



УДК: 621.039

DOI: 10.26277/SECNRS.2025.117.3.005

© 2025. Все права защищены.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТНЫХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ НАРУШЕНИЙ В РАБОТЕ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЕРОЯТНОСТНОГО АНАЛИЗА БЕЗОПАСНОСТИ

Ивочкин М. Ю.*, канд. физ.-мат. наук (ivochkin@secnrs.ru),

Бредова В. А.* (bredova@secnrs.ru),

Берг Т. В.* (berg@secnrs.ru),

Максеев Р. Е.* (makseev@secnrs.ru),

Холодкова Д. А.* (sergeeva@secnrs.ru)

Статья поступила в редакцию 25 августа 2025 г.

Аннотация

Представлены требования федеральных норм и правил в области использования атомной энергии, предусматривающие проведение анализа нарушений в работе атомных станций, в том числе с использованием результатов вероятностного анализа безопасности.

Установлено, что рекомендации руководства по безопасности при использовании атомной энергии РБ-104-16 «Рекомендации по использованию вероятностного анализа безопасности при оценке нарушений в работе атомных станций», разработанные в поддержку указанных выше требований, в основном гармонизированы с международными документами, однако требуют уточнения и дополнения, например, в части оценки значимости нарушений, приводящих к исходным событиям, которые учитываются в вероятностном анализе безопасности второго уровня.

На основе результатов анализа российского и международного опыта оценки нарушений в работе атомных станций разработаны предложения по совершенствованию вероятностных методов оценки нарушений, включающие уточнение перечня вероятностных показателей, используемых для проведения оценки, уточнение порядка их расчета с использованием вероятностной модели энергоблока атомной станции, а также уточнение критериев оценки значимости нарушений по влиянию на безопасность.

Отмечено, что учет указанных предложений при актуализации РБ-104-16 позволит обеспечить корректную оценку и категоризацию нарушений в работе атомных станций, что, в свою очередь, будет способствовать принятию правильных корректирующих и регулирующих мер по обеспечению безопасности атомных станций.

► **Ключевые слова:** вероятностный анализ безопасности, нарушение в работе атомной станции, вероятностная модель энергоблока атомной станции.

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

THE IMPROVEMENT OF PROBABILISTIC METHODS FOR ASSESSMENT OF OPERATIONAL OCCURRENCES OF NUCLEAR POWER PLANTS USING PROBABILISTIC SAFETY ANALYSIS

Ivochkin M. Yu.*; Ph. D.,
Bredova V. A.*,
Berg T. V.*,
Makseev R. E.*,
Kholodkova D. A.*

The article was received by the editors' crew on August 25th, 2025.

Abstract

Federal rules and regulations in the field of atomic energy use, which require the analysis of operational events at nuclear power plants, including the use of probabilistic safety analysis results, are represented.

It was established that the recommendations of Nuclear Safety Guide RB-104-16 "Recommendations for use of probabilistic safety assessment in evaluating nuclear power plants operational disturbances", developed in support of the above requirements, are generally harmonized with international documents. However, they require clarification and supplementation, for example, in terms of assessing the significance of operational occurrences leading to initiating events and which are considered in the second-level probabilistic safety analysis.

Based on the results of an analysis of Russian and international experience in assessing operational occurrences in the operation of nuclear power plants, proposals have been developed to improve probabilistic methods for assessing operational occurrences, including clarifying the list of probabilistic indicators, clarifying the procedure for calculating them using the probabilistic model for nuclear power plant unit, as well as clarifying criteria for assessing the significance of operational occurrences on the impact on safety.

It was noted that taking these proposals into account when updating RB-104-16 will ensure the correct assessment and categorization of operational occurrences in the operation of nuclear power plants, which, in turn, will facilitate the adoption of corrective and regulatory measures to ensure the safety of nuclear power plants.

► **Keywords:** *probabilistic safety analysis, operational occurrence of nuclear power plant, probabilistic model for nuclear power plant unit.*

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

Введение

С начала 1990-х гг. методология вероятностного анализа безопасности (ВАБ) атомных станций (АС) стала все более широко применяться во многих странах мира, в том числе и в России, как дополнительный инструмент для принятия решений при проектировании, эксплуатации и регулировании безопасности АС совместно с традиционными детерминистическими методами. Использование методологии ВАБ при оценке нарушений позволяет с применением установленной вероятностной метрики (вероятностных показателей) численно оценить риск от нарушений при эксплуатации АС, выделить наиболее важные вопросы безопасности АС, которые требуют решений, определить меры по обеспечению безопасности и установить приоритеты их реализации, а также оценить влияние корректирующих мер на вероятностные показатели.

Впервые ВАБ для анализа нарушений в работе АС начал применяться Комиссией по ядерному регулированию (КЯР) США в 1979 г. в рамках программы ASP (Accident Sequence Precursor) [1]. На основе информации, содержащейся в отчетах о расследовании нарушений и отчетах об инспекциях на АС, с использованием собственных стандартных вероятностных моделей энергоблоков АС КЯР вплоть до настоящего времени выполняются количественные оценки влияния нарушений в работе АС на вероятностные показатели энергоблоков АС. При этом стоит отметить, что значимость нарушений в работе АС с использованием ВАБ выполняется КЯР одновременно с программой ASP в рамках еще двух программ [1]:

- определения значимости результатов инспекций SDP (Significance Determination Process) с учетом оценки состояния ключевых факторов безопасности по показателям состояния (оценивается деятельность лицензиата по обеспечению безопасности, принимаются решения в соответствии с матрицей действий и санкции) [2–4];
- расследования инцидентов КЯР (NRC Incident Investigation Program), по которой, в зависимости от величины риска от нарушения при эксплуатации АС, принимается решение о планировании и проведении инспекции [5].

В настоящее время оценка нарушений в работе АС с использованием ВАБ проводится во многих странах мира, развивающих атомную энергетику [6–9]. В пункте 5.29 документа SSR-2/2 [10] предписывается выполнение анализа нарушений в работе АС,

а в документе TECDOC-1417 [11] приведен пример выполнения такого анализа.

В соответствии с требованиями пункта 1.2.23 НП-001-15 [12] эксплуатирующая организация должна осуществлять деятельность по повышению безопасности АС с учетом анализов безопасности и опыта эксплуатации, включая результаты анализов нарушений в работе АС. Согласно требованиям НП-004-08 [13] каждое нарушение в работе АС подлежит расследованию в установленном порядке, в том числе с учетом результатов ВАБ, а отчет о расследовании нарушения в работе АС, содержащий, в том числе, оценку влияния нарушения в работе АС на безопасность энергоблока АС с применением ВАБ, направляется в Ростехнадзор для принятия возможных регулирующих решений.

Также требованиями пункта 4.1.16 НП-001-15 [12] предусмотрена разработка плана реализации мероприятий и обоснования эксплуатации энергоблока АС на мощности до его реализации при выявлении отклонений (событий), являющихся предвестниками тяжелой аварии, для которых условная вероятность перехода в тяжелую аварию составляет 10^{-3} или более.

С целью содействия соблюдению требований НП-004-08 [13] в 2016 г. Ростехнадзором выпущено РБ-104-16 [14], содержащее рекомендации для оценки значимости для безопасности АС нарушений в составе отчета о расследовании нарушения в работе АС.

Опыт применения эксплуатирующей организацией руководства по безопасности РБ-104-16 [14] для оценок нарушений в работе АС и регулирующим органом при экспертизе этих оценок показал, что рекомендации РБ-104-16 [14] в части определения вероятностных показателей, порядка расчета вероятностных показателей с использованием вероятностной модели энергоблока АС, выбора вероятностных критериев оценки значимости нарушений по влиянию на безопасность требуют уточнения и дополнения.

Далее рассматриваются конкретные предложения по улучшению рекомендаций РБ-104-16 [14] в указанной части.

1. Вероятностные показатели

Одним из этапов проведения оценки нарушения в работе АС с использованием ВАБ является расчет значений вероятностных показателей, на основе которых в дальнейшем определяется значимость нарушения в работе АС. Для выполнения указанного расчета требуется разработанный ВАБ

энергоблока АС, содержащий, в том числе, его вероятностную модель, в которую при оценке нарушения могут вноситься изменения, отражающие совокупность отклонений (отказов элементов систем и ошибок персонала), характеризующих произошедшее нарушение в работе АС.

В РБ-104-16 [14] установлены следующие вероятностные показатели для оценки нарушений в работе АС:

- увеличение суммарной вероятности тяжелых запроектных аварий для одного энергоблока АС за один год, обусловленное нарушением (ΔВТА);
- условная вероятность тяжелых запроектных аварий для одного энергоблока АС при реализации нарушения (УВТА);
- увеличение суммарной вероятности предельного аварийного выброса для одного энергоблока АС за один год, обусловленное нарушением (ΔВПАВ).

Однако РБ-104-16 [14] не содержит вероятностного показателя, необходимого для учета отказов элементов и ошибок персонала, рассматриваемых в ВАБ уровня 2, при возникновении нарушений, приводящих к исходным событиям (ИС). Введение такого вероятностного показателя обеспечивает оценку нарушения в работе АС с учетом результатов ВАБ уровня 2, что позволяет комплексно оценивать нарушения на основе ВАБ и исключить их возможную неверную оценку, когда нарушение в работе АС на основе ВАБ уровня 1 оценено как незначимо влияющее на безопасность АС, а на основе ВАБ уровня 2 это нарушение значительно влияет на безопасность АС.

Изучение международного опыта в разработке методов оценки нарушений в работе АС с применением ВАБ уровня 1 [1, 2, 5–9] показывает, что для оценки нарушений в работе АС используются такие вероятностные показатели, как условная вероятность тяжелых аварий для одного энергоблока АС при реализации нарушения в работе АС (УВТА) и увеличение ВТА для одного энергоблока АС за один год, обусловленное нарушением (ΔВТА), которые соответствуют РБ-104-16 [14].

Существуют рекомендации по применению ВАБ уровня 2 для оценки нарушений в работе АС [7, 8], что подразумевает использование таких вероятностных показателей, как условная вероятность большого аварийного выброса для одного энергоблока АС при реализации нарушения в работе АС (УВБАВ) и увеличение вероятности большого аварийного выброса для одного энергоблока АС за один год, обусловленное нарушением (ΔВБАВ). Следует отметить, что указанные вероятностные показатели

применяются не только при проведении оценки нарушения в работе АС, но и для иных задач, связанных с применением ВАБ уровня 2 [15, 16]. Также ΔВБАВ является аналогом используемой в РБ-104-16 [14] ΔВПАВ.

УВТА является вероятностным показателем, показывающим влияние постулированного ИС, к которому привело нарушение в работе АС, и определяется следующим образом:

$$УВТА = \frac{ВТА_{ИС}}{f_{ИС}}, \quad (1)$$

где $ВТА_{ИС}$ – ВТА на временном интервале в один год для постулированного ИС, вызванного нарушением в работе АС;

$f_{ИС}$ – частота возникновения ИС.

Вероятностный показатель ΔВТА учитывает длительность эксплуатации энергоблока АС с отклонениями, характеризующими нарушение (например, скрытый отказ элемента или недостатки программного обеспечения, которые могут перейти в явный отказ спустя некоторое время), и определяется следующим образом:

$$\Delta ВТА = (ВТА_{нар} - ВТА_{баз}) \times \frac{t_{нар}}{T}, \quad (2)$$

где $ВТА_{нар}$ – ВТА на временном интервале в один год, определенная при постулировании отклонений, характеризующих нарушение в работе АС;

$ВТА_{баз}$ – ВТА на временном интервале в один год, определенная при выполнении ВАБ уровня 1;

$t_{нар}$ – длительность эксплуатации энергоблока АС с отклонениями, характеризующими нарушение в работе АС;

T – временной интервал, равный одному году.

Вероятностные показатели УВБАВ и ΔВБАВ определяются аналогичным УВТА и ΔВТА образом:

$$УВБАВ = \frac{ВБАВ_{ИС}}{f_{ИС}}; \quad (3)$$

$$\Delta ВБАВ = (ВБАВ_{нар} - ВБАВ_{баз}) \times \frac{t_{нар}}{T}, \quad (4)$$

где $ВБАВ_{ИС}$ – ВБАВ на временном интервале в один год для постулированного ИС, вызванного нарушением в работе АС;

$f_{ИС}$ – частота возникновения ИС;

$ВБАВ_{нар}$ – ВБАВ на временном интервале в один год, определенная при постулировании отклонений, характеризующих нарушение в работе АС;

$ВБАВ_{баз}$ – ВБАВ на временном интервале в один год, определенная при выполнении ВАБ уровня 2.

В целях гармонизации с международным подходом использование указанных вероятностных показателей при оценке нарушений в работе АС с применением ВАБ представляется целесообразным и в российской нормативной базе.

Аналогично программе предвестников аварий ASP КЯР [1] для определения требуемой пунктом 4.1.16 НП-001-15 [6] условной вероятности перехода в тяжелую аварию для отклонения (события), являющегося предвестником тяжелой аварии, представляется целесообразным использовать указанные способы определения УВТА и (или) ΔВТА.

Использование других вероятностных метрик (вероятностных показателей) для оценки риска от нарушений при эксплуатации АС (например, используемых при проведении классификации систем и элементов по влиянию на безопасность [17, 18]) не представляется своевременным, поскольку они отсутствуют в международной и российской практике и не апробированы прежним опытом или исследованиями.

2. Порядок расчета вероятностных показателей с использованием вероятностной модели энергоблока атомной станции

В настоящем разделе приведено описание рекомендаций по моделированию нарушений в работе АС в вероятностной модели энергоблока АС, которые фактически отсутствуют в РБ-104-16 [14], однако присутствуют в различных международных документах [1, 2, 5–9], обеспечивая расчет вероятностных показателей по формулам (1) – (4) с учетом отклонений, характеризующих нарушение в работе АС.

При расчете вероятностных показателей с использованием вероятностной модели энергоблока АС рекомендуется определить, какие аварийные последовательности, модели «деревьев отказов», базисные события или действия персонала могут использоваться для представления нарушения в модели ВАБ, какие новые действия персонала рекомендуется моделировать или, наоборот, какие действия персонала, учтенные в модели, стали невозможными из-за нарушения.

Все произошедшие в ходе нарушения события рекомендуется отражать в вероятностной модели энергоблока АС:

- обнаруженные отказавшие элементы систем следует считать находящимися в неработоспособном состоянии с вероятностью 1;
- элементы систем, которые успешно выполнили свои функции, следует оставлять без изме-

нений и считать, что возможность отказа, как и показатели надежности в вероятностной модели энергоблока АС, таких элементов в ходе нарушения сохраняются (вероятность отказа для таких элементов не изменяется);

- для ошибок персонала справедливы аналогичные допущения, что и для отказавших элементов, приведенные выше;
- с целью сохранения возможности отказов по общей причине, если отказавший элемент включен в вероятностной модели энергоблока АС в группу элементов, подверженных отказам по общей причине, то такой элемент не следует исключать из указанной группы;
- если в вероятностной модели энергоблока АС одним базисным событием заменены несколько базисных событий и логические связи между ними, то при оценке нарушений следует устанавливать неработоспособное состояние для элементов систем, успешное выполнение функций безопасности которых зависит от отказавших или перешедших в состояние неготовности во время нарушения элементов систем (в том числе обеспечивающих систем и систем управления);
- длительность эксплуатации энергоблока АС с отклонениями, характеризующими нарушение, – промежуток времени, в течение которого энергоблок пребывал в условиях рассматриваемого нарушения (например, неготовность элемента) – следует определять на основе информации о расследовании нарушения;
- в случае если длительность указанным способом определить не удастся, то в рамках консервативного подхода промежуток времени, в течение которого энергоблок АС эксплуатировался, например с неработоспособным элементом, следует принимать равным сумме периода между проверками работоспособности и времени восстановления неработоспособного элемента.

3. Вероятностные критерии оценки значимости нарушений по влиянию на безопасность

Критерии для оценки значимости нарушений в работе АС выбираются соответствующими принятым вероятностным показателям для оценки нарушений в работе АС. Путем сравнения вероятностных показателей с вероятностными критериями каждое нарушение в работе АС категоризируется по его значимости для безопасности. В зависимости от категории значимости для безопасности принимается решение о выполнении дальнейших

исследований, необходимости разработки и реализации корректирующих мероприятий или принятия регулирующих решений.

Анализ международного опыта в разработке методов оценки нарушений в работе АС с применением ВАБ [1, 2, 5–9] показывает, что подходы к категоризации нарушений в работе АС в разных странах различаются. В США оценка нарушений в работе АС с применением ВАБ используется в первую очередь для мониторинга уровня безопасности лицензиатов [2–4], а также принятия решения о планировании и проведении инспекций [5]. В других странах (например, Бельгии, Испании [6, 7]) категоризация нарушений направлена на определение статистически значимых закономерностей в эксплуатации энергоблоков АС, например по следующим группам:

- категории значимости нарушений;
- непосредственные причины нарушений;
- коренные причины нарушений;
- отказавшие системы и элементы.

Исходя из международного опыта (и, прежде всего, опыта КЯР [1–5]) предлагается уточнить приведенные в РБ-104-16 [14] критерии для категоризации нарушений в работе АС по их влиянию на безопасность (указаны на диаграммах, приведенных на рис. 1).

В области I диаграмм расположены нарушения категории «высокозначимые», на которые распространяются требования пункта 4.1.16 НП-001-15 [14]. В областях II и III диаграмм – нарушения категорий «среднезначимые» и «малозначимые», соответственно. При этом с точки зрения их последствий для эксплуатирующей организации и Ростехнадзора «малозначимые» и «среднезначимые» нарушения

фактически идентичны, так как в российских нормах при использовании атомной энергии не установлены требования, определяющие границу между ними. Однако представляется целесообразным сохранить приведенные в РБ-104-16 [14] области II и III диаграммы с целью возможного дальнейшего уточнения определения предвестника тяжелой аварии, приведенного в НП-001-15 [12], а именно: какое отклонение АС или эксплуатационное событие может считаться значимой частью аварийной последовательности. Границу между областью II и III диаграмм представляется целесообразным выбрать величиной 10^{-6} для УВТА/ΔВТА, поскольку именно это значение является критерием для отбора нарушений согласно программе ASP [1], а также при определении значимости результатов инспекций SDP (соответствует «зеленому коду», который не требует каких-либо действий со стороны регулятора [2, 3]) и при отборе нарушений для проведения инспекций (не требуется проведения инспекции со стороны регулятора [5]). Исходя из международного опыта [6, 7] для УВБАВ/ΔВБАВ аналогично предлагается использовать критериальное значение, меньшее на порядок, чем для УВТА/ΔВТА.

Заключение

По результатам анализа отечественного и международного опыта применения ВАБ при оценке нарушений в работе АС можно сформулировать следующие выводы:

- методология анализа нарушения в работе АС с использованием ВАБ, применяемая в Российской Федерации, в основном гармонизирована с международной практикой;

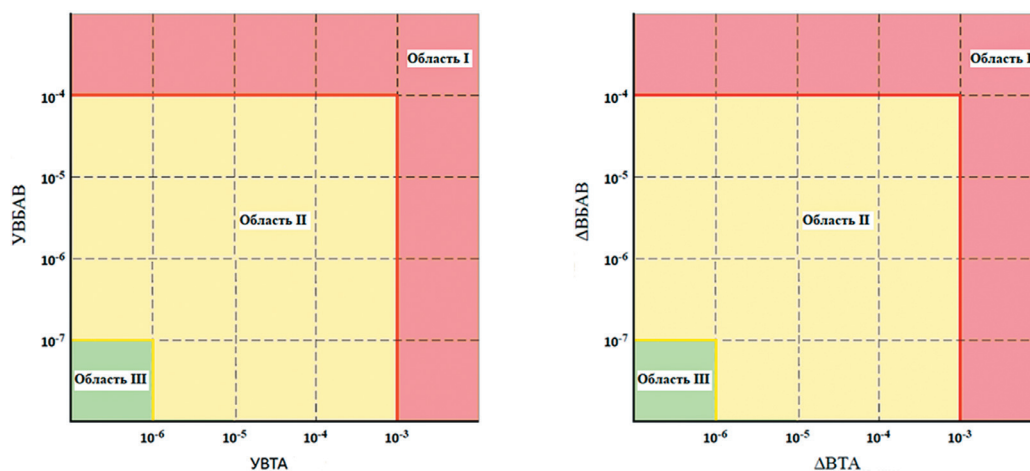


Рис. 1. Диаграммы категоризации нарушений в работе атомной станции по их влиянию на безопасность на основе вероятностных показателей энергоблока

[Fig. 1. Diagrams of the categorization of operational occurrences of nuclear power plant according to their impact on safety based on probabilistic indicators of the nuclear power plants unit]

▪ разработаны предложения по совершенствованию вероятностных методов оценки нарушений в работе АС, включающие уточнение перечня вероятностных показателей, используемых для проведения оценки, уточнение порядка их расчета с использованием вероятностной модели энергоблока АС, а также уточнение критериев оценки значимости нарушений по влиянию на безопасность;

▪ учет указанных предложений при актуализации РБ-104-16 [14] позволит обеспечить корректную оценку и категоризацию нарушений в работе АС, что, в свою очередь, способствует принятию правильных корректирующих и регулирующих мер по обеспечению безопасности АС.

Литература

1. US Nuclear Regulatory Commission Accident Sequence Precursor Program Summary Description. Revision 2, July 2024.
2. US Nuclear Regulatory Commission, Inspection Manual Chapter 0609, Significance Determination Process, November 9, 2020.
3. Букринский А. М. Атомный надзор в США (основные черты и особенности) // Ядерная и радиационная безопасность. 2009. № 51 (1). С. 42–57.
4. Букринский А. М. Определение значимости результатов инспекций, осуществляемых персоналом NRC, в процессе реакторного надзора // Ядерная и радиационная безопасность. 2009. № 53 (3). С. 15–23.
5. US Nuclear Regulatory Commission, Management Directive (MD) 8.3, “NRC Incident Investigation Program”, DT-23-06, May 4, 2023.
6. OECD Nuclear Energy Agency (NEA) Committee on the Safety of Nuclear Installations (CSNI): Use and Development of Probabilistic Safety Assessment, An Over-view of the Situation at the End of 2010. NEA/CSNI/R(2012)11. France, January 2013.
7. OECD Nuclear Energy Agency (NEA) Committee on the Safety of Nuclear Installations (CSNI): Proceedings of the Workshop on Precursor Analysis. 28–30 March 2001 in Brussels, NEA/CSNI/R(2003)11. France, March 2003.
8. Babst S., Gänssmantel G., Wielenberg A. (2016). Lessons learned on probabilistic methodology for precursor analyses // De Gruyter Brill, v. 81, issue 5, pp. 520–526.
9. Seunghyun Jang, Sunghyun Park, Moosung Jae. (2017). Development of an Accident Sequence Precursor Methodology and its Application to Significant Accident Precursors // Nuclear Engineering and Technology, v. 49, issue 2, pp. 313–326. DOI: 10.1016/j.net.2017.01.014.
10. Конкретные требования безопасности № SSR-2/2 (Rev. 1). Безопасность атомных электростанций: ввод в эксплуатацию и эксплуатация. МАГАТЭ, Вена, 2017.
11. IAEA-TECDOC-1417. International Atomic Energy Agency (IAEA): Precursor analyses – The use of deterministic and PSA based methods in the event investigation process at nuclear power plants. IAEA, Vienna, 2004.
12. 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.
13. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Положение о порядке расследования и учета нарушений в работе атомных станций (НП-004-08): утв. приказом Ростехнадзора от 14.05.2008 № 3.
14. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. Рекомендации по использованию вероятностного анализа безопасности при оценке нарушений в работе атомных станций (РБ-104-16): утв. приказом Ростехнадзора от 04.07.2016 № 281.
15. IAEA NUCLEAR ENERGY SERIES No. NP-T-3.1: Risk-informed In-service Inspection of Piping Systems of Nuclear Power Plants: Process, Status, Issues and Development. IAEA, Vienna, 2010.
16. EPRI Topical Report TR-112657 Revision B-A, Revised Risk Informed Inservice Inspection Procedure. Final Report, December 1999.
17. Бахметьев А. М., Ершов Г. А., Морозов В. Б. Некоторые вопросы совершенствования нормативных документов по поддержке принятия решений в области проектирования и эксплуатации атомных станций с использованием методов вероятностного анализа безопасности // Атомная энергия. 2021. Т. 130. № 1. С. 41–48.
18. Бахметьев А. М., Фальков А. А., Демин В. А. Основы безопасности ядерных установок: учеб. пособие. – Нижний Новгород: Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, 2021.

References

1. US Nuclear Regulatory Commission Accident Sequence Precursor Program Summary Description. Revision 2, July 2024.
2. US Nuclear Regulatory Commission, Inspection Manual Chapter 0609, Significance Determination Process, November 9, 2020.
3. Bukrinskii A. M. (2009). Atomnyi nadzor v SSHA (osnovnye cherty i osobennosti) [Nuclear supervision in the USA (main features and peculiarities)]. *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost' – Nuclear and Radiation Safety Journal*, No. 51 (1), pp. 42–57. [in Russian].
4. Bukrinskii A. M. (2009). Opredelenie znachimosti rezul'tatov inspektsii, osushchestvlyaemykh personalom NRC, v protsesse reaktornogo nadzora [Determining the significance of the results of inspections carried out by NRC personnel in the process of reactor supervision]. *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost' – Nuclear and Radiation Safety Journal*, No. 53 (3), pp. 15–23. [in Russian].
5. US Nuclear Regulatory Commission, Management Directive (MD) 8.3, “NRC Incident Investigation Program”, DT-23-06, May 4, 2023.
6. OECD Nuclear Energy Agency (NEA) Committee on the Safety of Nuclear Installations (CSNI): Use and Development of Probabilistic Safety Assessment, An Over-view of the Situation at the End of 2010. NEA/CSNI/R(2012)11. France, January 2013.
7. OECD Nuclear Energy Agency (NEA) Committee on the Safety of Nuclear Installations (CSNI): Proceedings of the Workshop on Precursor Analysis. 28–30 March 2001 in Brussels, NEA/CSNI/R(2003)11. France, March 2003.
8. Babst S., Gänssmantel G., Wielenberg A. (2016). Lessons learned on probabilistic methodology for precursor analyses // *De Gruyter Brill*, v. 81, issue 5, pp. 520–526.
9. Seunghyun Jang, Sunghyun Park, Moosung Jae. (2017). Development of an Accident Sequence Precursor Methodology and its Application to Significant Accident Precursors // *Nuclear Engineering and Technology*, v. 49, issue 2, pp. 313–326. DOI: 10.1016/j.net.2017.01.014.
10. Specific Safety Requirements № SSR-2/2 (Rev. 1). Safety of Nuclear Power Plants: Commissioning and Operation. IAEA. Vienna, 2017.
11. IAEA-TECDOC-1417. Precursor analyses – The use of deterministic and PSA based methods in the event investigation process at nuclear power plants. IAEA. Vienna, 2004.
12. 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.
13. Federal'nye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoi energii “Polozhenie o poryadke rassledovaniya i ucheta narushenii v rabote atomnykh stantsii” (NP-004-08) [Federal rules and regulations in the field of atomic energy use “Provision on the Procedure of Investigation and Accounting of Operational Occurrences at Nuclear Power Plants” (NP-004-08)]. 2011.
14. Rukovodstvo po bezopasnosti pri ispol'zovanii atomnoi ehnergii “Rekomendatsii po ispol'zovaniyu veroyatnostnogo analiza bezopasnosti pri otsenke narushenii v rabote atomnykh stantsii” (RB-104-16) [Safety guide in the field of atomic energy use “Recommendations on the use of the probabilistic safety analysis in assessment of NPP anticipated operational occurrences” (RB-104-16)]. 2016.
15. IAEA NUCLEAR ENERGY SERIES No. NP-T-3.1: Risk-informed In-service Inspection of Piping Systems of Nuclear Power Plants: Process, Status, Issues and Development. IAEA, Vienna, 2010.
16. EPRI Topical Report TR-112657 Revision B-A, Revised Risk Informed Inservice Inspection Procedure. Final Report, December 1999.
17. Bakhmet'ev A. M., Ershov G. A., Morozov V. B. (2021). Nekotorye voprosy sovershenstvovaniya normativnykh dokumentov po podderzhke prinyatiya reshenii v oblasti proektirovaniya i ehkspluatatsii atomnykh stantsii s ispol'zovaniem metodov veroyatnostnogo analiza bezopasnosti [Some issues of improving regulatory documents to support decision-making in the field of design and operation of nuclear power plants using methods of probabilistic safety analysis]. *Atomnaya ehnergiya – Atomic energy*, v. 130, No. 1, pp. 41–48. [in Russian].
18. Bakhmet'ev A. M., Fal'kov A. A., Demin V. A., et. al. (2021). *Osnovy bezopasnosti yadernykh ustanovok* [Fundamentals of nuclear plant safety]. A textbook. Nizhniy Novgorod: Lobachevsky National Research Nizhny Novgorod State University. [in Russian].

Сведения об авторах

Ивочкин Михаил Юрьевич, начальник 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).

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).

Максеев Роман Евгеньевич, научный сотрудник, 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).

Холодкова Дарья Алексеевна, младший научный сотрудник, 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).

Authors credentials

Ivochkin Mikhail Yur'evich, 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: ivochkin@secnrs.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.

Makseev Roman Evgen'evich, 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: makseev@secnrs.ru.

Kholodkova Dar'ya Alekseevna, Junior 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: sergeeva@secnrs.ru.

Для цитирования

Ивочкин М. Ю., Бредова В. А., Берг Т. В., Максеев Р. Е., Холодкова Д. А. Совершенствование вероятностных методов оценки нарушений в работе атомных станций с использованием вероятностного анализа безопасности // Ядерная и радиационная безопасность. 2025. № 3 (117). С. 47–55. DOI: 10.26277/SECNRS.2025.117.3.005.

For citation

Ivochkin M. Yu., Bredova V. A., Berg T. V., Makseev R. E., Kholodkova D. A. (2025). Sovershenstvovanie veroyatnostnykh metodov otsenki narushenii v rabote atomnykh stantsii s ispol'zovaniem veroyatnostnogo analiza bezopasnosti [The improvement of probabilistic methods for assessment of operational occurrences of nuclear power plants using probabilistic safety analysis]. *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost'* – Nuclear and Radiation Safety Journal, No. 3 (117), pp. 47–55. [in Russian]. DOI: 10.26277/SECNRS.2025.117.3.005.