

# ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ МОДЕЛИ ВЕРОЯТНОСТНОГО АНАЛИЗА БЕЗОПАСНОСТИ В УСЛОВИЯХ МУЛЬТИБЛОЧНОСТИ ОБЪЕКТА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ

Трибелев А.А., Королев А.С.  
НИЯУ МИФИ, Москва, Россия  
AATribelev@mephi.ru, korolev@mirea.ru

*Аннотация. В докладе рассматривается возможность адаптации вероятностного анализа безопасности (ВАБ) для условий мультиблочных АЭС. Рассматриваются специфичные задачи, связанные с межблочными взаимодействиями и каскадными эффектами, а также предлагаются рекомендации к адаптации системного подхода при анализе безопасного состояния АЭС.*

*Ключевые слова: безопасность АЭС, вероятностный анализ безопасности, мультиблочные АЭС.*

## Введение

Большая часть АЭС в мире содержат несколько энергоблоков, располагающихся на одной площадке [1]. После аварии на АЭС Фукусима происходило переосмысление подходов к вероятностному анализу безопасности (ВАБ) в условиях мультиблочности, что отмечено в документации МАГАТЭ [2] в исследованиях [3, 4, 5], что говорит о росте интереса к данному вопросу.

Безопасность является важнейшим свойством объекта использования атомной энергии (ОИАЭ). Обоснование безопасного состояния АЭС строится в условиях риск-ориентированного подхода через создание вероятностной модели безопасности. При построении модели безопасности важным инструментом является методология ВАБ, позволяя провести количественную и качественную оценку рисков, на основании которого определяются подходы к проектированию технических и организационных мер, направленных на реализацию и поддержание безопасного состояния. Традиционная практика проведения анализа подразумевает ориентацию на моноблочное состояние ОИАЭ.

В контексте мультиблочности, размещение нескольких источников потенциально радиационной угрозы на одной площадке создает специфические задачи, включая учет межблочных связей, а также интерференцию негативных факторов в аварийных ситуациях. Это усложняет традиционное управление безопасностью, в том числе функциональной безопасностью и управление авариями. При этом, для решения данных задач краевые условия, выраженные в количественном ограничении, остаются неизменными.

Таким образом, для мультиблочных условий необходимо рассмотрение иного подхода к реализации ВАБ и последующей реализации инжиниринга требований к реализации функциональной безопасности, в том числе с учетом внутренних условий резервирования и разнообразия и внешних условий межблочного взаимодействия. Важно учитывать потенциальные общие причины, способные вызвать одновременный отказ систем безопасности нескольких блоков. Проектирование функциональной безопасности должно включать сценарии каскадного развития аварий, предусматривая механизмы предотвращения и смягчения последствий. Это требует тщательного анализа взаимосвязей между блоками, разработки скоординированных планов действий в чрезвычайных ситуациях и внедрения эффективных систем мониторинга и управления, способных оперативно реагировать на быстро меняющуюся обстановку.

В докладе рассматривается проблематика риск-ориентированного подхода при решении задач ВАБ для последующей технической реализации решений, принятых на основе результатов, и предложены рекомендации для повышения надежности системного подхода к реализации функциональной безопасности в условиях сложной интеграции мультиблочных процессов.

## 1. Обоснование безопасности на основе вероятностного подхода

### 1.1. Методология традиционного ВАБ

Для определения практического опыта реализации методологии ВАБ, на которых строится современное обоснование безопасности, обратимся к работам [6, 7].

В зависимости от содержания, целей и предназначения результатов различают несколько уровней ВАБ. ВАБ-0 содержит качественный и количественный анализы надёжности систем и оборудования АЭС, важных для безопасности. Он подразумевает анализ и оценку надёжности персонала, внешних и

внутренних воздействий, отказов по общей причине, перечни исходных событий аварий и др. ВАБ-1 предполагает разработку вероятностных моделей для определения состояния с повреждением источников, содержащих ядерной топливо и радиоактивные материалы. ПО этим моделям производится оценка количества выделяющихся при авариях радиоактивного вещества, определяются причины таких событий, рассчитываются вероятности аварийных состояний. ВАБ-2 предусматривает анализ состояний с повреждением станций, моделирования системы локализации, определение состава и количества выбрасываемых в окружающую среду радиоактивных веществ, оценку вероятностей наступлений аварийных ситуаций, которые приводят к данному исходу. ВАБ-3 подразумевает анализ распространения выбрасываемых за пределы герметичной оболочки радиоактивных веществ, оценку создаваемых при это на местности доз облучения, расчет комплексных показателей безопасности

## 1.2. Модель безопасности АЭС

Как следует из вышеизложенного и [6, 8], выполнение ВАБ связано с моделированием и расчетом ряда физических показателей. На этапе проектирования необходимо рассчитать величины установленных вероятностных показателей безопасности для всех ССК ОИЯЭ. Расчеты производятся на основе априорной исходной информации о надежности оборудования и частотах событий, который могут инициировать нарушение условий и пределов безопасной эксплуатации ОИЯЭ.

Задача расчета вероятностных показателей безопасности решается на основе систематического подхода через определение исходных событий, определения эксплуатационных состояний, категоризация выбранных состояний, моделирование схем развития аварийных ситуаций для выбранных категорий и на основе данного анализа разрабатываются технические или организационные меры реагирования на аварийные состояния. Вместе с этим для каждой системы безопасности разрабатываются модели, позволяющие оценить вероятность успешного/неуспешного выполнения функций безопасности.

Исходя из данного определения, для оценки безопасности АЭС требуется разработка математической модели безопасности, основанной на вероятностном подходе. Математическая модель безопасности может быть представлена как:

$$P_c = P(\sum_{i=1}^n A_i). \quad (1)$$

При анализе систем ОИЯЭ вероятностная модель безопасности строится в соответствии со следующим порядком. Вначале строится вербальная модель безопасности с описанием условий безопасного функционирования системы. На основе происходит формализация вербальной модели в математическую графовую модель. Далее графовая модель преобразуется в логическую модель в приближении множества минимальных сечений отказов или же множества критических путей. На следующем этапе логическая модель преобразуется в расчетную вероятностную функцию, представленную либо в совершенной дизъюнктивной нормальной форме, либо в ортогональной дизъюнктивной нормальной форме. На последнем этапе на основе вероятностной модели производятся расчеты требуемых вероятностных характеристик безопасности.

## 2. Определение проблематики

Для первоначального определения проблематики перехода от одноблочного ОИЯЭ к мультиблочному состоянию обратимся к [9] и определим контекст рекомендаций от экспертов касательно имплементации общих подходов к обоснованию безопасности. В частности, приводятся следующие заключения:

- независимость систем (элементов) должна достигаться для всех блоков АЭС;
- исключение взаимного влияния технических средств и защиты от отказов по общим причинам для снижения влияния порогового эффекта на безопасность АЭС;
- обоснование многоцелевого использования систем безопасности в условиях отсутствия снижения надежности;
- системы безопасности каждого блока многоблочной АС должны быть независимы, в то время как к специальным техническим средствам для управления ЗПА такое требование не предъявляется. Однако достаточность таких средств при одновременном возникновении ЗПА на всех блоках АС должна быть показана в проекте АС;
- ЗПА (в частности, вследствие внешних воздействий) могут возникать на нескольких блоках многоблочной АС одновременно.

Обратимся к Руководству [2] для конкретизации данных заключений. При переходе в практическую плоскость должны быть расширены стандартные инструменты анализа. То есть, должны решаться задачи в несколько иной интерпретации. Так, ключевые аспекты мультимодульного ВАБ должны включать:

- Идентификация событий-инициаторов: Анализ событий, способных инициировать аварии на нескольких блоках (например, землетрясения, наводнения), а также событий, специфичных для одного блока, но влияющих на соседние (пожары, затопления);
- Разработка интегрированных логических моделей: Создание детализированных логических моделей для каждого блока с учетом взаимосвязей между ними, включая использование общих ресурсов и каскадные эффекты;
- Количественная оценка вероятностей: Оценка вероятностей событий и отказов с учетом зависимостей, применение статистических методов и Bayesian inference для обновления вероятностей;
- Оценка комплексных показателей риска: Количественная оценка частоты повреждения активной зоны (CDF) и частоты крупного повреждения активной зоны (LCF) для каждого блока и площадки в целом.

Переноса данные определения в плоскость практического решения, определяются следующие проблемные зоны. В условиях мультимодульного ОИАЭ, где несколько объектов могут функционировать одновременно, краевые условия решения задач, касающиеся воздействия радиации на персонал и окружающую среду, остаются едиными для всех блоков. Это означает, что даже если каждый блок имеет свои индивидуальные параметры безопасности, общие ограничения по радиационному воздействию должны быть соблюдены для всей площадки. При этом задачи не могут быть решены в явном виде, т.к. это приведёт к коллизиям и искажению в расчетах. Это создает сложности в оценке, поскольку необходимо учитывать, что авария на одном блоке может повлиять на радиационную безопасность других блоков. То есть сохраняя общие традиционные подходы к определению последствий. Следовательно задача должна быть решена в условиях

### 3. Определение интегральной модели

Интегрированный подход в обозначенных ранее условиях, предполагает расширение модульного состояния до мультимодульного в части подходов к анализу. В основе данного подхода должно лежать моделирование ключевых проблем безопасности, включая анализ определенных и условных внешних угроз, определенных и условных внутренних инициирующих событий для площадки, а также внутренних независимых событий

Иницирующее событие, которое может привести к аварийной ситуации, может быть единым для нескольких блоков. Например, землетрясение или наводнение могут одновременно инициировать нештатные ситуации на обоих блоках. Это требует от анализа учета не только индивидуальных сценариев для каждого блока, но и их взаимосвязей. Важно понимать, что одно и то же инициирующее событие может иметь разные последствия для разных блоков, в зависимости от их состояния и взаимного влияния, как это изображено на рисунке 1.

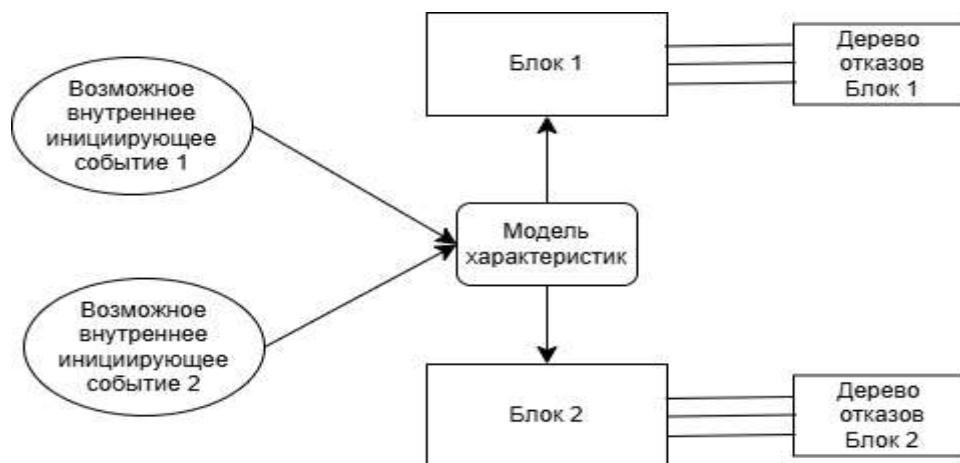


Рис. 1. Учет инициирующего события в условиях мультимодульности

При этом как отмечалось ранее, межблочные связи представляют собой критически важный аспект, который необходимо учитывать в мультиблочного ВАБ. Например, отказ оборудования в одном блоке может вызвать каскадные эффекты, влияя на соседний блок через общие системы, такие как системы электроснабжения или охлаждения. Это может привести к тому, что авария в одном блоке увеличивает вероятность отказа в другом, что в свою очередь может повлиять на общую вероятность повреждения активной зоны для всей площадки, как это изображено на рисунке 2

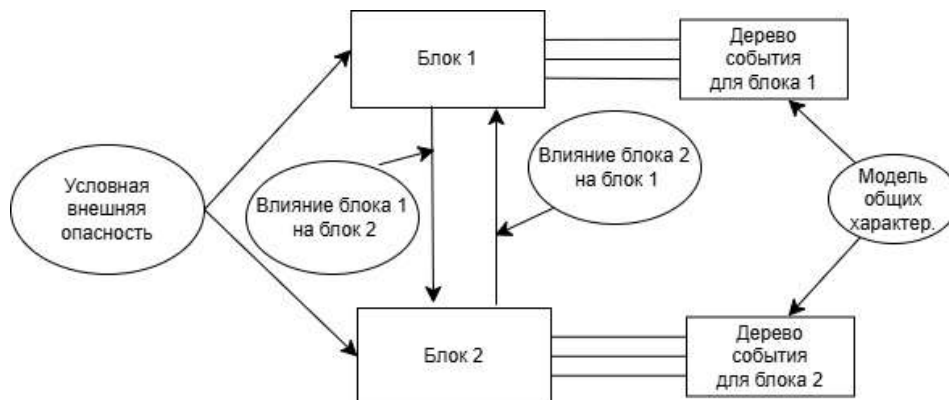


Рис. 2. Учет межблочных связей

Обобщая отмеченное выше, можно свести опыт к постановке задачи в условиях следующей модели, отображенной на рисунке 3.

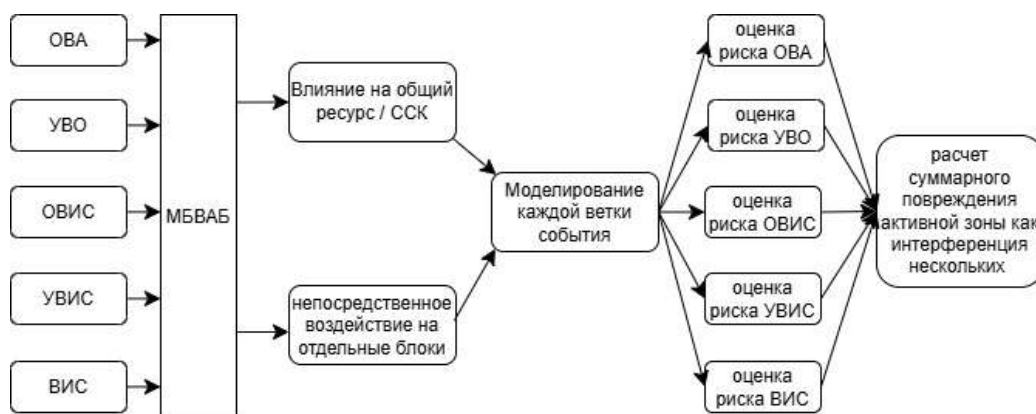


Рис. 3. Модель ВАБ для нескольких блоков

Где, ОВА – определенная внешняя опасность, УВО – условная внешняя опасность, ОВИС – определенной внутреннее инициирующее событие, УВИС – условное внутреннее инициирующее событие, ВИС – внутреннее инициирующее событие.

Как отмечалось ранее, важно сохранить неразрывную связь при переходе от моноблочного состояния к мультиблочному. Это требуется для реализации подхода, при котором общее состояние безопасности в условия ВАБ уровня 1 и 2 будут определены в соответствии со схемой на рисунке 4.

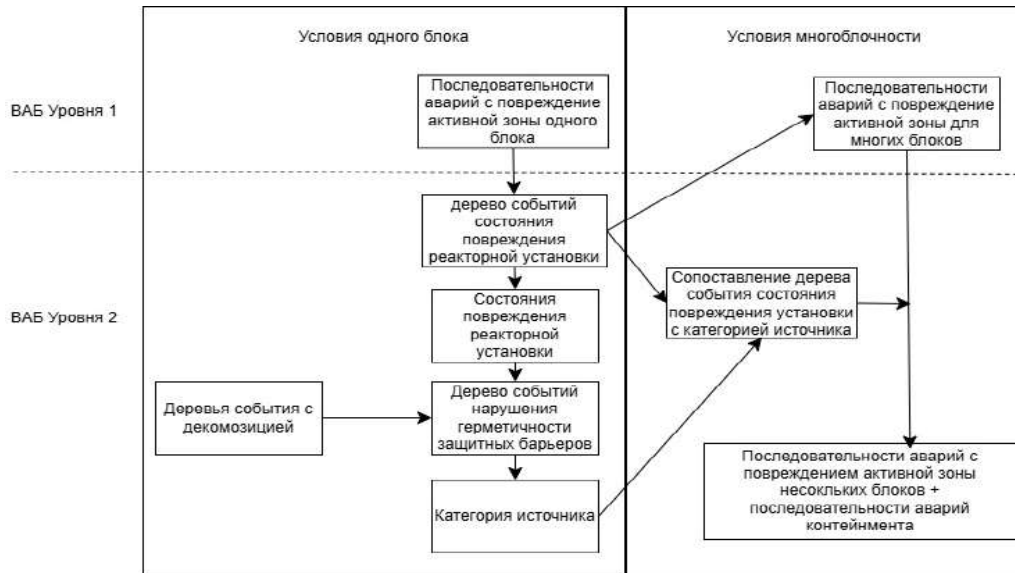


Рис. 4. Базовые модели ВАБ 1 и ВАБ 2

#### 4. Постановка задачи

Описанный ранее подход к вероятностному анализу безопасности определяет дальнейшую имплементацию задачи по реализации функциональной безопасности ОИАЭ. Логика преобразований при этом должна сохраняться в контексте методологии последовательности этапов моделирования и расчета при производстве ВАБ.

В постклассических условиях вероятностного подхода, которые были определены ранее, должны быть учтены следующие дополнительные компоненты при построении общей модели безопасности. Условие надежности, которое должно быть определено исходя из предположений:

$$R_{total}(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t), \quad (2)$$

где,  $R_{total}(t)$  – вероятность безотказной работы всей мультиблочной АЭС в течение времени  $t$ ,  $R_i(t)$  – вероятность безотказной работы блока  $i$ ,  $n$  – количество блоков на АЭС.

Данное определение строится исходя из идентифицированных суммы рисков:

$$R_{total} = \sum_{i=1}^n P(E_i)C(E_i) + \sum_{j=1}^m P(E_{ij})C(E_{ij}), \quad (3)$$

где:  $P(E_i)$  – вероятность события  $E_i$  для блока  $i$ ,  $C(E_i)$  – последствия события  $E_i$  для блока  $i$ ,  $P(E_{ij})$  – вероятность межблочного события  $E_{ij}$ ,  $C(E_{ij})$  – последствия межблочного события  $E_{ij}$ ,  $n$  – количество блоков,  $m$  – количество межблочных событий.

Реализация функции безопасности происходит с учетом принципов независимости и резервирования. В данном случае, Достаточность систем можно оценить через количество независимых систем, необходимых для выполнения критических функций безопасности. В условиях мультиблочности достаточность определяется соотношением:

$$N_{req}^{total} = \sum_{i=1}^n \frac{C_{min,i}}{C_{act,i}} + \sum_{j=1}^m \frac{C_{min,j}}{C_{act,j}}, \quad (4)$$

где:  $n$  – количество блоков,  $m$  – количество межблочных систем,  $C_{min,i}$ ,  $C_{min,j}$  – минимальные требования к количеству систем для блока  $i$  и межблочной системы  $j$ ,  $C_{act,i}$ ,  $C_{act,j}$  – фактическое количество доступных систем для блока  $i$  и межблочной системы  $j$ .

Связанное с этим понятие разнообразия определяется как сумма успешностей различных систем по блокам и межблочным связям:

$$D_{total} = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{K_i} P_{i,k} + \sum_{j=1}^m \sum_{l=1}^{L_j} P_{j,l}, \quad (5)$$

где:  $P_{i,k}$  – вероятность успешного выполнения функции безопасности для  $k$ -й системы блока  $i$ ,  $K_i$  – количество различных систем (технологий) для блока  $i$ ,  $P_{j,l}$  – вероятность успешного выполнения

функции безопасности для  $l$ -й межблочной системы  $j$ ,  $L_j$  – количество различных систем (технологий) для межблочной системы  $j$

Комбинированная вероятность безотказной работы по блокам и межблочным системам

$$R_{combined} = 1 - (\prod_{i=1}^n \prod_{k=1}^{K_i} (1 - R_{i,k}) \times (\prod_{j=1}^m \prod_{l=1}^{L_j} (1 - R_{j,l})), \quad (6)$$

где:  $R_{i,k}$  – вероятность безотказной работы  $k$ -й системы блока  $i$ ,  $R_{j,l}$  – вероятность безотказной работы  $l$ -й межблочной системы  $j$ .

Таким образом итоговым результатом будет определение суммарного риска примет вид:

$$R_{total} = \sum_{i=1}^n (1 - R_i) C(E_i) + \sum_{j=1}^m (1 - R_j) C(E_j) + \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{K_i} (1 - R_{i,k}) C(E_{i,k}), \quad (7)$$

где:  $R_i$ ,  $R_j$  – надежность блока  $i$  и межблочной системы  $j$ ,  $R_{i,k}$ ,  $R_{j,l}$  – надежность различных систем блока  $i$  и межблочной системы  $j$ ,  $C(E_i)$ ,  $C(E_j)$ ,  $C(E_{i,k})$ ,  $C(E_{j,l})$  – соответствующие последствия событий

В условиях мультиблочности риск определяется как совокупность вероятностей и последствий для всех блоков АЭС, учитывающая взаимосвязи и зависимости между ними. Формально это можно записать как:

Сумма рисков для мультиблочности должна быть меньше предельно допустимого значения, определяемого нормативной документацией и техническими условиями, если выполняются следующие условия:

1. Общий риск не должен превышать установленный предел;
2. Каждый отдельный риск для блока должен быть ниже допустимого уровня;
3. Необходимо учитывать взаимные влияния и каскадные эффекты, чтобы избежать недооценки рисков, на условиях определенных в соответствии с рисунком 4.

Дальнейшее решение данной задачи строится на основе системного подхода, реализуемого в ходе создания моделей безопасности, как это описывается в п. 1.2, и связанных с этим частных подзадач, решаемых вероятностными математическими методами.

## 5. Заключение

В докладе представлен анализ изменения подхода от традиционного одноблочного ВАБ ОИАЭ к учету многоблочного состояния. Данный переход на основе представленных рекомендаций и дальнейшая его детализация позволит более корректно реализовать принятые подходы к анализу безопасного состояния в условиях риск-ориентированного подхода, тем самым сняв часть консерватизма с математических моделей, на основании которых происходит обоснование безопасности ОИАЭ.

## Литература

1. International Atomic Energy Agency, Nuclear Power Reactors in the World, Reference Data Series № 2, IAEA, Vienna, 2024.
2. International Atomic Energy Agency, Multi-unit Probabilistic Safety Assessment, Safety Reports Series № 110, IAEA, Vienna, 2023.
3. Jang S., Jae M. A development of methodology for assessing the inter-unit common cause failure in multi-unit PSA Model // Reliability engineering & system safety. – 2020. – Vol. 203. – 107012.
4. Hlavac Pavol, Kovacs Zoltan, Maioli Andrea, Henneke Denis, Hitachi G., Amico Paul, Hughes Jensen, Boneham Paul, Coman Ovidiu, Poghosyan Shahen. Development of multiunit PSA model for the case study of the IAEA project, PSA. – 2020.
5. Qavi A., Shah N., Hammad S.W. Probabilistic safety assessment of Multi Unit Site of Nuclear Power Plant (2022), Strengthening Safety of Evolutionary and Innovative Reactor Designs (International Conference on Topical Issues in Nuclear Installation Safety), Vienna (Austria), 2022.
6. Швыряев Ю.В. Вероятностный анализ безопасности при проектировании и эксплуатации атомных станций с реакторами ВВЭР: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.14.03 / Швыряев Юрий Васильевич. – М., 2004. – 340 с.
7. Берберова М.А. Оценка показателей риска для вторых очередей Смоленской и Курской АЭС; диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.14.03 / Берберова Мария Александровна. – М., 2015. – 120 с.
8. Ершов Г.А., Гавриленко В.М., Козлов Ю.И. Обеспечение надежности и безопасности ядерных энергетических объектов в процессе проектирования. Методология и практика. Теплоэнергетика, 2004. – № 2.

9. Комментарии к Федеральным нормам и правилам «Общие положения обеспечения безопасности атомных станций» (НП-001-15) [РБ-152-18: утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 3 октября 2018 г. № 486]. –М., 2018.