

УДК: 621.039

DOI: 10.26277/SECNRS.2025.117.3.002

© 2025. Все права защищены.

УЧЕТ СОВМЕСТНОГО ПОВРЕЖДЕНИЯ НЕСКОЛЬКИХ ИСТОЧНИКОВ РАДИОАКТИВНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ВЕРОЯТНОСТНОГО АНАЛИЗА БЕЗОПАСНОСТИ УРОВНЯ 2 ЭНЕРГОБЛОКА АЭС

Любарский А. В.*, канд. техн. наук (Lyubarskiy_AV@aep.ru),
Бредова В. А.** (bredova@secnrs.ru),
Морозов В. Б.*, д-р техн. наук (Morozov_VB@aep.ru),
Токмачев Г. В.*, канд. техн. наук (Tokmachev_GV@aep.ru)

Статья поступила в редакцию 31 июля 2025 г.

Аннотация

Рассмотрены вопросы, связанные с применением рекомендаций руководства по безопасности при использовании атомной энергии РБ-044-18 Ростехнадзора (далее – РБ-044-18) и специального руководства по безопасности SSG-4 (ред. 1) МАГАТЭ (далее – SSG-4 (ред. 1), в части учета повреждения нескольких источников радиоактивности при проведении вероятностного анализа безопасности уровня 2, выполняемого для оценки соответствия проектов энергоблоков АЭС требованию п. 1.2.17 федеральных норм и правил в области использования атомной энергии НП-001-15.

Охарактеризовано понятие «состояние с повреждением источников радиоактивности» для нескольких источников. Показано, при каких условиях и каким образом следует учитывать вклад выбросов радиоактивности из нескольких источников в вероятность большого аварийного выброса.

Проведен анализ подходов к оценке вероятности большого аварийного выброса для нескольких источников радиоактивности на энергоблоке АЭС, рекомендуемый РБ-044-18 и SSG-4 (ред. 1).

Приведена методика оценки вероятности возникновения большого аварийного выброса при его отсутствии из-за выброса из отдельных источников радиоактивности.

Представлен алгоритм анализа совместного повреждения источников радиоактивности.

Приведены рекомендации по усовершенствованию РБ-044-18 в части учета нескольких источников радиоактивности.

► **Ключевые слова:** вероятностный анализ безопасности уровня 2, состояние с повреждением источников радиоактивности, источник радиоактивности, совместное повреждение, ядерное топливо.

* АО «Атомэнергопроект», Москва, Россия.

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

CONSIDERATION OF THE COMBINED DAMAGE OF SEVERAL SOURCES OF RADIOACTIVITY IN LEVEL 2 PROBABILISTIC SAFETY ASSESSMENT FOR A NPPS UNIT

Lyubarsky A. V.*, Ph. D.,
Bredova V. A.**,
Morozov V. B.*, D. Sc.,
Tokmachev G. V.*, Ph. D.

The article was received by the editors' crew on July 31st, 2025.

Abstract

The issues related to the application of recommendations of safety guide in the use of atomic energy RB-044-18 of Rostekhnadzor (hereinafter – RB-044-18) and the IAEA Specific Safety Guide SSG-4 (rev. 1) (hereinafter – SSG-4 (rev. 1)) for accounting of damage of several sources of radioactivity in the probabilistic safety assessment of level 2 (PSA-2) performed to assess the compliance of the NPP unit design with the requirement of i. 1.2.17 of federal rules and regulations NP-001-15, are discussed.

The concept of “state with damage to radioactivity sources” for several sources is characterized. It is shown under what conditions and how the releases from several radioactivity sources should be taken into account in the estimation of large accidental release probability.

The analyses of the approaches for assessing the probability of a large accidental release from several sources of radioactivity at a NPPs unit, recommended by RB-044-18 and SSG-4 (rev. 1), was performed. A method for assessing the probability of a large accidental release in its absence from individual sources of radioactivity is given. An algorithm for analyzing the joint damage of radioactivity sources is presented. The recommendations for improving the RB-044-18 in terms of considerations of several radioactivity sources are provided.

► **Keywords:** *level 2 probabilistic safety assessment, state with damage to radioactivity sources, radioactivity source, joint damage, nuclear fuel.*

* JSC “Atomenergoproekt”, Moscow, Russia.

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

Введение

Одной из основных целей выполнения вероятностного анализа безопасности уровня 2 (ВАБ-2) является проверка соответствия энергоблока АЭС требованиям п. 1.2.17 НП-001-15 [1] в части превышения суммарной вероятности большого аварийного выброса (БВ) для каждого энергоблока АЭС на интервале в один год, равной $1.0E-7$.

Стандарты по безопасности МАГАТЭ [2] и Ростехнадзора РБ-044-18 [3], разработанные в поддержку выполнения ВАБ-2, содержат ряд положений, относящихся к учету нескольких источников радиоактивности (ИР) на энергоблоке АЭС, однако конкретных указаний, как это учитывать при выполнении ВАБ-2, в [2, 3] не приведено.

В частности, в п. 35 РБ-044-18 [3] содержится следующая рекомендация: *«В соответствии с рекомендациями данного раздела настоящего Руководства по безопасности рекомендуется формировать СПИР (определять их вероятность и перечень характерных признаков), характеризующиеся одновременным повреждением нескольких источников радиоактивности (например, повреждение твэлов в активной зоне и в БВ)»*. В разделе IV «Преобразование результатов ВАБ уровня 1 в исходные данные ВАБ уровня 2» [3] не указаны цели построения состояний с повреждением источника радиоактивности (СПИР), однако рекомендации следующих разделов вносят некоторые пояснения, с какой же целью формируются СПИР.

Рассмотрим рекомендации, относящиеся к учету СПИР с повреждением нескольких ИР:

- П. 49 [3] рекомендует проводить оценки нагрузок на герметичную оболочку (ГО), обусловленных событиями тяжелой аварии (ТА) для каждого СПИР. При этом для СПИР, характеризующихся одновременным повреждением нескольких ИР, рекомендуется учитывать нагрузки на ГО от всех поврежденных ИР.

- П. 55 [3] рекомендует выполнять расчеты запроектных аварий для СПИР, характеризующихся одновременным повреждением нескольких ИР, и учитывать их влияние на аварийные выбросы, а также параметры в реакторной установке, бассейне выдержки (БВ), зданиях и помещениях, в которых расположены элементы реакторной установки и БВ, включая ГО, а также прилегающих к ним негерметичных помещениях.

- П. 63 [3] рекомендует разрабатывать аварийные последовательности ВАБ-2 для СПИР,

характеризующихся одновременным повреждением нескольких ИР.

- П. 74 [3] рекомендует для каждого из расчетов ТА, выполненных для СПИР (включая СПИР с одновременным повреждением нескольких ИР), устанавливать соответствие между аварийным выбросом и одним из выбранных диапазонов относительной массы (активности) аварийного выброса.

- П. 79 [3] рекомендует формировать категории аварийных выбросов по формуле, которая представляет собой сумму вероятностей каждой из категорий для всех СПИР, включая СПИР с одновременным повреждением нескольких ИР.

Документ [2] также содержит ряд рекомендаций в части совместного рассмотрения нескольких ИР:

- П. 6.19 [2]. В зависимости от расположения БВ (внутри защитной оболочки реактора; за пределами защитной оболочки реактора, но внутри здания реактора или за пределами здания реактора) анализ развития ТА должен представить информацию о взаимодействии реактора и БВ: так как возможны механизмы, через которые авария в реакторе может вызвать аварию в БВ и наоборот. Результатом такого анализа может быть определение дополнительных аварийных последовательностей, учитывающих совместное повреждение реактора и БВ, которые необходимо учесть в ВАБ-2.

- П. 6.20 [2]. Если БВ находится внутри здания защитной оболочки реактора, и не доказано, что последовательность событий совместного развития аварии в реакторе и БВ не является пренебрежимо малой, следует провести анализ развития аварии, чтобы показать совокупное воздействие аварии в реакторе и БВ с отработанным топливом на условия в ГО (например, давление, температура, распространение расплава активной зоны, горючий газ, производство пара в защитной оболочке, ускорение испарения воды БВ), а также на радиологические выбросы.

- П. 6.21 [2]. Если БВ находится внутри реакторного здания, но вне здания ГО, то при анализе развития ТА следует учитывать влияние их развития внутри здания реактора, и их воздействия на БВ и радиоактивные выбросы.

Авторами статьи выполнен анализ с целью понять, нужно ли оценивать совместные выбросы из нескольких ИР в ВАБ-2 при выполнении требования п. 1.2.17 НП-001-15 [1], и, если нужно, то как их оценивать и как использовать результат таких оценок? Результаты этого анализа приводятся ниже.

1. Понятие «состояние с повреждением источника радиоактивности» для нескольких источников радиоактивности

СПИР для отработанного ядерного топлива, как правило, является элементом расширенной модели ВАБ-1, где каждое неуспешное конечное состояние (повреждение ядерного топлива) разбивается на несколько отдельных состояний, учитывающих работоспособность систем, влияющих на развитие ТА.

СПИР для ядерного топлива в реакторе разрабатываются на основе модели ВАБ уровня 1 для ядерного топлива в реакторе, СПИР для БВ – на основе модели ВАБ-1 для ядерного топлива в БВ.

СПИР для других ИР на основе ВАБ-1 не разрабатывается вообще в силу того, что целью ВАБ-1 является оценка вероятности ТА, то есть нарушения проектного предела по температуре ядерного топлива в реакторе или отработанного ядерного топлива в местах его размещения, что неприменимо к другим ИР: радиоактивным отходам, радиоактивным материалам и средам и в какой-то мере к свежему ядерному топливу. Свежее ядерное топливо не содержит продуктов деления и его повреждение не может приводить к БАВ. Тем не менее ТА с участием свежего ядерного топлива в принципе возможна, если создадутся условия для возникновения самоподдерживающейся цепной реакции. Однако вероятность возникновения таких условий по многим оценкам существенно ниже $1,0E-10$ за год, и большой аварийный выброс, связанный со свежим ядерным топливом, можно исключать из анализа.

Следовательно, для формирования СПИР, включающих несколько ИР, в первую очередь должна быть разработана модель ВАБ-1 для совместной ТА для ядерного топлива в реакторе и БВ.

Однако сначала целесообразно понять, что вообще надо оценивать, когда говорят о БАВ для нескольких ИР.

2. Оценка вероятности большого аварийного выброса для нескольких источников радиоактивности

При анализе подходов к выполнению ВАБ с целью оценки вероятности БАВ для нескольких ИР на энергоблоке АЭС интуитивно кажется разумным рассмотреть только вероятность БАВ для каждого ИР индивидуально и вероятность БАВ для случая, когда несколько источников имеют повреждение, но при этом ни на одном из источников выброс не достигает БАВ.

Ниже обосновывается, что эти соображения верны. Рассмотрим следующие события:

Примечание: далее вместо фразы «БАВ произошел при радиоактивном выбросе из ИР N» будет использоваться термин «БАВ из ИР N».

- Событие X – БАВ произошел на энергоблоке АЭС, в котором есть как минимум два ИР: ядерное топливо в реакторе – r и ядерное топливо в БВ – s .

Как указано в разделе 1, на энергоблоках АЭС находятся и другие ИР, отличные от ядерного топлива в реакторе и БВ. Эти ИР также учитываются в анализе, хотя и не включены явно в приведенные ниже формулы.

- Событие $R(\bar{R})$ – БАВ произошел (не произошел) из ИР r .

- Событие $S(\bar{S})$ – БАВ произошел (не произошел) из ИР s .

По формуле полной вероятности и используя формулу де Моргана [4] вероятность события X можно определить как:

$$P(X) = P(X/(R+S)) * P(R+S) + P(X/(\bar{R}+\bar{S})) * P(\bar{R}+\bar{S}) = P(X/(R+S)) * P(R+S) + P(X/\bar{R}\bar{S}) * P(\bar{R}\bar{S}). \quad (1)$$

Очевидно, что:

$P(X/(R+S))$ равна 1 и формулу (1) можно записать как:

$$P(X) = P(R+S) + P(X/\bar{R}\bar{S}) * P(\bar{R}\bar{S}). \quad (2)$$

Эту же формулу для совместных событий R и S можно записать в виде:

$$P(X) = P(R) + P(S) - P(RS) + P(X/\bar{R}\bar{S}) * P(\bar{R}\bar{S}). \quad (2a)$$

Очевидно, что событие отсутствия БАВ на обоих ИР r и s является дополнением к событию с возникновением БАВ на хотя бы одном ИР, вероятность которого, согласно НП-001-15 [1], должна максимально соответствовать целевому ориентиру $C=1.0E-7$ (за год). Поэтому вероятность $(\bar{R}\bar{S})$ (вероятность отсутствия БАВ на ИР r и s) практически равна 1 ($\approx 1-C$). Также $P(R) * P(S)$ (в случае независимости обоих ИР) близка к $1.0E-14$ ($\approx C^2$), то есть практически равна 0. Соответственно:

$$P(X) \leq P(R) + P(S) - P(RS) + P(X/\bar{R}\bar{S}) \leq P(R) + P(S) + P(X/\bar{R}\bar{S}), \quad (3)$$

где $P(R)$, $P(S)$ – вероятность БАВ из ИР r и ИР s , оцененная индивидуально для каждого ИР;

$P(R\ S)$ – вероятность того, что БАВ возник как из-за выброса из ИР r , так и из-за выброса из ИР s ;

$P(X/\bar{R}\ \bar{S})$ – вероятность возникновения БАВ на энергоблоке АЭС при условии, что выброс ни из ИР r , ни из ИР s не привел к БАВ.

Если ввести еще одно событие I , заключающееся в том, что БАВ на энергоблоке АЭС произошел из-за выброса на любых ИР энергоблока (соответственно, $\bar{I}$ – БАВ не произошел), отличных от r и s , то формулу (2а) можно записать в виде:

$$P(X) = P(R) + P(S) + P(I) - P(R\ S) - P(R\ I) - P(S\ I) + P(R\ S\ I) + P(X/\bar{R}\ \bar{S}\ \bar{I}).$$

Однако такая форма записи не дает дополнительных преимуществ и не используется в анализе.

Что касается $P(R\ S)$, то в случае полной зависимости R и S эта вероятность равна или $P(R)$, или $P(S)$, а в случае полной независимости она равна $P(R) * P(S)$ и близка к 0. Полная зависимость событий R от S означает, что вероятность наступления события R при условии наступления события S равна 1 ($P(R/S) = 1$). Аналогично полная зависимость событий S от R означает, что, вероятность наступления события S при условии наступления события R равна 1 ($P(S/R) = 1$). То есть $P(R\ S) = P(R) * P(S/R) = P(R)$ в случае полной зависимости S от R и $P(R\ S) = P(S) * P(R/S) = P(S)$ в случае полной зависимости R от S .

То есть результат вычислений по формулам (2а) и (3) изменяется в пределах:

$$P(X) \geq \max [P(R), P(S)] + P(X/\bar{R}\ \bar{S}); \quad (4)$$

$$P(X) \leq P(R) + P(S) + P(X/\bar{R}\ \bar{S}). \quad (5)$$

Из формулы (5) следует, что консервативная оценка вероятности БАВ для энергоблока, содержащего два и более ИР, может быть получена путем сложения вероятности БАВ для каждого из ИР, оцененных независимо, и вероятности БАВ, определенного при условии, что индивидуальный выброс на каждом из рассмотренных ИР не достигает БАВ.

Ситуация, когда выброс на каждом ИР не достигает БАВ, но при этом БАВ достигается при выбросах на нескольких источниках радиоактивности (энергоблоке АЭС с несколькими ИР), возможна, только если:

- происходит выброс на одном из ИР r или s , который несколько ниже, чем БАВ, но достаточно велик, чтобы при учете совместного выброса от других ИР энергоблока АЭС БАВ был достигнут;

- происходит выброс одновременно на обоих ИР, выброс на каждом из ИР r и s несколько ниже, чем БАВ, но достаточно велик, чтобы при учете совместного выброса или выброса от других ИР энергоблока АЭС БАВ был достигнут;

- выброс на ИР r и s не происходит, но БАВ достигается за счет выброса из других ИР энергоблока АЭС.

3. Оценка вероятности возникновения большого аварийного выброса при его отсутствии из отдельных источников радиоактивности $P(X/\bar{R}\ \bar{S})$

Далее оцениваются вероятности возникновения БАВ при отсутствии БАВ из отдельных ИР для АЭС, для которой выполняются следующие условия (характерные для АЭС ВВЭР-1200М):

- Условие 1: в случае ТА в реакторе, которая не связана только с частичным повреждением ядерного топлива, БАВ всегда достигается, если есть байпас ГО или она потеряла свою целостность (далее – при поврежденной ГО).

- Условие 2: в случае ТА в БВ, которая не связана только с частичным повреждением ядерного топлива БВ, БАВ достигается независимо от состояния ГО. Частичное повреждение ядерного топлива – частный случай ТА, а именно: повреждение ядерного топлива, при котором не происходит плавление топливной матрицы (например, повреждение твэл при падении тяжелых грузов в реактор или БВ, разгерметизация твэлов при кратковременном осушении и повторном заливе активной зоны реактора и т. п.).

- Условие 3: независимо от состояния ГО дозовые нагрузки на население на несколько порядков ниже необходимых для формирования БАВ для выбросов радиоактивных материалов в следующих сценариях аварий:

- ТА в реакторе при неповрежденном ГО;
- аварии с выходом радиоактивных продуктов за пределы ГО при частичном повреждении ядерного топлива в реакторе, в БВ или реакторе и БВ;
- аварии с выходом радиоактивных продуктов за пределы ГО при отсутствии ТА в реакторе и (или) БВ;
- аварии, приводящие к выходу радиоактивных продуктов в окружающую среду из ИР, отличных от ядерного топлива в реакторе и БВ;
- любые сочетания перечисленных сценариев выхода радиоактивных продуктов в окружающую среду.

Рассмотрим детально, как можно оценить вероятность $P(X/\bar{R} \bar{S})$ для АЭС с учетом выполнения условий 1–3.

Рассмотрим четыре события:

1. Событие Tr – на ИР r произошла ТА с полным повреждением топлива (r в данном примере представляет реактор).
2. Событие Ts – на ИР s произошла ТА с полным повреждением топлива (s в данном примере представляет БВ).
3. Событие $\bar{Tr}$ – на ИР r не произошла ТА с полным повреждением топлива.
4. Событие $\bar{Ts}$ – на ИР s не произошла ТА с полным повреждением топлива.

События $TrTs$, $\bar{Tr}Ts$, $Tr\bar{T}s$, $\bar{Tr}\bar{T}s$ – различные сочетания событий для различных ИР.

Формула полной вероятности для полного множества возможных вариантов состояния ИР r и s , с точки зрения возникновения ТА, будет иметь вид:

$$P(X/\bar{R} \bar{S}) = P(X/\bar{R} \bar{S}/TrTs) * P(TrTs) + P(X/\bar{R} \bar{S}/\bar{Tr}Ts) * P(\bar{Tr}Ts) + P(X/\bar{R} \bar{S}/Tr\bar{T}s) * P(Tr\bar{T}s) + P(X/\bar{R} \bar{S}/\bar{Tr}\bar{T}s) * P(\bar{Tr}\bar{T}s), \quad (6)$$

где $P(X/\bar{R} \bar{S}/TrTs)$, $P(X/\bar{R} \bar{S}/\bar{Tr}Ts)$, $P(X/\bar{R} \bar{S}/Tr\bar{T}s)$, $P(X/\bar{R} \bar{S}/\bar{Tr}\bar{T}s)$ – вероятности БАВ на энергоблоке АЭС при следующих условиях:

- БАВ не вызван выбросом от одного из ИР r или s , но может быть вызван совместным выбросом из нескольких ИР;
- на ИР r и s реализованы конкретные состояния ($TrTs$), ($\bar{Tr}Ts$), ($Tr\bar{T}s$) или ($\bar{Tr}\bar{T}s$) с точки зрения возникновения ТА;
- $P(TrTs)$, $P(\bar{Tr}Ts)$, $P(Tr\bar{T}s)$, $P(\bar{Tr}\bar{T}s)$ – вероятности реализации конкретного состояния ИР r и s с точки зрения возникновения ТА.

Рассмотрим составляющие формулы (6):

- $P(X/\bar{R} \bar{S}/TrTs)$ – вероятность БАВ на энергоблоке, с учетом того, что выброс из каждого из ИР r и s связан с ТА, но при этом для каждого из выбросов из отдельных ИР r и s БАВ не достигается. Вероятность события $P(X/\bar{R} \bar{S}/TrTs)$ равна 0, так как, согласно условию 2, при ТА в БВ (ИР s) всегда происходит БАВ, и рассматриваемая ситуация невозможна;
- $P(X/\bar{R} \bar{S}/\bar{Tr}Ts)$ – вероятность БАВ на энергоблоке, при том, что ни на одном ИР (ни на r , ни на s) не достигнут БАВ, и при этом на ИР s произошла ТА, а на ИР r – нет. Аналогично предыдущему случаю вероятность события $P(X/\bar{R} \bar{S}/\bar{Tr}Ts)$ равна 0, так как, согласно условию 2, при ТА в БВ (ИР s) всегда происходит БАВ, и рассматриваемая ситуация невозможна;

- $P(X/\bar{R} \bar{S}/Tr\bar{T}s)$ – вероятность БАВ на энергоблоке АЭС, при том, что ни на одном ИР не достигнут БАВ, и при этом на ИР r произошла ТА, но на ИР s – нет. Такая ситуация в принципе возможна, если:

- a. выброс из ИР r связан с ТА с полным повреждением топлива и ограничен проектной неплотностью (в противном случае выброс из реактора приводит к БАВ (см. условие 1));
- b. выброс от других ИР, отличных от топлива в реакторе, не достигает БАВ, но в сочетании с выбросом из реактора через проектную неплотность достигает БАВ. Вероятность события $P(X/\bar{R} \bar{S}/Tr\bar{T}s)$ равна 0, так как, согласно условию 3, любые сочетания выбросов через проектную неплотность из поврежденного топлива в реакторе, выбросов из БВ и реактора при отсутствии ТА с полным повреждением топлива и выбросов от других ИР, отличных от топлива в реакторе и БВ, на несколько порядков ниже, чем выброс, необходимый для формирования БАВ;

- $P(X/\bar{R} \bar{S}/\bar{Tr}\bar{T}s)$ – вероятность БАВ на энергоблоке АЭС, при том, что ни на одном ИР не достигнут БАВ, и при этом ни на одном ИР не произошла ТА. Эта составляющая соответствует ситуации, когда весь выброс связан только с выходом радиоактивных продуктов деления из ИР, отличных от ядерного топлива в реакторе и БВ, и (или) из реактора и БВ при отсутствии в них ТА (например, с выходом радиоактивных продуктов из мест хранения радиоактивных отходов и (или) одновременным выходом теплоносителя из реактора и БВ за пределы ГО). Вероятность события $P(X/\bar{R} \bar{S}/\bar{Tr}\bar{T}s)$ также равна 0, учитывая, что, согласно условию 3, любые сочетания выбросов из реактора и БВ при отсутствии ТА и выбросов от других ИР, отличных от топлива в реакторе и БВ, на несколько порядков ниже, чем выброс, необходимый для формирования БАВ.

Таким образом, можно сделать вывод, что для рассматриваемого энергоблока АЭС $P(X/\bar{R} \bar{S})$ равна 0.

На основании приведенной оценки вероятности возникновения БАВ можно сделать вывод о том, что для любой АЭС, для которой выполняются условия 1–3, справедливы следующие утверждения:

- Дополнительный вклад в вероятность БАВ от совместного повреждения нескольких ИР равен 0, и консервативно вероятность БАВ для энергоблока АЭС может быть оценена как сумма вероятностей БАВ из реактора и БВ, определенных независимо.
- Нет необходимости и практической пользы от разработки модели СПИР для совместного повреждения нескольких ИР, которая предусмотрена п. 35 [3].

▪ Выполнение пп. 49, 55, 63 и 74 [3] избыточно, так как они вытекают из необходимости выполнять п. 35 [3].

▪ П. 79 [3] требует уточнения, так как, в отличие от рекомендации данного пункта о суммировании вероятностей СПИР с совместным повреждением ядерного топлива, для более точной оценки вероятности БАВ необходимо использовать формулу (2а), то есть вклад в вероятность БАВ от совместного выброса из ИР должен вычитаться.

▪ Пп. 6.19–6.20 [2] не требуют выполнения, так как выброс только из БВ при ТА приводит к БАВ, и совместное влияние ТА на выбросы в БВ и реакторе не увеличивает вероятности БАВ.

▪ П. 6.21 [2] не требует выполнения, для энергоблоков АЭС, в которых БВ находится вне ГО.

4. Алгоритм анализа совместного повреждения источников радиоактивности

Вывод, полученный по результатам анализа совместного повреждения нескольких ИР, выполненного авторами, может быть неприменим для других АЭС, для которых результаты анализов радиационных последствий аварий не подтверждают выполнение условий 1–3 раздела 3.

Например, если выброс через неповрежденную ГО может быть близок к БАВ (что характерно для АЭС с большой проектной неплотностью), некоторые составляющие формулы (6) могут быть отличны от нуля. Тем не менее выводы, сделанные относительно применимости рекомендаций [3], справедливы и для других типов АЭС.

Представленный выше анализ следовал определенному алгоритму, который применим для всех АЭС.

Этот алгоритм можно формализовать следующим образом:

Этап 1. Выполнение оценок дозовых нагрузок:

а. Выполняются оценки дозовых нагрузок на население для следующих сценариев ТА с полным повреждением ядерного топлива:

- i. ТА в реакторе, ГО не герметична;
- ii. ТА в реакторе, ГО герметична (учитывается проектная неплотность);
- iii. ТА в БВ, ГО не герметична;
- iv. ТА в БВ, ГО герметична (учитывается проектная неплотность).

б. Выполняются оценки дозовых нагрузок на население для следующих сценариев ТА с частичным повреждением ядерного топлива:

- i. частичное повреждение ядерного топлива в реакторе, ГО не герметична;

ii. частичное повреждение ядерного топлива в БВ, ГО не герметична;

iii. частичное повреждение ядерного топлива в реакторе и БВ, ГО не герметична.

с. Выполняются оценки дозовых нагрузок на население для следующих сценариев запроектных аварий без повреждения ядерного топлива:

- i. авария в реакторе, ГО не герметична, учитывается выход теплоносителя за пределы ГО;
- ii. авария в БВ, ГО не герметична или авария сопровождается байпасом ГО (учитывается выход теплоносителя за пределы ГО).

д. Выполняются оценки дозовых нагрузок на население с выходом всех радиоактивных материалов, находящихся на энергоблоке АЭС, кроме ядерного топлива в реакторе, БВ и узле хранения свежего ядерного топлива.

Примечание: при выборе сценариев ТА и запроектных аварий выбираются те сценарии, информация из анализа которых позволит дать наиболее реалистичные оценки составляющих формулы (6).

Этап 2: Выполнение оценок вероятности БАВ для полного множества возможных вариантов состояния ИР r и s с точки зрения возникновения ТА по формуле (6):

- а. Анализируются условия, при которых составляющие формулы (6) не равны 0;
- б. Для этих условий выявляются исходные события, учитываемые при оценке составляющих;
- с. Выполняется оценка вероятности $P(X/\bar{R} \bar{S})$ для выбранных исходных событий.

Этап 3. Выполнение оценок вероятности БАВ с учетом совместного повреждения нескольких ИР:

- а. Определяются $P(R)$, $P(S)$;
- б. Вероятность БАВ для энергоблока АЭС оценивается по формуле (5);
- с. Если результаты оценки вероятности БАВ превышают целевой ориентир (или критерий) по вероятности БАВ, определяется $P(RS)$;
- д. Вероятность БАВ для энергоблока АЭС оценивается по формуле: $P(X) = P(R) + P(S) - P(RS) + P(X/\bar{R} \bar{S})$ (формула (2а) при $P(\bar{R} \bar{S}) = 1$).

Примечание: как указывалось в разделе 2, события с БАВ из разных ИР одного энергоблока АЭС часто оказываются зависимыми, и значение $P(RS)$ может быть сравнимо с $P(R)$ или $P(S)$. Физический смысл события RS заключается в том, что БАВ произошел одновременно из-за выбросов из ИР r и s , и при этом выброс из каждого ИР также привел к БАВ. Если интегральная модель ВАБ создается корректно, то расчет составляющей формулы (2а): $P(R) + P(S) - P(RS)$ выполняется автоматически,

без необходимости индивидуального расчета $P(R)$, $P(S)$ и $P(RS)$. Для корректного расчета в интегральной модели ВАБ необходимо для любого исходного события, применимого для ИР r , разрабатывать аварийные последовательности, включающие конечные состояния ИР s , и наоборот: для любого исходного события, применимого для ИР s , необходимо разрабатывать аварийные последовательности, включающие конечные состояния ИР r . В этом случае все дублирующие логические комбинации отказов, приводящие к совместному БАВ ИР r и s , будут исключены из результатов за счет применения законов Булевой логики.

Выводы

Выполненный авторами статьи анализ и предлагаемый алгоритм выполнения анализа позволяет сделать ряд важных выводов:

1) Ряд положений РБ-044-18 [3] избыточны. Выполнение рекомендаций, приведенных в разделе 1 пунктов [3], крайне трудоемко, но при этом может не давать дополнительной информации для оценки риска от совместного повреждения нескольких ИР.

2) Нет необходимости выполнять положения пп. 6.19–6.20 [2], если выброс при ТА в БВ или реакторе приводит к БАВ.

3) П. 6.21 [2] не требует выполнения для АЭС, в которых БВ находится внутри ГО, что характерно для АЭС с реакторами типа ВВЭР в России.

4) Исходя из информации, приведенной в статье, РБ-044-18 [3] следует доработать с целью корректировки рекомендаций, требующих трудоемких анализов, но не обеспечивающих более полную картину профиля риска с учетом предложений, представленных в статье, а именно: прежде чем выполнять оценки последствий совместного повреждения нескольких ИР, необходимо выполнить серию расчетов дозовых нагрузок, на основании результатов которых выявляются реалистичные сценарии, требующие учета при определении вероятности БАВ энергоблока АЭС.

5) Алгоритм анализа, предложенный в статье, может применяться для любой АЭС, обеспечивая сокращение трудозатрат и повышение реалистичности оценок вероятности БАВ.

Литература

1. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций (НП-001-15): утв. приказом Ростехнадзора от 17.12.2015 № 522.
2. Specific Safety Guide No. SSG-4 (Rev. 1). Development and Application of Level 2 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants, IAEA, 2025.
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 (с изм.: приказ Ростехнадзора от 24.01.2024 № 21).
4. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. – 4-е изд. – М.: Изд-во «Наука», 1969.

References

1. Federal'nye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoi energii "Obshchie polozheniya obespecheniya bezopasnosti atomnykh stantsii" (NP-001-15) [Federal rules and regulations in the field of atomic energy use "General provisions for nuclear power plant safety assurance" (NP-001-15)]. 2015.
2. Specific Safety Guide No. SSG-4 (Rev. 1). Development and Application of Level 2 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants, IAEA, 2025.
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 atomic energy use "General recommendations to the development of probabilistic safety analysis (Level 2 PSA) for a NPP unit" (RB-044-18)]. 2024.
4. Ventsel E. S. (1969). Teoriya veroyatnostey [Probabilistic theory]. (4th ed.). Moscow: "Nauka". [in Russian].

Сведения об авторах

Любарский Артур Вадимович, главный эксперт, Управление вероятностного анализа безопасности, Дирекция по обоснованию безопасности, АО «Атомэнергoproект» (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).

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

Токмачев Геннадий Владимирович, главный специалист, Управление вероятностного анализа безопасности, Дирекция по обоснованию безопасности, АО «Атомэнергoproект» (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.

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.

Для цитирования

Любарский А. В., Бредова В. А., Морозов В. Б., Токмачев Г. В. Учет совместного повреждения нескольких источников радиоактивности при выполнении вероятностного анализа безопасности уровня 2 энергоблока АЭС. Ядерная и радиационная безопасность. 2025. № 3 (117). С. 15–23. DOI: 10.26277/SECNRS.2025.117.3.002.

For citation

Lyubarsky A. V., Bredova V. A., Morozov V. B., Tokmachev G. V. Uchet sovmestnogo povrezhdeniya neskol'kikh istochnikov radioaktivnosti pri vypolnenii veroyatnostnogo analiza bezopasnosti urovnya 2 ehnergobloka AEHS [Consideration of the combined damage of several sources of radioactivity in level 2 probabilistic safety assessment for a NPPs unit]. Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost' – Nuclear and Radiation Safety Journal, 2025, No. 3 (117), pp. 15–23. [in Russian]. DOI: 10.26277/SECNRS.2025.117.3.002.

