

На правах рукописи



СЫРОВ

Александр Александрович

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПЕРЕГРУЗКИ ЯДЕРНОГО
ТОПЛИВА ЗА СЧЕТ ПОВЫШЕНИЯ ЗАЩИЩЕННОСТИ
ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

Специальность 05.26.02 – Безопасность в чрезвычайных
ситуациях (энергетика)

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2011

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет" на кафедре "Управление и защита в чрезвычайных ситуациях"

Научный руководитель

– доктор техн. наук, профессор

Гуменюк Василий Иванович

Официальные оппоненты:

– доктор техн. наук, профессор

Федорович Евгений Данилович

– доктор техн. наук, ст.науч.сотр.

Симановский Юрий Михайлович

Ведущая организация – филиал ОАО «Концерн Росэнергоатом» «Ленинградская атомная станция», г. Сосновый Бор.

Защита диссертации состоится 21 июня 2011 г. в 18-00 на заседании диссертационного совета Д 212.229.04 в ГОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет" по адресу:

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29,
в аудитории 411 ПГК

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет"

Автореферат разослан "20" мая 2011 г.

Отзыв на автореферат, заверенный печатью учреждения, в двух экземплярах просим направить по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Факс: (812)-552-6552

E-mail: kg1210@mail.ru

Ученый секретарь
диссертационного совета



К.А. Григорьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. По мере роста установленных мощностей АЭС все более актуальными становятся вопросы дальнейшего повышения их технико-экономических показателей, надежности функционирования, безопасности эксплуатации для населения и окружающей среды. Одним из направлений решения этих задач является сокращение времени планово-предупредительных ремонтов, модернизация действующего оборудования, комплексная автоматизация управления основными технологическими процессами АЭС, оптимизация топливного цикла, как в целом, так и в той части, которую топливо проходит в пределах АЭС. Последнее имеет особо большое значение для водо-водяных энергетических реакторов (ВВЭР), у которых замена топлива связана с длительной остановкой и их частичной разборкой. Минимизация длительности перегрузки топлива может привести к сокращению времени простоя реактора. Это становится весьма реальным в связи с проведением мероприятий по снижению времени профилактического ремонта оборудования. При этом следует иметь в виду, что перегрузка ядерного топлива (ЯТ) является одним из ответственных этапов эксплуатации АЭС в части соблюдения правил ядерной безопасности, так как, во-первых, в процессе перегрузки выполняются операции по изменению геометрии активной зоны и, во-вторых, ликвидируются два барьера безопасности – разгерметизируется первый контур и открывается гермозона. Нарушения при перегрузке могут инициировать возникновение чрезвычайной ситуации (ЧС) на АЭС.

Исходя из этого, в настоящее время ОАО «Концерн Росэнергоатом» проводит модернизацию транспортно-технологического оборудования перегрузки ЯТ, основной целью которой является сокращение времени перегрузки ЯТ при условии выполнения требований по безопасности.

Сокращение времени перегрузки ЯТ достигается путем увеличения скоростей перемещения механизмов перегрузочного оборудования, совмещением их движения и, как следствие, переходом на автоматизированные режимы работы. При этом существенно возрастают требования к системе управления перегрузочным оборудованием в части обеспечения безопасности, т.к. персонал, в силу своих психофизических особенностей, не всегда способен отслеживать быстрые изменения состояния транспортно-технологического оборудования и своевременно принимать решения о возможности продолжения перегрузки.

Таким образом, для сокращения времени перегрузки ЯТ при условии выполнения требований по безопасности необходимы усовершенствования системы управления перегрузочным оборудованием, направленные на обеспечения безопасности перегрузки ЯТ.

Известно, что безопасность объекта это совокупность условий и факторов, обеспечивающих состояние защищенности объекта от угроз различного характера. Безопасность можно обеспечить путем устранения источника опасности или повышением защищенности от опасности. При этом под защищенностью

понимается способность объекта противостоять поражающим (негативным) факторам (воздействиям) используя средства и способы защиты.

Следовательно, одним из направлений совершенствования перегрузочного оборудования в части обеспечения безопасности перегрузки ЯТ является повышение защищенности транспортно-технологического оборудования от негативных внешних и внутренних факторов.

Однако, в настоящее время отсутствует эффективный научно-методический аппарат, который позволил бы сформировать рекомендации по повышению защищенности транспортно-технологического оборудования.

Таким образом, тема диссертационной работы, посвященная обеспечению безопасности перегрузки ЯТ за счет повышения защищенности транспортно-технологического оборудования, является актуальной, так как реализация полученных результатов позволит сократить время перегрузки ЯТ при условии выполнения требований по безопасности и снизить риски ЧС.

Целью работы является обеспечение безопасности перегрузки ЯТ за счет повышения защищенности транспортно-технологического оборудования перегрузки ЯТ, что позволяет улучшить экономические показатели перегрузочной машины и снизить риски ЧС на энергоблоках в целом.

Научная задача работы. На основе теории надежности технических систем разработать научно-методический аппарат повышения защищенности транспортно-технологического оборудования перегрузки ЯТ.

Объект исследования. Транспортно-технологическое оборудование перегрузки ядерного топлива на АЭС с реакторными установками типа ВВЭР.

Предмет исследования. Закономерности, раскрывающие зависимость защищенности транспортно-технологического оборудования перегрузки ЯТ от структуры перегрузочного оборудования, состава защит и блокировок, надежности оборудования и персонала.

Метод исследования. Методы теории систем, теории надежности технических систем, математической статистики.

Научная новизна.

1. Впервые проведена классификация возможных видов повреждения тепловыделяющих сборок (ТВС) в процессе перегрузки на АЭС и проведен анализ их возможных последствий.

2. Впервые сформулировано понятие защищенности транспортно-технологического оборудования перегрузки ЯТ и разработаны теоретические основы анализа защищенности МП от внешних и внутренних факторов.

2. На основе теоретических и экспериментальных исследований разработана и апробирована методика обеспечения безопасности перегрузки ЯТ за счет повышения защищенности транспортно-технологического оборудования, учитывающая структурное и функциональное многообразие перегрузочного оборудования и особенность перегрузки ЯТ, связанную с изменением в процессе перегрузки причин и условий повреждения ЯТ.

3. Разработана структура и алгоритм работы системы мониторинга безопасности перегрузки ЯТ, целью которой является обеспечение безопасности пе-

регрузки ЯТ путем формирования современной постоянно-действующей системы сбора и анализа информации по результатам эксплуатации перегрузочного оборудования.

Практическая ценность работы заключается в том, что полученные результаты могут использоваться как инструмент, позволяющий разрабатывать и обосновывать технические решения по обеспечению безопасности перегрузки ЯТ при проектировании и эксплуатации транспортно-технологического оборудования на АЭС и предприятиях, связанных с переработкой ЯТ.

Реализация результатов работы. Результаты диссертационной работы были использованы при проектировании оборудования перегрузки ЯТ на 4 энергоблоке Калининской АЭС и модернизации перегрузочного оборудования на 5 энергоблоке Нововоронежской АЭС.

Результаты работы были внедрены при выполнении НИР «Научные основы прогнозирования опасностей, снижения риска и уменьшения последствий природных и техногенных катастроф» и при разработке магистерских программ на кафедре «Управление и защита в чрезвычайных ситуациях» Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

По результатам диссертационных исследований был проведен патентный поиск и подана заявка на изобретение «Устройство для мониторинга и способа мониторинга риска для использования с объектом атомной энергетики» (номер заявки 2010139828).

Достоверность полученных результатов обусловлена использованием известного и апробированного математического аппарата и опытом эксплуатации систем на основе предлагаемых решений по обеспечению безопасности.

На защиту выносятся:

1. Методика обеспечения безопасности перегрузки ЯТ за счет повышения защищенности транспортно-технологического оборудования;
2. Структура и алгоритм работы системы мониторинга безопасности перегрузки ЯТ.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы докладывались на I Всероссийской научно-практической конференции «Безопасность в чрезвычайных ситуациях» (Санкт-Петербург, 2009), на 13-ой Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы «Фундаментальные исследования и инновации в технических университетах» (Санкт-Петербург, 2009), II Всероссийской научно-практической конференции «Безопасность в чрезвычайных ситуациях» (Санкт-Петербург, 2010), на XIV Всероссийской конференции «Фундаментальные исследования и инновации в технических университетах» (Санкт-Петербург, 2010), на международной научно-практической конференции «Неделя науки СПбГПУ» (Санкт-Петербург, 2010), на научно-практической конференции «Проблемы управления безопасностью в чрезвычайных ситуациях» (Санкт-Петербург, 2010), на XVIII международной научно-практической конференции «Высокие интеллектуальные технологии и инновации в образовании и науке» (Санкт-Петербург, 2011), III Всероссийской научно-практической конференции «Безопасность в чрезвычайных ситуациях»

(Санкт-Петербург, 2011), на XV Всероссийской конференции «Фундаментальные исследования и инновации в технических университетах» (Санкт-Петербург, 2011).

Личный вклад автора. Автор принимал участие в разработке методики анализа безопасности перегрузки ЯТ, выполняемой ЗАО «Диаконт» совместно с кафедрой «Управление и защита в чрезвычайных ситуациях» Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. В рамках выполненных работ автором было введено и разработано понятие защищенности транспортно-технологического оборудования перегрузки ЯТ и разработана методика обеспечения безопасности перегрузки ЯТ за счет повышения защищенности транспортно-технологического оборудования.

Публикации по теме диссертации. По результатам выполненных исследований опубликовано 15 печатных работ, четыре из них в изданиях, рекомендованных ВАК.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и двух приложений. Работа включает в себя 115 страниц текста, 31 рисунок, 6 таблиц, список литературы из 90 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы, научная новизна и практическая ценность полученных результатов.

В **первой главе** дано описание транспортно-технологического оборудования, выполняющего перегрузку ЯТ на АЭС с реакторными установками типа ВВЭР, приведено описание процесса перегрузки ЯТ и рассмотрены возможные направления обеспечения безопасности перегрузки ЯТ.

В процессе эксплуатации АЭС с реакторными установками типа ВВЭР перегрузка ЯТ осуществляется посредством многофункционального, роботизированного комплекса-манипулятора (рис. 1) – машины для перегрузки ЯТ (МП).

МП состоит из моста, тележки, рабочей штанги, захвата для ТВС, захвата для кластера и телевизионной штанги.

Особенности конструкции МП определены условиями безопасности выполнения перегрузочных работ на открытом реакторе и необходимостью реализации технологического цикла перегрузки ЯТ, состоящего из элементарных операционных манипуляций, выполняемых в строгой логической последовательности в условиях ограниченного пространства зоны обслуживания реактора.

Управление процессом перегрузки осуществляется системой управления МП, которая выполняет следующие функции:

- функцию управления (формирование по заданию персонала управляющих воздействий на исполнительные механизмы МП – двигатели, тормоза);

- информационную функцию (предоставление персоналу информации о состоянии механизмов МП и компонентов системы управления МП);
- функцию защит и блокировок (перевод МП в безопасное состояние при отказах оборудования, ошибках персонала, внешних воздействий).



Рис. 1. Машина для перегрузки топлива

Современные системы управления оборудованием по перегрузке ЯТ являются сложными комплексами электронного и электромеханического оборудования, включают в себя несколько самостоятельных подсистем и имеют большое количество функциональных связей. Число защит и блокировок, необходимых для обеспечения безопасного выполнения всех функций системы, может достигать до 100 и более. Система должна работать в различных режимах управления и может быть отнесена к разряду структурно-сложных систем.

Особенности технологии перегрузки ЯТ в условиях АЭС наиболее полно нашли своё отражение в работах А.И. Шиянова и М.В. Максимова.

Перегрузка топлива на современных реакторах ВВЭР осуществляется один раз в год, для чего останавливается реактор и производится открытие герметичной крышки реактора.

Последовательность перегрузочных операций предусматривает многократное чередование операций выгрузки, перестановки и загрузки кассет в реактор. Эта последовательность задается однозначно, и не может изменяться в ходе перегрузки.

Важными факторами безопасности при проведении перегрузочных операций является ограничение скорости транспортировки и ускорений, в зависимости от типа перегружаемого изделия. Для предотвращения аварий при транспортировке элементов перегрузки требуется жесткое соблюдение границ перемещения.

Для предотвращения аварий при вертикальном перемещении захвата ТВС и захвата кластера при приближении к опасным участкам, движение захватов производится на пониженных скоростях с контролем усилия перемещения.

Для ТВС опасными считаются её подъем и опускание при наличии возможности соприкосновения любой ее боковой поверхности с каким-либо элементом зоны перегрузки. Поэтому подъем ТВС от крайнего нижнего положения до выхода хвостовика из опасной зоны и опускание между этими уровнями производится на малой скорости и с контролем изменения усилия перемещения кассеты относительно ее веса в свободном состоянии.

Контроль усилия ведется для любых перегружаемых изделий в момент начала подъема, так как возможно так называемое "прикипание" элементов активной зоны к окружающим конструкциям.

В работе все события, при которых перемещаемые ТВС или ТВС на местах хранения получают нагрузку больше допустимых эксплуатационных нагрузок, называются повреждением ТВС.

Рассматриваемые виды повреждений ТВС показаны на следующей схеме:



Рис.2. Рассматриваемые виды повреждений ТВС

Предполагается, что при авариях по обслуживанию топлива оболочка ТВЭЛов повреждается в такой степени, что все газовые и летучие продукты радиоактивного распада попадают в воду бассейна перегрузки. В последующей фазе радиоактивные инертные газы (изотопы криптона и ксенона), а также частично и изотопы йода попадают в атмосферу зала, что может привести к нарушению пределов безопасной эксплуатации АЭС и возникновению ЧС.

В качестве показателя безопасности перегрузки ЯТ рассматривается вероятность повреждения ТВС в процессе перегрузки. Вероятностный анализ безопасности перегрузки ЯТ на существующих АЭС с реакторами типа ВВЭР (работы Коробкина В.В., Федосовского М.Е.) показывает, что в настоящее время вероятность повреждения ТВС составляет не более 10^{-3} на реактор в год, причем существенный вклад в этот показатель вносят отказы системы управления МП.

Одним из основных путей обеспечения безопасности перегрузки ЯТ является повышение защищенность МП, под которой понимается способность МП предотвращать за счет использования средств и способов защиты повреждения

ТВС при перегрузке (и как следствие возникновение ЧС) вследствие отказов компонентов МП, ошибок персонала или внешних воздействий.

Под средствами защиты МП понимаются реализованные в системе управления МП защиты и блокировки.

Во **второй главе** приведены теоретические основы оценки защищенности МП.

Для количественной оценки защищенности МП против инициирующего нарушения $ИН_m$ (m - порядковый номер инициирующего нарушения) предлагается использовать показатель защищенности φ_m , который определяется как вероятность отказа определенного набора защит и блокировок МП, предотвращающих повреждение ЯТ вследствие инициирующего нарушения $ИН_m$.

Вычисление показателя защищенности МП φ_m удобно выполнять с использованием логико-вероятностных методов анализа надежности и безопасности структурно-сложных технических систем (работы Острейковского В.А., Швыряева Ю.В., Бахметьева А.М., Ершова Г.А., Рябина И.А., Можая А.С. др.). Привлекательность логико-вероятностных методов заключается в их четкости и больших возможностях выявления значимости отдельных элементов в общей структуре технической системы.

Используя терминологию логико-вероятностных методов, показатель защищенности МП φ_m против инициирующего нарушения $ИН_m$ может быть представлен как вероятность истинности события, связанного с отказом определенного набора защит и блокировок:

$$\varphi_m = P \left(\bigwedge_{j \in k_m} z_j = 1 \right) \quad (1)$$

где z_j – состояние защиты (блокировки), предусмотренной в МП для предотвращения повреждения ТВС вследствие инициирующего нарушения $ИН_m$ ($z_j=1$, если защита (блокировка) находится в работоспособном состоянии и $z_j=0$, если защита (блокировка) отказала); k_m – множество номеров защит (блокировок), предусмотренных в МП для предотвращения ЯТ вследствие инициирующего нарушения $ИН_m$.

Для вычисления показателя защищенности φ_m необходимо выразить отказы защит и блокировок через отказы компонентов МП и ошибки персонала и привести полученное соотношение к дизъюнктивной нормальной форме (ДНФ). После этого показатель защищенности φ_m может быть вычислен по следующей формуле:

$$\varphi_m = P\left(\bigwedge_{j \in k_m} z_j = 1\right) = \left(\bigwedge_{i=1}^w m_i = 1\right) = 1 - \prod_{i=1}^w (1 - p(m_i)), \quad (2)$$

$$p(m_i) = \prod_{s \in g_i} p(x_s),$$

где $p(m_i)$ – вероятность реализации конъюнктивного одночлена $m_i = \bigwedge_{s \in g_i} x_s$; $p(x_s)$ – вероятность события x_s (отказа компонента МП или ошибки персонала); g_i – множество номеров отказов компонентов МП (ошибок персонала), входящих в конъюнктивный одночлен m_i .

Формирование ДНФ, выражающей отказ набора защит и блокировок, является сложной задачей, что связано с тем, что против одного иницирующего нарушения может быть предусмотрено несколько защит или блокировок, отказ каждой из которых выражается через большое число аргументов (отказов компонентов МП, ошибок персонала). Поэтому для формирования ДНФ и последующих расчетов предлагается использовать автоматизированные расчетные комплексы анализа надежности и безопасности технических систем, например Risk Spectrum или CRISS.

Если рассматривается отказ компонента МП, то величина $p(x_s)$ вычисляется как усредненная за время одной перегрузки вероятность отказа:

$$p(x_s) = \frac{1}{T} \int_0^T Q_f(t) dt, \quad (3)$$

где T – время выполнения одной перегрузки; $Q_f(t)$ – вероятность отказа компонента на интервале $(0, t)$.

При этом необходимо учитывать изменение интенсивности отказов компонентов МП в процессе перегрузки, что связано с изменением режимов работы компонентов и условий их эксплуатации (см. рис. 3):

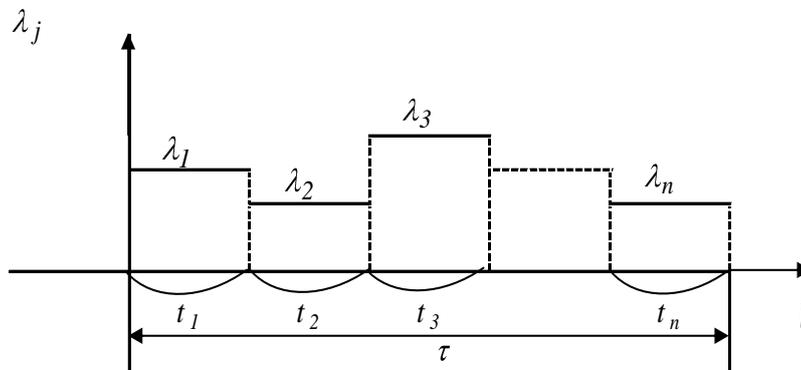


Рис. 3. Зависимость интенсивности отказов компонентов МП от времени

В случае, если рассматривается ошибка персонала, то для вычисления величины $p(x_s)$, используется соотношение:

$$p(x_s) = 1 - \prod_{j \in m_i} (1 - g_j), \quad (4)$$

g_j – номинальная вероятность ошибки персонала при выполнении j -го действия, необходимого для успешного выполнения i -ой задачи; m_i – общее число действий необходимых для решения i -ой задачи.

В **третьей главе** приведена методика обеспечения безопасности перегрузки ЯТ за счет повышения защищенности МП, структура и алгоритм работы системы мониторинга безопасности процесса перегрузки ЯТ.

Ниже приведено описание основных этапов предлагаемой методики обеспечения безопасности перегрузки ЯТ.

Этап 1. Определение иницирующих нарушений в процессе перегрузки. Процесс перегрузки ЯТ характеризуется наличием большого числа потенциальных опасных событий (иницирующих нарушений), реализация которых может привести к повреждению ТВС. Это ошибки оперативного и обслуживающего персонала МП, отказы компонентов МП, нарушения условий эксплуатации. Основной сложностью учета и анализа всех возможных опасных событий при перегрузке ЯТ является тот факт, что на различных участках технологического процесса к повреждению ЯТ могут привести разные группы опасных событий.

В качестве примера рассмотрим операцию извлечения ТВС из реактора. На рис. 4 показано положение рабочей штанги МП при сцеплении с ТВС (положение справа) и положение рабочей штанги после окончания процесса извлечения, когда ТВС находится в транспортном положении и готова к перемещению на координаты установки (положение слева). Если при сцеплении с ТВС оператор выдаст ложную команду на поворот рабочей штанги, то, так как ТВС находится в активной зоне, это приведет к скручиванию топливной сборки. А когда сборка уже находится в транспортном положении, то ложная команды оператора на поворот рабочей штанги не приведет к повреждению ТВС, так как сборка находится выше уровня активной зоны и ее повороту ничего не препятствует.

Таблица 1. Фрагмент перечня базовых интервалов процесса перегрузки ЯТ на АЭС с реакторными установками типа ВВЭР-440

Операция «Захватывание ТВС»	
R05	Поворот рабочей штанги (РШ) при сцеплении с ТВС
Операция «Подъем ТС»	
R06	Вертикальное перемещение РШ с ТВС от гнезда до положения хвостовика ТВС на 200 мм выше уровня головок установленных сборок
R07	Вертикальное перемещение РШ с ТВС от положения хвостовика ТВС на 200 мм выше уровня головок установленных сборок до транспортного положения
Операция «Перемещение моста и тележки с ТВС»	
R08	Перемещение моста и тележки по реактору, бассейн выдержки, колодцу 1 с ТВС
R09	Перемещение моста через транспортный коридор с ТВС

Далее на каждом базовом интервале определяются все возможные иницирующие нарушения. Общая классификация иницирующих нарушений, возможность возникновения которых должна быть рассмотрена на каждом базовом интервале, приведена на рис. 5.

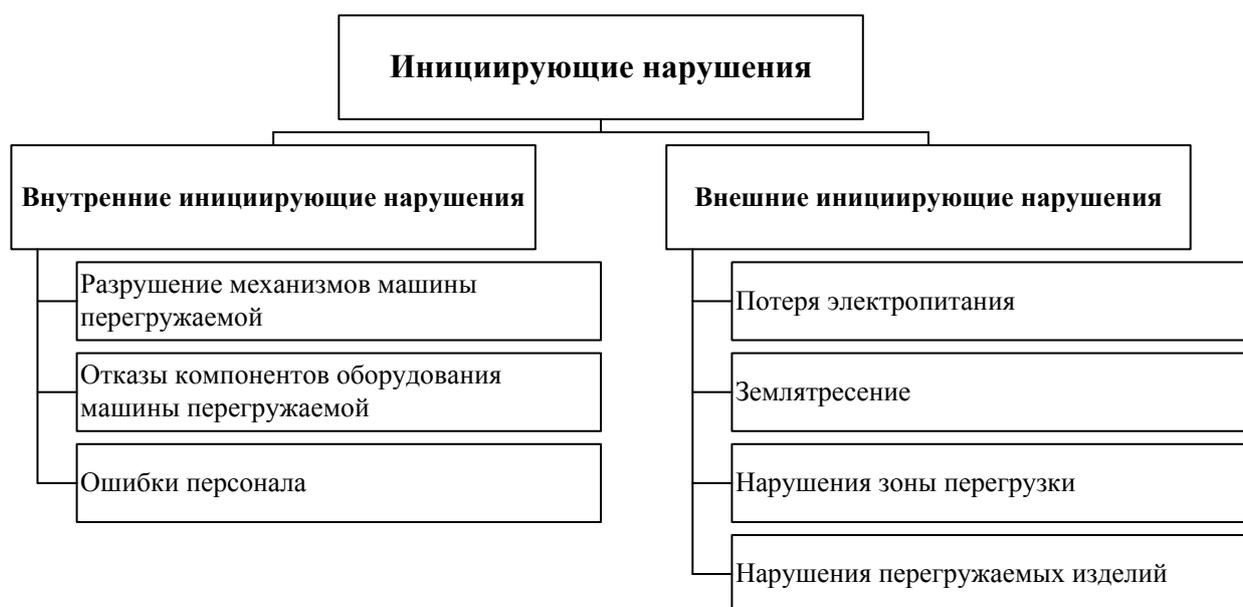


Рис. 5. Классификация иницирующих нарушений при перегрузке ЯТ

Этап 2. Анализ защищенности МП по отношению к каждому иницирующему нарушению. Для каждого иницирующего нарушения определяется набор защит и блокировок МП, предназначенных для предотвращения повреждения ТВС, и проводится оценка показателей защищенности φ_m . При определении наборов защит и блокировок необходимо рассмотреть физические защитные меры (ловители, упоры и т.д.), защиты (блокировки) системы управления МП, защитные действия персонала.

В табл. 2 приведены основные этапы анализа защищенности МП и результаты диссертационных исследований по выполнению данных этапов.

Таблица 2. Этапы анализа защищенности МП

Этап	Результаты диссертационных исследований по выполнению этапа
1. Анализ компонентов МП, участвующих в реализации защит и блокировок	Приведено описание наиболее типовых отказов компонентов МП, данные по надежности компонентов МП
2. Анализ возможных отказов по общей причине компонентов МП, участвующих в реализации защит и блокировок	На основе рекомендаций МАГАТЭ, МЭК разработана схема формирования групп отказов по общим причинам на основе факторов общности: конструкции, технологии изготовления и условий эксплуатации. Разработаны рекомендации по выбору моделей отказов по общим причинам и параметров моделей
3. Анализ действий персонала по обслуживанию МП, ошибки при выполнении которых, могут привести к отказу защит и блокировок	В диссертационной работе приведены справочные данные по вероятностям ошибок персонала МП при выполнении единичных действий, определенные на основе данных, приведенных в SHARP, THERP, статистических данных по надежности оперативного персонала, собранные в процессе тренировок на полномасштабных тренажерах ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 и приведенные в работах Острейковского В.А.
4. Построение графической модели отказа набора защит и блокировок (деревьев отказов)	Разработаны рекомендации по построению графических моделей отказов средств защиты с использованием программных комплексов Risk Spectrum и CRISS, даны рекомендации по обозначению событий моделей
5. Формирование логической и вероятностной модели отказа набора защит и блокировок	Разработаны рекомендации по представлению и анализу логических и вероятностных моделей отказов средств защиты

Этап 3. Разработка рекомендаций по повышению защищенности МП.

Принципиальный алгоритм обеспечения безопасности перегрузки ЯТ на основе анализа защищенности МП приведен на рис. 6.

Основными направлениями обеспечения безопасности перегрузки ЯТ за счет повышения защищенности МП, являются:

- повышение надежности защит и блокировок;
- предотвращение и ограничение последствий ошибок персонала при техническом обслуживании МП в части реализации защит и блокировок;
- повышение эффективности защит и блокировок за счет изменения аппаратной или программной реализации, условий срабатывания и т.д.;
- введение дополнительных защит и блокировок.

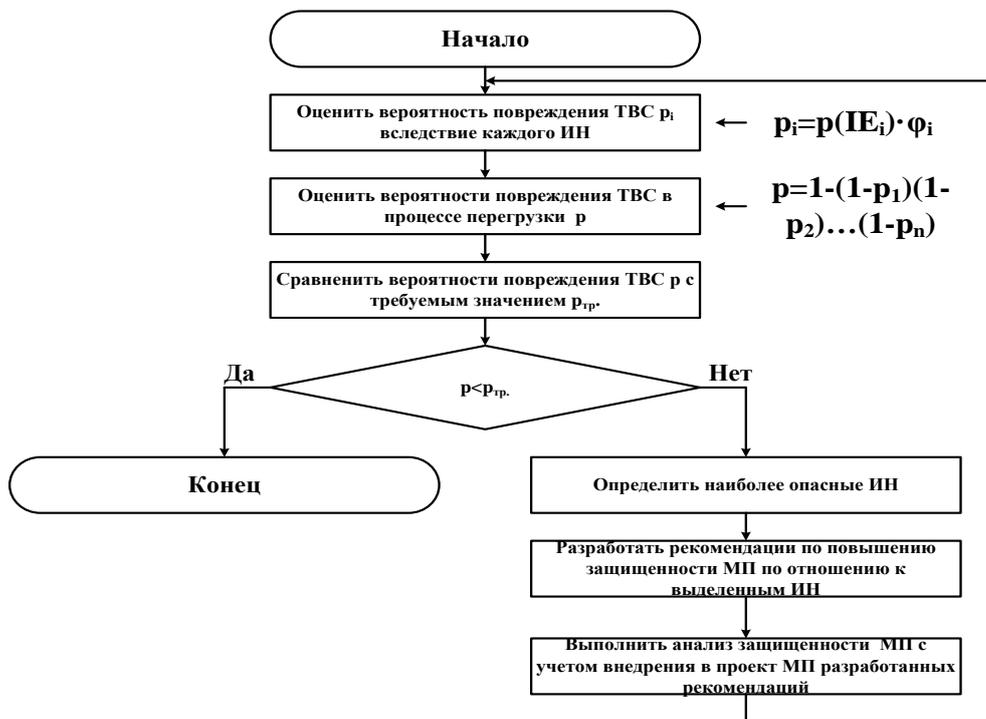


Рис. 6. Блок-схема разработки рекомендаций по обеспечению безопасности перегрузки ЯТ

ОАО «Концерн Росэнергоатом» значительное внимание уделяет вопросам повышения эффективности, надежности и безопасности эксплуатации ядерных установок в рамках совершенствования системы управления жизненным циклом АЭС. Исходя из этого, предлагается проект система аналитического мониторинга безопасности перегрузки ЯТ, целью которой является обеспечения безопасности перегрузки ЯТ путем формирования современной постоянно-действующей системы сбора и анализа информации по результатам эксплуатации перегрузочного оборудования.

Система аналитического мониторинга представляет собой человеко-машинную систему, которая обеспечивает сбор информации в определенном формате, создание и заполнение компьютерной базы данных, анализ собранной информации с оценкой показателей безопасности перегрузки ЯТ и надежности перегрузочного оборудования, оценкой тенденций их изменения.

Принципиальная схема системы мониторинга безопасности перегрузки ЯТ приведена на рис 7.

Рассмотрим назначение основных элементов предлагаемой системы мониторинга.

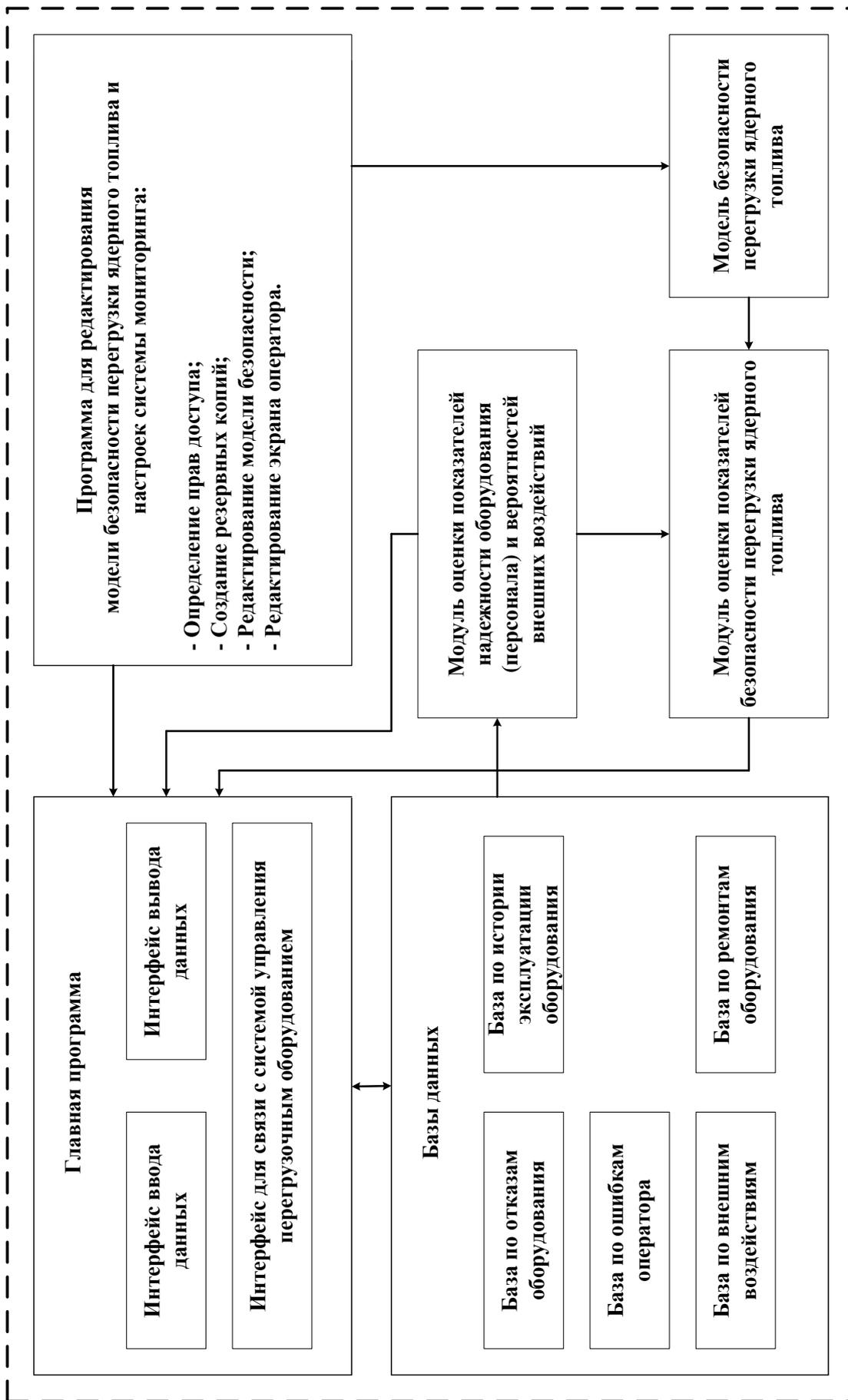


Рис. 7 Принципиальная схема системы мониторинга безопасности перегрузки ЯТ

Главное окно программы предназначено для ввода информации в базу данных, осуществления оперативного поиска информации по определенному набору признаков, отображения результатом оценки надежности оборудования и безопасности процесса перегрузки, разработки отчетной документации. Ввод информации осуществляется вручную (оператором) и автоматически, за счет связи системы мониторинга с системой управления МП.

База данных позволяет накапливать информацию по эксплуатации перегрузочного оборудования.

Модуль оценки надежности оборудования (персонала) и вероятностей внешних воздействий на основе анализа информации от базы данных позволяет:

- автоматически рассчитывать суммарные наработки и количество отказов перегрузочного оборудования;
- проводить автоматизированный расчет показателей надежности перегрузочного оборудования на основе опыта эксплуатации (интенсивности отказов, средних наработок на отказ, вероятности отказа на требование, зависимости интенсивности отказов и вероятности безотказной работы от времени);
- автоматически проводить оценку надежности персонала;
- автоматически строить диаграммы распределений числа отказов однотипного оборудования по годам эксплуатации и зависимостей интенсивности отказов однотипного оборудования от наработки и диаграммы вероятности безотказной работы.

Для оценки показателей надежности по результатам эксплуатации оборудования используется Байесовский подход, который позволяет уточнить априорный закон распределение отказов оборудования на основе эксплуатационных данных.

Модуль оценки показателей безопасности перегрузки ЯТ использует результаты оценки надежности оборудования (персонала) и вероятностей внешних воздействий. На основе полученной информации и, используя модель безопасности перегрузки ЯТ, данный модуль оценивает вероятности повреждения ТВС в процессе перегрузки. Модель безопасности перегрузки ядерного топлива представляет собой функцию, связывающую вероятность повреждения ТВС при перегрузке $p(S)$ с надежностью элементов перегрузочного оборудования, с надежностью обслуживающего и оперативного персонала, с вероятностью внешних по отношению к технологическому процессу воздействий:

$$p(S) = \prod_{i=1}^n p(IN_i) \varphi_i, \quad (5)$$

где $p(S)$ – вероятность повреждения ЯТ в процессе перегрузки; $p(IN_i)$ – вероятность инициирующего нарушения IN_i ; φ_i – показатель защищенности МП по отношению к инициирующему нарушению IN_i ; n – общее число рассматриваемых в процессе перегрузки инициирующих нарушений.

Кроме того, данный модуль осуществляет выбор корректирующих мер, реализация которых обеспечит безопасность перегрузки ЯТ.

Предлагаемый порядок обеспечения безопасности перегрузки ЯТ на этапе эксплуатации перегрузочного оборудования приведен на рис. 8.

В качестве требований по безопасности рассматривается вероятность повреждения ТВС в процессе перегрузки. Так, согласно финским нормативным документам, вероятность повреждения ТВС не должна превышать 10^{-3} в год.

Целевая функция управления корректирующими мерами определяется исходя из минимизации затрат на реализацию мероприятий по обеспечению безопасности при условии выполнения требований по безопасности.



Рис. 8. Схема обеспечения безопасности перегрузки ЯТ на этапе эксплуатации перегрузочного оборудования

Система мониторинга безопасности позволит поддерживать уровень безопасности перегрузки ЯТ на требуемом уровне и снизить затраты, связанные последствиями повреждения ТВС.

В четвертой главе на основе разработанной методики обеспечения безопасности перегрузки ЯТ получены научно-технические предложения по совершенствованию транспортно-технологического оборудования перегрузки ЯТ, которые позволили повысить эффективность выполнения операций перегрузки по оперативным (время выполнения операций) и экономическим (стоимостным) показателям и обеспечить уровень безопасности, соответствующий допустимым рискам по возникновению ЧС.

В качестве примера рассматриваются результаты обеспечения безопасности перегрузки ЯТ на 5-ом энергоблоке Нововоронежской АЭС при модернизации МП.

Перегрузку реактора на 5-ом энергоблоке Нововоронежской АЭС предполагается осуществлять в режиме, когда наведение РШ на заданную координату, сцепление с перегружаемым изделием и извлечение его производится в автоматическом режиме, а команда на выполнение каждой следующей операции после выполнения предыдущей выдается оператором.

Например, после наведения МП на заданную координату сцепление с извлекаемым изделием производится после проверки правильности выхода на заданную координату путем сравнения показаний индикаторов перемещения моста и тележки с координатами, указанными в программе загрузки.

Принципиальная структура системы управления МП на 5-ом энергоблоке Нововоронежской АЭС после модернизации приведена на рис. 9.

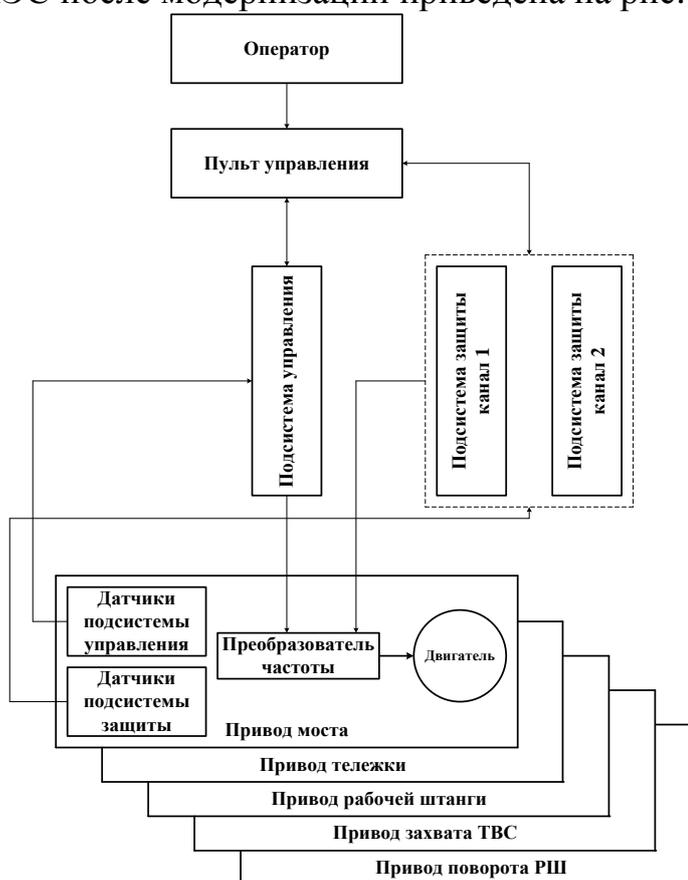


Рис. 9. Принципиальная схема системы управления МП

Выполнение каждой из основных функций системы управления МП (СУМП): функции управления, функции диагностики и функции защит и блокировок – реализуется отдельными самостоятельными составными частями СУМП и программными средствами.

Функция защит и блокировок реализуется двумя каналами, с применением максимально различной элементной базы для каждого из каналов. Каждый из каналов имеет собственный набор датчиков, достаточный для реализации соот-

ветствующей функции (защиты или блокировки). Датчики различных каналов работают на разных физических принципах и производятся различными производителями.

С целью обеспечения безопасности выполнения перечисленных операций в системе управления должны быть предусмотрены следующие основные группы защит и блокировок:

- защиты (блокировки), формируемые по положениям механизмов – с использованием сигналов датчиков координат и датчиков положений;
- защиты (блокировки), формируемые по усилиям на механизмах – с использованием сигналов датчиков усилий;
- защиты (блокировки), формируемые по параметрам движения;
- защиты (блокировки), формируемые по параметрам среды перегрузки – с использованием сигналов датчиков внешних систем (датчиков контроля среды перегрузки);
- защиты (блокировки), формируемые по результатам диагностирования оборудования МП и СУМП.

Учитывая наличие двух разных подсистем защит и блокировок, становится актуальным вопрос о распределении защит и блокировок между этими подсистемами и их достаточности для обеспечения безопасности перегрузки ЯТ.

Основные технические решения системы управления выполнены на базе компонентов SIEMENS. На самой машине перегрузочной используются компоненты фирмы SEW EURODRIVE.

При выполнении анализа процесса перегрузки сформировано более 200 иницирующих нарушений, проведен анализ защищенности МП по отношению к каждому иницирующему нарушению и выполнена оценка безопасности перегрузки ЯТ. Оценка защищенности МП и вероятностей повреждения ЯТ была выполнена с использованием программного комплекса Risk Spectrum.

В качестве исходных данных по надежности компонентов МП были использованы данные по надежности фирм-производителей оборудования (SIEMENS, SEW EURODRIVE), а также данные по надежности оборудования АЭС собранные МАГАТЭ.

Результаты оценки безопасности перегрузки ЯТ приведены в табл. 3.

Таблица 3. Результат оценки вероятностей повреждения ТВС

Повреждение ТВС	Вероятность
Падение ТВС	$5,78 \cdot 10^{-6}$
Изгиб ТВС	$8,61 \cdot 10^{-6}$
Сжатие ТВС	$2,10 \cdot 10^{-4}$
Боковой удар ТВС	$1,39 \cdot 10^{-4}$
Скручивание ТВС	$2,99 \cdot 10^{-6}$
Превышение ТВС допустимого уровня	$6,31 \cdot 10^{-6}$
Падение РШ в реактор, БВ или УГ	$2,59 \cdot 10^{-9}$

Из табл. 3 видно, что наиболее вероятными видами повреждения ТВС являются «Сжатие ТВС» ($2,10 \cdot 10^{-4}$), «Боковой удар ТВС» ($1,39 \cdot 10^{-4}$), «Изгиб ТВС» ($8,61 \cdot 10^{-6}$).

Большая вероятность сжатия ТВС объясняется плохой защищенностью МП к инициирующим нарушениям, приводящим к ошибке позиционирования моста или тележки при выходе на координаты установки ТВС, что может привести к тому, что при установке ТВС упрутся в соседнюю, уже установленную сборку, и сожмет ее.

Сложность повышения защищенности МП против данного инициирующего нарушения заключается в необходимости ручного ввода в систему управления координат всех ячеей реактора и бассейна выдержки и необходимостью контроля промежуточных положений моста (тележки).

Большая вероятность бокового удара и изгиба ТВС связана с плохой защищенностью МП против инициирующих нарушений, приводящих к ложному перемещению моста (тележки) при извлечении или установки ТВС, что объясняется большой вероятностью событий приводящих к ложным перемещениям моста (тележки).

Общая вероятность повреждения ТВС составила $3,50 \cdot 10^{-4}$, однако по результатам анализа неопределенности выявлено, что данный показатель может выходить за пределы допустимой зоны (95% квантиль распределения вероятности повреждения ТВС равен $1,48 \cdot 10^{-3}$, что больше предельного значения, равного 10^{-3}). Поэтому было принято решение о внесении дополнительных мер, направленных на обеспечение безопасности перегрузки ЯТ.

Исходя из анализа наиболее вероятных повреждений ТВС было предложено внести в проект МП следующие защиты и блокировки:

- ввести дополнительные меры, направленные на контроль ошибочных действий оператора с целью уменьшения вероятности сжатия ТВС из-за ошибки позиционирования моста (тележки);
- ввести защитную меру подсистемы защит II по запрету перемещения моста (тележки) при нахождении РШ не в транспортном положении с целью уменьшения вероятности изгиба и бокового удара ТВС из-за ложного перемещения моста (тележки);
- ввести защитную меру системы защит II по запрету перемещения моста (тележки) при сцеплении (расцеплении) с целью уменьшения вероятности изгиба ТВС из-за ложного перемещения моста (тележки);
- ввести защитную меру подсистемы защит II по запрету перемещения РШ при уменьшении усилия на тросах РШ с целью уменьшения вероятности сжатия ТВС из-за ошибки позиционирования моста (тележки);
- ввести защитную меру подсистемы защит I по запрету перемещения РШ при уменьшении усилия на тросах РШ с целью уменьшения сжатия ТВС из-за ошибки позиционирования моста (тележки).

Результаты оценки вероятностей повреждения ТВС до и после реализации рекомендаций по обеспечению безопасности приведены на рис. 10. Общая ве-

роятность повреждения ТВС с учетом неопределенности результатов составила – $3,4 \cdot 10^{-4}$.

Таким образом, анализ и оценка защищенности МП на Нововоронежской АЭС при проектировании позволил достигнуть требуемого уровня безопасности перегрузки ЯТ при условии использования автоматического режима работы (время одной перестановки ТВС было сокращено с **40 минут до 20 минут**), что позволило сократить время перегрузки до **6 суток** и получить экономический эффект **не менее 16 млн. руб в год**.

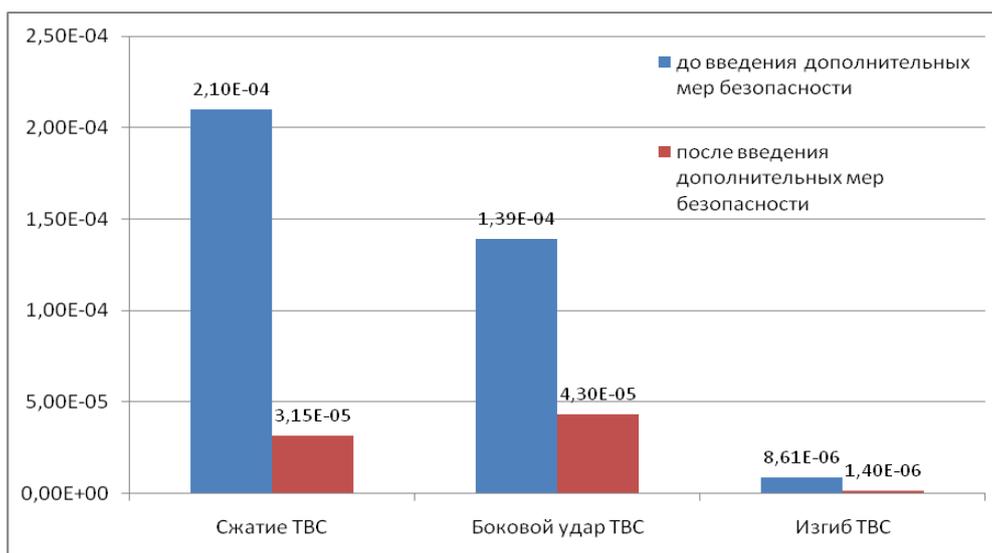


Рис. 10. Результаты оценки вероятности повреждения ТВС до и после реализации рекомендаций по обеспечению безопасности перегрузки ЯТ

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Основными результатами выполненных диссертационных исследований являются:

- определены виды повреждения ТВС в процессе перегрузки на АЭС и их возможные последствия, которые могут привести к возникновению ЧС;
- разработаны теоретические основы анализа защищенности МП от внешних и внутренних воздействующих факторов, базирующиеся на математических моделях вероятностного анализа безопасности, учитывающие особенности структуры и режимов эксплуатации МП;
- разработана методика повышения безопасности перегрузки ЯТ за счет повышения защищенности МП, позволяющая сформировать рекомендации по повышению защищенности МП, обеспечивающих требуемый уровень безопасности перегрузки ЯТ;
- разработана структура и алгоритм работы системы мониторинга безопасности перегрузки ЯТ, целью которой является обеспечения безопасности перегрузки ЯТ путем формирования современной постоянно-действующей системы сбора и анализа информации по результатам эксплуатации перегрузочного оборудования;

- проведена апробация разработанной методики обеспечения безопасности перегрузки ЯТ при решении задач создания и проектирования МП, результаты которой свидетельствуют об адекватности разработанных моделей реальным условиям функционирования МП, о существенном технико-экономическом эффекте, полученным при использовании разработанной методики.

Полученные в диссертационной работе результаты отвечают требованиям новизны, теоретической и практической значимости. Апробация полученного научно-методического аппарата обеспечения безопасности перегрузки ЯТ показала, что цель диссертационного исследования, состоящая в обеспечении безопасности перегрузки ЯТ, за счет повышения защищенности транспортно-технологического оборудования перегрузки топлива достигнута.

Основным направлениями дальнейших исследований следует считать разработку научно-методического аппарата обеспечения безопасности перегрузки ЯТ на этапе эксплуатации за счет контроля действий обслуживающего персонала, состояния оборудования и конструкций МП.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Сыров, А. А. Вероятностный анализ безопасности транспортно-технологического оборудования перегрузки ядерного топлива / А.А. Сыров, В.И. Гуменюк, М.Е. Федосовский, Г.А. Фокин // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2009. № 2 (78). С. 98–102. – 0,25 п.л. (в т.ч. автора 0,15 п.л.).
2. Сыров, А. А. Оценка уязвимости транспортно-технологического оборудования перегрузки ядерного топлива / А.А. Сыров, В.И. Гуменюк, М.Е. Федосовский, Г.А. Фокин// Информация и космос. 2009. № 4. С. 94–100. – 0,37 п.л. (в т.ч. автора 0,25 п.л.).
3. Сыров, А.А. Обеспечение защищенности и минимизация затрат при перегрузке ядерного топлива на АЭС с реакторами типа ВВЭР / А.А. Сыров, В.И. Гуменюк, Г.Л. Атоян // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2011. № 2. С. 233–237. - 0,25 п.л. (в т.ч. автора 0,15 п.л.).
4. Сыров, А.А. Критерии оценки неблагоприятных последствий радиационных аварий / А.В. Храмов, А.А. Сыров // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2010. № 2. С. 237–241. - 0,25 п.л. (в т.ч. автора 0,10 п.л.)
5. Заявка на изобретение «Устройство для мониторинга риска и способ мониторинга риска для использования с объектом атомной энергетики», номер заявки 2010139828.
6. Сыров, А. А. Анализ уязвимости транспортно-технологического оборудования перегрузки ядерного топлива / М.Е. Федосовский, А.А. Сыров, Г.А. Фокин // материалы Всерос. науч.-прак. конф. «Безопасность в чрезвычайных ситуациях» (Санкт-Петербург, 2009). С. 113–119. – 0,37 п.л. (в т.ч. автора 0,25 п.л.).
7. Сыров, А. А. Анализ безопасности оборудования перегрузки активной зоны реакторной установки / М.Е. Федосовский, А.А. Сыров, Г.А. Фокин // материалы 13 Всерос. конф. по проблемам науки и высшей школы «Фундаментальные исследования и инновации в технических университетах» (Санкт-Петербург, 2009). С. 277–284. – 0,43 п.л. (в т.ч. автора 0,3 п.л.).

8. Сыров, А.А. Опыт использования методики анализа безопасности транспортно-технологических операций с ядерным топливом / А.А. Сыров, В.И. Гуменюк, М.Е. Федосовский, Г.А. Фокин // материалы Всерос. Научно-практической конференции «Безопасность в чрезвычайных ситуациях» (Санкт-Петербург, 2010). С. 517–523. – 0,44 п.л. (в т.ч. автора 0,3 п.л.).
9. Сыров, А.А. Методика анализа безопасности транспортно-технологических операций с ядерным топливом / А.А. Сыров, В.И. Гуменюк, М.Е. Федосовский, Г.А. Фокин // материалы XIV Всероссийской конференции «Фундаментальные исследования и инновации в технических университетах» (Санкт-Петербург, 2010) С. 277–284. – 0,44 п.л. (в т.ч. автора 0,3 п.л.).
10. Сыров, А.А. Метод анализа безопасности технологических процессов / А.А. Сыров, В.И. Гуменюк // материалы XXXVIII международной научно-практической конференции «Неделя науки СПбГПУ»: материалы докладов (Санкт-Петербург, 2010). С. 49. – 0,06 п.л. (в т.ч. автора 0,04 п.л.).
11. Сыров, А.А. Анализ надежности персонала транспортного - технологического оборудования перегрузки ядерного топлива / А.А. Сыров, В.И. Гуменюк // материалы научно-практической конференции «Проблемы управления безопасностью в чрезвычайных ситуациях» (Санкт-Петербург, 2010). С. 89–95. – 0,37 п.л. (в т.ч. автора 0,15 п.л.).
12. Сыров, А.А. Защищенность транспортно-технологического оборудования перегрузки ядерного топлива / А.А. Сыров, В.И. Гуменюк // материалы XVIII международной научно-методической конференции «Высокие интеллектуальные технологии и инновации в образовании и науке» (Санкт-Петербург, 2011). С. 99–105. – 0,25 п.л. (в т.ч. автора 0,15 п.л.).
13. Сыров, А.А. Проблемы безопасности при обращении с радиоактивными отходами ядерной энергетики в инновационной экономике / А.А. Сыров, О.Э. Муратов, М.Н. Тихонов, В.А. Храмов // материалы XVIII международной научно-методической конференции «Высокие интеллектуальные технологии и инновации в образовании и науке» (Санкт-Петербург, 2011). С. 121–128. – 0,43 п.л. (в т.ч. автора 0,20 п.л.).
14. Сыров, А.А. Социальная безопасность малых доз ионизирующих радиаций / А.А. Сыров, М.Н. Тихонов // материалы XVIII международной научно-методической конференции «Высокие интеллектуальные технологии и инновации в образовании и науке» (Санкт-Петербург, 2011). С. 130–137. – 0,43 п.л. (в т.ч. автора 0,15 п.л.).
15. Сыров, А.А. Проект системы аналитического мониторинга безопасности перегрузки ядерного топлива на АЭС с реакторными установками типа ВВЭР / А.А. Сыров, В.И. Гуменюк // материалы III Всероссийской научно-практической конференции «Безопасность в чрезвычайных ситуациях» (Санкт-Петербург, 2011). С. 89–94. – 0,3 п.л. (в т.ч. автора 0,12 п.л.).
16. Сыров, А.А. Модели оценки вероятностей отказов по общим причинам / А.А. Сыров, В.И. Гуменюк // материалы XV Всероссийской конференции «Фундаментальные исследования и инновации в технических университетах» (Санкт-Петербург, 2011). С. 127–134. – 0,43 п.л. (в т.ч. автора 0,20 п.л.).