

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ВЕРОЯТНОСТНОГО АНАЛИЗА БЕЗОПАСНОСТИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЗАЩИТНЫХ СИСТЕМ БЕЗОПАСНОСТИ АЭС

А. А. Петракова¹⁾, О. В. Гусакова¹⁾

¹⁾ Учреждение образования «Международный государственный экологический институт имени А. Д. Сахарова» Белорусского государственного университета, ул. Долгобродская, 23/1, 220070, г. Минск, Беларусь, ol.gusakova@gmail.com

Представлены результаты анализа и оценки надежности система аварийного охлаждения активной зоны высокого давления методом вероятностного анализа безопасности. Вероятностный анализ безопасности является количественным методом оценки частоты и последствий аварий, которые могут произойти на атомных электростанциях. Изучена технологическая схема одного канала системы, проанализированы режимы ее работы. Построено дерево отказов, определены события, приводящие к отказу канала системы. В результате построения дерева отказов был произведен расчет вероятности отказа канала и оценена значимость базовых событий.

Ключевые слова: вероятностный анализ безопасности; системы безопасности; дерево отказов.

APPLICATION OF PROBABILISTIC SAFETY ANALYSIS METHOD TO STUDY THE RELIABILITY OF NPP SAFETY PROTECTION SYSTEMS

N. A. Petrakova¹⁾, O. V. Gusakova¹⁾

¹⁾ International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University, Dolgobrodskaya str., 23/1, 220070, Minsk, Belarus, ol.gusakova@gmail.com

The article presents the results of the analysis and reliability assessment of the high-pressure core emergency cooling system using the probabilistic safety analysis method. Probabilistic safety analysis is a quantitative method for assessing the frequency and consequences of accidents that may occur at nuclear power plants. The process flow diagram of one channel of the system was studied, its operating modes were analyzed. A fault tree was constructed, and events leading to a system channel failure were determined. As a result of constructing the fault tree, the probability of channel failure was calculated and the significance of basic events was assessed.

Keywords: probabilistic safety analysis; safety systems; fault tree.

<https://doi.org/10.46646/SAKH-2025-1-95-98>

Вероятностный анализ безопасности (ВАБ) получил широкое распространение для оценки безопасности объектов использования атомной энергии. Современные требования к анализу и обоснованию безопасности ядерных установок, руководства МАГАТЭ предусматривают использование детерминистских и вероятностных методов как необходимого условия полноты исследования безопасности на всех этапах жизненного цикла ядерной установки.

Вероятностный анализ безопасности опасных промышленных объектов представляет собой сложную комплексную задачу системного анализа, выполнение которой невозможно без разработки и использования соответствующего методического и программного обеспечения.

Актуальность применения ВАБ для обеспечения ядерной и радиационной безопасности АЭС определяется возможностями ВАБ прогнозировать и демонстрировать поведение энергоблока АЭС и его систем в аварийных условиях. Полученные материалы в виде количественных оценок используются для анализа и выявления слабых мест в конструкции и эксплуатации энергоблока, которые снижают уровень безопасности АЭС. В дальнейшем на основании

этого анализа будут выполнены корректирующие мероприятия, эффективность которых также может быть определена с помощью ВАБ.

В соответствии с концепцией глубокоэшелонированной защиты в проекте АЭС предусмотрены системы безопасности для предотвращения или ограничения повреждения реакторной установки и локализации радиоактивных продуктов деления. Защитные системы безопасности – это системы, предназначенные для предотвращения или ограничения повреждения ядерного топлива, оболочек тепловыделяющих элементов, оборудования и трубопроводов, содержащих радиоактивные продукты. Одной из важнейших защитных систем является система аварийного охлаждения активной зоны высокого давления (САОЗ ВД)

Целью данной работы является анализ надежности САОЗ ВД методом ВАБ с помощью программного пакета SAPHIRE.

САОЗ ВД предназначена для предотвращения повреждения ТВЭЛов и расплавления топлива во всех авариях с потерей теплоносителя. Требования, которые предъявляются к САОЗ включают в себя: частичное или полное компенсирование утечки теплоносителя из активной зоны в начальный момент аварии, обеспечение отвода остаточного тепловыделения в активной зоне после остановки реактора, наличие двух- или трехкратного резервирования для повышения надежности, а также надежное электропитание для приводов насосов.

Система аварийного охлаждения активной зоны является защитной системой безопасности, так как обеспечивает отвод тепла от активной зоны в аварийных режимах. Система состоит из четырех одинаковых и полностью независимых один от других каналов. На рисунке 1 приведена упрощенная схема одного из каналов.

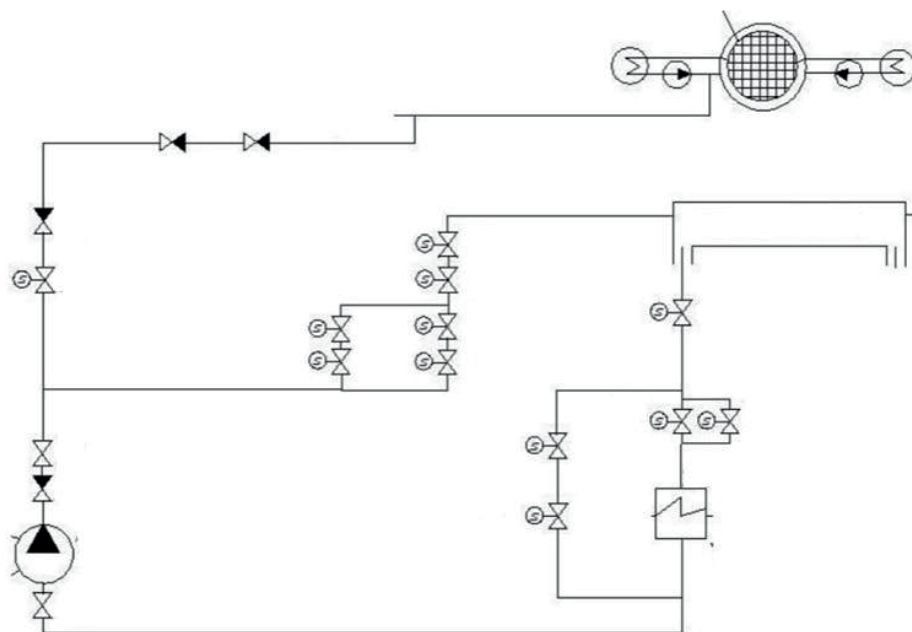


Рис.1. Упрощенная технологическая схема одного канала системы аварийного охлаждения активной зоны высокого давления

Всасывающие трубопроводы каждого канала системы через трубопроводы системы аварийного впрыска высокого давления подсоединяются к баку-приемке защитной оболочки запаса борированной воды низкой концентрации. На всасывающем трубопроводе установлена запорная задвижка (ручная, ремонтная). На напорном трубопроводе последовательно установлены: обратный клапан, запорная (ручная, ремонтная) задвижка, отсекающий клапан вне защитной оболочки (при пересечении трубопроводами защитной оболочки), обратные клапаны, внутри защитной оболочки.

Трубопровод (линия рециркуляции) выполняет роль разгрузочного трубопровода при работе насоса на минимальной производительности при закрытой арматуре на напоре насоса или давления в первом контуре, превышающем напор насоса. Таким образом, линия рециркуляции обеспечивает опробование насоса (периодические испытания) и работу его в режиме рециркуляции.

Построение дерева отказов CAO3 ВД производилось в программе SAPHIRE. Комиссия по ядерному регулированию США разработала программу для практической комплексной оценки надежности SAPHIRE (systems analysis program for hands-on integrated reliability evaluations), которая используется для проведения вероятностных оценок рисков на персональном компьютере. SAPHIRE позволяет пользователям предоставлять базовые данные о событиях, создавать и устранять неисправности, деревья отказов и деревья событий, выполнять анализ неопределенности и генерировать отчеты. Таким образом, аналитики могут выполнять ВАБ для любой сложной системы, объекта или процесса.

Так как система CAO3 ВД состоит из четырех одинаковых и полностью независимых один от других каналов, то деревья отказов (ДО) каждого из каналов, будут одинаковыми, в данной работе было выполнено построение ДО только для одного канала.

Дальнейший анализ схемы показывает, что отказ основной линии произойдет в случае, если произойдет отказ или обратного клапана, или ручной задвижки, или задвижки с электроприводом, или насоса аварийного впрыска высокого давления, или теплообменника, или бака-приямка.

Исходя из типов отказа элементов CAO3 ВД, отказ обратного клапана произойдет, в случае если произойдет течь наружу или отказ на открытие, течь наружу и отказ на открытие будут являться базовыми событиями. Отказ теплообменника произойдет в случае, если произойдет течь наружу или внутренняя течь, или засорение или отказ системы промконтур ответственных потребителей. Отказ насоса произойдет, если произойдет отказ на старт или отказ в работе. Отказ задвижки с электроприводом произойдет, если произойдет отказ на открытие или отказ на закрытие, или течь наружу. Отказ бака-приямка произойдет в случае, если произойдет течь наружу или засорение, или будет недостаточная концентрация бора.

На рисунке 2 представлен фрагмент дерева отказов для анализа отказа пары последовательно расположенных задвижек с электроприводом линии рециркуляции.

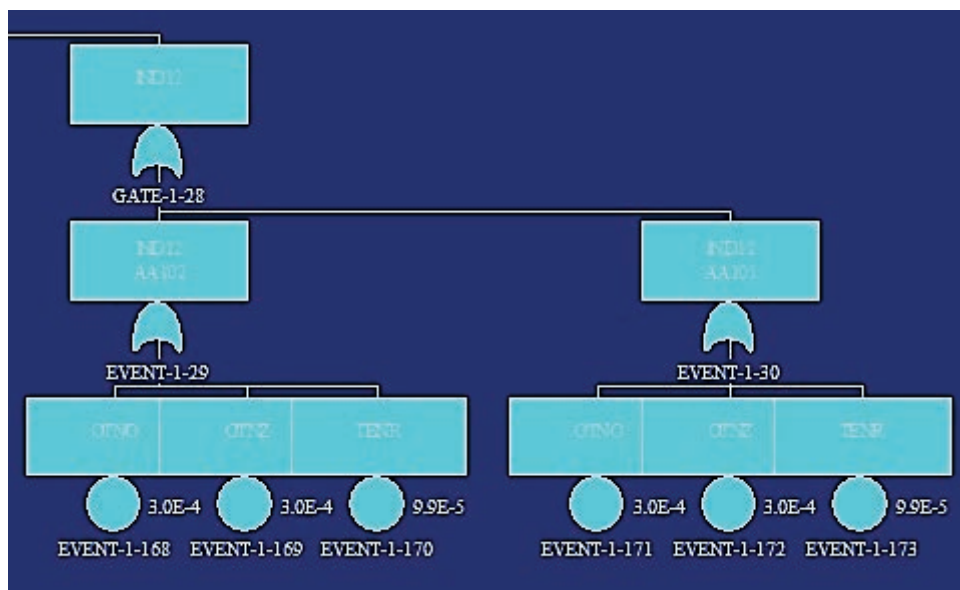


Рис.2. Фрагмент дерева отказов

Оценка значимости отдельных отказов показала, что наибольший вклад в отказ системы будет вносить засор теплообменника и отказ системы промконтура ответственных потребителей. Наименьший вклад вносит течь наружу обратного клапана.

Библиографические ссылки

1. Вероятностный анализ безопасности атомных станций (ВАБ): Учебное пособие / В. В. Бегун [и др], Киев. 2000.
2. Похолкин А. А. Применение защитных систем реактора ВВЭР при локализации аварии типа «малая течь из 1-го контура во 2-й» [Электронный ресурс] // Актуальные проблемы энергетики. 2016: материалы научно-технической конференции студентов и аспирантов (Минск, 2017). Минск: БНТУ. 2017. С. 290-295. URL: <https://rep.bntu.by/handle/data/34983> (дата обращения: 27.02.2025).
3. Солонин В. И. Безопасность и надежность реакторных установок. Учебное пособие по курсу «Расчеты и проектирование ядерных энергетических установок». М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана. 1996.
4. Волков Ю. В., Дугинов О. Б., Клинов Д. А. Надежность и безопасность ЯЭУ. Учебное пособие по курсу «Надежность и безопасность ЯЭУ». 2-е изд., перераб. и доп. Обнинск: ИАТЭ. 2005.
5. Smith C. L., Wood S. T. Systems Analysis Programs for Hands-on Integrated Reliability Evaluations (SAPHIRE). Idaho: Office of Nuclear Regulatory Research, 2011.