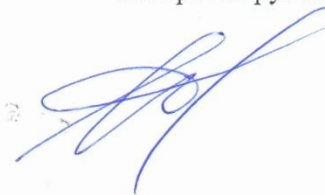


На правах рукописи



Извеков Юрий Анатольевич

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ВЫБОРА И ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА
ОБЪЕКТОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ НА ОСНОВЕ
КОНСТРУКЦИОННОГО РИСК-АНАЛИЗА**

Специальность: 05.02.23 –
Стандартизация и управление качеством продукции

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Магнитогорск – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Научный консультант - доктор технических наук, профессор
Мезин Игорь Юрьевич

Официальные оппоненты:

Антипов Дмитрий Вячеславович,
доктор технических наук, доцент,
ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» (Самарский университет), кафедра «Производство летательных аппаратов и управление качеством в машиностроении», заведующий кафедрой

Анцев Виталий Юрьевич,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет», кафедра «Подъемно-транспортные машины и оборудование», заведующий кафедрой

Клочков Юрий Сергеевич,
доктор технических наук, доцент,
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», ректорат, и.о. проректора по научно-организационной деятельности

Ведущая организация - Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Юго-Западный государственный университет», г. Курск

Защита состоится «28» декабря 2021 г. В 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.111.05 на базе ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» по адресу: 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, МГТУ, малый актовый зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» и на сайте <http://www.magtu.ru>.

Автореферат разослан « _____ » _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Полякова Марина Андреевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Эффективность производства металлопродукции напрямую связана с улучшением имеющихся и применением новых технологий на множестве объектов металлургического предприятия. Среди таких объектов наибольшую часть составляет различное грузоподъемное оборудование, которое эксплуатируется за пределами гарантийных сроков и в большинстве своем испытывает тяжелые и сверхтяжелые режимы работы. Качество этого оборудования оценивается через показатели качества, которые регламентированы в определенной нормативной и технической документации. Однако современное развитие технологий металлургической отрасли не имеет единой научно-методической базы для оценки качества объектов металлургического предприятия по критериям риска. Оценке качества кранового оборудования посвящены следующие документы: Федеральный закон «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» от 21.07.97 г. № 116-ФЗ, ГОСТ 28609-90 «Краны грузоподъемные. Основные положения расчета», РД 10-112-6-03 «Методические указания по обследованию специальных металлургических кранов». Таким образом, действующая регламентация является морально устаревшей и недостаточной. Поэтому назрела необходимость пересмотра и развития научных основ выбора и оценки качества таких объектов металлургического предприятия, как краны, по показателям надежности, безопасности и экономической эффективности на базе конструкционного риск-анализа. Конструкционный риск-анализ позволяет определить уровень риска аварии, надежности, безопасности и экономической эффективности конструкции крана, то есть оценить его качество, исходя из режимов его работы и вероятности неблагоприятных исходов.

Требования ГОСТ Р ИСО 9001:2015 «Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь» предполагают риск-ориентированный междисциплинарный подход, используя различные научные основы и методики.

При проведении исследований необходимо различать технологическое и прочностное качество. Технологическое качество определяется уровнем используемой технологии, и оно должно быть высоким. На этом этапе нужны статистические методы оценки и регулирования качества. Качество эксплуатирующихся объектов связывается с прочностью, надежностью и безопасностью и их экономической эффективностью.

Для создания научных основ выбора и оценки фактического качества и безопасности объектов кранового оборудования металлургического предприятия необходим углубленный анализ состояния основных конструкций крана, напряженно-деформированного состояния, режимов и циклов нагружения.

Таким образом, на современном этапе назрела необходимость применения конструкционного риск-анализа для развития научных основ выбора и оценки показателей качества объектов металлургического предприятия. С этой точки зрения тема диссертационного исследования представляется крайне актуальной, своевременной и востребованной.

Степень разработанности темы исследования

В настоящее время учитываются и нормируются риски для объектов атомной энергии, нефтегазового комплекса, двигательных установок ракет-носителей, химически опасных сосудов, трубопроводов, оборонного комплекса. Для оборудования металлургической промышленности конструкционный риск-анализ пока не применяется.

За рубежом риск-анализ рассматривается как вероятностный риск-анализ и вероятностный анализ безопасности. Вместе эти два аспекта представляют собой современный аппарат обеспечения безопасности технических и сложных технических систем. Вероятностный риск-анализ достаточно молод. Известные авторы в этом направлении D. Jones, H. Kumamoto, E. Henley, G. Taguchi, H. Bloch, F. Geitner, B. Morgan, C. Pietersen, R. Kolluru.

Советские и российские исследования вероятностных показателей аварий рассматриваются по-другому. В работах Н.Н. Афанасьева, В.В. Болотина, А.С. Гусева, А.Ф. Гетмана, А.Б. Злочевского, В.П. Когаева и др. упор делался на изучение статистических эффектов в конструкциях. Основные разделы сформированных теорий вошли в нормы проектирования потенциально опасных объектов. За рубежом данное направление нашло отражение в трудах W. Weibull, T. Yokobory, R. Heivud и др.

В работах В.В. Болотина, А.Ф. Бермана, А.Ф. Гетмана, Н.А. Махутова, А.М. Лепихина показана работоспособность риск-ориентированного подхода к оценке состояния потенциально опасных производственных объектов. В этих работах было проведено развитие вероятностной механики разрушения на основе технологической дефектности, обоснован вид распределения критических дефектов, определен вероятностный учет роста трещин, определен алгоритм риск-анализа для конструкций различных опасных производственных объектов. Для конструкций кранов как объектов металлургического предприятия риск-анализ не был применен. Представляется, что здесь подход должен быть несколько иным, поэтому ему и посвящено данное диссертационное исследование.

Целью работы является развитие научных основ выбора и оценки качества по показателям надежности и безопасности объектов металлургического предприятия на основе риск-анализа конструкций на примере металлургических кранов оборудования для оценки их фактического технического состояния. Оценка качества по критериям риска позволит принимать верные научно-технические решения на этапах гарантийной и послегарантийной эксплуатации, заканчивая решением о снятии с эксплуатации, продлении срока службы, установлении видов и продолжительности технических мероприятий для этих целей.

Для получения итогового результата работы необходимо решить следующие **задачи**:

1. Построение концептуальных моделей анализа, синтеза и оптимизации состояния и динамики качества основных конструкций кранов на основе риск-анализа, позволяющих количественно оценить риск аварии на этапах гарантийной и послегарантийной эксплуатации.

2. Проведение свертки единичных показателей надежности и безопасности и экономических показателей в оценке качества основных конструкций кранов для выделения наиболее значимых показателей.

3. Исследование закономерностей и связей, динамических процессов, характеризующих напряженное состояние и вероятность разрушения в целях обеспечения эффективности, надежности и безопасности основных конструкций кранов с использованием теории случайных функций (процессов) их вероятностной нагруженности.

4. Разработка научно-обоснованного квалиметрического метода оценки надежности и риска основных конструкций кранов металлургического предприятия, описывающего их фактическое техническое состояние, исходя из понятий «нормальный риск», «предельно-допустимый риск», «предельный риск (катастрофический риск)».

5. Разработка математического аппарата и алгоритма риск-анализа для организационных и методических подходов (мероприятий) для оценки качества и безопасности кранов металлургического предприятия.

6. Разработка технических требований нормативной и технической документации к крановому оборудованию металлургического предприятия на основе конструкционного риск-анализа, внедрение которых позволит принимать взвешенные управленческие решения при его эксплуатации, в том числе, с учетом экономической эффективности.

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

1. Разработан научно-обоснованный подход к оценке качества кранового оборудования металлургического предприятия, основанный на анализе аварийности, что впервые позволило оценивать его качество как функцию от риска аварий и их ущерба.

2. Предложен новый понятийный аппарат критериев, определяющих показатели качества кранового оборудования металлургического предприятия, что явилось основой построения модели выбора и анализа показателей качества на основе конструкционного риск-анализа.

3. Впервые показана целесообразность и результативность использования многомерного статистического метода главных компонент для свертки показателей качества кранового оборудования металлургического предприятия, что обеспечило снижение размерности количества показателей с 15 до 9 и выделение из них основных, характеризующих безопасность, надежность и ущерб. Суммарные вклады по двум главным выделенным компонентам составили около 70%.

4. С использованием аппарата квалиметрии предложена система классификационных признаков кранового оборудования на основе конструкционного риск-анализа, что позволило определить его следующие состояния: имеющие «нормальный риск» (вероятность 0,159), «предельно-допустимый риск» (вероятность 0,521), «предельный риск (катастрофический риск)» (вероятность 0,749).

5. Теоретически обоснованы и рассчитаны плотности вероятностей нахождения кранового оборудования металлургического предприятия в состояниях «нормальный риск», «предельно-допустимый риск», «предельный

риск», что позволяет определить возможность их эксплуатации сверх гарантийных сроков с учетом неопределенности исходной информации и использованием Марковских случайных процессов.

Элементы научной новизны предполагают в современных условиях применение риск-ориентированного подхода в оценке качества исследуемого оборудования и принятия при этом правильных управленческих решений по его дальнейшей эксплуатации либо выводе из нее. Рассматриваемые модели принятия решений позволяют существенно повысить составляющую экономического эффекта рассматриваемых объектов, и такой подход можно распространить на другие конструкции, работающие в схожих условиях.

Объектом исследования является качество кранов металлургического предприятия.

Предмет исследования – риск-анализ основных конструкций кранов в процессе эксплуатации и послегарантийных сроков эксплуатации.

Теоретическая и практическая значимость результатов работы заключается в следующем:

1. Доказана возможность использования теории случайных функций (модели вероятностной нагруженности конструкций) для построения модели и исследования опасных факторов, определяющих возможность эксплуатации кранов металлургического предприятия.

2. Определена и доказана взаимосвязь между напряженным состоянием основных конструкций кранов, изменением напряжений и деформаций, числом циклов работы крана и вероятностью возникновения риска аварии (появления аварийной ситуации).

3. Впервые показана возможность и целесообразность использования функций плотности вероятностей напряжений, деформаций, числа циклов работы крана до риска аварийного отказа для основных конструкций металлургического мостового крана грузоподъемностью 300 т, что позволяет принимать технические решения для снижения нагруженности конструкции.

4. Для снижения нагруженности в конструкции фермы мостового металлургического крана доказана целесообразность установки шпренгелей на основе разработанного метода снижения предельных нагрузок с учетом рассчитанных плотностей вероятностей напряжений, деформаций и числа циклов работы крана.

5. Разработан алгоритм конструкционного риск-анализа для основных конструкций мостового металлургического крана грузоподъемностью 300 т, позволяющий количественно оценить вероятность риска аварии и принять решение по его дальнейшей эксплуатации, а также определить стратегию проведения технического обслуживания.

6. Рассчитаны численные значения уровня риска возникновения аварийных ситуаций кранового оборудования металлургического предприятия, что позволяет определить технические мероприятия и обосновать необходимость проведения мониторинга и установления сроков технического обслуживания на стадиях его эксплуатации и послегарантийной эксплуатации.

7. Результаты диссертационной работы внедрены в АО «Магнитогорский ГИПРОМЕЗ», НИИ «Промбезопасность», ООО «Инженерный

технический центр «Промтехаудит», были использованы при выполнении научно-исследовательских и выпускных квалификационных работ обучающимися по направлениям подготовки 01.03.02 «Прикладная математика и информатика», 22.03.02 «Металлургия», 01.04.02 «Прикладная математика информатика», 15.04.02 «Технологические машины и оборудование», 01.06.01 «Математика и механика», включены в лекционный и методический материал специальных учебных курсов «Теория вероятностей и математическая статистика», «Уравнения математической физики», «Математический анализ», «Численные методы в решении математических моделей», читаемых автором для обучающихся по направлениям 22.03.02, 18.04.01 ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», написании двух учебных пособий «Математическое моделирование технических систем», «Численные методы решения краевых задач».

Методология и методы исследования

Теоретические и расчетно-экспериментальные исследования оценки качества объектов металлургического предприятия на примере кранового оборудования на основе конструкционного риск-анализа выполнены на основе многомерных статистических методов, методов строительной механики, теории вероятностей, теории случайных процессов, Марковских случайных процессов, квалиметрических методов. В работе использованы прикладные пакеты для расчета напряженного состояния конструкции, приведены результаты аналитических расчетов, математического и имитационного моделирования, применен метод главных компонент и выполнено развитие вероятностного конструкционного риск-анализа с позиций теории вероятностей, случайных процессов, Марковских случайных процессов, механики разрушения, нелинейной динамики для обоснования выбора и оценки показателей качества объектов металлургического предприятия на примере кранов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Концепция оценки качества основных конструкций кранов металлургического предприятия на основе конструкционного риск-анализа.
2. Результаты модельных и численных исследований нагруженности фермы с различными геометрическими характеристиками конструкции мостового металлургического крана.
3. Теоретическое обоснование вида функций распределений вероятностных полей напряжений и деформаций.
4. Обоснование модели принятия решения и расчетной модели риска конструкции крана с учетом априорной информации, вероятности возникновения аварии (разрушения), ее эскалации, возникающих при этом экономических затрат.
5. Полученные расчетные зависимости оценки качества основных конструкций кранов металлургического предприятия на основе разработанных вероятностных моделей.
6. Расчеты риска разрушений (аварий) основных конструкций кранов.

Достоверность и обоснованность результатов и научных выводов работы, апробация результатов

Обоснованность результатов диссертационного исследования подтверждается адекватно применяемыми методами математического моделирования; логичностью формулировок; отсутствием противоречий между разработанным подходом и теоретическими и практическими знаниями, полученными другими исследователями; проведением численных экспериментов, подтверждающих теоретические результаты автора. Достоверность подтверждается использованием современных представлений об оценке качества технических систем, многомерных статистических методов, теории надежности, нелинейной динамики, теории вероятностей. Кроме этого, подтверждена сходимость полученных результатов и известных теоретических и экспериментальных исследований.

Основные полученные результаты материалов диссертации были представлены и апробированы на различных конференциях: Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования» (Магнитогорск, 2010-2020 гг.), Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Актуальные проблемы современной науки и образования» (Сибай, 2012 г.), IV Международный научный форум (Москва, 2012 г.), Международная научно-практическая конференция «Современные тенденции в образовании и науке» (Тамбов, 2013, 2015 гг.), IV Международная научная конференция «Актуальные проблемы технических наук» (Краснодар, 2017 г.), Международная научная конференция математиков «Дифференциальные уравнения и смежные проблемы» (Стерлитамак, 2018 г.), Международная научно-техническая конференция «Пром-инжиниринг» (ИСИЕ, Челябинск, Сочи, 2018-2020 гг.), Международная научно-техническая конференция «Живучесть и конструкционное материаловедение» (Москва, ИМАШ РАН, 2018-2020 гг.), Международная научная конференция «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении» (Москва, ИМАШ РАН, 2019 г.), Международная научно-техническая конференция «Строительство, архитектура и техносферная безопасность» (ISSATS, Челябинск, 2018-2020 гг.), Международная научно-техническая конференция «Современные направления и перспективы развития технологий и оборудования в машиностроении 2020, 2021» (ICMTMTE-2020, ICMTMTE-2021, Севастополь, 2020-2021 гг.), I национальная научно-практическая конференция «Современные проблемы и перспективы развития науки, техники и образования» (Магнитогорск, 2020 г.), V Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы науки и образования в современном ВУЗе» (Стерлитамак, 2021 г.), семинары в Инженерном научном центре «Промтехаудит» (Магнитогорск, 2013-2021 гг.), семинары в Управлении рисками ПАО «ММК» (Публичное акционерное общество «Магнитогорский металлургический комбинат», Магнитогорск, 2013-2015 гг.) семинары кафедры Динамики, прочности и механики машин НИУ «Южно-Уральский государственный университет» (Челябинск, 2013, 2014 гг.), семинары в АО «Магнитогорский ГИПРОМЕЗ» (Магнитогорск, 2021 г.), семинары в НИИ «Промбезопасность» (Магнитогорск, 2020-2021 гг.).

Материалы диссертационной работы были доложены 20.04.2021 на объединенном научно-техническом совете по специальности 05.02.23 в ФГБОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева».

Внедрение результатов диссертационного исследования. Результаты диссертационной работы внедрены в АО «Магнитогорский ГИПРОМЕЗ» (г. Магнитогорск), НИИ «Промбезопасность» (г. Магнитогорск), ООО «Инженерный технический центр «Промтехаудит» (г. Магнитогорск) и в учебный процесс ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», о чем имеются соответствующие акты внедрения.

Личный вклад автора заключается в формулировании цели и задач диссертационного исследования, самостоятельном участии в проведении теоретических и численных исследований, обосновании концепции оценки качества объектов металлургического предприятия, свертке показателей качества, разработке математических моделей качества конструкции крана, исследовании напряженно-деформированного состояния исследуемых основных конструкций крана, интерпретации результатов, формулировке основных положений и выводов, подготовке к публикации статей по теме диссертационного исследования.

Публикации. Основное содержание диссертации отражено в 48 публикациях: 15 статей в журналах из Перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора наук, 11 статей проиндексированы в наукометрических базах Scopus и Web of Science, в других изданиях – 22 работы. Опубликовано 3 монографии.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка использованной литературы из 234 наименований, 10 приложений на 13 страницах, изложена на 215 страницах, включает 88 рисунков, 40 таблиц.

Автор выражает огромную благодарность за оказание технической помощи при работе с математическими прикладными пакетами программ кандидату физико-математических наук, доценту кафедры прикладной математики и информатики Анисимову А.Л., при работе с программами исследования напряженно-деформированного состояния конструкций аспирантке кафедры механики Ступак А.А.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрыта актуальность рассматриваемой научной проблемы по теме диссертационной работы, приведена степень разработанности выбранного направления, сформулированы цель и задачи исследования, научные положения, выносимые на защиту, изложена научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, логическая структура диссертации, представлен личный вклад автора.

В первой главе приведена существующая научно-методическая база стандартизации оценки качества объектов металлургического предприятия с позиций надежности и безопасности, аварийности грузоподъемных машин и

современных представлений о вероятностном и нелинейном риск-анализе таких конструкций.

Показано, что существующие методы оценки качества на современном этапе недостаточны для эффективного управления производством. Установлено, что целесообразно провести работы по созданию и развитию методов оценки качества кранового оборудования металлургического предприятия на основе риск-анализа конструкций для увеличения их безопасной и надежной работы. Выбор и оценка показателей качества с использованием конструкционного риск-анализа составляют научную основу диссертационного исследования.

За рубежом риск-анализ рассматривается как вероятностный риск-анализ и вероятностный анализ безопасности. Совместно эти два аспекта представляют собой современный аппарат обеспечения безопасности технических и сложных технических систем. Сложные технические системы содержат в своем составе несколько технических систем. Известные авторы в этом направлении D. Jones, H. Kumamoto, E. Henley, G. Taguchi, H. Bloch, F. Geitner, B. Morgan, C. Pietersen, R. Kolluru. Изучением статистических эффектов в конструкциях за рубежом занимались W. Weibull, T. Yokobogu, R. Heivud и др.

В Советском Союзе и России исследования вероятностных показателей аварий велись несколько иначе. Работы Н.Н. Афанасьева, В.В. Болотина, А.С. Гусева, А.Ф. Гетмана, А.Б. Злочевского, В.П. Когаева и др. посвящались установлению статистических подходов к оценке прочности и ресурса по различным критериям, например, сопротивления усталости. Они нашли применение в различных отраслях машиностроения: автомобилестроении, самолетостроении, железнодорожном транспорте и др.

Особое внимание в области создания и развития научных основ стандартизации и качества заслуживают работы Ю.П. Адлера, Г.Г. Азгальдова, И.З. Аронова, Б.В. Бойцова, В.В. Бойцова, В.А. Васильева, А.В. Зажигалкина и др.

Научный интерес представляют исследования квалиметрии, стандартизации и управления качеством в промышленном секторе экономики, рассмотренные в трудах Д.В. Антипова, В.Ю. Анцева, О.А. Горленко, Г.С. Гуна, И.Г. Гуна, А.Г. Ивахненко, Ю.С. Клочкова, В.Н. Козловского, И.А. Михайловского, Г.Ш. Рубина, И.Ю. Мезина, М.А. Поляковой, М.В. Чукина и др.

Рассмотрение оценки риска для элементов кранового оборудования можно отследить по работам В.С. Котельникова, А.А. Короткого, А.Н. Павленко, Л.С. Каминского, С.С. Чичерина, И.И. Еремина, В.В. Шевцова. В данных работах недостаточно полно были освещены вопросы оценки качества элементов кранового оборудования металлургического предприятия по показателям безопасности с позиций конструкционного риск-анализа.

Работы В.В. Болотина, А.Ф. Бермана, А.Ф. Гетмана, Н.А. Махутова, А.М. Лепихина показали работоспособность риск-ориентированного подхода к оценке состояния потенциально опасных производственных объектов.

Рассмотрена аварийность грузоподъемных машин России, предприятий, подконтрольных Уральскому Управлению Ростехнадзора, анализ опасностей и качественная картина эксплуатирующихся кранов в ПАО «ММК».

Определены научные принципы риск-анализа конструкций, проанализирована динамика металлургических мостовых кранов, которая подчиняется уравнению Лагранжа II рода с целью выявления элементов или участков, которые могут определять риск аварии или катастрофы.

Осуществлена постановка цели исследования, задач, методологии и методов, используемых в работе.

Во второй главе показано, что для технических систем и объектов характерно многогранное понятие качества объекта, которое представляется следующим образом: надежность технической системы (включает в себя безотказность, ремонтпригодность, долговечность); безопасность технической системы (социальные и индустриальные риски, экологические риски, техногенные риски); экономические показатели технической системы (величина ущерба, затраты, связанные с рисками, техногенные риски); прочие показатели качества технической системы (сохраняемость, эргономичность и др.).

Концептуальную модель функции качества будем рассматривать в следующем виде

$$K(t) = f(B(t), H(t), \Xi(t)), \quad (1)$$

где $K(t)$ – функция качества технической системы (объекта, элемента); $B(t)$ – функция безопасности; $H(t)$ – функция надежности; $\Xi(t)$ – функция экономической эффективности.

Тогда обобщающее условие анализа и оценки качества на основе риск-анализа можно записать как

$$R(t) = \sum_i P_i(t) * U_i(t) \leq [R(t)] = \frac{R_c(t)}{n_R} = m_Z Z(t), \quad (2)$$

где $R(t)$ – риск - сочетание вероятностей $P_i(t)$ возникновения аварий и катастроф и ущербов $U_i(t)$ от них; n_R – запас по рискам ($n_R \geq 1$); $R_c(t)$ – критический риск; затраты $Z(t)$, связанные с формирующимися рисками $R(t)$; m_Z – коэффициент эффективности затрат ($m_Z \geq 1$); i – рассматриваемые элементы.

В то же время риск рассматривается как

$$R(t) = P_A \cap P_f(a) \cap E \cap Z, \quad (3)$$

где P_A – априорные вероятности состояния элементов оборудования; $P_f(a)$ – вероятности аварий элементов оборудования; E – коэффициент изменения состояния; Z – затраты, связанные с рисками.

Очевидно, что функцию качества технической системы (элемента, объекта) можем представить в следующем виде

$$K(t) = \frac{1}{R(t)} = \frac{1}{\sum_i P_i(t) * U_i(t)} \geq [K(t)] = \frac{1}{[R(t)]} = \frac{n_R}{R_c(t)} = \frac{1}{m_Z Z(t)}, \quad (4)$$

где $[K(t)]$ – допускаемый уровень качества.

Для реализации такой концептуальной модели необходимо:

1. снизить размерность задачи в оценке качества элементов рассматриваемого кранового оборудования;

2. провести предварительный анализ опасностей и выделить потенциальные зоны разрушений. На этом этапе с использованием численных методов анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкций определяются наиболее напряженные зоны;

3. провести анализ и синтез риска аварии конструкции;
4. построить вероятностные модели риска. Для построения таких моделей нужно использовать методы теории надежности и вероятностной динамики. Определение вероятностей риска аварий (функций риска) на заданных вероятностных моделях. Используя количественные оценки, можно определить вероятности риска аварии для каждого рассматриваемого объекта;
5. проанализировать возможные потери от разрушений;
6. оценить элементный риск оборудования с учетом видов предельных состояний конструкции;
7. оценить конструкционный риск следующим образом

$$R_{\Sigma} \rightarrow \{R_i\} \rightarrow \{R_{ij}\} \rightarrow \{R_{ijk}\}, \quad (5)$$

где R_{Σ} – риск оборудования (объекта, системы); $\{R_i\}, \{R_{ij}\}$ – риск подсистемы; $\{R_{ijk}\}$ – риск элемента системы.

$$\{R_{ijk}\} \rightarrow \{R_{ij}\} \rightarrow \{R_i\} \rightarrow \{R_{\Sigma}\}. \quad (6)$$

Риск элемента системы \rightarrow риск подсистемы \rightarrow риск оборудования (объекта, системы).

Для свертки и выделения наиболее значимых показателей из всего многообразия показателей качества воспользуемся методом главных компонент, позволяющим произвести снижение размерности пространства разнородных данных.

Ввиду ограниченности вычислительных мощностей выделим 15 показателей исследуемых кранов металлургического предприятия, смоделированных и известных в процессе эксплуатации металлургического предприятия на протяжении 15 лет (таблица 1).

Таблица 1 – Показатели качества конструкции в процессе эксплуатации

Надежность		Безопасность	
1	Количество конструкций, шт.	8	Аварийные события, шт.
2	Число циклов при эксплуатации, циклы	9	Тяжелонагруженные режимы, %
3	Наработка без перерывов, %	10	Нарушения правил эксплуатации, %
4	Ремонтопригодность, %	11	Нарушение стандартов качества по эксплуатации, %
5	Вероятность безаварийной работы, %	12	Нарушение технического обслуживания (ТО), %
6	Выполнение Промежуточных экспертных обследований (ПЭО) и Генеральных экспертных обследований (ГЭО), %	13	Социальные и промышленные риски, кол-во
7	Величина ущерба, рискованные затраты, %	14	Экологические риски, количество
		15	Техногенные риски, количество

Используя метод главных компонент, получим собственные значения и векторы, из которых выбраны максимальные (рисунок 1).

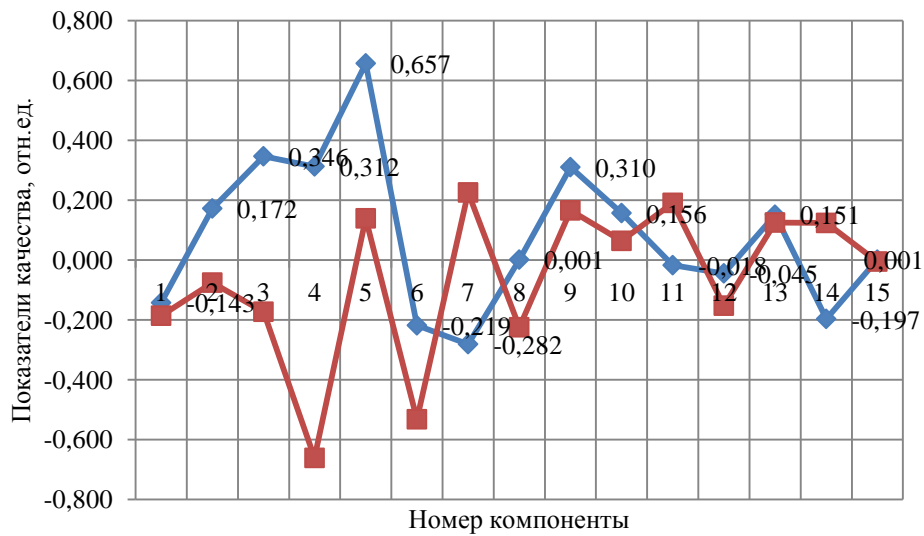


Рисунок 1 – Изменение собственных векторов, соответствующих максимальным собственным значениям

Максимальные значения показателей качества соответствуют значениям «Вероятность безаварийной работы» (показатель 5).

Кроме этого, максимальные значения векторов наблюдаем у показателей безопасности «Тяжелонагруженные режимы» (показатель 9) и экономических показателей «Величина ущерба, рисковые затраты» (показатель 7).

В данном исследовании удельный вклад первой главной компоненты равен 29,1%, удельный вклад второй главной компоненты равен 36,4%. Суммарные вклады по двум главным компонентам равны 65,5% (из 15 компонент), что является удовлетворительным результатом. Таким образом, данные этих двух компонент могут быть использованы в оценке показателей качества конструкции объекта металлургического предприятия.

Для формирования исходной информации решена задача снижения размерности данных с помощью метода главных компонент как основного метода компонентного анализа.

Конструкция должна работать вне так называемой пиковой области, а действующие нагрузки будут при этом будут находиться ниже значений ее предельного состояния. Риск аварии или разрушения возможен только при условии накопления повреждений в конструкции после определенного времени эксплуатации. Таким образом, оценка качества может быть проведена с учетом риск-анализа пиков и предвестников пиков экстремальных значений случайной функции выше допустимого уровня, а также совместной функции распределения вероятностей (напряжений σ_{ij} , деформаций ε_{ij} , числа циклов N), которые являются определяющими для оценки показателей качества конструкции.

В рассматриваемых конструкциях число пиков достаточно мало, и их появление можно считать независимыми катастрофическими редкими событиями. Примем появление пиков амплитуд нагрузок за допускаяемый уровень приближенно подчиняющимся закону χ^2 – распределения Пирсона. Тогда вероятность того, что для стационарного процесса нагружения системы за

время T случайная функция превысит уровень X^* будет определяться следующим образом

$$n^*(X^*) \approx P\left(x > \frac{X^*}{T}\right) \approx \frac{T}{2\pi\psi(m_0)} \int_{v_0^*}^{\infty} v^{m_0-1} e^{-\frac{v^2}{2}} dv, \quad (7)$$

где v - параметр распределения Пирсона. Параметр Пирсона рассчитывается по формуле

$$v = \frac{\sigma'_x}{\sigma_x} e^{-\frac{(X^* - \bar{x})^2}{2\sigma_x^2}}, \quad (8)$$

где $\psi(m_0)$ - нормировочная постоянная распределения. Нормировочная постоянная рассчитывается по формуле

$$\psi(m_0) = 2^{\frac{m_0-2}{2}} \Gamma\left(\frac{m_0}{2}\right), \quad (9)$$

где v_0^* - нижний предел интегрирования, представляющий минимальное значение параметра распределения.

$$v_0^* = \frac{\sigma'_{x_0}}{\sigma_{x_0}} e^{-\frac{(X^* - \bar{x}_0)^2}{2\sigma_{x_0}^2}}, \quad (10)$$

где x_0 - минимальное значение процесса, m_0 - параметр распределения, представляющий собой показатель кривой усталости или степени отказов системы.

Таким образом, алгоритм нахождения вероятности аварий или катастроф для оценки качества рассматриваемой конструкции может быть определен следующим порядком:

1) строится кривая передаточной функции системы и выявляются резонансные частоты случайного процесса нагружения по характерным пикам кривой;

2) интервал работы системы T разбивается на несколько значений, и по выражению (7) производится построение кривой надежности и ненадежности конструкции. При этом необходимо иметь значения спектральной плотности нагрузок на выходе системы;

3) анализируется и устанавливается зависимость между сроком службы конструкции и вероятностью ее аварии или катастрофы, либо вероятностью безотказной работы для выбранных частот случайного процесса нагружения.

С помощью моделирования получена теоретическая кривая безотказной работы технической системы (рисунок 2) для $m_0 = 0,1$ красная линия, $m_0 = 0,15$ синяя линия, $m_0 = 0,2$ зеленая линия в зависимости от лет эксплуатации, вероятность безаварийной эксплуатации кранов металлургического предприятия при принятом порядке регламентов и технического обслуживания (рисунок 3) и вероятность безаварийной эксплуатации за пределами гарантии (рисунок 4).

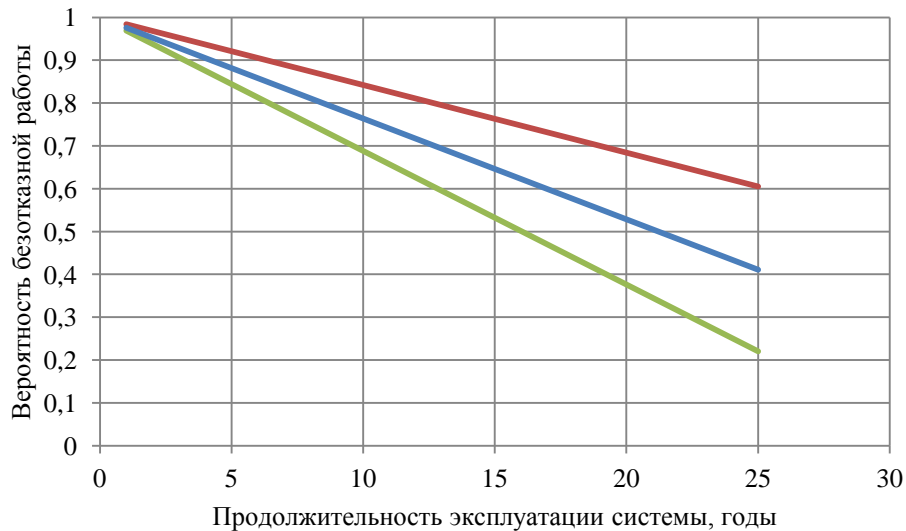


Рисунок 2 – Теоретическая кривая безотказной работы технической системы

Таким образом, теоретически можно нормировать риски следующим образом: оценка надежности больше 0,5 – «нормальный риск», равняется 0,5 – «предельно-допустимый риск», меньше 0,5 – «предельный риск».

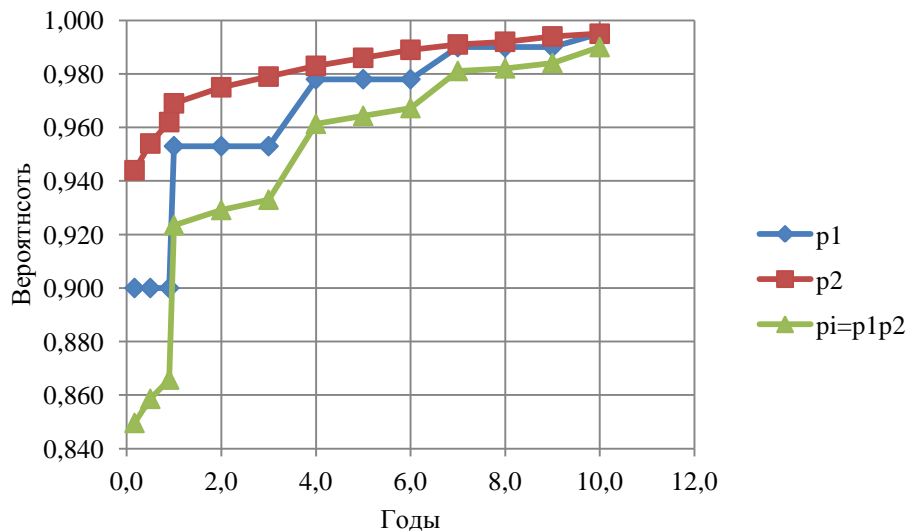


Рисунок 3 - Вероятность безаварийной эксплуатации в течение гарантийных сроков эксплуатации при принятом порядке проводимого технического обслуживания в ПАО «ММК»

Предложенный подход позволил представить качество конструкции крана за пределами гарантийных сроков эксплуатации (рисунок 5). Синей линией показано изменение качества конструкции в относительных единицах, красной линией - предельное качество, ниже которого эксплуатировать кран нельзя.

Приведены аналитические зависимости и модельные примеры. И хотя произведенные расчеты носят иллюстративный характер, но они охватывают два основных этапа процесса эксплуатации: до окончания гарантии и после нее. В расчет не входили возможные аварии и катастрофы, не связанные с этими процессами.

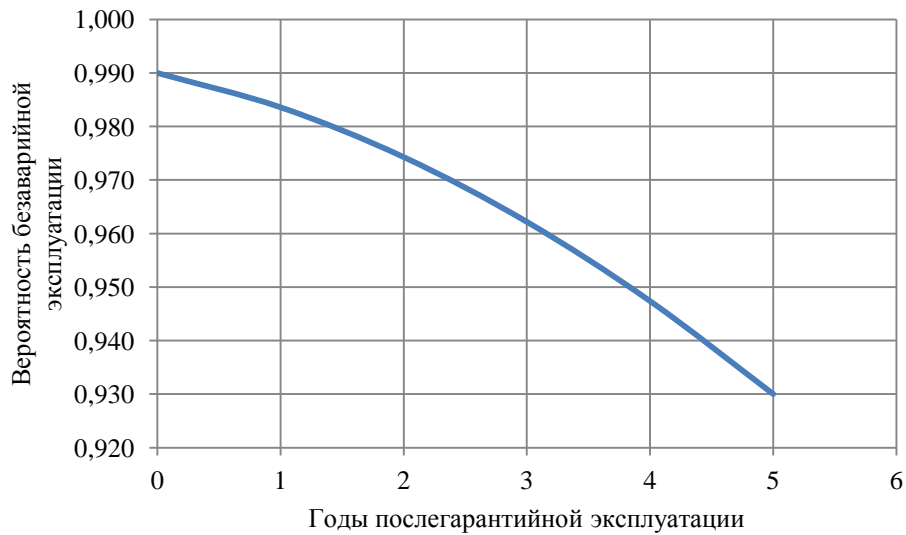


Рисунок 4 - Вероятность безаварийной эксплуатации за пределами гарантии крана металлургического предприятия

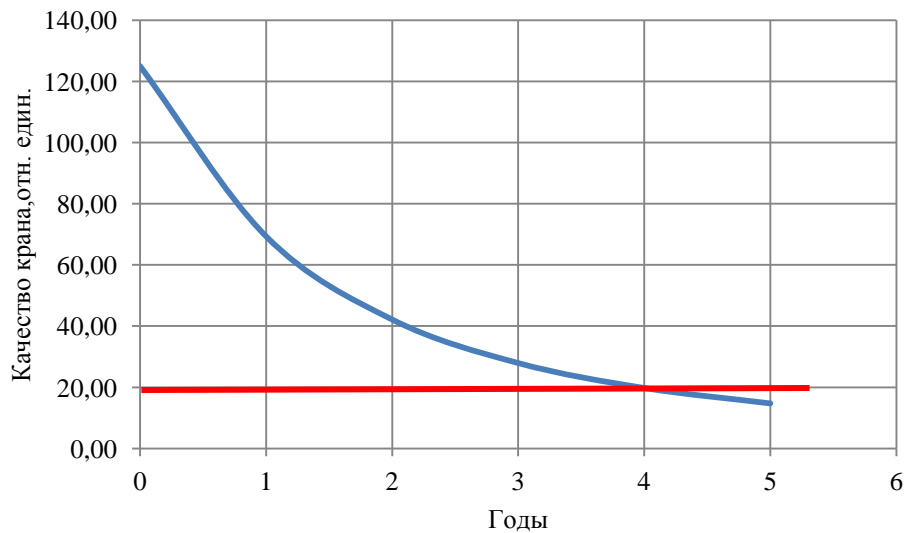


Рисунок 5 - Качество оборудования за пределами гарантии по годам

Предлагаемая концепция позволяет прогнозировать динамику изменения рисков кранового оборудования, а, значит, и оценивать качество таких объектов металлургического предприятия.

В третьей главе рассчитаны поля напряжений и деформаций фермы несущей конструкции мостового металлургического крана грузоподъемностью 300 т и длиной пролета L 24 м и 18 м, высотой h от 1 до 3 м (рисунки 6-11) с различными высотами, пределом текучести материала $\sigma_T = 165$ МПа. Расчеты проводились с использованием программного комплекса «ЛИРА-САПР».

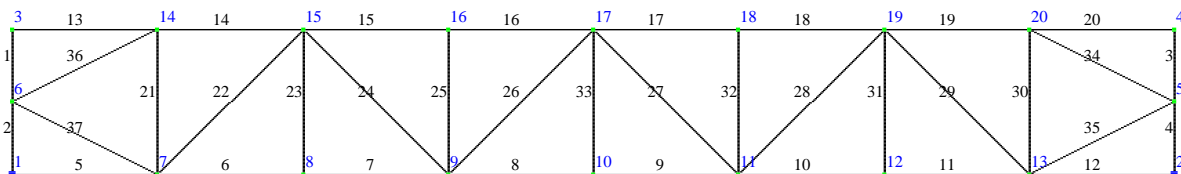


Рисунок 6 - Исходная схема фермы крана с нумерацией узлов и элементов

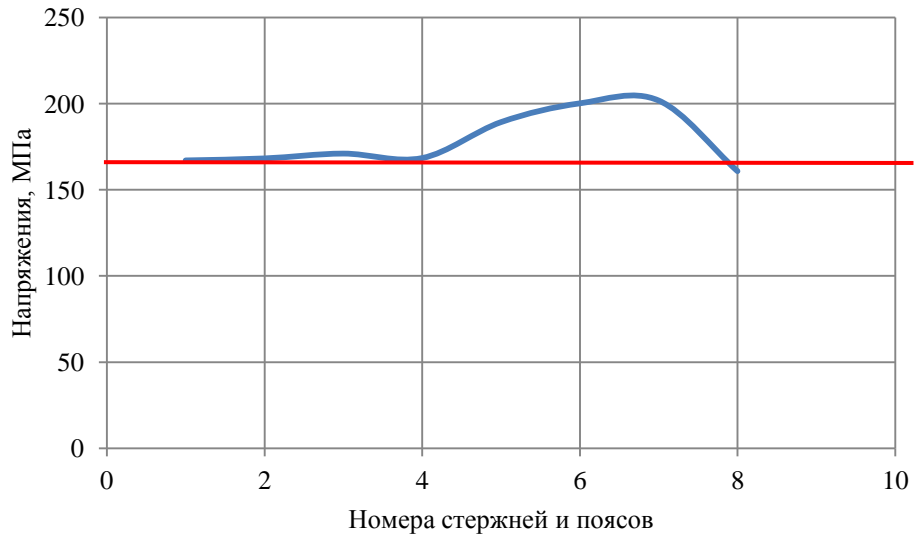


Рисунок 7 – Действующие напряжения в ферме: $L = 24$ м; $h = 3$ м
(красная линия $\sigma_T = 165$ МПа)

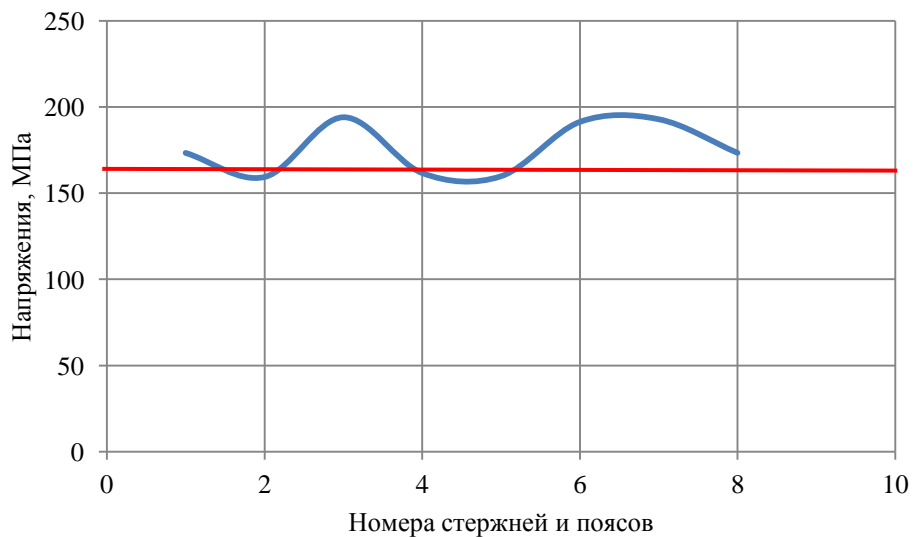


Рисунок 8 – Действующие напряжения в ферме: $L = 24$ м; $h = 2$ м
(красная линия $\sigma_T = 165$ МПа)

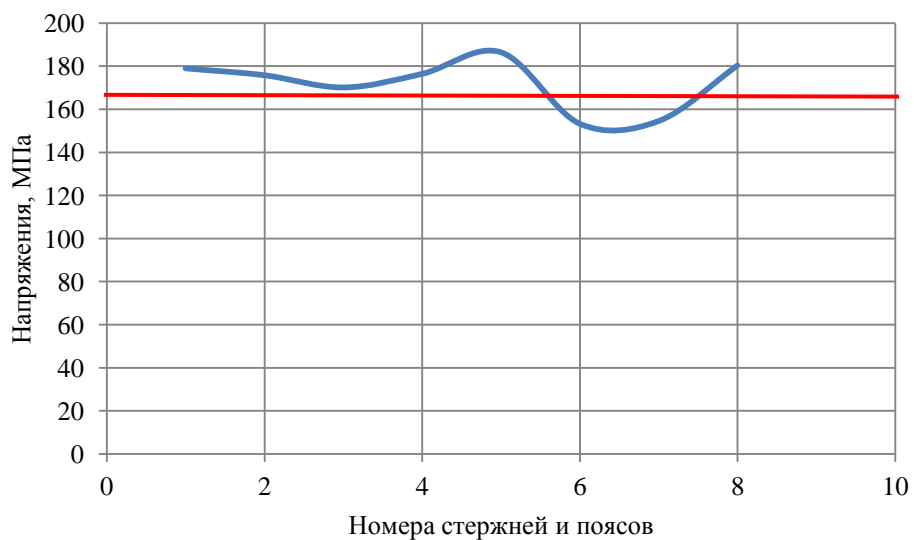


Рисунок 9 – Действующие напряжения в ферме: $L = 24$ м; $h = 1$ м
(красная линия $\sigma_T = 165$ МПа)

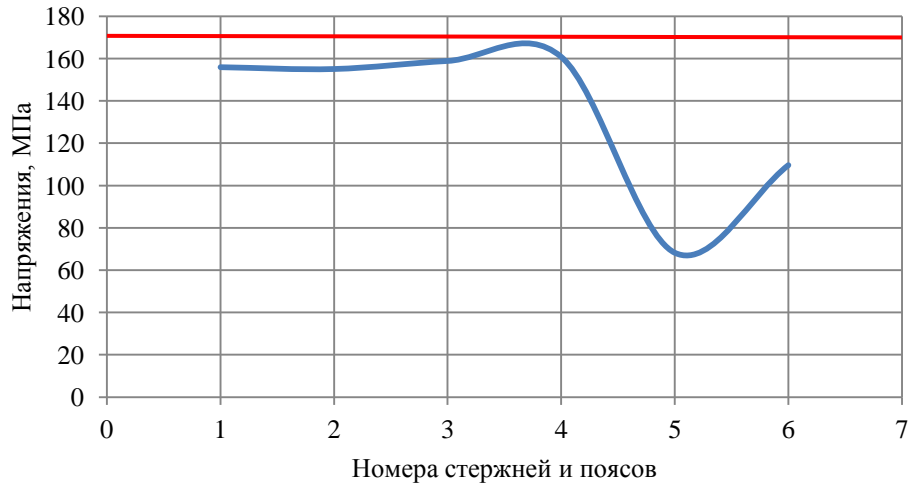


Рисунок 10 – Действующие напряжения в ферме: $L = 18$ м; $h = 3$ м
(красная линия $\sigma_T = 165$ МПа)

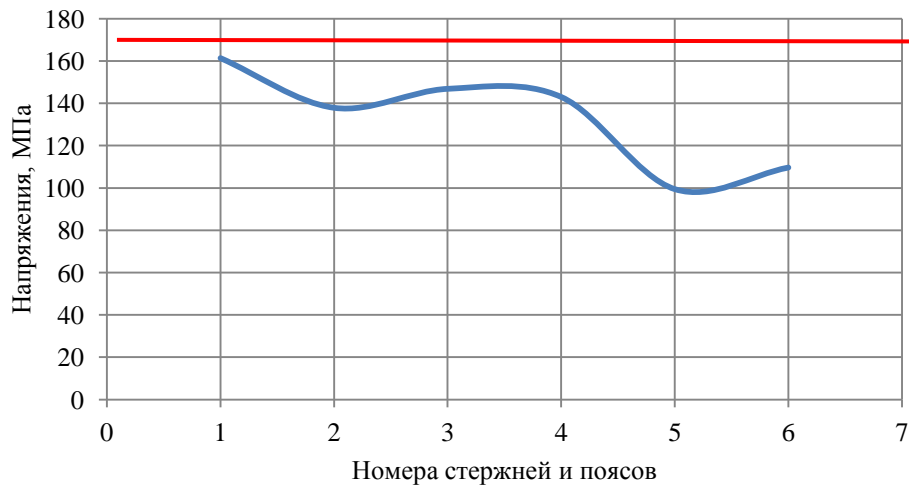


Рисунок 11 – Действующие напряжения в ферме: $L = 18$ м; $h = 2$ м
(красная линия $\sigma_T = 165$ МПа)

Расчет металлических конструкций производился по первому предельному состоянию, то есть по достижению напряжениями в определенных зонах предела текучести металла фермы.

Описание свойств функций плотности распределения $f(\sigma_{ij}, t), f(\varepsilon_{ij}, t)$ возможно при определенном предположении о характере случайных процессов. Учитывая, что тяжелонагруженные машины эксплуатируются в установившихся режимах, то с определенной достоверностью можно предположить, что такие случайные процессы являются стационарными Гауссовскими процессами с математическими ожиданиями

$$\langle \sigma_{ij} \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} \sigma_{ij} f(\sigma_{ij}) d\sigma_{ij}, \quad (11)$$

$$\langle \varepsilon_{ij} \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} \varepsilon_{ij} f(\varepsilon_{ij}) d\varepsilon_{ij}, \quad (12)$$

и дисперсиями

$$\sigma_{ij}^2 = \int_{-\infty}^{\infty} \sigma_{ij}^2 f(\sigma_{ij}) d\sigma_{ij}, \quad (13)$$

$$\varepsilon_{ij}^2 = \int_{-\infty}^{\infty} \varepsilon_{ij}^2 f(\varepsilon_{ij}) d\varepsilon_{ij}, \quad (14)$$

где $\langle \sigma_{ij} \rangle, \langle \varepsilon_{ij} \rangle$ - математические ожидания действующих напряжений, деформаций соответственно.

Плотность распределения вероятностей в этом случае подчинена нормальному закону распределения

$$f(\sigma_{ij}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{ij}^2}} e^{-\frac{(\sigma_{ij}-\langle\sigma_{ij}\rangle)^2}{2\sigma_{ij}^2}}, \quad (15)$$

$$f(\varepsilon_{ij}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\varepsilon_{ij}^2}} e^{-\frac{(\varepsilon_{ij}-\langle\varepsilon_{ij}\rangle)^2}{2\varepsilon_{ij}^2}}. \quad (16)$$

Расчеты проводили для тяжело нагруженного элемента рассматриваемого крана – фермы рамы несущей конструкции мостового металлургического крана грузоподъемностью 300 т. При эксплуатации фермы несущей конструкции крана при подъеме, перемещении и опускании груза изменение действующих напряжений и деформаций является случайным стационарным дифференцируемым процессом с нормальным распределением. Материал рамы – сталь ВСтЗсп5. В результате расчетов были получены следующие значения: нормальное постоянное математическое ожидание напряжений $\langle \sigma_{ij} \rangle = 150$ МПа, деформаций $\langle \varepsilon_{ij} \rangle = 0,785 * 10^{-3}$; дисперсия $\sigma_{ij}^2 \approx 8300$ МПа², предельные напряжения ≥ 165 МПа, предельные деформации $1,219 * 10^{-3}$. Изучение вероятностной динамики характеристик безопасной эксплуатации будем проводить при помощи имитационного моделирования.

Тогда динамику характеристик безопасности эксплуатации и риска можно представить в следующем виде

$$P_S(t) = P\{F(\sigma_{ij})\} = \int \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{ij}^2}} e^{-\frac{(\sigma_{ij}-\langle\sigma_{ij}\rangle)^2}{2\sigma_{ij}^2}} d\sigma_{ij}, \quad (17)$$

$$P_S(t) = P\{F(\varepsilon_{ij})\} = \int \frac{1}{\sqrt{2\pi\varepsilon_{ij}^2}} e^{-\frac{(\varepsilon_{ij}-\langle\varepsilon_{ij}\rangle)^2}{2\varepsilon_{ij}^2}} d\varepsilon_{ij}, \quad (18)$$

$$P_R(t) = 1 - P\{F(\sigma_{ij})\} = 1 - \int \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{ij}^2}} e^{-\frac{(\sigma_{ij}-\langle\sigma_{ij}\rangle)^2}{2\sigma_{ij}^2}} d\sigma_{ij}, \quad (19)$$

$$P_R(t) = 1 - P\{F(\varepsilon_{ij})\} = 1 - \int \frac{1}{\sqrt{2\pi\varepsilon_{ij}^2}} e^{-\frac{(\varepsilon_{ij}-\langle\varepsilon_{ij}\rangle)^2}{2\varepsilon_{ij}^2}} d\varepsilon_{ij}, \quad (20)$$

где $P_S(t), P_R(t)$ – вероятность нахождения конструкции крана в безопасном состоянии (состояние S), опасном состоянии (состояние R).

Результаты расчетных исследований и моделирования представлены на рисунках 12-14.

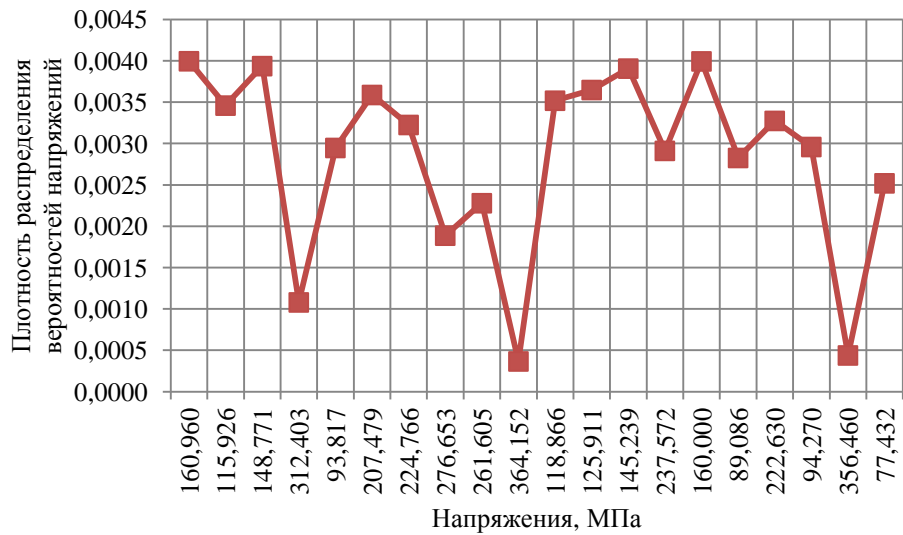


Рисунок 12 - Функция плотности распределения вероятностей от действующих напряжений

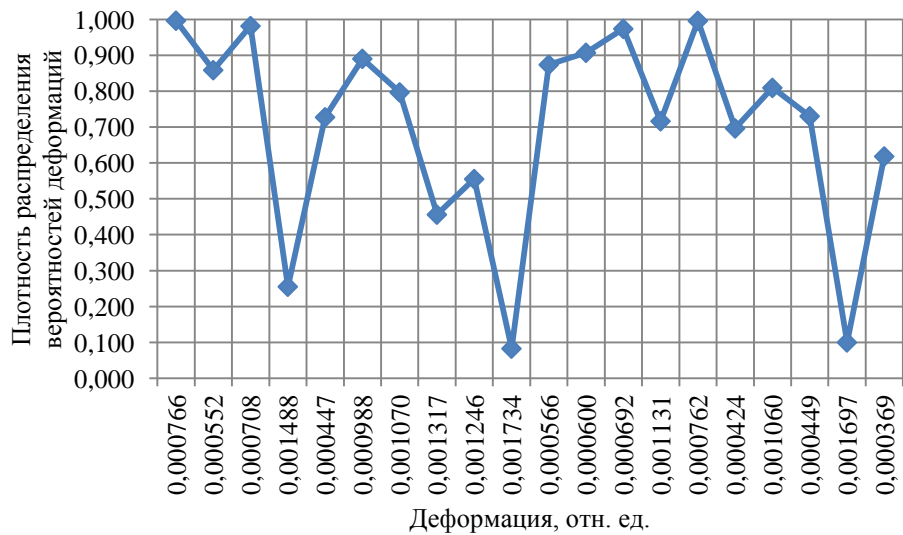


Рисунок 13 - Функция плотности распределения вероятностей от деформаций

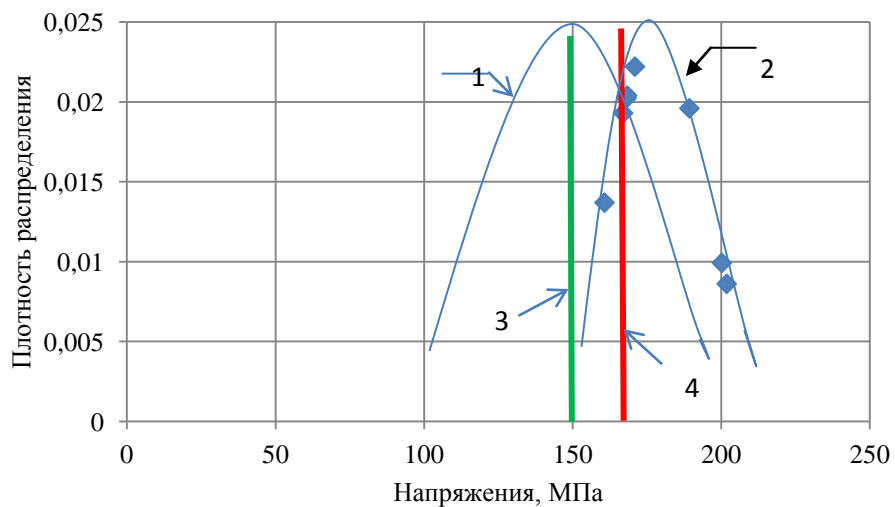


Рисунок 14 – Функция плотности распределения вероятностей действующих напряжений для фермы моста: 1- распределение для математического ожидания действующих напряжений 150 МПа; 2 - распределение действующих напряжений; 3 – напряжение 150 МПа; 4 – напряжение предела текучести σ_T 165 МПа

Полученные смоделированные кривые вероятностной нагруженности крана грузоподъемностью 300 т позволили получить уравнения плотности вероятностей напряжений и деформаций в следующем виде

$$f(\sigma_{ij}) = 0,008e^{-0,006\sigma_{ij}}, \quad (21)$$

$$f(\varepsilon_{ij}) = 0,597e^{\varepsilon_{ij}}. \quad (22)$$

Все коэффициенты полученных моделей статистически значимы по критерию Фишера.

Тогда изменение характеристик безопасной эксплуатации фермы моста металлургического крана можно записать в следующем виде

$$P_S(t) = P\{F(\sigma_{ij})\} = \int 0,008e^{-0,006\sigma_{ij}}d\sigma_{ij}, \quad (23)$$

$$P_S(t) = P\{F(\varepsilon_{ij})\} = \int 0,597e^{\varepsilon_{ij}}d\varepsilon_{ij}, \quad (24)$$

$$P_R(t) = 1 - P\{F(\sigma_{ij})\} = 1 - \int 0,008e^{-0,006\sigma_{ij}}d\sigma_{ij}, \quad (25)$$

$$P_R(t) = 1 - P\{F(\varepsilon_{ij})\} = 1 - \int 0,597e^{\varepsilon_{ij}}d\varepsilon_{ij}. \quad (26)$$

Полученные зависимости позволяют оценить качество конструкции при эксплуатации мостовых металлургических кранов различной нагруженности.

В четвертой главе исследовано использование принципов квалиметрии для оценки риска конструкции, и показано управление техногенным риском как интегральным показателем качества кранового оборудования металлургического предприятия.

Представляется интересным использование аппарата квалиметрии для количественной оценки не только продукции, но и различных объектов металлургического предприятия. К ним можно отнести различное оборудование: прокатные станы, конвертеры, металлургические краны. Последние, как правило, эксплуатируются в насыщенных тяжелых и сверхтяжелых режимах, а также за пределами гарантийных сроков. Рассматривая такие объекты металлургического предприятия как краны, можно сказать, что применить к оценке их качества статистический и экономический подходы затруднительно, а иногда практически невозможно, поскольку объективно отсутствует необходимая информация либо ее получение затруднено.

Рассмотрим конструкцию металлургического мостового крана. Его функция заключается в поднимании, перемещении и опускании грузов. Выделим его основные подсистемы:

- металлоконструкция моста: пролетные и концевые балки главного и вспомогательного мостов; зоны приварки кронштейнов проходных галерей моста к стенкам балок; нижние пояса балок;
- пролетные балки вспомогательного моста;
- траверса механизма главного подъема: крюки; металлоконструкция траверсы;
- храповая передача механизма главного подъема: храповое колесо; собачки; оси крепления собачек; прижимные пружины; осевое крепление храпового колеса.

Учитывая режимы работы исследуемого крана, будем оценивать по критериям надежности и риска каждую группу несущей конструкции. Тогда

уровень надежности конструкции крана P_k , состоящей из уровней надежности ее четырех основных групп P_{ai} , будет определяться следующим образом

$$P_k = \sum_{i=1}^4 P_{ai}, \quad (27)$$

или

$$P_k = \prod_{i=1}^4 P_{ai}. \quad (28)$$

В каждой группе несущей конструкции крана выделим элементы с наименьшими p_1 и наибольшими p_2 уровнями надежности, причем ($p_2 > p_1$). Уровни надежности p_1 и p_2 с позиции квалиметрии будем считать единичными показателями доминирующего свойства такого объекта, то есть его конструкционной безопасности. Введем понятие комплексного и интегрального показателя конструкционной безопасности исследуемого объекта. Таким показателем может являться закон распределения вероятностей уровней надежности в группах конструкций.

Введем показатель качества металлургического крана – закон равномерной плотности, математическая модель которого представлена в виде выражения

$$f(p) = \frac{1}{p_2 - p_1}. \quad (29)$$

Математическое ожидание надежности элементов основных конструкций крана определяется по следующей формуле

$$m_p = \frac{p_1 + p_2}{2}, \quad (30)$$

а дисперсия вычисляется

$$D_p = \frac{(p_2 - p_1)^2}{12}. \quad (31)$$

В процессе эксплуатации математическое ожидание уменьшается, то есть смещается влево. Причины здесь могут быть самые различные: от снижения несущей способности конструкций до ошибок персонала, который их эксплуатирует.

В конкретный момент времени показателями качества технического состояния несущей конструкции металлургического крана будут являться величины уровней надежности и их математическое ожидание. Таким образом, можно определить среднее значение риска аварии R , которое в соответствии с принципами квалиметрии можем принять за интегральный показатель качества рассматриваемого объекта металлургического предприятия

$$R = 1 - \prod_{i=1}^n m_{pi}, \quad (32)$$

где n – количество элементов в группе, $n = 15$.

Таким образом, задача количественной оценки объекта сведется к задаче определения уровней надежности элементов в группе конструкций. В связи с отсутствием статистических данных по надежности несущих конструкций металлургических кранов будем использовать правило, построенное на основе лингвистической переменной «очень». Значение фактического риска аварии позволяет отнести техническое состояние элемента конструкции крана к одному из трех возможных состояний (таблица 2).

Таблица 2 - Значения риска для элемента конструкции

Нормальный риск	Предельно-допустимый риск	Катастрофический риск
0,159	0,521	0,749

Данные, приведенные в таблице 2, получены путем компьютерного моделирования риск-ситуаций элемента конструкции.

В результате для каждой из четырех групп конструкции крана получены уровни надежности (рисунок 15).

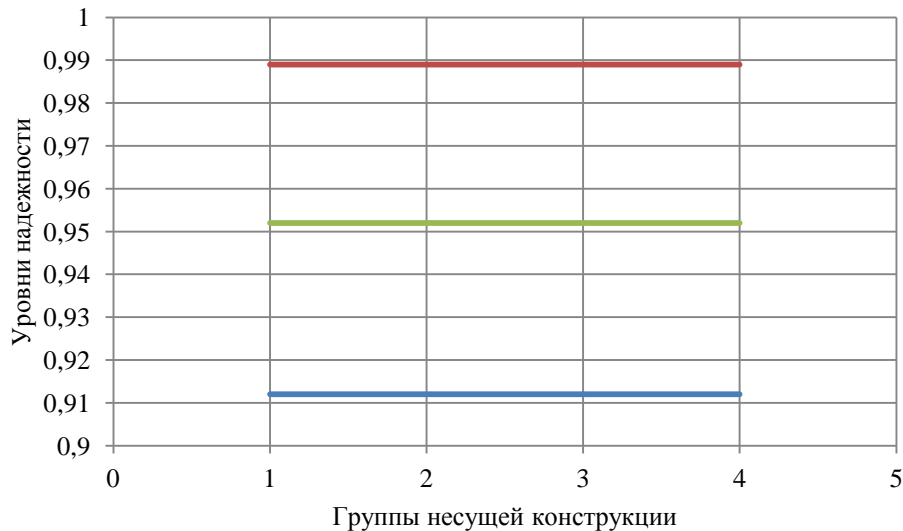


Рисунок 15 – Уровни надежности для четырех групп несущей конструкции крана

В результате эксплуатации уровни надежности снижаются, тем самым снижая безопасный ресурс металлургического крана. Если по истечению безопасного ресурса и после проведения промежуточных и генеральных обследований будут проведены ремонтно-восстановительные работы с учетом указанных уровней надежности (рис. 15), то кран можно будет эксплуатировать. Если этого не учитывать, то дальнейшая эксплуатация может привести к авариям, катастрофам, и, соответственно, к ущербам, которые могут быть несоизмеримо выше стоимости ремонтно-восстановительных работ. Данный квалиметрический метод упростит работу экспертов при принятии решения об эксплуатации такого металлургического объекта и обеспечит экономический эффект, который может быть сопоставим с ценой нового металлургического крана и ввода его в эксплуатацию.

При помощи имитационного моделирования были получены значения риска конструкции (рисунок 16).

На рисунке 16 зеленая линия указывает нормальный риск (вероятность 0,159), оранжевая линия – на предельно-допустимый риск (вероятность 0,521), красная линия – на предельный риск (вероятность 0,749). Моделирование проводилось по формуле (32).

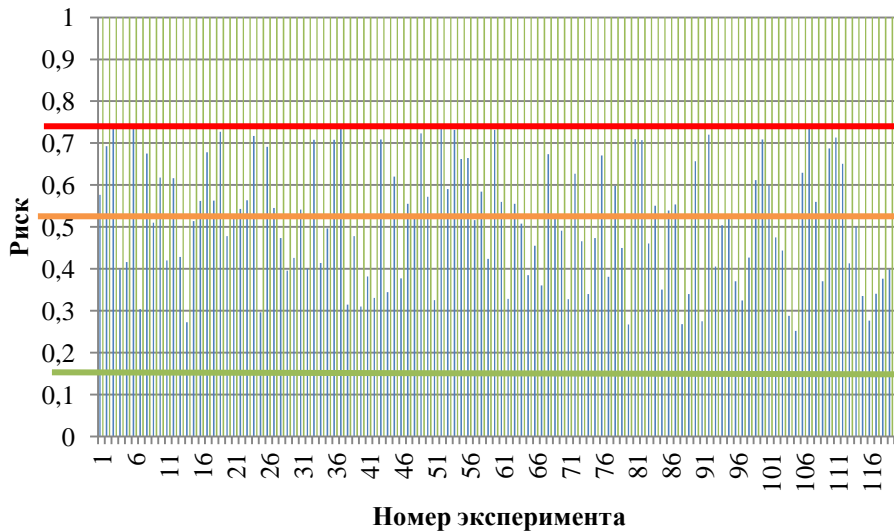


Рисунок 16 – Вычислительный эксперимент

В пятой главе выполнено расчетное обоснование оценки качества объектов металлургического предприятия на примере металлургического крана и приведен критический анализ ГОСТ 28609-90 «Краны грузоподъемные. Основные положения расчета», «РД 10-112-6-03. Методических указаний по обследованию специальных металлургических кранов». Для кранов металлургического предприятия предусмотрены следующие виды экспертного обследования: промежуточное экспертное обследование (ПЭО) и генеральное экспертное обследование (ГЭО).

Выработка нормативного срока службы оценивается по текущему значению характеристического числа N_{ϕ} , которое определяется как произведение величины расчетного коэффициента нагружения K_p числа циклов работы крана за срок эксплуатации C_T

$$N_{\phi} = K_p C_T. \quad (33)$$

Стандарты, распространяющиеся на краны мостового типа, устанавливают рекомендуемые основные положения их расчета, который обеспечивает их надежность при эксплуатации. Для оценки надежности кранов мостового типа используются методы предельных состояний в детерминированной форме для металлических конструкций и допускаемых напряжений для механизмов. Вместе с тем при наличии необходимых исходных данных допускается для расчета кранов и их элементов применять вероятностные методы. В этом случае за предельное напряжение принимают нормативные значения предела прочности, предела текучести или предела выносливости. Также рекомендуется металлические конструкции рассчитывать по методу предельных состояний по исчерпанию конструкцией несущей способности и по достижению условий, нарушающих нормальную эксплуатацию.

При исследовании металлоконструкции крана необходимым выглядит достижение состояния, при котором дальнейшее увеличение нагрузок приведет к переходу конструкции или его элемента в изменяемую систему (например, достижения напряжениями в определенных зонах сечения значения предела текучести).

Оценить возможные угрозы и уязвимости, а также проанализировать потенциальные дефекты позволяет анализ FMEA (Failure Mode and Effects Analysis, анализ видов и последствий отказов). FMEA имеет достаточно широкое применение на машиностроительных предприятиях. Однако, как представляется, даже этот метод не лишен некоторых недостатков. К ним можно отнести не слишком высокую достоверность результатов при эксплуатации, то есть с какой-либо наработкой, потому как он изначально разработан для элементов при проектировании и производстве. Кроме того, FMEA более всего подходит для элементов невысокой сложности. Также, в стандартах регламентировано, что при высокой сложности оборудования FMEA должен применяться в совокупности с другими методами.

Изучив катастрофические события в ПАО «ММК» 1947, 1967, 1987 и 2008 годов (обрыв траверсы сталь-ковша, разлив металла, отрыв крюка, излом несущей конструкции, гибель людей), можно рассчитать риск как $(1/20)$, то есть одна катастрофа в 20 лет. Экономический ущерб невозможно сопоставить, но, выразив через условные денежные единицы, получим значение критического или катастрофического риска в этом случае ($R_c(t) = 5000$) в условных единицах. Тогда критическое качество $K_c(t) = 0,0002$ условных единиц в степени «минус 1».

Таким образом, для кранов металлургического предприятия в процессе эксплуатации и за пределами гарантийных сроков можно предложить следующий алгоритм оценки их качества по критериям риска:

- анализ всей информации и документации по конструкции крана;
- оперативная диагностика и экспертное обследование;
- анализ механизмов деградации и эскалации повреждений;
- оценка качества в баллах или условных единицах по критериям нормального риска, приемлемого риска, критического (катастрофического) риска;
- принятие решение по крану: капитально-восстановительный ремонт, снижение рабочих параметров эксплуатации и дальнейшая эксплуатация, демонтаж или утилизация.

На основе ранее проведенных исследований с учетом экономической составляющей удалось нормировать качество эксплуатирующегося мостового металлургического крана кислородно-конвертерного цеха (ККЦ) ПАО «ММК» (рисунок 17).

Нормальному качеству соответствует 120 единиц и выше; предельно-допустимому 1,7678 единицы и критическому (катастрофическому) 0,0137 единицы.

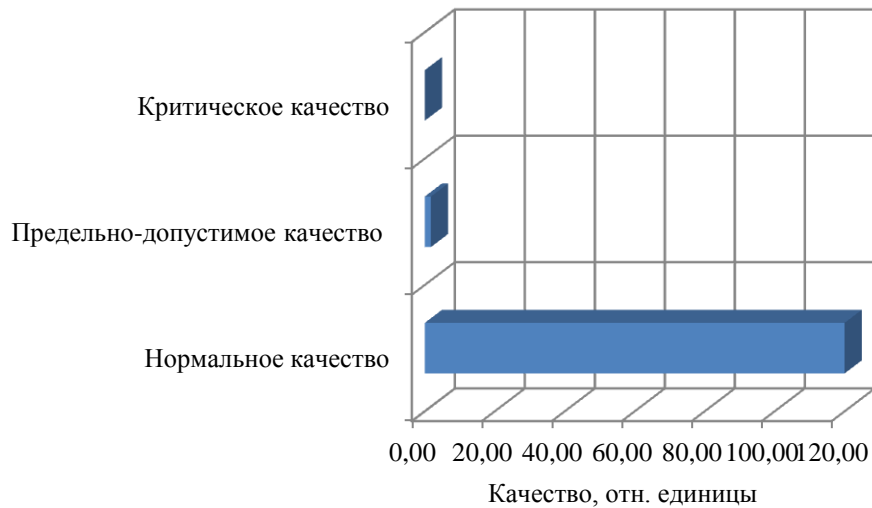


Рисунок 17 - Нормирование качества мостового металлургического крана кислородно-конвертерного цеха ПАО «ММК»

Таким образом, на основе имеющегося нормирования можем определить текущее фактическое техническое состояние металлургического крана. Данные значения качества позволяют связать количество отработанных циклов, действующие ранее напряжения и деформации, построить таблицы для оценки качества крана. Это позволит уточнить значение характеристического числа для оценки нормативного срока службы, оценки несущей способности конструкции и применения алгоритма оценки качества.

Состояние несущей способности S конструкции можно характеризовать координатами точки в четырехмерном пространстве, а ее развитие или деградация будет характеризоваться ее настоящим. В таком пространстве всегда будут находиться области, которые связаны с большим риском для конструкции. Эти области будем называть джокерами (правилами), в соответствии с которыми конструкция с некоторой вероятностью $P(t)$ может совершить скачок, то есть переход в некоторую точку русла или к другому джокеру. Джокер при этом может резко изменить диаграмму бифуркаций и (или) подавить возникновение хаоса. Необходимо найти такую область, где возможно предсказать динамику изменения состояния несущей способности конструкции. Такая задача представляется трудноразрешимой, но это можно описать следующим образом.

Считаем, что несущую способность конструкции определяет большое количество переменных: усталость несущей конструкции, различные дефекты, в том числе, накопленные, количество циклов нагружения, превышающее допустимые нормы, а также действующие при этом напряжения и деформации и др. Найдем проекцию малой размерности ортонормальных векторов, которые будут определять динамику несущей способности исследуемой конструкции. Тогда, очевидно, можем записать

$$S(t) = F(\vec{N}, \vec{\sigma}, \vec{\varepsilon}), \quad (34)$$

где \vec{N} – вектор циклов, которые приобретает конструкция в процессе эксплуатации, $\vec{\sigma}, \vec{\varepsilon}$ – вектор действующих напряжений и деформаций, соответственно.

Из эксплуатационной документации можем принять эти три вектора как основные, определяющие динамику несущей способности конструкции, ее надежность P или риск R аварии в интегральном смысле для всей конструкции.

Учитывая это, полагаем, что несущая способность конструкции будет находиться или следовать правилам (джокерам):

G_1 - несущая способность конструкции нормальная (надежность всех элементов больше или равна 0,841);

G_2 - несущая способность конструкции предельно-допустимая (надежность всех элементов больше или равна 0,479);

G_3 - несущая способность конструкции катастрофическая (надежность всех элементов меньше или равна 0,250).

Тогда можно записать, что несущая способность конструкции может быть подчинена вышеуказанным правилам, то есть

$$S = F(\vec{G}_1, \vec{G}_2, \vec{G}_3). \quad (35)$$

Джокеры представлены в векторной форме.

В настоящее время анализ русел и джокеров представлен только в терминах алгебры логики. Предложенный подход, как представляется, является достаточно перспективным и расширяет возможности нелинейной динамики для каждой конкретной ситуации и конструкции.

Используя имеющиеся данные численных и расчетных данных количества циклов, напряжений и деформаций, а также предложенный метод исследования, представим динамику несущей способности конструкции металлургического крана, состоящего из четырех основных подсистем. Несущая способность конструкции может быть представлена в матричной форме таблица 3.

Таблица 3 - Несущая способность крана в процессе эксплуатации

Годы эксплуатации	G1	G2	G3
0	0,84	0,48	0,25
15	0,43	0,35	0,24
25	0,32	0,29	0,39

В матрицах указана вероятность надежной (безаварийной) эксплуатации конструкции металлургического крана. На рисунке 18 представлена диаграмма безаварийной эксплуатации металлургического крана в зависимости от срока его эксплуатации.

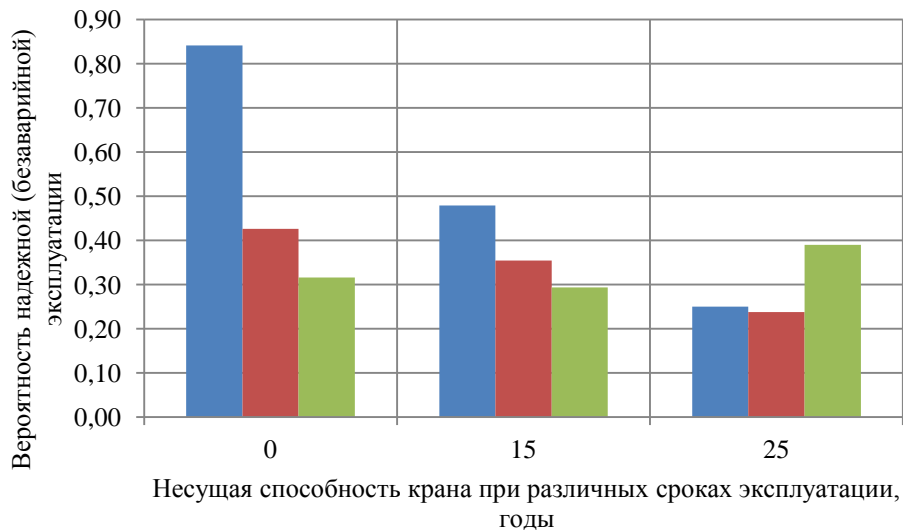


Рисунок 18 – Несущая способность конструкции

Из представленной диаграммы можно проследить за изменением несущей способности конструкции и увидеть, что через 25 лет эксплуатации в тяжелых и сверхтяжелых режимах работы будет все больше прослеживаться джокер (правило) G3. Учитывая, что средний возраст эксплуатации кранов металлургического предприятия составляет 25-30 лет, то предложенный подход достаточно адекватно описывает реальную ситуацию. Таким образом, можно управлять состоянием несущей способности большой конструкции, устанавливая уровень технического обслуживания либо постоянного дистанционного мониторинга. В результате проведенных исследований был рассчитан срок ресурса после гарантийной эксплуатации для металлургического крана с заданными характеристиками приблизительно в 5 лет с последующей его экспертизой и принятием решения о дальнейшей эксплуатации.

Используя теорему о Марковских случайных процессах, найдены предельные вероятности в стационарном (установившемся) режиме, то есть при $t \rightarrow \infty$. В состоянии S1 (исправное) конструкция будет находиться 48,4% времени; в состоянии S2 (незначительно неисправное) – 30,3% времени; в состоянии S3 (существенно неисправное) – 20,3% времени; в состоянии S4 (аварийное) – 1,0% времени. В этом случае модель принятия решений оценки качества оборудования будет включать стратегию управления риском и оценки экономического эффекта от эксплуатации объекта металлургического предприятия, как составляющих его качества.

Предлагаются следующие модели.

1) Модель гарантированной надежности и ее экономическая составляющая

$$D_1 = (C - Z(p))n_0. \quad (34)$$

Это тот случай, когда кран, отработавший гарантийный срок эксплуатации более не эксплуатируется. Достоинством такой модели является то, что не нужен мониторинг. Недостаток заключается в том, что время до аварии может быть маленьким, собственник может отказаться от эксплуатации, хотя на самом деле объект может находиться в работоспособном состоянии.

Риск аварии объекта тогда будет определяться по формуле

$$R(t) = (1 - p)^{n_0}. \quad (35)$$

2) Модель штатных аварий. При проектировании кранов обязательно учитываются так называемые штатные или нормальные аварии. Тогда экономическая составляющая в отличие от (34) становится случайной величиной с математическим ожиданием, определяемым как

$$\bar{D}_2 = \sum_{m=0}^T m [(C - Z(p))p(m|n) - p(m|n)L], \quad (36)$$

где T - время эксплуатации крана, L - стоимость ликвидации последствий аварии.

В этом случае, если хорошо отработана система технического обслуживания ($p > \frac{1}{2}$), аварии можно избежать. Управление риском в этом случае сводится к выбору режима технического обслуживания и проектного срока эксплуатации.

3) Модель идеального мониторинга. В предыдущем случае было необходимо в штатном режиме ликвидировать последствия крупной аварии. В этом случае если мы будем обладать системой идеального мониторинга, то в критической ситуации нужно будет просто прекратить эксплуатацию крана. Предполагая, что такая высокоэффективная система мониторинга в единицу времени требует затрат N , то экономическая составляющая в среднем составит

$$\bar{D}_3 = (C - Z(p) - N) \sum_{m=0}^{\infty} m * p(m, n). \quad (37)$$

Рассмотренные модели подразумевают, что величины p , $Z(p)$, L , C , N существенно не меняются за время эксплуатации крана. Однако, практика показывает, что это не совсем так. Количество аварий на металлургических предприятиях показывает, что технические, социальные, психологические, экономические и показатели конструкционного риск-анализа становятся наиболее существенными.

Считая, что из 756 мостовых кранов в ПАО «ММК» 620 работают за пределами гарантийных сроков, а 136 эксплуатируются нормативно, приведем модельные расчеты их экономической эффективности.

Суммарный средний за 15 лет эксплуатации ущерб может быть оценен по следующей формуле

$$\bar{U} = N * G * \tilde{C}, \quad (38)$$

где N - количество эксплуатирующихся кранов, G - срок гарантийной эксплуатации, \tilde{C} - нижняя граница суммарного ущерба.

Тогда для всей совокупности мостовых кранов:

$$\bar{U} = N * G * \tilde{C} = 756 * 15 * 2,1 = 23814 \text{ условных единиц (усл. ед.)}. \quad 1 \text{ усл. ед.} - 1000 \$.$$

Для всей совокупности кранов, а также с учетом их эксплуатационных нагрузок (напряжения и деформации) и режимов работы рассчитаем средние ущербы для трех типов аварий:

- первый тип соответствует 2382 авариям;
- второй тип - 239 авариям;

- третий тип - 24 катастрофам.

Получены важные показатели, но все-таки представляется достаточно серьезным, что может произойти 24 аварии катастрофического типа. Тогда, принимая $n_0 = 15$, $p = 0.107$; рассчитаем приемлемый риск по формуле

$$R(t_0) = (1 - 0.107)^{15} = 0.183.$$

Тогда, принимая в среднем $C = 100000$ усл. ед., получим

$$D_1 = (100000 - 23814) * 15 = 1142790 \text{ усл. ед. } \bar{D}_2 = 1260856 \text{ усл. ед.} \\ \bar{D}_3 = 378360 \text{ усл. ед.}$$

На основании вышеупомянутых предположений о трех моделях принятий решений в управлении риском аварий объектов металлургического предприятия необходимо принять модель – модель штатных аварий, в том числе и с учетом экономической составляющей.

При использовании второй модели принятие решений управления риском сводится к выбору технического обслуживания и установлению проектного срока эксплуатации, а также приемлемого уровня риска. Если говорить об авариях различных типов, то такая модель предполагается наиболее оптимальной.

Предложенный подход может явиться научно-методической базой для создания новых систем оценки качества, диагностики и мониторинга опасных производственных объектов с использованием так называемых цифровых двойников, которые будут оценивать их техническое состояние и принимать решение о продлении ресурса и обеспечения безопасной эксплуатации с продленным ресурсом. Такие системы мониторинга и прогнозирования позволят будут своевременно получать информацию о фактическом техническом состоянии технической системы и принятии решения о продлении эксплуатации или вывода из нее.

Используя предложенный подход, представляется возможным построение вероятностных моделей для технической системы (краны), группы систем (цеха), сложной системы (металлургическое предприятие), связывающие их свойства и вероятность их отказа, ведущего к аварии. Свойства таких систем изменяются с течением времени. Диагностика и мониторинг фиксирует эти изменения. Для прогнозирования изменения технических систем будем использовать функцию плотности вероятностей циклов нагружения, действующих напряжений, деформаций в несущих конструкциях.

В общем случае можно записать условие оценки качества технической системы в следующем виде

$$\vec{O} = \vec{Y}(N, \sigma, \varepsilon); \vec{Z}(N, \sigma, \varepsilon); \vec{W}(N, \sigma, \varepsilon), \quad (39)$$

где \vec{O} – вектор оценки качества, \vec{Y} – вектор контролируемых параметров, \vec{Z} – вектор корректирующих воздействий, \vec{W} – вектор управляющих воздействий, N – количество циклов крана, σ – действующие напряжения в несущих конструкциях, ε – действующие деформации в несущих конструкциях.

В **Заключении** изложены выводы по работе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного диссертационного исследования были получены следующие результаты:

1. Построены концептуальные модели анализа, синтеза и оптимизации состояния качества основных конструкций кранов на основе риск-анализа. Такой подход применен впервые для оценки качества кранов металлургического предприятия. Использование этих моделей позволило впервые для таких объектов представить качество как функцию от риска аварий и их ущерба. Предложенная методология является одним из направлений развития научных основ выбора и оценки показателей качества объектов металлургического предприятия с использованием конструкционного риск-анализа, показывает эффективность в сравнении с международными и отечественными аналогами.

2. Определены показатели надежности, безопасности и экономической эффективности, которые характеризуют качество кранов металлургического предприятия в современных условиях. С целью снижения размерности задачи проведена свертка единичных показателей надежности и безопасности и экономических показателей. Она позволила снизить размерность задачи с 15 показателей до 9 и выделить наиболее значимые из них. При проведении свертки был использован метод главных компонент, что расширило и показало адекватность его применения.

3. Исследованы аналитически и численно закономерности и связи, характеризующие напряженное состояние и вероятность разрушения крана металлургического предприятия. Расчеты проводились по первому предельному состоянию, то есть по достижению действующих напряжений предела текучести материала. Это позволило оценить качество конструкции крана одним числом, что существенно упрощает его нормирование.

4. Разработан научно-обоснованный квалиметрический метод оценки надежности и риска основных конструкций кранов металлургического предприятия, описывающего их фактическое техническое состояние, исходя из понятий «нормальный риск», «предельно-допустимый риск», «предельный риск (катастрофический риск)». Показано, что риск аварии является интегральной характеристикой качества.

5. Разработан математический аппарат и алгоритм риск-анализа для организационных и методических подходов (мероприятий) в оценке качества и безопасности кранов металлургического предприятия. Дан критический анализ существующих стандартов оценки качества кранов металлургического предприятия, предлагается их расширение, дополнение или совместное использование с предложенным подходом. Введены новые понятия джокеры и русла для оценки состояния качества конструкции, что расширяет применение нелинейной динамики.

6. Практическая ценность подтверждена актами внедрения и принятия к использованию результатов диссертационного исследования ряда промышленных предприятий и учреждений, а также в ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» для подготовки обучающихся по направлениям 01.03.02, 22.03.02, 18.04.01, 01.04.02, 15.04.02, 01.06.01.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Извеков, Ю.А. Анализ техногенной безопасности кранового хозяйства России / Ю.А. Извеков // Современные наукоемкие технологии. - 2012. - № 12. - URL: <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=31121> (дата обращения: 08.09.2021).
2. Крылова, Е.А. О подходе к оценке техногенной безопасности металлургического производства / Е.А. Крылова, Ю.А. Извеков // Успехи современного естествознания. - 2012. - № 6. - URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=30349> (дата обращения: 08.09.2021).
3. Извеков, Ю.А. Оценка упругопластической деформации на основе метода преобразования вероятностей / Ю.А. Извеков, Т.Г. Кузина // Современные проблемы науки и образования. - 2013. - № 6. - URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=10810> (дата обращения: 08.09.2021).
4. Извеков, Ю.А. Анализ динамики и вопросы оптимизации металлургических мостовых кранов / Ю.А. Извеков, Е.В. Кобелькова, Н.А. Лосева // Фундаментальные исследования. - 2013. - № 6-2. - URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=31494> (дата обращения: 08.09.2021).
5. Извеков, Ю.А. Определение вероятности отказа механической конструкции с учетом рассеяния прочностных характеристик ее материала / Ю.А. Извеков, Н.В. Банатурский // Современные проблемы науки и образования. - 2015. - № 1-1. - URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=18368> (дата обращения: 08.09.2021).
6. Извеков, Ю.А. Математическое моделирование накопления повреждений конструкции при установившемся режиме нагружения / Ю.А. Извеков, Е.А. Пузанкова, И.В. Глаголева // Современные проблемы науки и образования. - 2015. - № 2-2. - URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=23228> (дата обращения: 08.09.2021).
7. Извеков, Ю.А. Расчетная модель потенциальных зон разрушения несущих конструкций металлургических кранов / Ю.А. Извеков, Е.М. Гугина // Международный научно-исследовательский журнал. - 2017. - № 12–5 (66). - С. 88-90.
8. Оценка рисков потенциально опасных металлургических объектов за пределами гарантийных сроков эксплуатации в менеджменте качества промышленного предприятия / Ю.А. Извеков, Е.М. Гугина, А.Л. Анисимов, В.В. Шеметова // Современные наукоемкие технологии. - 2018. - № 11-2. - С. 179-182.
9. Извеков, Ю.А. Снижение размерности в задачах оценки качества мостовых кранов металлургического предприятия / Ю.А. Извеков, А.Л. Анисимов, В.В. Шеметова // Современные наукоемкие технологии. - 2019. - № 3-2. - С. 171-176.
10. Модельный анализ характеристик ущерба сложных технических систем металлургического предприятия / Е.А. Москвина, Ю.А. Извеков, Е.М.

Гугина, В.В. Шеметова // Современные наукоемкие технологии. - 2019. - № 3-2. - С. 217-221.

11. Извеков, Ю.А. Модель принятия решений в управлении риском аварий объектов металлургического предприятия / Ю.А. Извеков, Л.А. Грачева // Современные наукоемкие технологии. - 2020. - № 2. - С. 20-24.

12. Извеков, Ю.А. Стандартизация оценки качества специальных металлургических кранов на основе конструкционного риск-анализа / Ю.А. Извеков // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. - 2021. - Т. 23. - № 2. - С. 37-41.

13. Извеков, Ю.А. Квалиметрический метод оценки качества объектов металлургического предприятия / Ю.А. Извеков, М.Ю. Наркевич // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. - 2021. - Т. 23. - № 2. - С. 42-45.

14. Извеков, Ю.А. Научно-методическая база оценки качества технических систем металлургического предприятия / Ю.А. Извеков // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. - 2021. - Т.19. - №2. - С. 98-102. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-2-98-102>.

15. Анализ эффективности существующей системы оценки качества материалов, изделий и конструкций на опасных производственных объектах / М.Ю. Наркевич, В.Д. Корниенко, О.С. Логунова, М.А. Полякова, Ю.А. Извеков // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. - 2021. - Т.19. - №2. - С. 103-111. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-2-103-111>.

Публикации в изданиях, входящих в наукометрические базы Web of Science и Scopus:

1. Izvekov, Yu.A. Mathematical modeling and calculation of accuracy and durability of mechanical systems elements / Yu.A. Izvekov, V.V. Dubrovsky, E.Yu. Khamutskikh // World Applied Sciences Journal. - 2014. - Vol. 30. - № 1. - P. 32-34.

2. Mathematical evaluation of mechanical construction safe loading / Yu.A. Izvekov, E.V. Kobelkova, N.A. Loseva, V.V. Dubrovsky, E.Yu. Khamutskikh // Journal of Industrial Pollution Control. - 2015. - Vol. 31. - № 1. - P. 115-118.

3. Mathematical definition of durability of a mechanical system in case of extreme loading conditions / Yu.A. Izvekov, E.V. Kobelkova, N.A. Loseva, E.Yu. Khamutskikh, I.V. Glagoleva // International Journal of Pure and Applied Mathematics. - 2016. - Vol. 107. - № 3. - P. 661-666.

4. Izvekov, Yu.A. Analysis and evaluation of technogenic risk of technological equipment of metallurgical enterprises / Yu.A. Izvekov, E.M. Gugina, V.V. Shemetova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2018. - Vol. 451. - P. 012177.

5. Izvekov, Yu.A. Technogenic risk control / Yu.A. Izvekov, E.M. Gugina, V.V. Shemetova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2018. - Vol. 451. - P. 012178.

6. Izvekov, Yu.A. Structural Risk Analysis as Basis for Quality Control of Metallurgical Systems / Yu.A. Izvekov, E.M. Gugina, V.V. Shemetova // Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering. - ICIE 2018. - Lecture

Notes in Mechanical Engineering. - Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-95630-5_182.

7. Izvekov, Yu.A. Risk acceptance criteria for complex technical systems / Yu.A. Izvekov, E.A. Puzankova, I.A. Vakhrusheva // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2019. – Vol. 687. - Issue 6. - P. 066007.

8. Izvekov, Yu.A. Mathematic modelling of reliability, safety and risk indicators related to equipment elements existing at iron and steel enterprises / Yu.A. Izvekov, O.A. Torshina. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2019. – Vol. 687. - Issue 6. - P. 066008.

9. Izvekov, Yu.A. Dynamic Pattern of Safe Operation Indicators for Heavy-Duty Machines / Yu.A. Izvekov, V.V. Dubrovsky, A.L. Anisimov // Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). - ICIE 2019. - Lecture Notes in Mechanical Engineering. - Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22041-9_64.

10. Izvekov, Yu.A. Probability calculation applied to potential failure zones of the bridge girder of metallurgical crane / Yu.A. Izvekov, V.V. Dubrovsky, A.A. Stupak // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 971. - 042012. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/971/4/042012>.

11. Probabilistic modeling of crack growth in large structures / Yu. Izvekov, O. Torshina, A. Anisimov, G. Kameneva, T. Bondarenko // MATEC Web Conf. – 2020. – 329. - 03021. <https://doi.org/10.1051/matecconf/202032903021>.

Монографии:

1. Извеков, Ю.А. Риск-анализ оборудования металлургических производств. Подход. Концепция. Анализ / Ю.А. Извеков. – Saarbrücken: Lap Lambert, 2013. – 56 с.

2. Извеков, Ю.А. Прогнозирование надежности несущих конструкций кранов металлургических производств. В книге: Вопросы. Гипотезы. Ответы: Наука XXI века: коллективная монография / Ю.А. Извеков. – Краснодар: Издательство Априори, 2013. - С. 189-211.

3. Извеков, Ю.А. Метод открытого риск-анализа элементов несущих конструкций кранов металлургических производств. В книге: Вопросы. Гипотезы. Ответы: Наука XXI века: коллективная монография / Ю.А. Извеков, Л.А. Грачева // Краснодар: Издательство Априори, 2017. - С. 127-143.

Публикации в иных изданиях:

1. Бархоткин, В.В. Обзор аварий на крановом оборудовании металлургических производств / В.В. Бархоткин, Ю.А. Извеков, С.Р. Миникаев // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. - 2013. - № 10-1. - С. 9-11.

2. Извеков, Ю.А. Прогнозирование долговечности механических систем корреляционным методом / Ю.А. Извеков, Д.А. Бирюков // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. - 2014.- № 3-1. - С. 57-60.

3. Извеков, Ю.А. Вероятностный синтез сложной механической системы / Ю.А. Извеков // Молодой ученый. – 2014. - № 4. - С. 179-182.

4. Извеков, Ю.А. Обоснование расчета долговечности механической системы спектральным методом / Ю.А. Извеков, Л.А. Изосова, Э.И. Абдрахманов // Молодой ученый. - 2014.- № 5(64). - С. 63-65.

5. Численный расчет долговечности механической системы спектральным методом / Ю.А. Извеков, Л.А. Изосова, Е.В. Кобелькова, Н.А. Лосева // Молодой ученый. - 2014.- № 5(64). - С. 65-67.

6. Извеков, Ю.А. Анализ научно-методического аппарата и современных подходов к оценке безопасности сложных механических систем / Ю.А. Извеков, Л.А. Грачева // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. - 2014. - № 8-4. - С. 9-10.

7. Бархоткин, В.В. Запас прочности / В.В. Бархоткин, Ю.А. Извеков, С.Р. Миникаев // ТехНадзор. - 2014. - № 6 (91). - С. 86-87.

Публикации в сборниках трудов конференций:

1. Извеков, Ю.А. Методология прогнозирования риска металлургического производства как сложной социально-природно-техногенной системы / Ю.А. Извеков, Н.А. Лосева // В сборнике: Актуальные проблемы современной науки, образования и культуры. Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Сибай - 2012. - С. 352-354.

2. Извеков, Ю.А. Моделирование прогнозирования риска несущих конструкций кранов металлургического производства / Ю.А. Извеков // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова. - 2012. – Т. 1. - № 70. - С. 6-8.

3. Извеков, Ю.А. Математическое моделирование оценки упругопластической деформации несущих конструкций механических систем / Ю.А. Извеков // В сборнике: Современные тенденции в образовании и науке. Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции: в 26 частях. Тамбов - 2013. - С. 57-58.

4. Извеков, Ю.А. Аналитическая оценка пластической деформации несущих конструкций металлургических мостовых кранов / Ю.А. Извеков, Е.В. Кобелькова, Н.А. Лосева // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова. - 2013. - Т.1. - № 71. - С. 48-51.

5. Извеков, Ю.А. Междисциплинарный подход к оценке безопасности основных металлургических производств / Ю.А. Извеков // В сборнике: Актуальные вопросы в научной работе и образовательной деятельности. Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции: в 10 томах. Тамбов - 2015. - С. 72-73.

6. Извеков, Ю.А. О междисциплинарном подходе к оценке техногенной безопасности / Ю.А. Извеков, Е.В. Рыбалко, С.С. Хрипунова // В сборнике: Актуальные вопросы технических наук. Материалы IV Международной научной конференции. Краснодар – 2017. - С. 66-67.

7. Прогнозирование механических характеристик углеродистой проволоки с использованием разложения в ряд Фурье / Е.В. Рыбалко, С.С. Хрипунова, М.А. Полякова, Ю.А. Извеков // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. Магнитогорск – 2017. - Т.1. - С. 159-162.

8. Извеков, Ю.А. Математическое моделирование конструкционного риска сложных механических систем / Ю.А. Извеков, Е.М. Гугина // В сборнике

конференции «Дифференциальные уравнения и смежные проблемы». Стерлитамак – 2018. - Т.2. - С. 208-211.

9. Извеков, Ю.А. Совершенствование методологии повышения качества кранового оборудования металлургических предприятий на основе теории риск-анализа / Ю.А. Извеков // Сборник «Живучесть и конструкционное материаловедение» (ЖивКом - 2018). Научные труды 4-ой Международной научно-технической конференции, посвященной 80-летию ИМАШ РАН. Москва. - 2018. - С. 124-125.

10. Извеков, Ю.А. Конструкционный риск-анализ сложных механических систем / Ю.А. Извеков, Л.А. Грачева // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. Тезисы докладов 76-й международной научно-технической конференции. Магнитогорск - 2018. - С. 164-165.

11. Извеков, Ю.А. Оценка качества технологического оборудования машиностроительных производств / Ю.А. Извеков, Т.Г. Никонова // Инновации в машиностроении. Сборник трудов IX Международной научно-практической конференции. Под редакцией А.М. Маркова, А.В. Балашова, М.В. Доц. Барнаул - 2018. - С. 233-237.

12. Извеков, Ю.А. Метод количественной оценки риска аварии объекта / Ю.А. Извеков, Е.М. Гугина // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. Тезисы докладов 77-й международной научно-технической конференции. Магнитогорск - 2019. - С. 122.

13. Izvekov, Yu.A. Quantitative evaluation algorithm for technical system reliability / Yu.A. Izvekov // Научные труды VI Международной научной конференции Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении. Москва, ИМАШ РАН. - 2019. - С. 195-196.

14. Извеков, Ю.А. Научные основы методологии оценки и повышения качества технических систем металлургического предприятия / Ю.А. Извеков // 5-я Международная научно-техническая конференция в дистанционном формате «Живучесть и конструкционное материаловедение» (ЖивКоМ – 2020): Сборник трудов конференции / М: Изд-во ИМАШ РАН. - 2020, электронный формат – 282 с. - С. 118-119.

15. Извеков, Ю.А. Проблемы преподавания математики в технических ВУЗах России и пути их решения / Ю.А. Извеков // I Национальная научно-практическая конференция Современные проблемы и перспективы развития науки, техники и образования: Сборник материалов конференции. Магнитогорск: Изд-во МГТУ им. Г.И. Носова. - 2020. - С. 135-137.