

Хижняк Сергей Анатольевич

**ПРИМЕНЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТНОГО АНАЛИЗА БЕЗОПАСНОСТИ В
ИНСПЕКЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НА АС**

Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка
информации (по энергетике)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Федеральном бюджетном учреждении «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (ФБУ «НТЦ ЯРБ»)

Научный руководитель – Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры АСУ Обнинского института атомной энергетики – филиала НИЯУ МИФИ **Антонов Александр Владимирович**

Официальные оппоненты – Доктор технических наук, профессор, начальник управления главных инженерных проектов (ГИП) отделения технологии ВВЭР ОАО «Атомпроект»
Ершов Геннадий Алексеевич

Кандидат технических наук, начальник отдела системных разработок по надежности и безопасности ядерных установок ОАО «Опытное конструкторское бюро машиностроения им. Африкантова» (ОАО «ОКБМ Африкантов»)
Былов Игорь Александрович

Ведущая организация – ОАО «Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций» (ОАО «ВНИИАЭС»), г. Москва

Защита состоится «___» _____ 2014 года в ___ часов на заседании диссертационного совета Д 212.130.10 при Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ» по адресу: 249040, г. Обнинск Калужской обл., Студгородок, 1, зал заседаний ученого совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Обнинского института атомной энергетики НИЯУ МИФИ и на сайте Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» <http://www.mephi.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2014 года

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.130.10
доктор физико-математических наук, профессор

Шаблов Владимир Леонидович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В 1999 году необходимость разработки вероятностного анализа безопасности (ВАБ) уровня один была отмечена в заявлении о политике Госатомнадзора России "Применение вероятностного анализа безопасности действующих энергоблоков атомных станций". Спустя двенадцать лет, с учетом накопленного опыта применения ВАБ как в Российской Федерации, так и за рубежом, и необходимостью выполнения полномасштабных ВАБ-1 и ВАБ-2 для всех видов иницирующих событий (ИС), включая внешние воздействия природного и техногенного характера (подтверждается уроками аварии на АЭС Фукусима Дай-ити), было подписано заявление о политике по применению вероятностного анализа безопасности и риск-информативных методов для атомных станций. В данном заявлении Ростехнадзор как орган государственного регулирования безопасности при использовании атомной энергии заявляет о необходимости углубленного и широкого использования ВАБ и риск-информативных методов (методов, основанных на совместном учёте результатов вероятностных и детерминистических исследований) как комплексных инструментов оценки безопасности блоков АС.

Особое внимание в заявлении о политике уделяется практическому применению ВАБ, так как мировая практика показывает высокую эффективность использования ВАБ как надзорными органами, так и эксплуатирующими организациями в целях обеспечения безопасности блоков АС.

Необходимо отметить, что ОАО «Концерн Росэнергоатом» применяет ВАБ для задач эксплуатации. Так, на нескольких энергоблоках АЭС успешно функционирует основанная на модели ВАБ система мониторинга риска, с использованием ВАБ выполняются обоснования повышения уровня мощности и изменения топливного цикла. При этом практика прикладного применения ВАБ регулирующим органом в России отсутствует, и в настоящей работе впервые представлены решения задач по использованию ВАБ регулирующим органом.

Актуальность работы

Современное состояние науки и практики регулирования безопасности АС в мире демонстрирует высокую эффективность применения ВАБ как надзорными органами, так и эксплуатирующими организациями в целях обеспечения безопасности АС, в том числе и при инспекционной деятельности. Эксплуатирующая организация передает в Ростехнадзор ВАБ в составе комплекта документов, обосновывающих обеспечение ядерной и радиационной безопасности блока АС. ВАБ используется Ростехнадзором при лицензировании наряду с традиционными детерминистическими подходами для оценки и регулирования безопасности АС. Кроме того, ВАБ применяется Ростехнадзором при оценке безопасности модернизаций АС, но в инспекционной деятельности практика применения ВАБ в настоящее время отсутствует. Это обуславливает актуальность работы.

Целью диссертационного исследования является комплексное развитие направления применения ВАБ в инспекционной деятельности.

Для достижения данной цели в диссертационной работе **решены следующие задачи:**

- Предложена система индикаторов безопасности для оценки тенденции изменения ядерной безопасности АС, которая базируется на обработке результатов, поступающих в Ростехнадзор при лицензировании материалов ВАБ.
- Разработан метод обработки и предоставления информации на основе ВАБ для планирования и проведения инспекций. В основе метода лежит идея о выявлении наиболее значимых с точки зрения безопасности систем (элементов систем), базисных событий, аварийных последовательностей и их ранжирование.
- Предложен метод определения оптимальных периодов инспекций систем, при которых характеристики безопасности и надежности принимают экстремальные значения. Метод базируется на исследовании функционалов безопасности и надежности.

- Сформулирован подход по упрощенной оценке значимости нарушений для специалистов без специфических знаний в области ВАБ. В основе подхода лежит идея формализации модели ВАБ, основанная на применении значений порядков вероятностей показателей безопасности.

Результатом работы над каждой из задач стали разработанные с учетом российских особенностей и апробированные на российских энергоблоках АС методики, позволяющие решить актуальную задачу по применению ВАБ в инспекционной деятельности.

Научная новизна

Основным научным достижением диссертации является разработка методов и моделей применения ВАБ в инспекционной деятельности. Впервые были получены:

- система индикаторов безопасности, которая дает возможность оценки тенденции изменения ядерной безопасности АС на основе материалов ВАБ, поступающих в Ростехнадзор при лицензировании;
- метод обработки и предоставления информации из модели ВАБ, который заключается в выявлении наиболее значимых с точки зрения безопасности систем (элементов систем), базисных событий, аварийных последовательностей и их ранжирование для планирования и проведения риск-информативных инспекций АС;
- метод определения оптимальных периодов инспекций систем, основанный на исследовании функционалов безопасности и надежности, использующий информацию об эксплуатации объектов;
- формализованная модель ВАБ для упрощенной оценки значимости нарушений, основанная на применении значений порядков вероятностей показателей безопасности.

Практическая значимость работы состоит в том, что:

- Разработана методика расчета на основе ВАБ индикаторов безопасности для оценки тенденции изменения ядерной безопасности АС. Индикаторы безопасности могут быть использованы специалистами Ростехнадзора при выборе объектов и определении периодичности целевых и комплексных инспекций согласно административному регламенту по исполнению Ростехнадзором функций по федеральному государственному надзору в области использования атомной энергии. По разработанной методике рассчитаны индикаторы безопасности для оценки тенденции изменения ядерной безопасности на 12 энергоблоках АС России.
- Разработана методика применения ВАБ для планирования и проведения инспекций. Создаваемые с помощью методики справочники, содержащие результаты ранжирования по значимости для безопасности АС систем, элементов АС, а также возможных ошибок персонала, позволяют инспекторам Ростехнадзора проводить риск-информативные инспекции и тем самым повысить эффективность регулирования безопасности. На основе разработанной методики создан справочник для планирования и проведения риск-информативных инспекций на 5-м энергоблоке Нововоронежской АС.
- Разработана методика формализации модели ВАБ, которая позволяет создавать инструкции для оценки значимости нарушений. Инструкции смогут использовать как специалисты Ростехнадзора, так и специалисты эксплуатирующей организации, не обладающие навыками работы с моделью ВАБ. Полученные с помощью инструкций результаты оценки значимости нарушений могут использоваться для следующих целей:
 - ранжирование нарушений по степени влияния на безопасность и наглядное представление тенденции изменения безопасности;
 - оценка значимости нарушений с помощью ВАБ в соответствии с требованиями п.4.1 приложения 2 НП-004-08;
 - демонстрация уровня безопасности АС населению в соответствии с требованием ФЗ-170 "Об использовании атомной энергии".

В соответствии с методикой разработана инструкция, содержащая формализованную модель ВАБ для оценки значимости нарушений на 1-м энергоблоке Калининской АС.

Достоверность научных положений обеспечена применением широко известных методов теории вероятности, математической статистики; использованием известных подходов применения вероятностного анализа безопасности; результатами сравнения разработанных методик с методиками, используемыми в других странах; результатами апробации и опытом использования полученных результатов; применением моделей ВАБ, прошедших экспертизу Ростехнадзора.

Личный вклад автора

Представленная диссертационная работа является результатом научных исследований, проводимых с 2008 по 2012 гг. в отделе анализов риска Федерального бюджетного учреждения «Научно технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (ФБУ «НТЦ ЯРБ»). Всего было выпущено 8 отчетов в рамках федеральной целевой программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2008 год и на период до 2015 года» и в рамках государственного задания ФБУ «НТЦ ЯРБ» по проведению научных исследований по применению действующих нормативных документов в области регулирования ядерной и радиационной безопасности.

Автор участвовал в качестве исполнителя и ответственного исполнителя на всех этапах работы. Лично автором выполнены апробации разработанных методик.

На защиту **выносятся следующие положения:**

- Система индикаторов безопасности и метод их расчета для оценки тенденции изменения ядерной безопасности АС на основе материалов ВАБ, поступающих в Ростехнадзор при лицензировании, и рассчитанные на ее основе индикаторы безопасности для оценки тенденции изменения ядерной безопасности на 12 энергоблоках АС России.
- Методы обработки информации из модели ВАБ для планирования и проведения риск-информативных инспекций, основанные на выявлении и ранжировании наиболее значимых с точки зрения безопасности элементов модели ВАБ и на исследовании функционалов безопасности и надежности, а также разработанный на основе этих методов справочник для планирования и проведения риск-информативных инспекций на 5-м энергоблоке Нововоронежской АС.
- Подход по упрощенной оценке значимости нарушений с помощью формализованных моделей ВАБ, основанных на применении значений порядков вероятностей показателей безопасности, и разработанная на основе подхода инструкция, содержащая формализованную модель ВАБ для оценки значимости нарушений на 1-м энергоблоке Калининской АС.

Апробация результатов работы

Основные результаты диссертации опубликованы в российских научных журналах, докладывались и обсуждались на международных конференциях и совещаниях, получили одобрение российских и зарубежных специалистов.

Среди международных конференций и совещаний, на которых представлялись результаты работы:

1. Международная конференция «Безопасность АЭС и подготовка кадров-2009» (Обнинск, 29 сентября 2 октября 2009г.);
2. Совещание по реализации проекта МАГАТЭ RER9095 «Совершенствование технологий по анализу безопасности АЭС» на период 2012-2013гг.(Чехия, Прага, Институт ядерных исследований Ржеж А.О., 3-6 октября 2010г.);
3. Совещание по реализации проекта МАГАТЭ RER9095 «Совершенствование технологий по анализу безопасности АЭС» (Словения, Порторож, Администрация по ядерной безопасности Словении, 26-29 сентября 2011г.);
4. Международная конференция «Безопасность АЭС и подготовка кадров-2011» (Обнинск, 3-4 октября 2011г.);

5. Ежегодный научно-практический семинар с инспекторами МТУ ЯРБ (Москва, ФБУ «НТЦ ЯРБ», ноябрь 2011г.);
6. Ежегодный научно-практический семинар с инспекторами МТУ ЯРБ (Москва, ФБУ «НТЦ ЯРБ», ноябрь 2012г.);
7. Совещание по гармонизации оценок безопасности, синергии вероятностного и детерминистического анализов безопасности в рамках регионального проекта МАГАТЭ RER/9/126 «Совершенствование и гармонизация оценок безопасности, синергия вероятностного и детерминистического анализов безопасности» (Хорватия, Дубровник, 25-31 марта 2012г.);
8. VIII Международная научно-техническая конференция «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики» (МНТК-2012) (Москва, 23-25 мая 2012г.);
9. Семинар по вероятностному анализу безопасности 1 и 2 уровня в рамках регионального проекта МАГАТЭ RER/9/125 «Совершенствование оценок безопасности» (Италия, г. Триест, 30 сентября -13 октября 2012г.);
10. Научно-техническая конференция по ядерной и радиационной безопасности в Европе, Евросейф (Германия, Кёльн, 4-5 ноября 2013г.).

Результаты, полученные в рамках работы, были использованы при разработке, находящихся на утверждении, руководств по безопасности (РБ) «Рекомендации по использованию вероятностного анализа безопасности при оценке нарушений в работе атомных станций» и РБ «Применение ВАБ для задач эксплуатации».

Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в девяти работах, в том числе в четырех статьях в российских рецензируемых научно-технических журналах, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук. Кроме того, на материалы, представленные в диссертации, автором получено два свидетельства о государственной регистрации базы данных.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и 2 приложений. Работа изложена на 199 страницах, в том числе основного текста 123 страницы, включая 7 рисунков, 11 таблиц и список литературы из 95 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность, научная новизна и практическая ценность работы, сформулированы цели и задачи диссертационного исследования, а также представлены положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена обзору современного состояния НИР и практике применения ВАБ в инспекционной деятельности.

В разделе 1.1 представлен обзор мировой практики вероятностной оценки ядерной безопасности АС. Проанализированы целевые ориентиры России, США, а также рекомендации МАГАТЭ.

Представлен анализ следующих целей выполнения ВАБ:

- комплексная качественная и количественная оценка уровня ядерной и радиационной безопасности блока АС;
- оценка обеспечения достаточной надежности важных для безопасности систем;
- разработка рекомендаций по мероприятиям, направленным на обеспечение безопасности;
- установление в соответствии с п.1.2.16 ОПБ-88/97 окончательного перечня запроектных аварий (ЗПА);
- разработка руководств по управлению ЗПА;
- получение данных для разработки планов мероприятий по защите населения в случае радиационных аварий;
- зонирование территории вокруг АС, разработка планов защитных мероприятий.

В разделе 1.2 представлен обзор мировой практики использования ВАБ для планирования и проведения инспекций.

Приведен анализ практики внедрения ВАБ в инспекционную деятельность комиссии по ядерному регулированию (КЯР) США. В результате изучения содержания различных процедур инспекций КЯР США было установлено, что наилучший способ внедрения ВАБ в программу инспекции состоит в оказании содействия при планировании программы инспекции, а не в изменении содержания существующей процедуры инспекции.

Проанализирована практика создания КЯР США справочника по проведению основанного на концепции риска контроля типовых АС, состоящих из реакторов с водой под давлением (PWR).

Из анализа опыта США сделаны выводы, что основные цели применения ВАБ для планирования и проведения инспекций, сформулированные в различных документах, выпущенных Брукхэвенской национальной лабораторией по заказу КЯР США, в основном, одинаковы. Ранжирование систем и элементов по важности для безопасности на основе ВАБ выполняется, главным образом, для того, чтобы оказать содействие в выборе направления, в котором должен работать инспектор после выбора типа инспекции и направлять свои ресурсы на исследование проблем, являющихся наиболее важными для безопасности конкретной АС и исключить или сократить требования в отношении менее важных вопросов. Результаты ранжирования систем и элементов АС на основе ВАБ используются регулирующим органом при принятии решений о выделении ресурсов на поддержание и усиление безопасности энергоблоков АС путем привлечения внимания к системам и элементам систем, отказы которых вносят наибольший вклад в общую частоту повреждения активной зоны. Кроме того, результаты ранжирования систем и элементов АС на основе ВАБ используются при оценке подготовки операторов.

Сделаны выводы, что Ростехнадзор может использовать результаты ранжирования систем и элементов АС на основе ВАБ для планирования инспекционной деятельности, направлять свои ресурсы на исследование проблем, являющихся наиболее важными для безопасности конкретной АС, и исключить или сократить требования в отношении менее важных вопросов.

В разделе 1.3 представлен обзор мировой практики использования ВАБ для оценки значимости результатов инспекций.

Представлен анализ идеологических основ надзорной деятельности в области оценки безопасности АС в США. Проанализирована процедура определения значимости инспекций (Significance Determination Process, или сокращенно SDP), в основе которой и лежит идея создания формализованных моделей ВАБ.

В рассмотренной процедуре анализируются только те факторы безопасности, для которых возможна оценка их влияния на частоту повреждения активной зоны (ЧПЗ) или частоту раннего выброса радиоактивных веществ за пределы защитной оболочки. К ним относятся следующие факторы безопасности:

- иницирующие события;
- системы ограничения последствий;
- целостность барьеров.

В разделе 1.4 представлены выявленные направления возможного успешного применения ВАБ в инспекционной деятельности.

Направление 1

Согласно РД-04-18-99 периодичность целевых инспекций определяется Ростехнадзором на основе анализа деятельности АС и инспекционной деятельности, а периодичность комплексной инспекции должна быть не реже одного раза в пять лет. Следовательно, Ростехнадзор имеет некоторую степень свободы при определении частоты целевых и комплексных инспекций на различных АС. Индикаторы обеспечения ядерной безопасности АС, основанные на анализе представляемых в Ростехнадзор при лицензировании материалов ВАБ, могут свидетельствовать

о том, насколько эксплуатирующая организация стремится к обеспечению безопасности на каждом энергоблоке АС.

Направление 2

Исходя из административного регламента, инспекторы Ростехнадзора при проведении ряда инспекций имеют возможность планирования и выбора объектов инспекции по своему усмотрению. ВАБ при планировании и проведении инспекций позволяет выявить наиболее чувствительные к риску элементы, требующие пристального внимания, что позволяет повысить эффективность решения задач по обеспечению безопасности. Кроме того, информация, полученная из ВАБ, поможет направить человеческие и финансовые ресурсы регулирующего органа на наиболее важные для безопасности направления и исключить или сократить требования и затраты ресурсов в отношении менее важных вопросов.

Направление 3

В п.4.1 приложения 2 НП-004-08 содержится требование об оценке нарушения с помощью ВАБ. Для этих целей разработана методика по применению компьютерной модели ВАБ, однако использовать данную методику могут только специалисты в области ВАБ при наличии специального программного обеспечения и компьютерной модели ВАБ.

Согласно ФЗ-170 "Об использовании атомной энергии" и ФЗ-8 "Об обеспечении доступа к информации о деятельности государственных органов и органов местного самоуправления" Ростехнадзор должен наглядно предоставлять информацию об уровне безопасности АС для населения. При оценке результатов инспекций применение ВАБ позволяет выполнить количественную оценку выявленных нарушений с целью их ранжирования по степени влияния на безопасность при эксплуатации энергоблока АС, а также оценить и наглядно представить тенденцию изменения безопасности АС с учетом выявленных нарушений.

В разделе 1.5 представлена широко известная из литературы информация по оценкам значимости:

- оценка значимости по Фусселлу – Веселы (FV);
- оценка значимости по Бирнбауму (D);
- оценки значимости достижения и снижения риска (RII и RRI);
- оценка значимости элементов модели ВАБ.

Вторая глава посвящена разработке методики расчета на основе ВАБ индикаторов безопасности для оценки тенденции изменения ядерной безопасности АС.

В разделе 2.1 проанализированы следующие определения безопасности из нормативных документов РФ:

- радиационная безопасность населения;
- ионизирующее излучение;
- ядерная и радиационная безопасность АС;
- ядерная безопасность.

Предложена структура понятия «безопасность при использовании атомной энергии» (Рис. 1). Из неё видно, что безопасность при использовании атомной энергии обеспечивается не только ядерной и радиационной безопасностью АС (ЯРБ АС), но и комплексом мер по физической защите ядерных материалов и установок (ЯМ и ЯУ), учёту и контролю ЯМ, названных на рисунке «нераспространение», мероприятиями по аварийному реагированию, а также государственной инфраструктурой органов управления использованием атомной энергии и регулирования безопасности.

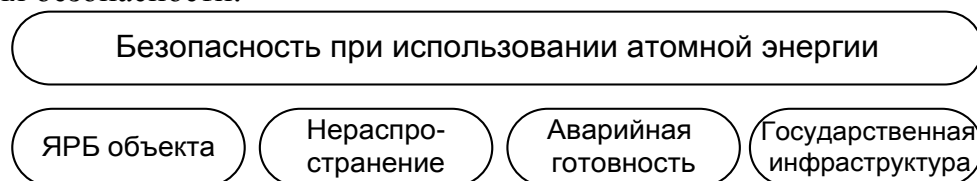


Рис. 1 Структура понятия «безопасность при использовании атомной энергии»

Предложенный Рис. 1 по своей сути очень похож на структуру факторов, влияющих на безопасность АС, принятую в США и представленную во многих нормативных документах США. Однако имеется серьезное отличие: в структуре факторов, влияющих на безопасность АС, в США совершенно не учтено то, что на Рис. 1 понимается под государственной инфраструктурой.

В разделе 2.2 представлен анализ возможных индикаторов для оценки тенденции изменения ядерной безопасности АС.

Все три типа ВАБ анализируют последствия ядерной аварии, которая может произойти в результате конкретного набора исходных событий с различной глубиной аварийного воздействия. Хотя величина оценки ядерной и радиационной безопасности для разных состояний и режимов эксплуатации АС будет различна, методика оценки состоит из общих этапов, которые, в конечном счете, можно довести до уровня ВАБ-2. А если имеются результаты ВАБ-2, сделанного в два момента времени, например, при выдаче двух последовательных лицензий на эксплуатацию, то в качестве индикатора безопасности целесообразно, используя выражение (2.1), рассмотреть изменение вероятности предельного аварийного выброса от энергоблока АС, оцененное за период действия лицензии на эксплуатацию АС или иной временной промежутки, $\Delta\tau$:

$$\Delta_n = \frac{P_{i-1} - P_i}{10^{-7} \cdot \Delta\tau}, \quad (2.1)$$

где P_i, P_{i-1} – значения вероятностей предельного аварийного выброса, рассчитанных в разные моменты времени, а 10^{-7} – целевой ориентир, установленный в ОПБ-88/97.

К сожалению, в настоящее время ВАБ-2 выполнен не для всех энергоблоков. Поэтому пока в качестве первого приближения вполне можно использовать результаты ВАБ-1, которые имеются практически для всех энергоблоков. При этом объем выполненных исследований ВАБ-1 для основной части энергоблоков АС, эксплуатируемых в России, по большей части ограничивается рассмотрением только внутренних иницирующих событий при работе энергоблоков на номинальном уровне мощности. Тогда вместо (2.1) для оценки ядерной безопасности можно использовать выражение:

$$\Delta_n = \frac{P_{i-1} - P_i}{10^{-5} \cdot \Delta\tau}, \quad (2.2)$$

В разделе 2.3 приведена поэтапная методика расчета и предоставления информации об индикаторах для оценки тенденции изменения ядерной безопасности АС, которая может быть полезна специалистам Ростехнадзора при определении частоты целевых и комплексных инспекциях на различных АС.

Третья глава посвящена методике применения ВАБ для планирования и проведения инспекций.

В разделе 3.1 представлены цели и область применения разработанной методики.

Разработанная методика позволяет создавать справочники для планирования и проведения риск-информативных инспекций. В основе справочников лежат результаты ранжирования систем, элементов АС, а также возможных ошибок персонала на основе ВАБ. Результаты ранжирования систем и элементов АС на основе информации из ВАБ могут быть также использованы в различных сферах эксплуатации АС для обеспечения её безопасности при:

- оптимизации программы планово-предупредительного технического обслуживания;
- планировании модернизаций;
- подготовке персонала АС.

В разделе 3.2 приведены теоретические основы, использованные в методике применения ВАБ для планирования и проведения инспекций.

Для оценки значимости элементов модели ВАБ используется показатель инспекционной значимости элементов модели ВАБ – “ИЗН”. Показатель инспекционной значимости “ИЗН” рассчитывается по вкладу элементов модели ВАБ в ЧПЗ или в частоту аварийной последовательности.

Вклад аварийной последовательности в ЧПЗ равен логическому произведению частоты инициирующего события этой последовательности и логической суммы вероятностей минимальных сечений этой последовательности. Поэтому инспекционную значимость аварийных последовательностей рационально определять по их вкладу в ЧПЗ. Ранжирование аварийных последовательностей (АП) по их вкладу в ЧПЗ является прямым процессом оценки частот аварийных последовательностей и их последующего упорядочивания по убыванию/возрастанию:

$$ИЗН_{АП} = F_{АП}, \quad (3.1)$$

где $F_{АП}$ - частота повреждения активной зоны, рассчитанная для одной аварийной последовательности (частота аварийной последовательности).

Инспекционная значимость базисных событий может быть определена в пределах всей модели ВАБ на уровне ЧПЗ или на уровне аварийных последовательностей. Определим инспекционную значимость базисного события по его вкладу в ЧПЗ. Инспекционная значимость базисного события на уровне ЧПЗ - это суммарный вклад в ЧПЗ всех минимальных сечений, в которых появляется базисное событие с номером n - “БС(n)”:

$$ИЗН_{БС(n)} = ЧПЗ - ЧПЗ /_{B_{БС(n)}=0}, \quad (3.2)$$

где: $ЧПЗ$ - частота повреждения активной зоны, рассчитанная в рамках модели ВАБ, $ЧПЗ /_{B_{БС(n)}=0}$ - частота повреждения активной зоны, рассчитанная при условии, что вероятность базисного события равна нулю.

Инспекционная значимость конкретной системы представляет собой вклад в ЧПЗ группы минимальных сечений, включающих все базисные события, принадлежащие к этой системе:

$$ИЗН_C = ЧПЗ - ЧПЗ /_{B_{\forall БС \in C}=0}, \quad (3.3)$$

где $B_{\forall БС \in C}$ - вероятность любого базисного события, принадлежащего системе “С”.

Инспекционная значимость системы определяется суммой вкладов минимальных сечений, содержащих одно или более базисных событий, привязанных к данной системе. Инспекционная значимость систем требует привязки различных базисных событий к конкретным системам.

Инспекционная значимость показывает абсолютное изменение ЧПЗ в зависимости от изменения параметров надёжности элементов модели ВАБ. Также для элементов модели ВАБ целесообразно рассчитать относительные значения показателей инспекционной значимости, которые позволяют оценить инспекционную значимость исследуемых элементов модели ВАБ по отношению к верхней границе минимальных сечений. Полученные таким образом относительные показатели инспекционной значимости удобно использовать при ранжировании по выбранному вероятностному показателю для системы, аварийной последовательности или ЧПЗ.

Относительная инспекционная значимость базисного события с номером “l” в пределах модели ВАБ (на уровне ЧПЗ) может быть представлена следующим образом:

$$ИЗН_{БС(l)}^0 = ИЗН_{БС(l)} / ЧПЗ, \quad (3.4)$$

где $ИЗН_{БС(l)}$ - инспекционная значимость базисного события с номером “l”.

Относительная инспекционная значимость системы “С” в пределах модели ВАБ может быть представлена следующим образом:

$$ИЗН_C^0 = ИЗН_C / ЧПЗ, \quad (3.5)$$

где $ИЗН_C$ - инспекционная значимость системы “С”.

Относительная инспекционная значимость аварийной последовательности в пределах модели ВАБ будет определяться по формуле:

$$ИЗН_{АП}^o = ИЗН_{АП} / ЧПЗ = F_{АП} / ЧПЗ, \quad (3.6)$$

где $ИЗН_{АП}$ - инспекционная значимость аварийной последовательности.

Определённая таким образом относительная инспекционная значимость совпадает с оценкой значимости по Фусселлу - Веселы.

В разделе 3.3 представлена методика разработки справочников для планирования и проведения риск-информативных инспекций. В представленной методике содержатся указания по применению формул (3.1-3.6) для расчета всех необходимых данных наполнения справочников для планирования и проведения риск-информативных инспекций энергоблоков АС.

В разделе 3.4 содержится ссылка на приложение к диссертационной работе, содержащее разработанный справочник для планирования и проведения риск-информативных инспекций на энергоблоке № 5 НВАЭС. Представленный справочник разработан на основе ВАБ первого уровня для внутренних исходных событий энергоблока № 5 НВАЭС. Используемая модель ВАБ энергоблока № 5 НВАЭС была разработана специалистами отдела анализов риска ФБУ «НТЦ ЯРБ» в рамках проекта Swisrus.

В разделе 3.5 представлен подход, позволяющий с помощью математических моделей определять оптимальные периоды инспекций на основе ВАБ.

Для определения оптимальных периодов инспекций отдельных систем на основе ВАБ была выбрана стратегия, в которой предполагается, что полное восстановление системы проводится либо в момент отказа, либо в заранее назначенный календарный момент времени. То есть можно говорить о полной исправности и готовности системы после восстановительных работ, проведенных под надзором инспектора либо после запланированной инспекции данной системы.

Задача определения оптимального периода инспекции τ_0 , для которого коэффициент готовности системы оказывается максимальным, была сведена к исследованию на экстремум функции

$$\frac{T_{nm}}{\bar{T}_{an} - T_{nm}} = -F(\tau) + \lambda(\tau) \int_0^{\tau} \bar{F}(x) dx, \quad (3.7)$$

где:

T_{nm} - средняя длительность инспекции системы;

\bar{T}_{an} - средняя длительность внепланового аварийно-профилактического ремонта;

$F(t)$ - функция распределения времени безотказной работы системы или $\bar{F}(t) = 1 - F(t)$;

$\lambda(t) = F'(t) / \bar{F}(t)$ - опасность отказов системы.

В качестве примера был рассчитан оптимальный период инспекции системы подпитки-продувки (СПП) на 5-ом энергоблоке Нововоронежской АЭС. Было получено $\varphi(\tau) = 0,108$, где

через $\varphi(\tau)$ обозначена правая часть формулы (3.7) при $T_{nm} = 7$ час, $\bar{T}_{an} = 72$ час,

$\lambda(t) = 0,00004t$, $\bar{F}(\tau) = e^{-0,00002t^2}$, где t в часах.

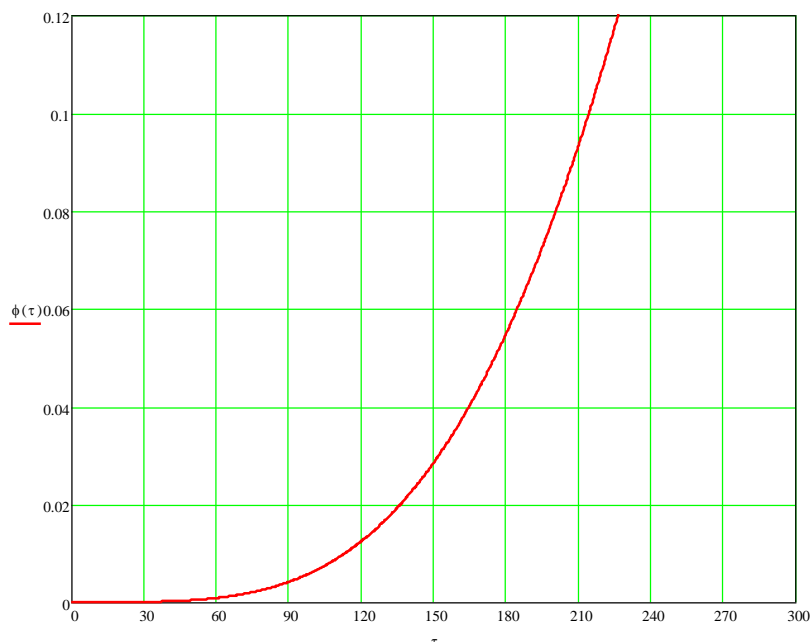


Рис. 2 Определение оптимального периода инспекции системы подпитки-продувки

Исходя из построенного графика (Рис. 2), получаем оптимальный период инспекции системы подпитки-продувки приблизительно 10 суток.

Четвертая глава посвящена методике разработки и использования формализованной модели ВАБ для оценки значимости нарушений.

В разделе 4.1 представлены цели и область применения разработанной методики.

Оценка значимости нарушений с помощью ВАБ направлена на достижение следующих целей:

- выполнение количественной оценки значимости нарушений с целью их ранжирования по степени влияния на безопасность эксплуатации энергоблока АС;
- предоставление информации для инспекторов с целью планирования в случае необходимости дополнительных инспекций;
- предоставление информации населению об уровне безопасности АС.

В 2008 году в ФБУ «НТЦ ЯРБ» была разработана методика вероятностной оценки значимости нарушений на АС с использованием компьютерных моделей ВАБ. Указанная методика предназначена для использования специалистами в области ВАБ и не может быть использована специалистами АС и Ростехнадзора, не обладающими специальными знаниями и навыками работы с компьютерной моделью ВАБ.

Приводимая в диссертационной работе методика позволяет трансформировать компьютерную модель ВАБ в инструкции, содержащие формализованную модель ВАБ для оценки значимости нарушений. С помощью подобных инструкций специалисты, не обладающие навыками работы с моделями ВАБ, смогут упрощенно оценивать значимость каждого конкретного нарушения в терминах вероятностных показателей безопасности энергоблоков АС.

В разделе 4.2 приведены теоретические основы, использованные в методике разработки и использования формализованной модели ВАБ для оценки значимости нарушений.

Для оценки значимости нарушения с помощью формализованной модели ВАБ применяется не величина вероятности, а порядок её величины. Данная величина получила название «Порядок вероятности показателя безопасности (ПВПБ)». Если вероятность реализации аварийной последовательности (АП) оценивается $1 \cdot 10^{-9}$, то это означает, что ПВПБ АП в терминах порядков вероятностей равна 9.

Основная информация из компьютерной модели ВАБ представляется в виде набора «рабочих» таблиц. Для каждого ИС, моделируемого в ВАБ, разрабатывается своя «рабочая» таблица, в которую вносятся все АП, приводящие к повреждению топлива в активной зоне реактора при данном ИС. При расчете значимости нарушения производится оценка вклада всех АП, обусловленных нарушением, в ЧПЗ.

Выражение для описания вклада в ЧПЗ от АП в величинах ПВПБ выглядит следующим образом:

$$SC_{CD} = SC_{IE} + SC_{MIT} + SC_{REC}, \quad (4.1)$$

где:

$SC_{CD} \approx -Lg(f_{CD})$ - значение ПВПБ для вклада аварийной последовательности в ЧПЗ;

$SC_{IE} \approx -Lg(f_{IE})$ - значение ПВПБ частоты исходного события;

$SC_{MIT} \approx -Lg(P_{MIT})$ - значение ПВПБ для вероятности отказа систем, выполняющих функции безопасности;

$SC_{REC} \approx -Lg(P_{REC})$ - значение ПВПБ для вероятности невыполнения оператором восстанавливающих действий (если применяются).

Для оценки значимости нарушения производится суммирование вклада в ЧПЗ от всех АП, обусловленных нарушением.

Суммирование выполняется в величинах ПВПБ по специально разработанному алгоритму, в котором используются следующие приближения:

Разность вкладов от двух АП с ПВПБ m и $(m-1)$ будет равняться $(m-1)$, чему соответствует следующая математическая интерпретация:

$$10^{-(m-1)} - 10^{-m} \approx 10^{-(m-1)}, \quad (4.2)$$

Сумма вкладов от трех АП одного порядка с ПВПБ m , приравнивается к вкладу одной АП со значением ПВПБ $(m-1)$, чему соответствует следующая математическая интерпретация:

$$10^{-m} + 10^{-m} + 10^{-m} \approx 10^{-(m-1)}, \quad (4.3)$$

Для удобства определения вероятности повреждения активной зоны за время существования нарушения определены три временных периода:

- $\Delta T < 3$ дней;
- $\Delta T = 3 - 30$ дней;
- $\Delta T > 30$ дней.

Изменение частоты ИС в каждом временном интервале оценивается количеством баллов, которые рассчитываются на основании пересчитанных вероятностей возникновения ИС по формуле:

$$\text{ПВПБ (ИС)} = -\lg(\text{Частота ИС} \cdot \Delta T), \quad (4.4)$$

где:

ПВПБ (ИС) – порядок вероятности показателя безопасности конкретного ИС с учетом существования нарушения;

Частота ИС – частота конкретного ИС;

ΔT – время существования нарушения.

Наиболее значимому для риска АС инициирующему событию соответствует наименьшее значение показателя запаса безопасности энергоблока АС. Ему присваивается наименьшее количество баллов.

В разделе 4.3 представлена методика разработки и использования формализованной модели ВАБ для оценки значимости нарушений. С помощью подходов, изложенных в данной методике и компьютерных моделей ВАБ специалисты в области ВАБ смогут разрабатывать инструкции, содержащие формализованную модель ВАБ для оценки значимости нарушений. Инструкции, содержащие формализованную модель ВАБ для оценки значимости нарушений состоят из формализованной модели ВАБ и пошагового алгоритма по её использованию.

Формализованная модель ВАБ разрабатывается для каждого энергоблока АС, на основе разработанной для этого энергоблока компьютерной модели ВАБ-1.

Используемые материалы, в том числе и модель ВАБ, должны соответствовать требованиям и рекомендациям российских нормативных документов, методических документов, а также рекомендациям международных документов.

Формализованная модель ВАБ состоит из следующих таблиц:

- категории инициирующих событий;
- зависимости ИС, СВБ, компонентов СВБ и обеспечивающих систем;
- рабочие таблицы для определения значимости нарушений;
- функции безопасности.

В разделе 4.4 содержится инструкция, содержащая формализованную модель ВАБ для оценки значимости нарушений на энергоблоке №1 Калининской АС.

Представленная инструкция разработана на основе ВАБ первого уровня для внутренних исходных событий энергоблока №1 Калининской АС.

На первом шаге инструкции с помощью опросного листа проводится проверка возможности оценки значимости нарушения с помощью ВАБ.

Далее выполняются следующие шаги:

- анализ влияния нарушения на готовность систем;
- анализ влияния нарушения на готовность СВБ;
- анализ влияния нарушения на изменение частоты ИС;
- заполнение рабочих таблиц.

Перечисленные шаги содержат алгоритм по использованию формализованной модели ВАБ, информация о разработке которой представлена в разделе 4.3.

На последнем шаге с помощью Табл. 1 производится оценки изменения уровня безопасности АС, обусловленного нарушением.

Табл. 1 Таблица оценки значимости нарушений

№ шага	Инструкция	Промежуточный результат
1.	Количество АП со значимостью для риска в «9» баллов	
2.	Результат деления Шага 1 на 3	
3.	Количество АП со значимостью для риска в «8» баллов	
4.	Результат сложения Шага 3 и Шага 2	
5.	Результат деления и округления в меньшую сторону Шага 4 на 3	
6.	Количество АП со значимостью для риска в «7» баллов	
7.	Результат сложения Шага 6 и Шага 5	
8.	Результат деления и округления в меньшую сторону Шага 7 на 3	
9.	Количество АП со значимостью для риска в «6» баллов	
10.	Результат сложения Шага 9 и Шага 8	
11.	Результат деления и округления в меньшую сторону Шага 10 на 3	
12.	Количество АП со значимостью для риска в «5» баллов	
13.	Результат сложения Шага 12 и Шага 11	
14.	Результат деления и округления в меньшую сторону Шага 13 на 3	
15.	Количество АП со значимостью для риска в «4» балла	
16.	Результат сложения Шага 15 и Шага 14	

1. Если результат Шага 16 «1», то для нарушения ΔЧПЗ оценивается значением $1 \cdot 10^{-4}$.
2. Если результат Шага 16 «2», то для нарушения ΔЧПЗ оценивается значением $5 \cdot 10^{-4}$.
3. Если результат Шага 13 «1», то для нарушения ΔЧПЗ оценивается значением $1 \cdot 10^{-5}$.

4. Если результат Шага 13 «2», то для нарушения $\Delta\text{ЧПЗ}$ оценивается значением $5 \cdot 10^{-5}$.
5. Если результат Шага 10 «1», то для нарушения $\Delta\text{ЧПЗ}$ оценивается значением $1 \cdot 10^{-6}$.
6. Если результат Шага 10 «2», то для нарушения $\Delta\text{ЧПЗ}$ оценивается значением $5 \cdot 10^{-6}$.
7. Если результат Шага 7 «1», то для нарушения $\Delta\text{ЧПЗ}$ оценивается значением $1 \cdot 10^{-7}$.
8. Если результат Шага 7 «2», то для нарушения $\Delta\text{ЧПЗ}$ оценивается значением $5 \cdot 10^{-7}$.

Если результаты Шагов 7, 10, 13 и 16 равны 0, то для нарушения $\Delta\text{ЧПЗ}$ оценивается значением меньше, чем $1 \cdot 10^{-8}$.

Пятая глава посвящена апробации представленных в работе методик.

В разделе 5.1 изложены результаты апробации методики расчета на основе ВАБ индикаторов безопасности для оценки тенденции изменения ядерной безопасности АС.

Для апробации методики были проанализированы результаты ВАБ для 12 российских энергоблоков АС. Такое количество рассмотренных энергоблоков АС обусловлено тем, что только 12 энергоблоков АС проходили в ФБУ «НТЦ ЯРБ» экспертизу материалов ВАБ два раза и оба раза получали положительное заключение о результатах ВАБ.

Полученные данные следует применять весьма аккуратно, так как изменение значений ЧПЗ, а, следовательно, и индикатора по формуле 2.2, может быть обусловлено следующими причинами:

- учет в модели ВАБ выполненных модернизаций (конструктивных, организационных и других изменений, направленных на обеспечение ядерной и радиационной безопасности энергоблока АС);
- исправление допущенных при выполнении ВАБ недостатков;
- учет новых исходных событий (ИС) (внутренние пожары и затопления, внешние события) и иных эксплуатационных состояний (стояночные режимы, эксплуатация на пониженной мощности).

Для оценки ядерной безопасности АС, прежде всего, является важным изменение ЧПЗ, обусловленное первой причиной.

Для рассмотренных энергоблоков АС минимальный срок между разрабатываемыми ВАБ равен трем годам, и за этот срок в модель ВАБ вносились существенные изменения.

Вместе с тем значения ЧПЗ для более поздних версий ВАБ, несомненно, возрастали из-за исправления недостатков, допущенных при выполнении первоначальных версий ВАБ. За последние десять лет качество выполнения ВАБ для российских энергоблоков АС существенно повысилось, и можно надеяться, что в будущем вклад данной причины в изменение ЧПЗ будет незначительным, так как уже сейчас большинство замечаний, выявленных при экспертизах ВАБ, учтено и существенно на ЧПЗ не влияет.

Вклад в ЧПЗ от учета новых ИС, а также иных эксплуатационных состояний для рассмотренных результатов ВАБ пока ещё не актуален, так как все результаты представлены исключительно для внутренних ИС при работе блока на мощности. Однако для оценки ядерной безопасности АС впоследствии, безусловно, необходимо выполнение полномасштабных ВАБ-1 и ВАБ-2 для всех типов событий и для всех режимов работы энергоблоков.

Для трех проанализированных энергоблоков АС значения Δn оказались отрицательны, что, возможно, свидетельствует не о снижении безопасности АС, а о повышении качества ВАБ и об устранении замечаний экспертов.

Для остальных проанализированных энергоблоков АС, несмотря на устранение замечаний, приводящих к росту ЧПЗ, значение Δn имеет положительную величину, что свидетельствует об обеспеченности безопасности АС.

В разделе 5.2 изложены результаты апробации методики применения ВАБ для планирования и проведения инспекций.

Для апробации методики совместно со специалистами Ростехнадзора был проведен анализ возможных направлений использования справочника для планирования и проведения риск-информативных инспекций на энергоблоке № 5 НВАЭС в повседневной деятельности инспекторов, которая регламентируется действующими нормативно правовыми актами и разработанными на их основе программами инспекций. По результатам анализа было сформулированы следующие рекомендации по возможным вариантам применения разрабатываемых на основе методики справочников для планирования и проведения риск-информативных инспекций:

- рекомендации с точки зрения подхода к анализу аварийной последовательности;
- рекомендации с точки зрения подхода к анализу систем или элементов систем;
- рекомендации для инспекции готовности блока к пуску;
- рекомендации для инспекции ремонтных работ;
- рекомендации для инспекции ремонтных работ;
- рекомендации для периодических инспекций;
- рекомендации для инспекции технического обслуживания.

Сформулированные подходы и рекомендации должны быть впоследствии включены во все разрабатываемые справочники.

В разделе 5.3 изложены результаты апробация методики разработки и использованию формализованной модели ВАБ для оценки значимости нарушений.

Для апробации методики была использована инструкция, содержащая формализованную модель ВАБ для оценки значимости нарушений на энергоблоке №1 Калининской АС

С помощью разработанной инструкции была произведена оценка девяти наиболее представительных нарушений, произошедших на Калининской АС за период с 1991 по 2005 гг.

Результаты оценки значимости нарушений с помощью инструкций были соотнесены с результатами оценки значимости нарушений, полученными по методике, позволяющей провести точные расчеты с использованием оригинальной компьютерной модели ВАБ.

На Рис. 3 представлены графики, полученные по результатам оценки значимости нарушений с помощью компьютерной модели ВАБ и с помощью инструкций, содержащих формализованную модель ВАБ. Графики показывают величину приращения (увеличения) ЧПЗ, обусловленную анализируемым нарушением относительного базового значения ЧПЗ. Оценки значимости нарушений, полученные с помощью инструкций, отличаются от оценок, полученных с помощью компьютерной модели ВАБ в среднем на один порядок в сторону увеличения значимости, то есть инструкции дают более консервативный результат. При этом для всех рассмотренных событий общая картина оценок значимости нарушений сохраняется.

Полученные различия в результатах оценок можно объяснить тем, что инструкции разрабатываются для выполнения упрощенной оценки нарушений. Это означает, что расчеты значимости нарушений проводятся в терминах порядков вероятностей, то есть с точностью до порядка. Также инструкции не позволяют учитывать все сложные комбинации событий, которые могут происходить в ходе нарушения, и возможные временные зависимости между событиями и не позволяют переоценивать вероятности отказа по общей причине для однотипного оборудования, выполняющего функции резервирования.

Но, несмотря на сказанное выше, можно констатировать, что инструкции, содержащие формализованную модель ВАБ, могут быть успешно использованы при оценки нарушений при отсутствии оперативной возможности использования оригинальной компьютерной модели ВАБ.

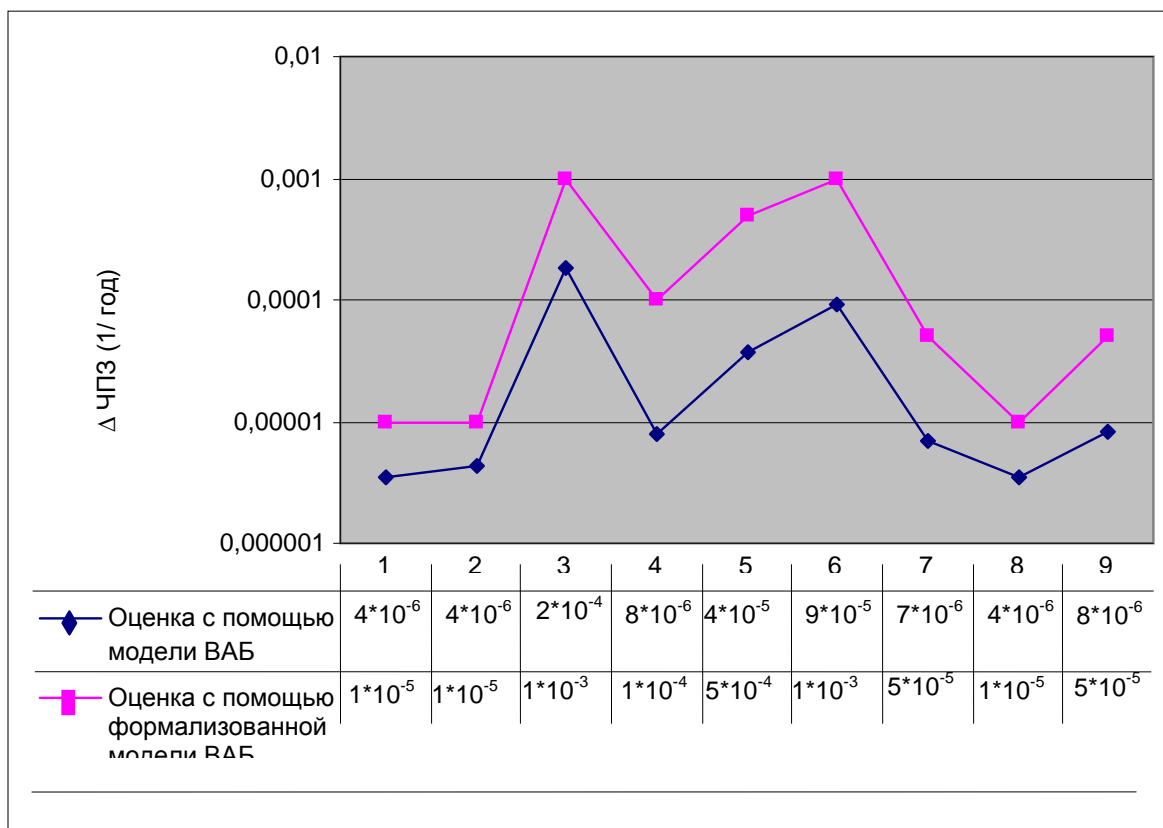


Рис. 3 Сопоставление результатов оценки нарушений с помощью компьютерной модели ВАБ и с помощью инструкций, содержащей формализованную модель ВАБ

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В процессе работы был разработан системный подход по применению ВАБ в инспекционной деятельности, в основе которого лежат следующие результаты:

1. Сформулирована проблема необходимости разработки методов применения ВАБ регулирующим органом в России, в том числе и в инспекционной деятельности. Выявлены основные возможные направления применения ВАБ в инспекционной деятельности. Проведен анализ существующих источников информации по данной проблеме.
2. Предложена система индикаторов безопасности для оценки тенденции изменения ядерной безопасности АС на основе результатов ВАБ, которая дает возможность оценить тенденции изменения ядерной безопасности АС на основе поступающих в Ростехнадзор при лицензировании материалов ВАБ. По разработанному методу рассчитаны индикаторы безопасности для 12 энергоблоков АС России.
3. Разработан метод обработки и предоставления информации на основе ВАБ для планирования и проведения инспекций, который заключается в выявлении наиболее значимых с точки зрения безопасности систем (элементов систем), базисных событий, аварийных последовательностей и их ранжирование для планирования и проведения риск-информативных инспекций АС. Метод позволил разработать справочник для планирования и проведения риск-информативных инспекций на 5-м энергоблоке Нововоронежской АС.
4. Предложен метод определения оптимальных периодов инспекций, основанный на исследовании функционалов безопасности и надежности, использующий информацию о реальной эксплуатации объектов.

5. Сформулирован подход по упрощенной оценке значимости нарушений для специалистов без специфических знаний в области ВАБ. В основе подхода лежат разработка и применение формализованных моделей ВАБ, которые используют не величину вероятности, а порядок её величины. На основе сформулированного подхода разработана методика, которая позволила создать инструкцию, содержащую формализованную модель ВАБ для оценки значимости нарушений на 1-м энергоблоке Калининской АС.
6. Результаты, полученные в рамках работы, были использованы при разработке РБ «Рекомендации по использованию вероятностного анализа безопасности при оценке нарушений в работе атомных станций» и РБ «Применение ВАБ для задач эксплуатации».

Основные публикации по теме диссертации

В российских рецензируемых научно-технических журналах, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук:

1. Хижняк С.А. Определения и индикаторы безопасности атомных станций / С.А. Хижняк, Б.Г. Гордон // Проблемы анализа риска. –2013. –том 10. –№4. –С.58-66.
2. Хижняк С.А. Применение вероятностного анализа безопасности для планирования инспекций / С.А. Хижняк, А.В. Антонов, В.А. Бредова // Ядерная и радиационная безопасность. –2011. –№62. –С.35-41.
3. Хижняк С.А. Применение формализованной модели ВАБ для оценки выявленных на АС нарушений / С.А. Хижняк, В.А. Бредова // Ядерная и радиационная безопасность. –2013. –№70. –С.53-59.
4. Мирошниченко М.И. О заявлении о политике по применению вероятностного анализа безопасности и риск-информативных методов для атомных станций / М.И. Мирошниченко, В.А. Манаков, С.А. Хижняк // Проблемы анализа риска. –2012. –том 9. –№4. –С.86-90.

В других изданиях:

5. Хижняк С.А. Применение вероятностного анализа безопасности для планирования инспекций / С.А. Хижняк // Тезисы докладов XI Международной конференции «Безопасность АЭС и подготовка кадров – 2009», том №1, г. Обнинск, 2009. –С.112-113.
6. Хижняк С.А. Использование процедурных таблиц разработанных на основе ВАБ для определения значимости нарушений, выявленных при проведении инспекций на АЭС / С.А. Хижняк // Тезисы докладов XII Международной конференции «Безопасность АЭС и подготовка кадров-2011», Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ, 2011. –С.201-202.
7. Хижняк С.А. Применение формализованной модели ВАБ для оценки выявленных на АС нарушений / С.А. Хижняк // Научная сессия НИЯУ МИФИ-2013, 2013. –С.239.
8. Справочник для планирования и проведения риск-информативных инспекций: свидетельство о государственной регистрации базы данных №2013621447 Российская Федерация; правообладатель и автор Хижняк С.А.; заявка №2013621204; заявл. 25.09.13; зарег.20.11.13г.
9. Формализованная модель вероятностного анализа безопасности: свидетельство о государственной регистрации базы данных №2013620511 Российская Федерация; правообладатель и автор Хижняк С.А.; заявка №2013620193; заявл. 19.02.13; зарег. 15.04.13г.