЕЗОПАСНОСТИ УРОВНЯ 2

Любарский А. В.\*, канд. техн. наук (Lyubarskiy\_AV@aep.ru),  
Бредова В. А.\*\* (bredova@secnrs.ru),  
Берг Т. В.\*\* (berg@secnrs.ru),  
Морозов В. Б.\*, д-р техн. наук (Morozov\_VB@aep.ru),  
Токмачев Г. В.\*, канд. техн. наук (Tokmachev\_GV@aep.ru),  
Федулов М. В.\* (Fedulov\_MV@aep.ru)

Статья поступила в редакцию 11 февраля 2026 г.

### Аннотация

В статье выполнен анализ рекомендаций документов Ростехнадзора и МАГАТЭ в части формирования и использования состояний с повреждением источников радиоактивности (СПИР) в вероятностном анализе безопасности уровня 2 (ВАБ-2). Рассмотрены признаки СПИР в моделях ВАБ-2 и способы преобразования результатов вероятностного анализа безопасности уровня 1 (ВАБ-1) в исходные данные для ВАБ-2 в непрерывной модели и в разорванной, основанной на формировании СПИР. Приведены примеры построения непрерывной модели ВАБ-2 без формирования СПИР и модели, основанной на формировании СПИР. Показаны преимущества использования непрерывной модели.

В статье проанализированы рекомендации РБ-044-18 по использованию СПИР. Сделан вывод о целесообразности дополнения РБ-044-18 для учета разных подходов к разработке моделей ВАБ-2, в частности включения рекомендаций, позволяющих разрабатывать непрерывные модели ВАБ-2 без необходимости формирования СПИР, и рекомендаций к выбору сценариев запроектных и тяжелых аварий в поддержку ВАБ-2.

► **Ключевые слова:** вероятностный анализ безопасности уровня 2, состояния с повреждением источников радиоактивности, дерево развития тяжелых аварий, непрерывная и разорванная модели.

**Статья публикуется в порядке дискуссии.**

Редакция журнала будет признательна авторам статей за альтернативные мнения по данному вопросу.

\* АО «Атомэнергопроект», Москва, Россия.

\*\* Федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности», Москва, Россия.

## PRESENT ISSUES OF CONVERSION OF THE RESULTS OF A LEVEL 1 PROBABILISTIC SAFETY ANALYSIS INTO INPUT DATA FOR A LEVEL 2 PROBABILISTIC SAFETY ANALYSIS

Lyubarsky A. V.\*, Ph. D.,  
Bredova V. A.\*\*,  
Berg T. V.\*\*,  
Morozov V. B.\*, D. Sc.,  
Tokmachev G. V.\*, Ph. D.,  
Fedulov M. V.\*

The article was received by the editors' crew on February 11<sup>th</sup>, 2026.

### *Abstract*

*The recommendations of the regulatory documents of Rostekhnadzor and the IAEA related to the formation and use of plant damage states (PDS) in level 2 probabilistic safety analysis (PSA-2) are analyzed in the article. The PDS attributes in PSA-2 models are considered as well as methods for transformations of level 1 probabilistic safety analysis (PSA-1) results in the input data for PSA-2 in the continuous model and separated model that is based on PDS. The example of the construction of continuous PSA-2 model without PDS formation and the model that is based on PDS is provided. The advantages of continuous model are demonstrated.*

*The recommendations of RB-044-18 on the use of PDS are analyzed in the article. Provided is the conclusion on the usefulness of the update of the RB-044-18 aimed to account for different approaches for PSA-2 model development, in particular; inclusion of recommendations, the development of continuous PSA-2 models without necessity for PDS formation and inclusion of recommendations for selection of beyond-design-basis and severe accidents scenarios in support of PSA-2.*

► **Keywords:** *level 2 probabilistic safety analysis, plant damage states, severe accidents progression event tree, continuous and separated models.*

### **The article is published for discussion purposes.**

*The editors' crew of the journal would be grateful to the authors of articles for alternative opinions on this topic.*

\* JSC "Atomenergoproekt", Moscow, Russia.

\*\* Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety, Moscow, Russia.

## Введение

Одним из первых этапов при разработке вероятностного анализа безопасности уровня 2 (ВАБ-2) традиционно является преобразование результатов вероятностного анализа безопасности уровня 1 (ВАБ-1) в исходные данные для ВАБ-2 (формирование набора состояний с повреждением источников радиоактивности (СПИР)). Необходимость выполнения данной задачи обусловлена распространенным в мировой практике подходом к выполнению ВАБ-2 [1] и регламентируется федеральными нормами и правилами в области использования атомной энергии «Основные требования к вероятностному анализу безопасности блока атомной станции» (НП-095-15) [2], порядок ее выполнения приведен в руководстве по безопасности при использовании атомной энергии «Рекомендации по разработке вероятностного анализа безопасности уровня 2 для блока атомной станции» (РБ-044-18) [3].

Целью формирования СПИР, как и целью всей задачи преобразования результатов ВАБ-1 в исходные данные для ВАБ-2, является передача такой информации из ВАБ-1, которая была бы достаточна для разработки дерева развития тяжелых аварий (ДРТА) (или по терминологии SSG-4 [1] – дерева событий герметичного ограждения (ГО)), а вместе с информацией, содержащейся в самом ДРТА, была бы достаточна для оценки вероятностей функциональных событий (ФС) ДРТА. В свою очередь, ДРТА строится таким образом, чтобы для каждого его конечного состояния можно было бы однозначно ответить на следующие вопросы:

- Какой вид повреждения ГО произошел (байпас ГО, разрушение оболочки ГО, проплавление бетонной шахты реактора и т. п.)?
- Какова энергия и место (высота) выброса?
- Реализован ли механизм снижения величины выброса для рассматриваемого вида повреждения ГО (осаждение, фильтрация и т. п.)?
- Когда произошло повреждение ГО? (В настоящее время в нормативных документах Российской Федерации в области использования атомной энергии нет разделения на ранний и поздний большой аварийный выброс, однако ответ на этот вопрос крайне важен для разработки стратегии защиты населения с использованием результатов ВАБ-2).

Первые три вопроса важны с точки зрения оценки величин выброса и дозовых нагрузок на население, последний вопрос – с точки зрения того, какой имеется запас времени для реализации мер по защите населения.

Пп. 23 и 24 [3] косвенно указывают на цель и принципы формирования СПИР:

*«П. 23. ... СПИР формируются исходя из схожести реакции блока АС по сценарию аварии после повреждения источника радиоактивности (включая воздействие на ГО и связанные с ним системы и/или аварийный выброс). Формирование СПИР и оценка их вероятностей обеспечивают преобразование результатов ВАБ уровня 1 в исходные данные ВАБ уровня 2. ...*

*П. 24. СПИР рекомендуется определять на основе рассмотрения множества характерных признаков (атрибутов). При этом рекомендуется, чтобы конечные состояния аварийных последовательностей, группируемые в одно СПИР, обладали сходными значениями всех характерных признаков».*

Подход, рекомендованный в [3] (и поддерживаемый также в [1]), ориентирован на так называемые разорванные модели ВАБ-1 и ВАБ-2. В разорванной модели все аварийные последовательности (АП) ВАБ-1, приводящие к тяжелой аварии и обладающие схожими признаками, объединяются в группы АП, называемые СПИР, их вероятности суммируются и тем самым определяются вероятности реализации каждого СПИР. Далее, для каждого СПИР (или групп СПИР, если удастся объединить несколько СПИР в одну группу), разрабатывается уникальное ДРТА, параметром исходного события (ИС) которого является вероятность СПИР и логика которого учитывает все особенности каждого СПИР, важные для определения нагрузок на ГО с целью оценки вероятностей различных видов его разрушения. При этом программное средство, в котором разрабатывается ДРТА, может отличаться от того, в котором разрабатываются СПИР.

В разорванной модели ВАБ разработка СПИР и точная информация о значении каждого из его признаков являются определяющими для правильного учета особенностей каждого СПИР в ДРТА. Например, если одним из признаков СПИР является неработоспособность системы изоляции ГО, то в ДРТА для этого СПИР не рассматриваются явления, приводящие к разрушению ГО, так как ГО для этого СПИР уже не герметично. Если одним из признаков СПИР является неработоспособность спринклерной системы, то в соответствующем ДРТА постулируется ее отказ, но при этом может рассматриваться возможность ее восстановления для предотвращения разрушения ГО из-за переопрессовки.

В пп. 25 и 26 [3] приводятся рекомендации по выбору и использованию признаков СПИР, так чтобы для каждого СПИР была техническая воз-

возможность разработать ДРТА и оценить вероятности ФС, используемых в ДРТА для корректной оценки конечных состояний ДРТА с последующей привязкой этих состояний к той или другой категории выброса. Важно отметить, что формально количество СПИР, даже предполагая, что каждый из рекомендованных п. 26 [3] признаков имеет только два значения, равно  $2^N$  в степени  $N$  ( $N$  – количество признаков СПИР), то есть 1 024, если  $N = 10$ . А если учесть количество эксплуатационных состояний (порядка 10), которые тоже влияют на «реакции блока АС по сценарию аварии после повреждения источника радиоактивности» (п. 23 [3]), то количество СПИР может превышать 10 000. Очевидно, что строить модели для всех СПИР крайне трудоемко, а при группировании АП в СПИР имеет место потеря части информации, что может оказать влияние на результаты. На практике количество СПИР существенно меньше 10 000, так как часть СПИР имеют пренебрежимо малую вероятность, а другие могут быть объединены в один при доминирующем влиянии одного или нескольких признаков (например, при значении «не изолировано» признака «изоляция ГО» другие признаки не влияют на развитие тяжелой аварии с точки зрения большого аварийного выброса).

В отличие от разорванной, в непрерывной модели ВАБ-1 и ВАБ-2 (далее – непрерывная модель ВАБ-2) ДРТА является продолжением модели ВАБ-1, разработанной в среде одного и того же программного средства. В непрерывной модели ВАБ-2 нет необходимости формировать признаки СПИР и передавать в ДРТА информацию из СПИР, так как она может быть получена непосредственно из ДРТА или передана в ДРТА непосредственно из модели ВАБ-1. Все необходимые комбинации событий присутствуют в непрерывной модели ВАБ-1, таким образом нет необходимости их повторного группирования для отражения всех признаков СПИР. Это упрощает и делает более прослеживаемой логическую модель ВАБ, включая ВАБ-1 и ВАБ-2, и ускоряет расчет.

Целью данной статьи является демонстрация возможности эффективной передачи информации из ВАБ-1 в ВАБ-2 без разработки СПИР и преимуществ такого подхода.

### Способы передачи информации из ВАБ-1 в ВАБ-2 для разорванной и непрерывной моделей ВАБ-2

Несмотря на некоторую неполноту формулировки целей формирования СПИР в [3], в целом

признаки СПИР отражают необходимый объем информации, которая должна быть передана в ДРТА, если она не может быть получена непосредственно из самого ДРТА.

Поэтому для того, чтобы сравнить способы передачи информации из ВАБ-1 в ВАБ-2, рассмотрим признаки формирования СПИР, рекомендуемые в [3].

В табл. № 1 приведен анализ способов передачи информации из ВАБ-1 в ВАБ-2 для двух подходов:

- а) с использованием разорванной модели, требующий формирования СПИР;
- б) с использованием непрерывной модели, не требующий формирования СПИР.

Как видно из табл. № 1, передача информации из ВАБ-1 в ВАБ-2 в непрерывной модели ВАБ-2 может быть успешно выполнена без формирования СПИР.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что для разработки непрерывной модели ВАБ-2 этап формирования СПИР как минимум избыточен.

### Пример построения модели ВАБ-2

#### Описание примера

Пример моделей ВАБ-2 разработан для ядерного топлива в реакторе типа ВВЭР при работе энергоблока на мощности для внутренних ИС, не связанных с исходным байпасом ГО (таких, как межконтурная течь 1-го контура за пределы ГО или разрыв теплообменной трубки парогенератора).

В примере построения моделей ВАБ-2 показаны способы передачи информации из ВАБ-1 в ВАБ-2 без формирования СПИР (для непрерывной модели ВАБ-2) и с формированием СПИР (для разорванной модели).

При построении примера в обеих моделях ВАБ-2 учитывались два явления, приводящие к снижению давления в реакторе:

1. Действия оператора по снижению давления для предотвращения разрушения корпуса реактора при высоком давлении в переходных процессах путем открытия импульсно-предохранительного устройства компенсатора давления и линий системы аварийного газоудаления. Если оператор своевременно выполняет это действие, то плавление топлива в активной зоне и разрушение корпуса реактора происходят при низком давлении.

2. Высокотемпературное разрушение соединительного трубопровода компенсатора давления или трубопроводов главного циркуляционного контура при высоком давлении.

Таблица № 1

**Анализ признаков состояния с повреждением источников радиоактивности в моделях ВАБ-2**  
**Analysis of plant damage state attributes in PSA-2 models**

| Признак СПИР (п. 26 [3])  | Способ передачи информации   |  |   | Учет в ДРГА   |                       |
|---|--|--|---|---|-----------------------|
|   | С использованием СПИР  | Без использования СПИР   | С использованием СПИР   | Без использования СПИР  | С использованием СПИР |
| ИС или группы ИС (большая или малая течь теплоносителя 1-го контура, переходный процесс, течь теплоносителя 1-го контура за пределы ГО и другие ИС) | С помощью назначения кода, соответствующего группе ИС, в кодировке СПИР  | С помощью формирования граничного условия, соответствующего группе ИС для всех ИС, входящих в группу                 | Учитывается в логике ДРГА, разработанного для СПИР, и при назначении вероятностей ФС ДРГА   | Учитывается при назначении состояний ФС ДРГА, меняющих вероятность и (или) логику ДРГА. Для АП с неизолированными течами теплоносителя 1-го контура за пределы ГО, как правило, строится отдельное ДРГА |                       |
| Зона возникновения ИС (помещение или помещения, возникновение ИС в которых влияет на развитие запроектных аварий, включая тяжелую аварию)           | С помощью назначения кода, соответствующего зоне возникновения ИС с течью, при кодировании СПИР  | С помощью формирования граничного условия, соответствующего зоне возникновения ИС с течью                            | Учитывается при назначении вероятностей ФС, определяющих разрушение ГО из-за дефлации/детонации водорода и окиси углерода в конкретном ДРГА для СПИР или ДРГА непрерывной модели ВАБ-2  |   |                       |
| Параметры контура циркуляции теплоносителя (например, давление в контуре циркуляции теплоносителя в момент повреждения активной зоны реактора)      | С помощью назначения кода, соответствующего давлению в реакторе в момент начала тяжелой аварии, при кодировании СПИР   | С помощью граничного условия, характеризующего ИС, с точки зрения давления в реакторе в момент начала тяжелой аварии | Учитывается при:<br>1. назначении вероятностей ФС, определяющих разрушение ГО из-за дефлации/детонации водорода и окиси углерода в конкретном ДРГА для СПИР или в ДРГА непрерывной модели ВАБ-2;<br>2. назначении вероятности высокотемпературного разрушения трубопроводов 1-го контура или теплообменных трубок парогенератора в конкретном ДРГА для СПИР или в ДРГА непрерывной модели ВАБ-2 |   |                       |
|   | <p>1. В разрабатываемых интерфейсных деревьях событий или непосредственно в ДРГА как разорванной, так и непрерывной модели ВАБ-2, как правило, учитываются действия персонала по сбросу давления 1-го контура.</p> <p>2. Для эксплуатационных состояний с открытым реактором и для бассейна выдержки давление всегда имеет признак «низкое».</p> <p>3. Давление в момент повреждения твэл в активной зоне существенно влияет на феноменологию развития тяжелой аварии.</p> <p>При высоком давлении в момент повреждения топлива в реакторе невозможно ввод теплоносителя от системы аварийного охлаждения активной зоны низкого давления или пассивных систем аварийного охлаждения реактора, либо из-за действия оператора, либо из-за высокотемпературного разрушения трубопроводов 1-го контура до того, как произошло повреждение корпуса реактора. Если же тяжелая авария происходит при низком давлении, то это является признаком того, что гидроэмкости первой и второй ступени уже опустошены или исходно неработоспособны. Крайне важно, что интенсивность и глубина парцикрониевой реакции также зависят от давления в момент начала тяжелой аварии</p> |  |   |   |                       |

| Признак СПИР (п. 26 [3])  | Способ передачи информации  |  | Учет в ДРГА   |   |
|---|---|--|---|---|
|   | С использованием СПИР   | Без использования СПИР   | С использованием СПИР   | Без использования СПИР  |
| Состояние систем безопасности и других систем (работоспособны/неработоспособны)   | С помощью назначения кода, соответствующего состоянию активных или пассивных систем. Активные или пассивные системы, влияющие на ход развития тяжелой аварии, моделируются в интерфейсных деревьях событий  | Активные или пассивные системы, влияющие на ход развития тяжелой аварии, моделируются непосредственно в ДРГА | Учитывается при:<br>1. назначении конечных состояний ДРГА конкретных СПИР или ДРГА непрерывной модели ВАБ-2 с точки зрения времени выброса из ГО (в случае его байпаса или разрушения), например, при работоспособности пассивных систем залива активной зоны может назначаться конечное состояние, соответствующее позднему выбросу, при отказе – раннему;<br>2. построении ДРГА конкретных СПИР или ДРГА непрерывной модели ВАБ-2 (если в результате детерминистического анализа показано, что после снижения давления в реакторе дальнейшая эскалация тяжелой аварии может быть остановлена и выброс как водорода, так и продуктов деления из поврежденных твэл ограничен) | Учитывается при:<br>1. назначении конечных состояний ДРГА конкретных СПИР или ДРГА непрерывной модели ВАБ-2 с точки зрения времени выброса из ГО (в случае его байпаса или разрушения), например, при работоспособности пассивных систем залива активной зоны может назначаться конечное состояние, соответствующее позднему выбросу, при отказе – раннему;<br>2. построении ДРГА конкретных СПИР или ДРГА непрерывной модели ВАБ-2 (если в результате детерминистического анализа показано, что после снижения давления в реакторе дальнейшая эскалация тяжелой аварии может быть остановлена и выброс как водорода, так и продуктов деления из поврежденных твэл ограничен) |
| Состояние локализуемых систем безопасности (исключая систему изолирующей арматуры ГО) (работоспособны/неработоспособны) | С помощью назначения кода, соответствующего состоянию локализуемых систем безопасности. Локализуемые системы моделируются в интерфейсных деревьях событий   | Локализуемые системы безопасности моделируются непосредственно в ДРГА  | Учитывается при:<br>1. оценке вероятности разрушения ГО из-за статического давления в конкретном ДРГА для СПИР или в ДРГА для непрерывной модели ВАБ-2;<br>2. назначении вероятностей ФС, определяющих разрушение ГО из-за дефлаграции/детонации водорода и окиси углерода в конкретном ДРГА для СПИР или в ДРГА для непрерывной модели ВАБ-2   | Учитывается при:<br>1. оценке вероятности разрушения ГО из-за статического давления в конкретном ДРГА для СПИР или в ДРГА для непрерывной модели ВАБ-2;<br>2. назначении вероятностей ФС, определяющих разрушение ГО из-за дефлаграции/детонации водорода и окиси углерода в конкретном ДРГА для СПИР или в ДРГА для непрерывной модели ВАБ-2   |
| Состояние ГО (герметично/негерметично)  | В рассматриваемом примере ГО изначально герметично. Негерметичность ГО, связанная с открытыми шлюзами или проходящими через арматуры ГО». Негерметичность ГО, вызванная ИС (внешними воздействиями, включая сейсмические), учитывается в вероятности ФС, связанной с разрушением ГО в ДРГА для СПИР или в ДРГА непрерывной модели ВАБ-2 |  |   |   |
| Состояние систем отвода тепла из ГО (работоспособны/неработоспособны)   | Аналогично признаку «Состояние локализуемых систем безопасности, признак не используется  |  |   |   |
| Состояние системы изолирующей арматуры ГО (работоспособны/неработоспособны)   | С помощью назначения кода, соответствующего состоянию системы изолирующей арматуры ГО. Система изолирующей арматуры ГО моделируется в интерфейсных деревьях событий   | Система изолирующей арматуры ГО моделируется в ДРГА  | Учитывается при назначении конечного состояния ДРГА для конкретных СПИР или ДРГА непрерывной модели ВАБ-2   |   |

| Признак СПИР (п. 26 [3])   | Способ передачи информации   |  | Учет в ДРГА   |   |
|--|--|--|---|---|
|  | С использованием СПИР  | Без использования СПИР   | С использованием СПИР   | Без использования СПИР                      |
| Состояние фильтрующих элементов ГО (работоспособны/неработоспособны) | С помощью назначения кода, соответствующего состоянию системы фильтрующих элементов ГО.<br>Система фильтрующих элементов может моделироваться в интерфейсных деревьях событий, но, как правило, моделируется в ДРГА для каждого СПИР | Система фильтрующих элементов моделируется в ДРГА  | Учитывается при назначении конечного состояния ДРГА для конкретных СПИР или ДРГА непрерывной модели ВАБ-2 |   |
| Состояние систем электроснабжения (работоспособны/неработоспособны)  | С помощью назначения кода, соответствующего состоянию системы фильтрующих элементов ГО   | В непрерывной модели состояние систем электроснабжения в ДРГА для ВАБ-2 известно и не требует отдельного учета | Учитывается путем моделирования потери питания активных систем в ФС ДРГА для конкретных СПИР              | Учитывается автоматически в моделях ФС ДРГА |
|  | Признак, как правило, не используется, так как даже в разорванной модели ВАБ-1 и ВАБ-2 он проявляется через состояние других систем, учитываемых в ВАБ-2   |  |   |   |

Таблица № 2

**Учитываемые признаки состояния с повреждением источников радиоактивности**  
**Considered attributes of plant damage state**

| Признак СПИР                               | Описание признака  | Коды признака и их значения   |
|--|--|---|
| ИС или группы ИС                           | Категория ИС, послужившего причиной тяжелой аварии           | T – переходные процессы;<br>L – течи теплоносителя 1-го контура внутри ГО;<br>I – течи теплоносителя 1-го контура за пределы ГО   |
| Параметры контура циркуляции теплоносителя | Давление в 1-ом контуре в момент начала тяжелой аварии       | L – низкое давление;<br>H – высокое давление  |
| Состояние систем безопасности              | Статус пассивной системы аварийного охлаждения активной зоны | W1 – работоспособность гидромоостей систем аварийного охлаждения активной зоны в количестве, достаточном для предотвращения повреждения топлива в течение 24 ч;<br>W2 – количество работоспособных гидромоостей систем аварийного охлаждения активной зоны недостаточно для предотвращения повреждения топлива в течение 24 ч |
| Состояние системы изолирующей арматуры ГО  | Состояние локализующей арматуры ГО                           | I1 – закрытие арматуры на всех проходах через ГО, связанных с окружающей средой в ГО;<br>I2 – незакрытие арматуры хотя бы на одной проходке через ГО, связанной с окружающей средой в ГО  |
| Состояние локализующих систем безопасности | Состояние спринклерной системы                               | S1 – работа хотя бы одного канала спринклерной системы от приемка с подачей воды на спринклерные гребенки;<br>S2 – отказ всех каналов спринклерной системы  |

Если снижение давления происходит в результате разрушения этих трубопроводов, то предполагается, что ядерное топливо повреждается при высоком давлении, а корпус реактора – при низком.

В примере рассматриваются не все признаки СПИР, указанные в табл. № 1, а только приведенные в табл. № 2. Кроме того, все ФС, связанные с разрушением ГО из-за дефлаграции/детонации водорода, представлены в упрощенном виде. Такое упрощение вводится только с целью ограничения объема статьи.

Пример разработан в среде программного средства «Risk Spectrum PSA» [4], но принципы построения модели применимы для любого типа реактора и в среде любого программного средства, позволяющего разрабатывать сложные модели ВАБ. Предлагаемый подход не имеет ограничений по количеству учитываемых признаков и может быть использован для всех ИС, эксплуатационных состояний и источников радиоактивности.

На рис. 1 приведено упрощенное дерево событий для ИС «Переходный процесс» из ВАБ-1, использованное для разработки примера.

### Построение модели ВАБ-2 без использования состояний с повреждением источников радиоактивности

На рис. 2 приведено ДРТА «DRTA1» модели ВАБ-2, разработанной без использования СПИР, связанное со всеми конечными состояниями «CD» (Core Damage – повреждение активной зоны) всех АП модели ВАБ-1 (конечные состояния «DRTA1» в дереве событий «Переходный процесс» на рис. 1). В табл. № 3 приведено краткое описание моделей АП «DRTA1». В табл. № 4 приведено описание ФС «DRTA1» с указанием граничных условий, используемых для изменения логики «DRTA1» или вероятностей ФС.

### Построение модели ВАБ-2 с использованием состояний с повреждением источников радиоактивности

На рис. 3 приведен пример интерфейсного дерева событий «IDC», разработанного для формирования СПИР, обусловленных конечными состояниями АП дерева событий для ИС «Переходный процесс».

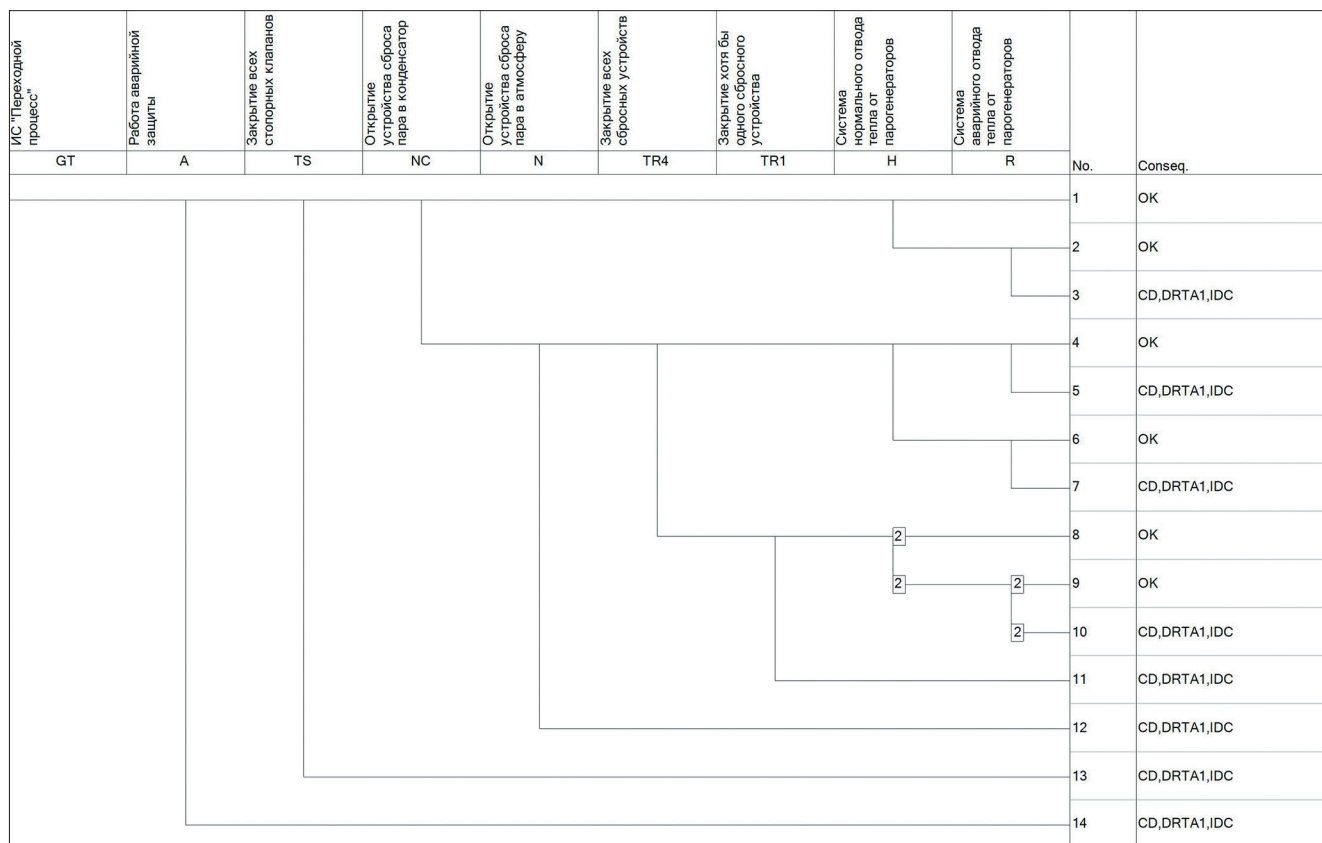


Рис. 1. Упрощенное дерево событий из вероятностного анализа безопасности уровня 1 для исходного события «Переходный процесс»

[Fig. 1. Simplified event tree from level 1 probabilistic safety analysis for the initiating event "Transient"]

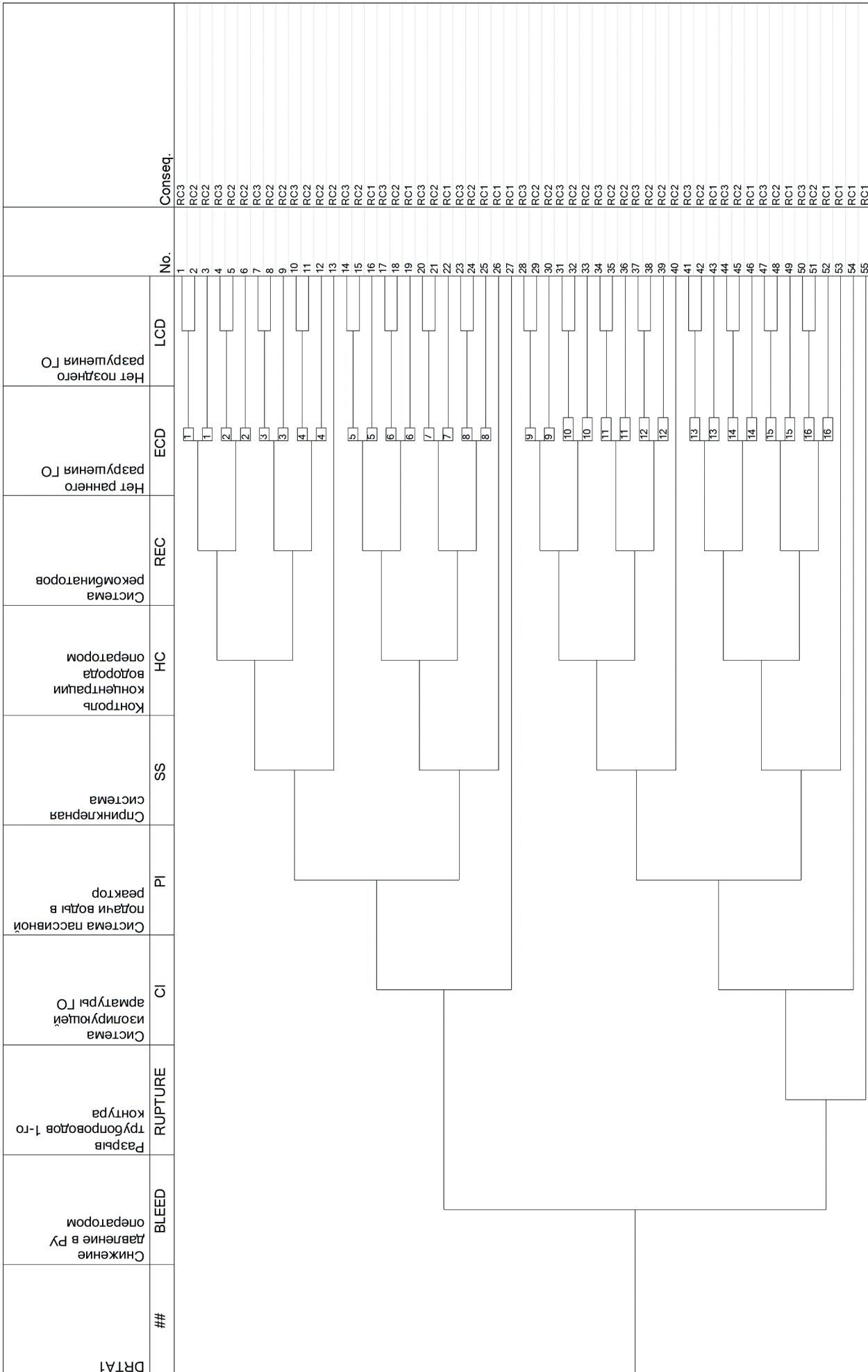


Рис. 2. Дерево развития тяжелых аварий непрерывной модели «DRTA1»  
 [Fig. 2. Severe accident development tree of the continuous model "DRTA1"]

**Краткое описание модели аварийных последовательностей дерева развития тяжелых аварий «DRTA1»**  
**Brief description of the model of severe accident development tree “DRTA1”**

| Номера аварийных последовательностей | Краткое описание логики аварийных последовательностей  | Конечные состояния  |
|--------------------------------------|--|---|
| 1–26                                 | Первые 26 АП сформированы для случая изолированного ГО при условии, что давление в реакторе ниже 1 МПа до момента разрушения корпуса реактора или разрушения теплообменных трубок парогенератора. Все АП учитывают различные состояния систем и действий оператора, влияющих на вероятность дефлаграции/детонации водорода, что учитывается при назначении вероятностей ФС «ECD» и «LCD» | Для АП 1, 4, 7, 10, 14, 17, 20 и 23, в которых ГО не повреждено, назначено конечное состояние «RC3», которое соответствует отсутствию большого аварийного выброса.<br>Для АП 2, 3, 5, 6, 8, 9, 11, 12, в которых ГО повреждено на ранней или поздней стадии, назначено конечное состояние «RC2», которое соответствует позднему аварийному выбросу, так как пассивная подача воды в РУ позволяет задержать повреждение топлива и выброс как минимум на 24 ч.<br>Для АП 13, 15, 18, 21 и 24, в которых ГО повреждено на поздней стадии, назначено конечное состояние «RC2», так как на ранней стадии ГО сохраняет целостность.<br>Для АП 16, 19, 22, 26, в которых ГО повреждено на ранней стадии и нет пассивной подачи воды, назначено конечное состояние «RC1», которое соответствует раннему большому аварийному выбросу, так как выброс происходит на ранней стадии тяжелой аварии (для АП 26 – консервативно).<br>Для АП 25, в которой отказ спринклерной системы приводит к разрушению ГО из-за переопрессовки, конечное состояние «RC1» назначено консервативно, так как разрушение ГО может произойти за пределами 24 ч |
| 27                                   | В данной АП отказ изоляции ГО приводит к выходу продуктов деления в окружающую среду   | Выход продуктов деления через неизолированные проходки ГО в ходе тяжелой аварии консервативно отнесен к раннему большому аварийному выбросу (категория «RC1»)   |
| 28–53                                | Логика данных АП и их конечные состояния идентичны АП 1–24. Различие только в вероятностях разрушения ГО на ранней стадии аварии из-за более интенсивной генерации водорода  |   |
| 54                                   | Логика данной АП и конечное состояние идентичны АП 27  |   |
| 55                                   | В данной АП происходит разрушение корпуса реактора при высоком давлении или происходит байпас ГО из-за высокотемпературного разрушения теплообменных трубок парогенератора   | Консервативно отнесено к раннему большому аварийному выбросу (категория «RC1»)  |

Таблица № 4

Описание функциональных событий дерева развития тяжелых аварий «DRTA1»  
Description of functional events of severe accident development tree “DRTA1”

| Обозначение функционального события | Содержание функционального события   | Модель функционального события  | Входная информация   |
|-------------------------------------|--|---|--|
| BLEED                               | Снижение давления оператором до момента разрушения корпуса реактора при высоком давлении | Дерево отказов, моделирующее ошибку оператора по открытию необходимого количества импульсно-предохранительных устройств компенсатора давления для снижения давления | <p>Дерево отказов строится таким образом, чтобы учитывать все возможные ИС, а не только ИС типа «Переходный процесс». Если на вход ДРТА приходят АП из деревьев событий, построенных для ИС, в которых давление ниже 1 МПа, ФС принимает значение «ЛОЖЬ» и нижние ветви этого ФС логически исключаются из модели. Это достигается тем, что в граничных условиях передается значение логического ключа, который включен в дерево отказов для ФС. Таким образом, при расчете дерева событий для таких ИС этот логический ключ принимает значение «ЛОЖЬ».</p> <p><b>Примечание.</b> Логический ключ (по терминологии МАГАТЭ «HOUSE EVENT») – это специальное средство управления логикой дерева отказов, позволяющее с помощью двух различных значений логического ключа («ЛОЖЬ» и «ИСТИНА») включать или исключать часть дерева отказов в зависимости от значения ключа. Логический ключ может входить в логику дерева отказов. В программном средстве «Risk Spectrum PSA» [4] значения логического ключа могут задаваться и активироваться в граничных условиях для каждого ИС и ФС или в расчетных заданиях для каждого расчета модели ВАБ</p> |
| RUPTURE                             | Высокотемпературное разрушение трубопровода 1-го контура при высоком давлении            | Базисное событие с оцененным значением вероятности  | <p>В рассматриваемом примере задано одно значение, но если для различных сценариев с высоким давлением имеются разные оценки этой вероятности, их также можно задавать с помощью заменяемого события, применяя разные значения вероятности для разных ИС.</p> <p><b>Примечание.</b> Заменяемое событие (в программном средстве «Risk Spectrum PSA» [4] используется обозначение «EXCHANGE EVENT») – это базисное событие модели ВАБ, которое заменяется на другое базисное событие, если в рассматриваемом расчете по модели ВАБ активен соответствующий логический ключ</p>   |
| CI                                  | Автоматическое закрытие изолирующей арматуры ГО  | Дерево отказов изолирующей арматуры ГО  | В данном примере не зависит от ИС, однако если модель включает эксплуатационные состояния, в которых меняется конфигурация системы изоляции или требуется действие оператора, это изменение также контролируется заданием соответствующих значений логических ключей в граничных условиях  |
| PI                                  | Пассивная подача воды в реактор после снижения давления                                  | Дерево отказов системы пассивной подачи воды в реактор  | Аналогично предыдущему ФС, если модель включает эксплуатационные состояния, в которых требуется действие оператора, это также контролируется логическими ключами и граничными условиями  |

| Обозначение функционального события | Содержание функционального события   | Модель функционального события   | Входная информация   |
|-------------------------------------|--|--|--|
| SS                                  | Автоматический запуск и работа спринклерной системы от приямка                             | Дерево отказов спринклерной системы  | Аналогично предыдущему ФС, если модель включает эксплуатационные состояния, в которых требуется действие оператора, это также контролируется логическими ключами и граничными условиями  |
| HC                                  | Контроль концентрации водорода периодическим включением и отключением спринклерной системы | Базовое событие с оцененной вероятностью ошибки оператора                                | В рассматриваемом примере задано одно значение, но если для различных сценариев имеются разные оценки этой вероятности, их также задают с помощью заменяемого события  |
| REC                                 | Система рекомбинаторов   | Базовое событие с оцененной вероятностью отказа системы                                  | В рассматриваемом примере задано одно значение, однако в зависимости от места выхода водорода и количества рекомбинаторов в конкретных помещениях ГО их эффективность будет отличаться. Для учета влияния различных мест выхода водорода на эффективность системы рекомбинаторов в граничные условия ИС с течами включаются условия, характеризующее место течи, а значения вероятности отказа системы рекомбинаторов задаются с помощью заменяемого события   |
| ECD                                 | Раннее разрушение ГО из-за дефляции/детонации водорода                                     | Базовое событие с оцененной вероятностью разрушения ГО из-за дефляции/детонации водорода | Пример для данного ФС иллюстрирует общий подход к разработке ДРГА в непрерывной модели ВАБ-2. На ДРГА на рис. 2 указаны 16 разных значений вероятности разрушения ГО из-за дефляции/детонации водорода в зависимости от последовательности ДРГА. Представленный подход позволяет учитывать зависимость этой вероятности от всех влияющих на нее факторов: наличия воды в реакторе, приводящей к более глубокому окислению циркония, возможности управлять работой спринклерной системы, что снижает концентрацию водорода в ГО, работоспособности рекомбинаторов, также снижающих концентрацию водорода в ГО. Для первых 24 АП это достигается возможностью задать 8 разных значений вероятности (1–8 входы в ФС). Модель позволяет также учесть тот факт, что в случае снижения давления из-за разрушения трубопроводов 1-го контура генерация водорода происходит более интенсивно и при высоких температурах горячих газов, что также повышает вероятность дефляции/детонации водорода и разрушения ГО (9–16 входы в ФС).<br>Более того, модель позволяет учитывать влияние ИС на вероятность дефляции/детонации водорода и разрушения ГО. Для каждого базисного события с помощью заменяемого события имеется возможность изменения базовой вероятности на ту, что более соответствует конкретному типу ИС или эксплуатационному состоянию |
| LCD                                 | Позднее разрушение ГО из-за дефляции/детонации водорода                                    | Базовое событие с оцененной вероятностью разрушения ГО из-за дефляции/детонации водорода | В рассматриваемом примере задано одно значение. Однако, аналогично предыдущему ФС, можно также задать несколько вариантов базисных событий, учитывающих те же факторы и по той же логике, что и в ФС «ECD»   |

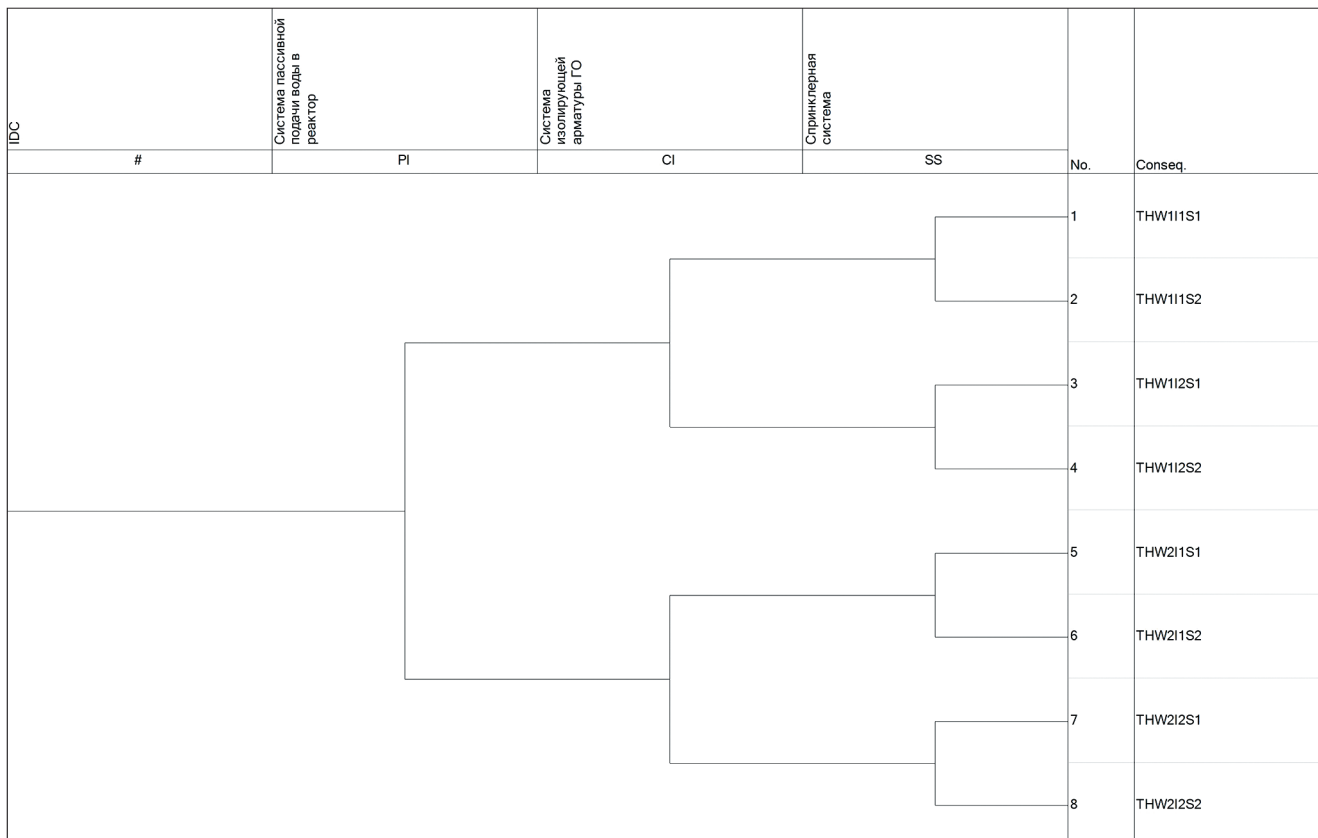


Рис. 3. Пример интерфейсного дерева событий «IDC» для исходного события «Переходный процесс»  
 [Fig. 3. Example of an interface event tree “IDC” for the initiating event “Transient”]

Данное дерево событий связано со всеми конечными состояниями «CD» в модели ВАБ-1 для всех ИС типа «Переходный процесс» (конечные состояния «IDC» дерева событий «Переходный процесс» на рис. 1). На рис. 4 и 5 приведены ДРТА для СПИР «THW11S1», «THW21S2» (код СПИР сформирован из кодов признаков СПИР из табл. № 2), на вход которых подается частота СПИР, определяемая как частота конечных состояний «THW11S1», «THW21S2» интерфейсного дерева событий «IDC» (рис. 3). В этих деревьях событий используются все ФС, описанные в табл. № 3. Как видно из рис. 4 и 5, структуры ДРТА разорванной модели и конечные состояния для разных СПИР отличаются, так как в ДРТА на рис. 4 учитывается факт успешной работы спринклерной системы и пассивных систем аварийного охлаждения активной зоны, но в ДРТА на рис. 5 показано, что эти системы отказали, что приводит к одной АП с конечным состоянием «RC1». Для разработки полной модели ВАБ-2 для рассматриваемого примера необходимо построить ДРТА для всех 24 СПИР, сформированных с учетом всех признаков, приведенных в табл. № 2. При этом очевидно, что все АП для всех СПИР присутствуют в ДРТА непрерывной модели ВАБ-2.

### Преимущества и недостатки различных способов передачи данных из ВАБ-1 в ВАБ-2

В примере показано, что передача информации из ВАБ-1 в ВАБ-2 эффективно обеспечивается в непрерывной модели без необходимости формирования СПИР. Несмотря на отсутствие СПИР, все включенные в интерфейсные деревья событий ФС присутствуют и в ДРТА непрерывной модели, что подтверждает фактический учет в нем признаков СПИР. Результаты оценки вероятностей конечных состояний «RC1», «RC2» и «RC3» для обеих моделей идентичны, но качественные результаты существенно отличаются. В непрерывной модели ВАБ-2 для каждой категории выбросов представлены минимальные сечения, содержащие ИС, отказы и неготовности оборудования, ошибки оператора и другую важную информацию, присутствующую как в модели ВАБ-1, так и в модели ВАБ-2, а также вероятности явлений, связанных с тяжелой аварией. В разорванной модели (с использованием СПИР) в минимальные сечения входят: код СПИР, отказы оборудования и ошибки оператора, смоделированные только в ФС, включенных в ДРТА, и вероятности явлений, связанных с тяжелой аварией,

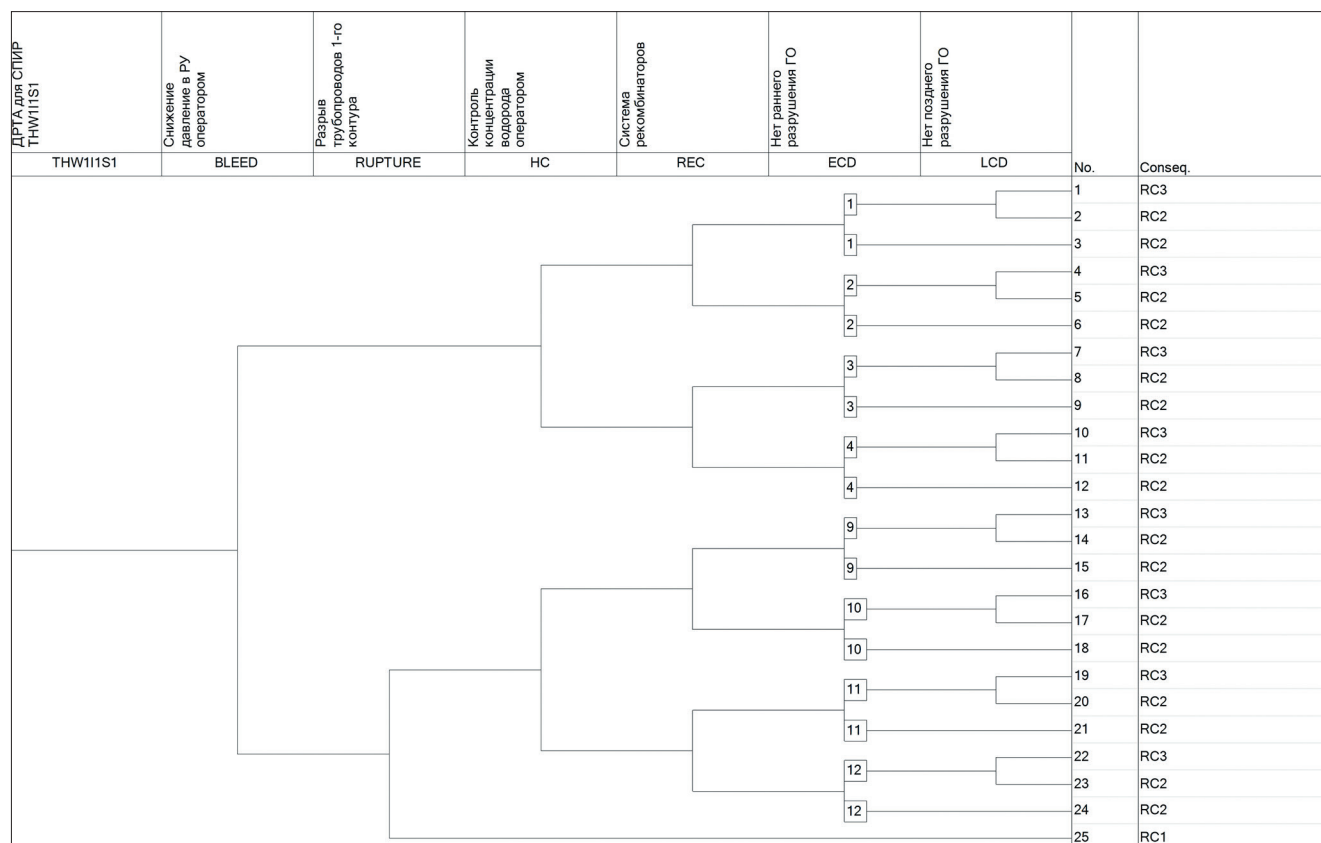


Рис. 4. Дерево развития тяжелой аварии разорванной модели для состояния с повреждением источников радиоактивности «ТНВ11S1»

[Fig. 4. Severe accident development tree of the “separated” model for the plant damage state “ТНВ11S1”]

| ДРТА для СПИР<br>ТНВ21S2 | No. | Conseq. |
|--------------------------|-----|---------|
| ТНВ21S2                  | 1   | RC1     |

Рис. 5. Дерево развития тяжелой аварии разорванной модели для состояния с повреждением источников радиоактивности «ТНВ21S2»

[Fig. 5. Severe accident development tree of the “separated” model for the plant damage state “ТНВ21S2”]

учитываемых в ДРТА, но не входят: ИС, отказы оборудования, ошибки оператора и другая информация из модели ВАБ-1.

Как видно из приведенного примера, подход без использования СПИР имеет важные преимущества, по сравнению с подходом, основанным на разработке ДРТА для отдельных СПИР:

1) Применение непрерывной модели ВАБ-2 позволяет полностью передать информацию в модель ДРТА, необходимую для ответа на вопросы, поставленные во введении статьи для каждого из ИС, рассмотренных в ВАБ-1, без разработки интерфейсных деревьев событий и формирования СПИР. Минимальные сечения, полученные в результате расчета по непрерывной модели ВАБ-2, дают пол-

ную информацию о протекании аварии для каждой категории аварийных выбросов: от ИС ВАБ-1, отказов элементов систем, рассматриваемых в ВАБ-1 и ВАБ-2, ошибок персонала, вероятностей феноменологических явлений, рассматриваемых в ДРТА, до категории выброса, что невозможно в разорванной модели ВАБ-1 и ВАБ-2.

2) Минимальные сечения, полученные с использованием непрерывной модели, позволяют выполнять анализы значимости и чувствительности по отношению к каждому элементу модели ВАБ-2 (ИС, системы, элементы, ошибки оператора и т. п.), что невозможно в разорванной модели. Фактически использование разорванной модели не позволяет выполнить рекомендации пп. 87 и 89 [3] в части

анализа значимости элементов и систем для всех категорий аварийных выбросов.

3) Количество ДРТА в непрерывной модели ВАБ-2 (как правило, 2 ДРТА) существенно меньше, чем в разорванной (количество ДРТА равно количеству СПИР), она наглядна и легко прослеживаема, так как позволяет проанализировать весь процесс от ИС до категории аварийного выброса. В разорванной модели такой анализ намного сложнее, так как СПИР не несут в себе в явном виде информации об ИС, отказах оборудования и систем, ошибках оператора и другую важную информацию из ВАБ-1.

4) Разработка модели ВАБ-2 с использованием СПИР – трудоемкий процесс, при этом любые изменения в ВАБ-1 требуют пересчета вероятностей СПИР и, соответственно, переработки модели ВАБ-2, что является большим недостатком разорванной модели. В непрерывной модели ВАБ-2 практически любые изменения модели ВАБ-1 учитываются автоматически.

Следует отметить, что разорванная модель, фактически рекомендуемая [1] и [3], на практике используется крайне редко. Более распространенный подход заключается в следующем:

- разрабатываются СПИР, согласно пп. 25 и 26 [3], и проводится группировка СПИР для минимизации модели ВАБ-2 (не предусмотренная явно в [3]);
- для каждого СПИР строятся ДРТА, на вход которых подаются минимальные сечения для этой группы СПИР.

В примере выше эта модель может быть построена, если на вход дерева событий на рис. 4 и 5 подавать минимальные сечения из дерева событий на рис. 3.

Такая модель – тоже по сути непрерывная, но включает в себя промежуточный этап формирования и группировки СПИР, приводящий к потере информации из-за группировки, но не дающий никаких преимуществ, при этом усложняющий модель и затрудняющий использование ее результатов. Как показала практика выполнения ВАБ, для действующих и проектируемых блоков АЭС время расчета по такой модели (без учета времени на разработку самой модели, которое включает время на детерминистические исследования) на порядки больше, чем время расчета по модели, построенной без использования СПИР (96 ч с использованием интерфейсных деревьев событий и 2 ч с включением ФС интерфейсных деревьев событий в ДРТА, т. е. без формирования СПИР), что затрудняет отладку модели и делает практически невозможным как выполнение анализа чувствительности (например,

к допущениям), так и использование ВАБ-2 для приложений ВАБ.

### Важные причины обновления рекомендаций по выполнению ВАБ-2

При обсуждении возможности отказа от этапа формирования СПИР необходимо рассмотреть другие аспекты использования СПИР, в частности отраженные в рекомендациях пп. 49, 52 и 55 [3]:

*«П. 49. Для каждой фазы тяжелой аварии (на момент времени, характеризующийся формированием наибольших нагрузок на ГО) для каждого СПИР проводятся оценки нагрузок на ГО, обусловленных событиями тяжелой аварии, перечисленными в пунктах 44 и 46 настоящего Руководства по безопасности, и оценки вероятности нарушения герметичности ГО...»*

*П. 52. В рамках данной задачи рекомендуется производить сбор максимально полной информации о развитии запроектных аварий, включая тяжелые аварии, в частности, информации о событиях аварии, характере изменения теплофизических параметров в РУ, зданиях и помещениях, в которых расположены элементы РУ, включая ГО, а также прилегающих к ним негерметичных помещениях, массе (активности) и составе аварийных выбросов...»*

*П. 55. Расчеты запроектных аварий рекомендуется выполнять для каждого СПИР...».*

Количество СПИР может превышать тысячи и, очевидно, выполнить рекомендации для каждого потребует неподъемных трудозатрат, временных и финансовых ресурсов. Но даже если заменить слова «для каждого СПИР» на «для каждого доминантного СПИР», то рекомендации выполнять оценку нагрузок на ГО и расчеты тяжелой аварии для СПИР не учитывают, что на момент формирования СПИР отсутствует полная информация, необходимая для оценки нагрузок на ГО. Так, в пп. 44 и 46 [3], на которые ссылается п. 49 [3], перечислен ряд событий тяжелой аварии, для которых следует оценивать нагрузки на ГО, в частности:

*«горение водорода (все виды) и окиси углерода в зданиях и помещениях, в которых расположены элементы РУ, включая ГО, а также прилегающих к ним негерметичных помещениях;*

*взаимодействие разрушенных элементов активной зоны и ВКУ с бетоном и/или другими элементами АС...;*

*повышение давления (включая квазистатическое) в пределах ГО, обусловленное различными физическими процессами в нем».*

Однако СПИР формируется на момент начала повреждения топлива, когда ни одно из указанных явлений еще не проявилось. Эти явления рассматриваются в ДРТА, когда имеется информация, в каких АП ДРТА работают или нет рекомбинаторы водорода, произошло или нет высокотемпературное разрушение трубопроводов 1-го контура, восстановлена или нет работа системы отвода тепла от ГО, работоспособно ли устройство локализации расплава и т. п.

Также на этапе формирования СПИР на момент начала повреждения топлива полностью отсутствует информация о явлениях в ГО, определяющих массу (активность) и состав аварийных выбросов (например, произошло или нет разрушение ГО из-за детонации водорода), и, следовательно, расчеты тяжелой аварии для СПИР не позволят получить всю требуемую информацию и выполнить таким образом рекомендацию п. 52 [3].

Оценку нагрузок на ГО, как и расчеты тяжелой аварии, представляется более целесообразным выполнять не для СПИР, а для АП ДРТА с целью получения информации, необходимой как для оценки вероятностей различных феноменологических явлений, моделируемых в ДРТА (например, детонации водорода в ГО на ранней и поздней фазе тяжелой аварии), так и для оценки радиационных последствий конечных состояний ДРТА.

Процесс анализа нагрузок на ГО и определения необходимых расчетов запроектных и тяжелых аварий связан не столько с формированием СПИР, сколько с построением и анализом ДРТА. Приведем его краткое описание.

Строится предварительная модель ДРТА с оценкой вероятностей феноменологических явлений, моделируемых в ДРТА, на основании имеющихся расчетов, обосновывающих безопасность блока АЭС, собственного опыта выполнения ВАБ-2 или опыта разработки ВАБ-2, представленного в открытых источниках информации, таких как публикации МАГАТЭ и NRC (NUREG). Далее выполняется количественная оценка вероятностей АП ДРТА с получением информации о минимальных сечениях этих АП и анализом их значимости. Для тех АП, которые вносят доминантный вклад в категории выбросов с недопустимыми последствиями или для которых фактор повышения риска таких последствий высок, определяются дополнительные сценарии тяжелой аварии, необходимые для перепредопределения вероятностей феноменологических явлений, корректировки логики ДРТА и построения окончательного ДРТА.

Следует отметить, что формирование СПИР и выявление доминантных СПИР (как отдельная задача, не входящая в непрерывную модель ВАБ-2) могут быть полезными с точки зрения определения предварительного перечня потенциально значимых сценариев ВАБ-2 и не противоречат логике разработки непрерывной модели ВАБ-2.

### Заключение

В статье показано, что эффективная передача информации из модели ВАБ-1 в модель ВАБ-2 в непрерывной модели ВАБ-2 выполняется без разработки СПИР. Приведен пример, представляющий общие принципы и подходы к разработке модели ВАБ-2 без разработки СПИР. Пример доказывает, что такой способ передачи информации из ВАБ-1 в ВАБ-2 не менее эффективен и продуктивен, чем рекомендованный в [3], основанный на формировании СПИР. В статье также показано, что ряд рекомендаций, относящихся к формированию и использованию СПИР в модели ВАБ, избыточен, если разрабатывается непрерывная модель ВАБ-2.

На основании информации, приведенной в статье, логично сделать вывод о необходимости дополнения рекомендаций [3] для учета возможностей интегральных моделей ВАБ-2, в частности с целью включения рекомендаций, позволяющих разрабатывать модели ВАБ-2 без необходимости формировать СПИР, и обновления рекомендаций по использованию СПИР (таких, как рекомендации пп. 49 и 52 [3]). Также важным аспектом обновления [3] является представление рекомендаций по выбору сценариев запроектных и тяжелых аварий в поддержку разработки модели ВАБ-2.

Пример непрерывной модели ВАБ-2, представленный в разделе «Пример построения модели ВАБ-2» статьи, несмотря на ряд упрощений, дает достаточно полную иллюстрацию предлагаемого подхода к выполнению задачи ВАБ-2 «Передача информации из ВАБ-1 в ВАБ-2», которое требуется п. 27 НП-095-15 [1]. В то же время в статье не обсуждаются важные вопросы, связанные с оценкой вероятностей ФС, используемых в ДРТА модели ВАБ-2 (независимо от принятого подхода моделирования). Эти вопросы, как и вопросы выполнения анализа нагрузок на ГО и определения номенклатуры расчетов запроектных и тяжелых аварий, необходимых для построения моделей ВАБ-2, не являются предметом данной статьи, но требуют отдельного рассмотрения.

## Литература

1. Specific Safety Guide No. SSG-4 (Rev. 1). Development and Application of Level 2 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants. IAEA, 2025.
2. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Основные требования к вероятностному анализу безопасности блока атомной станции (НП-095-15): утв. приказом Ростехнадзора от 12.08.2015 № 311.
3. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. Рекомендации по разработке вероятностного анализа безопасности уровня 2 для блока атомной станции (РБ-044-18): утв. приказом Ростехнадзора от 09.08.2018 № 355 (с изм.: приказ Ростехнадзора от 24.01.2024 № 21).
4. Аттестационный паспорт на программное средство «Risk Spectrum PSA» от 20.12.2019 № 484: версии 1.3.0, 1.3.2, 1.4.0 (аттестовано до 19.12.2029).

## References

1. Specific Safety Guide No. SSG-4 (Rev. 1). Development and Application of Level 2 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants. IAEA, 2025.
2. Federal'nye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoi energii "Osnovnye trebovaniya k veroyatnostnomu analizu bezopasnosti bloka atomnoi stantsii" (NP-095-15) [Federal rules and regulations in the field of atomic energy use "Basic requirements to probabilistic safety assessment of a nuclear plant power unit" (NP-095-15)]. 2015.
3. Rukovodstvo po bezopasnosti pri ispol'zovanii atomnoi ehnergii "Rekomendatsii po razrabotke veroyatnostnogo analiza bezopasnosti urovnya 2 dlya bloka atomnoi stantsii" (RB-044-18) [Safety guide in the field of atomic energy use "General recommendations to the development of probabilistic safety analysis (level 2 PSA) for a NPP unit" (RB-044-18)]. 2024.
4. Attestatsionnyi pasport na programmnoe sredstvo "Risk Spectrum PSA" No. 484: versii 1.3.0, 1.3.2, 1.4.0 (attestovano do 19.12.2029) [Certification passport for the "Risk Spectrum PSA" software No. 484: versions 1.3.0, 1.3.2, 1.4.0 (valid until 19.12.2029)]. 2019.

## Сведения об авторах

*Любарский Артур Вадимович*, главный эксперт, Управление вероятностного анализа безопасности, Дирекция по обоснованию безопасности АО «Атомэнергопроект» (105005, Москва, ул. Бакунинская, д. 7, стр. 1).

*Бредова Валентина Александровна*, заместитель начальника отдела анализов риска, федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (107140, Москва, вн. тер. г. муниципальный округ Красносельский, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5).

*Берг Татьяна Владимировна*, старший научный сотрудник отдела анализов риска, федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (107140, Москва, вн. тер. г. муниципальный округ Красносельский, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5).

*Морозов Владимир Борисович*, главный инженер по вероятностному анализу безопасности и анализу готовности, Управление вероятностного анализа безопасности, Дирекция по обоснованию безопасности АО «Атомэнергопроект» (105005, Москва, ул. Бакунинская, д. 7, стр. 1).

*Токмачев Геннадий Владимирович*, главный специалист, Управление вероятностного анализа безопасности, Дирекция по обоснованию безопасности АО «Атомэнергопроект» (105005, Москва, ул. Бакунинская, д. 7, стр. 1).

*Федулов Михаил Васильевич*, начальник отдела, Управление вероятностного анализа безопасности, Дирекция по обоснованию безопасности АО «Атомэнергопроект» (105005, Москва, ул. Бакунинская, д. 7, стр. 1).

### Authors credentials

*Lyubarskiy Artur Vadimovich*, Main Expert, Department of Probabilistic Safety Assessment, Safety Assessment Directory, JSC “Atomenergoproekt” (7 bld. 1, Bakuninskaya str., Moscow, 105005), e-mail: Lyubarskiy\_AV@aep.ru.

*Bredova Valentina Aleksandrovna*, Deputy Head of Risk Analysis Department, Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety (2/8 bld. 5, Malaya Krasnoselskaya str., vn. ter. g. municipalnyi okrug Krasnoselskii, Moscow, 107140), e-mail: bredova@secnrs.ru.

*Berg Tat'yana Vladimirovna*, Senior Researcher of Risk Analysis Department, Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety (2/8 bld. 5, Malaya Krasnoselskaya str., vn. ter. g. municipalnyi okrug Krasnoselskii, Moscow, 107140), e-mail: berg@secnrs.ru.

*Morozov Vladimir Borisovich*, Chief Engineer for Probabilistic Safety Assessment and Availability, Department of Probabilistic Safety Assessment, Safety Assessment Directory, JSC “Atomenergoproekt” (7 bld. 1, Bakuninskaya str., Moscow, 105005), e-mail: Morozov\_VB@aep.ru.

*Tokmachev Gennady Vladimirovich*, Main Specialist, Department of Probabilistic Safety Assessment, Safety Assessment Directory, JSC “Atomenergoproekt” (7 bld. 1, Bakuninskaya str., Moscow, 105005), e-mail: Tokmachev\_GV@aep.ru.

*Fedulov Mikhail Vasilievich*, Head of Group, Department of Probabilistic Safety Assessment, Safety Assessment Directory, JSC “Atomenergoproekt” (7 bld. 1, Bakuninskaya str., Moscow, 105005), e-mail: Fedulov\_MV@aep.ru.

### Для цитирования

*Любарский А. В., Бредова В. А., Берг Т. В., Морозов В. Б., Токмачев Г. В., Федулов М. В.* Актуальные вопросы преобразования результатов вероятностного анализа безопасности уровня 1 в исходные данные для вероятностного анализа безопасности уровня 2 // Ядерная и радиационная безопасность. 2026. № 1 (119). С. 25–42. DOI: 10.26277/SECNRS.2026.119.1.002.

### For citation

*Lyubarskiy A. V., Bredova V. A., Berg T. V., Morozov V. B., Tokmachev G. V., Fedulov M. V.* (2026). Aktualinii voprosi preobrazovaniya rezultatov veroyatnostnogo analiza bezopasnosti urovnya 1 v iskhodnye dannye dlya veroyatnostnogo analiza bezopasnosti urovnya 2 [Present issues of conversion of the results of a level 1 probabilistic safety analysis into input data for a level 2 probabilistic safety analysis]. Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost' – Nuclear and Radiation Safety Journal, No. 1 (119), pp. 25-42. [in Russian]. DOI: 10.26277/SECNRS.2026.119.1.002.

