

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени доктора технических наук

научный консультант: доктор технических наук,  
профессор Мезин Игорь Юрьевич

Магнитогорск – 2021

## Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ПО ПОКАЗАТЕЛЯМ НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ (НА ПРИМЕРЕ КРАНОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ).....	15
1.1 Анализ аварийности грузоподъемных машин и степени разработанности темы исследования.....	15
1.2 Анализ опасностей и последствий разрушений несущих конструкций металлургических объектов.....	27
1.2.1 О состоянии аварийности и травматизма на поднадзорных предприятиях Уральского управления Ростехнадзора.....	32
1.3 Научные принципы риск-анализа конструкций.....	37
1.3.1 Анализ динамики и оптимизация металлургических мостовых кранов.....	45
1.4 Постановка цели, задач и методов исследования.....	49
Выводы по главе 1.....	51
ГЛАВА 2 КОНСТРУКЦИОННЫЙ РИСК-АНАЛИЗ – НАУЧНАЯ ОСНОВА ВЫБОРА И ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕМЕНТОВ КРАНОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ.....	53
2.1 Концепция оценки качества элементов кранового оборудования на основе риск-анализа.....	53
2.2 Снижение размерности в задаче оценки качества сложных технических систем металлургического предприятия.....	58
2.3 Вероятностная оценка риска конструкций.....	70
2.4 Качество и риски технологического оборудования.....	76
2.5 Метод расчета вероятности безаварийной эксплуатации кранового оборудования.....	91
Выводы по главе 2.....	94
ГЛАВА 3 РАСЧЕТ ПОЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ ФЕРМЫ НЕСУЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ МОСТОВОГО МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КРАНА ГРУЗОПОДЪЕМНОСТЬЮ 300 Т.....	97
3.1 Расчет фермы несущей конструкции мостового металлургического крана грузоподъемностью 300 т .....	97
3.1.1 Расчет плоской системы, состоящей из шарнирно-стреловых элементов на статические нагрузки пролетом 24 м.....	102
3.1.2 Расчет плоской системы, состоящей из шарнирно-стреловых элементов на статические нагрузки пролетом 18 м.....	119
3.2 Расчетные исследования фермы мостового металлургического крана грузоподъемностью 300 т.....	133
3.3 Динамика изменения характеристик безопасности эксплуатации как показателя качества мостового металлургического крана.....	140
Выводы по главе 3.....	147
ГЛАВА 4 КВАЛИМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РИСКА И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОГЕННЫМ РИСКОМ – ИНТЕГРАЛЬНЫМ ПОКАЗАТЕЛЕМ КАЧЕСТВА ОБЪЕКТОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ.....	149

4.1 Квалиметрия при расчете риска аварии объектов металлургического предприятия .....	149
4.2 Конструкционный риск-анализ основных конструкций металлургического мостового крана.....	154
4.3 Вероятностные представления нагруженности конструкции .....	160
Выводы по главе 4.....	165
<b>ГЛАВА 5 РАСЧЕТНОЕ И ОРГАНИЗАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ НАУЧНЫХ ОСНОВ ВЫБОРА И АНАЛИЗА ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ОБЪЕКТОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ .....</b>	<b>166</b>
5.1 Оценка упругопластической деформации методом преобразования вероятностей .....	166
5.2 Оценка несущей способности конструкции методами теории катастроф.....	174
5.3 Критерии приемлемости риска ферм несущих конструкций мостовых металлургических кранов ...	176
5.4 Математическое моделирование показателей надежности, безопасности и риска основных конструкций мостовых металлургических кранов.....	181
5.5 Построение исследовательской программы анализа и управления риском на основе нелинейной динамики и Марковских случайных процессов .....	185
5.6 Методика расчета ущерба и принятия решения в управлении риском несущих конструкций мостовых металлургических кранов .....	194
5.7 Стандартизация и регламентация в сфере промышленной безопасности, технические требования к качеству кранов металлургического предприятия на основе конструкционного риск-анализа.....	200
5.8 Технические требования, организационные и методические рекомендации по экспертному обследованию крана.....	203
5.9 Программа экспертного обследования подъемного сооружения .....	206
Выводы по главе 5.....	211
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>214</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>216</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А .....</b>	<b>240</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....</b>	<b>241</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ В .....</b>	<b>242</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Г.....</b>	<b>243</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Д .....</b>	<b>244</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Е.....</b>	<b>248</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Ж.....</b>	<b>249</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ З.....</b>	<b>250</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ И .....</b>	<b>252</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ К .....</b>	<b>253</b>

## ВВЕДЕНИЕ

### Актуальность темы исследования

Обеспечение необходимого уровня качества различных технических и сложных технических систем (СТС) характеризуется системой международных стандартов ИСО 9000 [55], а также стандартов, учитывающих пожаро- и взрывобезопасность, анализ критичности отказов и основные положения их расчетов [56-62].

Основу металлургического предприятия составляют различные технические системы, объекты, которые работают в тяжелых и сверхтяжелых режимах работы и относятся к опасным производственным объектам [2,5,14,17-22]. Качество таких систем должно включать в себя их надежную и безопасную работу [9-13,75-105]. Современное развитие технологий металлургической отрасли не содержит единую научно-методическую базу для оценки качества объектов металлургического предприятия по критериям риска. В России и за рубежом на протяжении трех последних десятилетий создается и продолжает развиваться научно-методическая база обеспечения безопасности по критериям риска [19-26]. Металлургическая отрасль наряду с атомной, нефтегазовой, оборонной и другими является очень важной и насыщенной потенциально опасными объектами. Она также должна являться объектом пристальной оценки ее качества и внимания с точки зрения промышленной безопасности. Современное состояние промышленной безопасности на металлургических предприятиях не отвечает современным требованиям: применяется устаревшее оборудование (в некоторых случаях больше 80%), его модернизация осуществляется медленными темпами, люди, эксплуатирующие вверенную технику не всегда вовремя проходят переподготовку и повышение квалификации. Опасные производственные объекты определены в [2].

Проблема оценки качества и фактического технического состояния сложных, энерго-насыщенных и наукоемких объектов и оборудования, эксплуатирующегося в условиях металлургического производства, уменьшения

аварий и катастроф является достаточно насущной и актуальной. К таким объектам и оборудованию можно отнести различное оборудование: прокатные станы, конвертеры, металлургические краны и др.

Особое место в этом направлении занимает работа по разработке научных основ и новых подходов к выбору и оценке показателей качества объектов металлургического предприятия – специальных металлургических кранов на основе конструкционного риск-анализа, совершенствованию нормативной базы оценки фактического состояния конструкции по показателям надежности и безопасности, продлению сроков их эксплуатации, отработавших нормативный срок в условиях металлургического производства, отправлению на капитально-восстановительный ремонт, либо утилизацию. Поэтому заявленная тема диссертационного исследования является актуальной и своевременной

### **Степень разработанности темы исследования**

Конструкционный риск-анализ начинает набирать обороты. 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 [19-26,75-77].

Одним из основных объектов металлургического предприятия являются металлургические мостовые краны. Они составляют порядка 70% грузоподъемного оборудования любого металлургического предприятия. Не секрет, что большинство таких кранов работают за пределами гарантийных сроков эксплуатации. Дальнейшая их эксплуатация невозможна без количественной оценки аварий и их последствий такого оборудования как показателя качества.

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 [193,216], E. Henley [193,216], G. Taguchi [231], H. Bloch [205], F. Geitner, B. Morgan, C. Pietersen [223], R. Kolluru [226].

Советские и российские исследования вероятностных показателей аварий рассматриваются по-другому. В работах Н.Н. Афанасьева, В.В. Болотина [34], А.С. Гусева, А.Ф. Гетмана [50-52], 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 [34], А.Ф. Бермана, А.Ф. Гетмана [50-52], Н.А. Махутова [132-133, 136-139], А.М. Лепихина [125] 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.

Таким образом, на сегодняшний день назрела необходимость применения конструкционного риск-анализа для развития научных основ выбора и оценки показателей качества объектов металлургического предприятия.

**Целью диссертационной 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 автором 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.

### **Степень достоверности и апробация результатов и научных выводов работы**

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» (ICIE, 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.

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.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, 10 приложений на 13 страницах, списка использованной литературы из 234 наименований, изложена на 215 страницах машинописного текста, включает 88 рисунков, 40 таблиц.

## ГЛАВА 1 АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ПО ПОКАЗАТЕЛЯМ НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ (НА ПРИМЕРЕ КРАНОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ)

### 1.1 Анализ аварийности грузоподъемных машин и степени разработанности темы исследования

За 2009-2019 годы в России по данным Ростехнадзора [233,234] была зарегистрирована следующая динамика аварий и происшествий на объектах металлургических и коксохимических производств, изображенная на рисунке 1.1.



Рисунок 1.1 – Динамика аварий и происшествий на объектах металлургических и коксохимических производств в 2009-2019 гг. [14]

Из рисунка 1.1 видно, что количество аварий и смертельно травмированных людей увеличивается, что означает безусловное снижение качества и обслуживания различного технологического оборудования собственно, а также приводит к удорожанию продукции, которую эти системы производят либо обслуживают.

Доля различных аварий и чрезвычайных происшествий, в том числе на грузоподъемных машинах, представлена в таблице 1.1 в течение 2007-2010 гг. [75].

Таблица 1.1 - Основные объекты аварий

	2007	2008	2009	2010
Количество промышленных аварий	158	128	86	103
Крановое оборудование, %	24%	30%	26%	36%
Происшествия со смертельно травмированными	12%	13%	8%	17%

Главными причинами аварий на объектах металлургического предприятия, а, именно, крановом оборудовании являются превышающие проектные деформации несущих металлоконструкций, нарушение их целостности, трещины, нарушение правил эксплуатации, тяжелые и сверхтяжелые режимы работы, увеличение циклов эксплуатации, напряжения и соответствующие им деформации, близкие или равные пределу текучести материала конструкции, ведущие к снижению несущей способности, неэффективная оценка фактического технического состояния несущих металлоконструкций, то есть их качества. Ущерб от этих аварий составляет сотни тысяч долларов на одну аварию [21, 66], но самое главное, что при этом страдают, погибают люди, получают увечья.

Аварии на крановом оборудовании различного назначения практически в половине случаев происходят со смертельным исходом. Величина риска на грузоподъемных машинах составляет  $10^{-4}$  и выше [19-22,75-77]. Аварии же специальных металлургических кранов является практически в большинстве

своем происходят со смертельным исходом. Изучив катастрофические события в ПАО (Публичное акционерное общество) ММК («Магнитогорский металлургический комбинат») 1947, 1967, 1987 и 2008 годов: обрыв траверсы сталь-ковша, разлив металла, отрыв крюка, излом несущей конструкции, гибель людей, можно рассчитать риск как  $\left(\frac{1}{20}\right)$  – один раз в 20 лет. Экономический ущерб не сопоставим, но выразив через условные денежные единицы, можно получить значение критического или катастрофического риска, и в соответствии с этим оценить качество оборудования.

Таким образом, назрела проблема оценки качества основных конструкций кранов металлургического предприятия на этапах их гарантийной и послегарантийной эксплуатации.

Для создания научных основ оценки качества кранов и снижения риска неблагоприятных событий необходимо своевременно устранять их основные причины, а, именно, эффективно оценивать фактическое техническое состояние основных конструкций кранов, как с позиций традиционных методов, так, и с позиций конструкционного риск-анализа.

Настоящее состояние оценки качества несущих конструкций специальных металлургических кранов предполагает его дальнейшее совершенствование. Для решения этой важной научно-технической проблемы представляется перспективным применение риск-анализа вообще [67-70] и конструкционного риск-анализа в частности [21-54].

Особое внимание в области создания и развития научных основ стандартизации и качества заслуживают работы Ю.П. Адлера [6,7], Г.Г. Азгальдова [8], И.З. Аронова, Б.В. Бойцова [69], 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 отечественной оценки риска для элементов кранового оборудования можно отследить по работам В.С. Котельникова [117], А.А. Короткого [116], А.Н. Павленко, Л.С. Каминского, С.С. Чичерина, И.И. Еремина, В.В. Шевцова. В данных работах недостаточно полно были освещены вопросы качества элементов кранового оборудования металлургического предприятия по показателям безопасности с позиций конструкционного риск-анализа.

На сегодняшний день различают качество - технологическое и прочностное [24-44, 75-105]. Технологическое качество сегодня на достаточном уровне обеспечено различными нормативами, требованиями стандартов. Нормы на дефектность уже на грани чувствительности методов контроля. Например, в сварных соединениях кранов и подкрановых балок устраняются поры диаметром больше 3 мм, а при эксплуатации этих балок и большегрузных кранов находятся трещины до метра и более. С точки зрения прочности технологическое качество избыточно, экономически не оправдано, но оно важно для поддержания общего уровня качества производства. Качество присуще не только конструкции, а и технологии ее изготовления. На каждом заводе свой уровень качества, который отражается во всех типах конструкций. Нормы качества всего лишь отсекают некоторые величины дефектов, но не влияют на уровень качества. Поэтому необходимо разделять технологическое и эксплуатационное качество в методологии его обеспечения. Технологическое качество определяется уровнем используемой технологии и оно должно быть приемлемого уровня. На этом этапе нужны статистические методы оценки и регулирования качества.

В течение длительного времени на предприятия черной металлургии поставляются мостовые грузоподъемные краны общего назначения. Конструкторы и изготовители таких кранов часто не учитывают чрезвычайно жесткого режима их эксплуатации, что отражается на надежности кранов и приводит к непредвиденным срывам в обслуживании производства [86]. В ПАО

ММК эксплуатируется свыше тысячи мостовых кранов различного назначения. Из них более половины работают в тяжелом и весьма тяжелом режимах эксплуатации. Значительная часть кранов эксплуатируется на открытом воздухе при зимней расчетной температуре. К таким кранам относятся краны копровых цехов, шихтовых дворов.

В настоящее время оценка качества конструкций металлургических кранов осуществляется по [62]. Металлургические краны относятся к опасным производственным объектам [2], работающие в большинстве своем (в некоторых случаях более 80% от общей группы) за пределами гарантийных сроков эксплуатации. Требования же [55] напрямую указывают на учет рисков, возникающих в процессе эксплуатации. Для металлургических кранов предусмотрены следующие виды экспертного обследования – промежуточное экспертное обследование (ПЭО) и генеральное экспертное обследование (ГЭО). Учитывая, что большинство таких кранов работают за пределами гарантии, оценке фактического технического состояния необходим углубленный анализ состояния его основных конструкций. Этот анализ должен позволять уточнять расчет остаточного ресурса и выдавать рекомендации по принятию решений – дальнейшей эксплуатации крана, или его капитально-восстановительного ремонта, или его утилизации. Нужно решить задачу оценки качества основных конструкций крана металлургического предприятия по критериям риска.

Таким образом, назрела необходимость в изучении и уточнении, разработке новых стандартов оценки качества металлургических кранов [75-80]. Эти стандарты, в том числе, должны оценивать качество таких объектов (систем) как функцию от их надежной, безопасной и экономически эффективной эксплуатации. Настоящее состояние оценки качества опасных производственных объектов металлургической отрасли не содержит единую научно-методическую базу, поэтому данная проблема также представляется достаточно актуальной и своевременной.

Выработка нормативного срока службы оценивается по текущему значению

характеристического числа  $H_\phi$ , которое определяется как произведение величины расчетного коэффициента нагружения  $K_p$  числа циклов работы крана за срок эксплуатации  $C_T$  (1.1).

$$H_\phi = K_p C_T. \quad (1.1)$$

Но, как было сказано выше, большая часть таких кранов уже давно перешла число допустимых рабочих циклов и такая методика должна быть либо уточнена, либо существенно доработана. Кроме этого, должны быть дополнены основные виды работ при обследовании кранов металлургического предприятия.

Стандарт [62] распространяется на краны мостового типа и устанавливает рекомендуемые основные положения их расчета с целью обеспечения надежности при эксплуатации. Расчеты должны обеспечивать сохранение несущей способности крана и его элементов. Здесь используются методы предельных состояний в детерминированной форме для металлических конструкций и допускаемых напряжений – для механизмов. Вместе с тем, в пункте 2.2 [62] при наличии необходимых исходных данных допускается для расчета кранов и их элементов применять вероятностные методы [115,125]. В этом случае за предельное напряжение принимают нормативные значения предела прочности, предела текучести или предела выносливости. В [62] рекомендуется металлические конструкции рассчитывать по методу предельных состояний:

- по исчерпанию конструкцией несущей способности;
- по достижению условий, нарушающих нормальную эксплуатацию.

Говоря о 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 предела текучести). Зависимость первого предельного состояния имеет вид (1.2) [62]

$$\gamma_n F(q_n, \gamma_f) \leq S(\Phi, R_n, \gamma_m, \gamma_d), \quad (1.2)$$

где  $\gamma_n$  - коэффициент надежности по назначению крана или элемента конструкции;

- $F$  – обобщенное расчетное усилие для соответствующего сочетания нагрузок;
- $q_n$  – нормативная нагрузка;
- $\gamma_f$  – коэффициент надежности по нагрузке;
- $S$  – обобщенная несущая способность конструкции или ее элемента;
- $\Phi$  – геометрический фактор, характеризующий зависимость между действующей нагрузкой и напряженным состоянием конструкции;
- $R_n$  – нормативное сопротивление материала;
- $\gamma_m$  – коэффициент надежности по материалу;
- $\gamma_d$  – коэффициент условий работы.

Анализируя (1.2) и современное состояние эксплуатирующихся кранов в металлургической отрасли, можно сделать вывод о неоднозначности такого подхода в этом стандарте.

Оценить возможные угрозы и уязвимости, а также проанализировать потенциальные дефекты позволяет анализ FMEA (Failure Mode and Effects Analysis, анализ видов и последствий отказов) [13-19]. FMEA имеет достаточно широкое применение на машиностроительных предприятиях. Однако, как представляется, даже этот метод не лишен некоторых недостатков. К ним можно отнести не слишком высокая достоверность результатов при эксплуатации, то есть с какой-либо наработкой, потому как он изначально разработан для элементов при проектировании и производстве. Второе – FMEA более всего подходит для элементов не высокой сложности. Третье – в обозначенных стандартах прямо написано, что при высокой сложности оборудование FMEA должен применяться в совокупности с другими методами.

Таким образом, современное состояние оценки качества по критериям риска не отвечает заявленным требованиям эксплуатируемого оборудования на металлургическом предприятии и требует новых подходов. Одним из таких подходов является вероятностный конструкционный риск-анализ [19-22]. Оценку качества будем представлять как функцию, изменяющуюся во времени  $K(t)$ , обратную риску  $R(t)$  (1.3)

$$K(t) = \frac{1}{R(t)}. \quad (1.3)$$

Смысл такой функциональной зависимости отчасти может быть схож с характеристическим числом.

Риск  $R(t)$  представляет собой произведение вероятности  $P(t)$  возникновения аварийной или другой ситуации на ущерб  $U(t)$ . Если (1.3) записать для технической системы, состоящей из нескольких элементов, то она примет следующий вид (1.4)

$$K(t) = \frac{1}{R(t)} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n P_i(t) * U_i(t)} \geq [K(t)]. \quad (1.4)$$

Здесь  $[K(t)]$  – допускаемое качество объекта, которое связано с экономическими затратами и их эффективностью, которые показывают ущерб аварийных ситуаций и будут направлены на их устранение. Качество будет обусловлено функцией риска со следующей классификацией: нормальный риск, допускаемый риск, критический риск. Тогда, с учетом характеристического числа  $H_\phi$ ,  $S$  несущей способности конструкции и некоторых положений FMEA можно будет оценить качество конструкции. При этом качество будет являться безразмерной величиной или величиной, обратной денежным единицам, выраженной в баллах или единицах. Значения вероятности аварий можно получить на основании статистических данных, но в настоящее время это является проблематичным, поэтому они могут быть получены некоторыми расчетными методами [19-22] или методом имитационного моделирования. Значения экономических показателей принимается в условных денежных единицах.

В качестве исследуемых объектов будем рассматривать краны металлургического предприятия ПАО ММК, представленные в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Анализ эксплуатирующихся кранов ПАО ММК

Мостовые краны	756
Козловые	33
Портальные	5
Стреловые	128
Другие	187

Предварительный анализ кранов показал следующее распределение по срокам эксплуатации – рисунок 1.2.

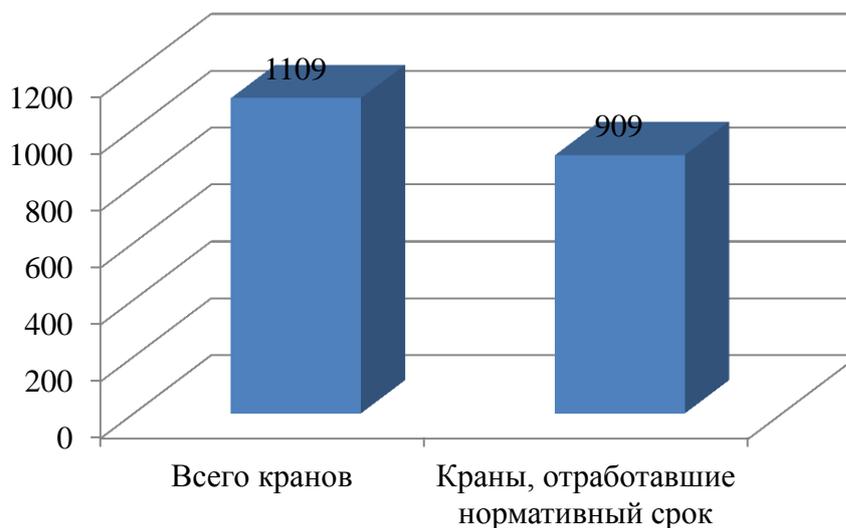


Рисунок 1.2 - Распределение кранов по срокам эксплуатации

Видно, что мостовые металлургические краны составляют 68% от общего количества на предприятии, а краны, отработавшие нормативный срок – 82%. Но, не смотря на это, они все равно продолжают эксплуатироваться.

Основные конструкции тяжелого и весьма тяжелого режимов работы быстро изнашиваются. Многочисленные трещины, развиваясь от концентраторов напряжений, нередко приводят такие конструкции в аварийное состояние.

Трещины образуются не только на тех кранах, которые находятся в эксплуатации длительное время. К сожалению, первые трещины обнаруживаются и на новых кранах уже через 1,5-2 года их эксплуатации.

С момента образования трещин начинаются внеплановые, аварийные остановки во время которых выполняется ремонт и усиления металлоконструкций. Наблюдения показывают, что подавляющее число трещин связано с несовершенным конструктивным исполнением металлоконструкций. Они буквально насыщены резкими изменениями сечений элементов и концентраторами напряжений технологического происхождения - подрезами кромок основного металла сваркой, кратерами в окончаниях сварных швов.

Подвержены частым разрушениям узлы сопряжения главных балок моста с концевыми, концевые балки в районе крепления букс ходовых колес крана, вертикальные стенки главных балок в местах крепления к ним кронштейнов проходных галерей.

Недостатки перечисленных узлов известны давно и даже вошли в справочную литературу. Однако мостовые краны, которые уже длительное время убедительно демонстрируют в металлургии свое конструктивное совершенство, по-прежнему выпускаются промышленностью.

За последние годы появились новые и к тому же трудно устранимые трещины, прежде всего поперечные в верхних поясах главных балок. Они зарождаются под подошвой подтележечного рельса и развиваются по направлению к кромке листа. Возникают эти трещины от чрезмерного уменьшения толщины верхнего пояса и высоты подтележечного рельса.

Часто происходит отрыв диафрагм в коробчатых главных балках от верхнего пояса и стенок. Сначала разрушается горизонтальный шов, крепящий диафрагму к поясу, и начинает деформироваться верхняя кромка диафрагмы. Затем разрушаются вертикальные швы. В итоге теряется местная устойчивость вертикальных стенок главных балок. По общему мнению, это вызвано тем, что

толщину диафрагм с 10-12 мм довели до 4-6 мм, в неуклонном стремлении снижения массы кранов.

По той же причине стали недостаточно жесткими в вертикальной плоскости главные балки моста. Значит, увеличилось время затухания и амплитуда их колебаний. Мало того, что эти явления сказались на снижении производительности кранов, они привели также к аварийным ситуациям, когда происходит сбрасывание грузовых тележек с подтележечных рельсов. В подобных случаях возникает необходимость в реконструкции кранов, которая заключается в увеличении высоты главных балок моста или в установке двух вспомогательных ферм, связанных с главными балками вертикальными связями.

По той же причине стали недостаточно жесткими в вертикальной плоскости главные балки моста. Значит, увеличилось время затухания и амплитуда их колебаний. Мало того, что эти явления сказались на снижении производительности кранов, они привели также к аварийным ситуациям, когда происходит сбрасывание грузовых тележек с подтележечных рельсов. В подобных случаях возникает необходимость в реконструкции кранов, которая заключается в увеличении высоты главных балок моста или в установке двух вспомогательных ферм, связанных с главными балками вертикальными связями.

В настоящее время краны часто поставляются с гибким токопроводом, который в условиях горячих металлургических цехов, а также при эксплуатации на открытом воздухе при низких температурах, при весьма тяжелых режимах работы, работает ненадежно. Отсутствие площадок для обслуживания токопровода приводит к большим неудобствам при ремонтах кранов. Для создания таких площадок требуется около 2 т металла.

С целью повышения эксплуатационной надежности кранов и соответствия их требованиям производства комбинатов вынужден реконструировать их еще до установки на подкрановые балки. Средние затраты на реконструкцию одного крана составляют порядка 50-90% от стоимости крана. Только из-за аварийных

ремонтных несущих металлических конструкций кранов комбинатов теряет порядка 400 тыс. руб. ежегодно (в ценах 1988 г.).

Аварийные остановки кранов нарушают напряженный ритм основного производства и по этой причине в определенной мере снижают выпуск продукции. По сталеплавильному переделу это снижение можно оценивать в 0,25 %, по прокатному – в 0,2 % от объема производства [198].

Поставляемым в настоящее время на комбинат магнитным и грейферным кранам, изготавливаемым на базе серийных мостовых кранов общего назначения, в полной мере присущи все перечисленные выше недостатки.

Качество эксплуатирующихся систем связывается с прочностью, надежностью и безопасностью. Здесь первые позиции занимает риск-анализ, который предлагает оценить риски и ущербы от них. Нужно ли устранять дефект в станине прокатного стана, кране, подкрановой балке с остановками производства или можно эксплуатировать до планового ремонта. На этом этапе жизненного цикла нужны иные подходы и методологии оценки и обеспечения качества и безопасности, отличающиеся от современных.

Проблема качества и оценки фактического технического состояния кранового оборудования металлургических предприятий, эксплуатирующихся в условиях металлургического производства, является достаточно насущной и актуальной. Особое место в этом направлении занимает работа по разработке научных основ и новых подходов к совершенствованию нормативной базы повышения надежности и безопасности кранового оборудования, по продлению сроков эксплуатации грузоподъемных машин, отработавших нормативный срок в условиях металлургического производства.

При разработках на фундаментальном уровне сформулированы модели, а прикладные разработки основываются пока только на исследованиях. В производственных документах использование таких моделей отсутствует.

На основе анализа известных путей решения проблемы оценки качества по показателям риска аварий предлагается синтезировать достижения теории вероятностей, механики предельных состояний, нелинейной динамики, вероятностной динамики конструкций, квалиметрии.

## 1.2 Анализ опасностей и последствий разрушений несущих конструкций металлургических объектов

К числу наиболее острых проблем в металлургических и коксохимических производствах относятся медленные замена оборудования и технических средств безопасности, не отвечающих требованиям безопасности и внедрение современных технологий. Продолжаются эксплуатация мартеновских печей и применение устаревших технологий разлива стали в ОАО (открытом акционерном обществе) «Выксунский металлургический завод», ОАО «Уральская сталь», ОАО «Бежицкий сталелитейный завод» и др. [17, 18].

Причины аварий – конструктивные недостатки, нарушения при строительстве и эксплуатации оборудования. Основные травмирующие факторы: падение предметов и пострадавших с высоты (37,5%); выбросы расплавов и раскалённых газов из металлургических агрегатов (25,0%); воздействие вращающихся и движущихся частей оборудования (12,5%); технологический транспорт (12,5%); воздействие технологических газов (12,5%). Видно, что эксплуатация кранового оборудования, не отвечающего требованиям безопасности, является основной причиной травм и несчастных случаев на металлургических предприятиях. Основные причины несчастных случаев - неудовлетворительная организация и проведение ремонтных работ, неудовлетворительное техническое состояние оборудования, конструктивные недостатки оборудования.

При анализе аварий кранового оборудования на металлургических предприятиях установлено, что причинами являются обрывы стальных грузовых

канатов, разрушение крюков, неисправность приборов безопасности, неисправность грузозахватных органов, низкое качество стали, применяемое при изготовлении металлоконструкций кранов, хрупкое разрушение металлоконструкций, эксплуатация крана значительно выше нормативного срока службы, некачественное обследование кранов, отработавших нормативный срок. Вместе с тем при расследовании причин аварий разливочных кранов не принимается во внимание сопутствующий фактор, как перегруз крана при заполнении ковша жидким металлом (из-за разгара футеровки) и, как следствие, увеличение емкости ковша. Обычно такие аварии, связанные с перегрузом кранов, характерны при эксплуатации грейферных, магнитно – грейферных кранов при подъеме мертвого груза из-за несрабатывания ограничителя грузоподъемности.

Основной задачей в области промышленной безопасности является обеспечение состояния защищенности жизненно важных интересов личности и общества от аварий на опасных производственных объектах и последствий указанных аварий. В целях ее исполнения ведется учет аварий и несчастных случаев, произошедших при эксплуатации опасных производственных объектов, техническое расследование их причин с разработкой мер по устранению последствий, а также анализ материалов по результатам технического расследования причин аварий и несчастных случаев и проведение профилактических мероприятий, направленных на предупреждение возникновения в поднадзорных организациях аварийных ситуаций и несчастных случаев при эксплуатации опасных производственных объектов.

Результаты анализа состояния аварийности и травматизма при эксплуатации подъемных сооружений в период с 2005 по 2016 годы включительно показывают [233,234], что на поднадзорных объектах произошло 476 аварий и 826 несчастных случаев со смертельным исходом рисунки 1.3 и 1.4 соответственно.

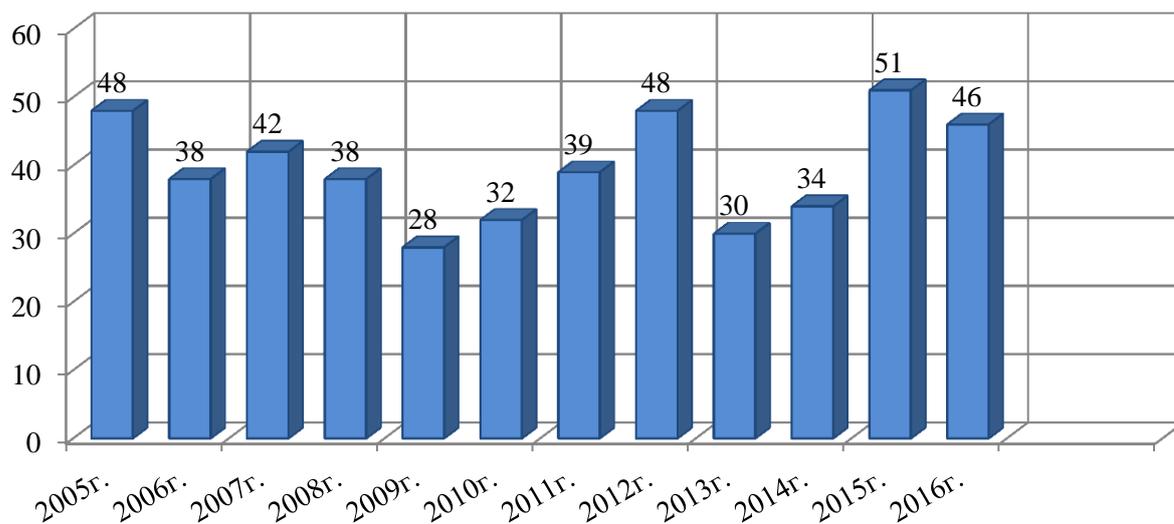


Рисунок 1.3 - Количество аварий на подъемных сооружениях (по данным Ростехнадзора)

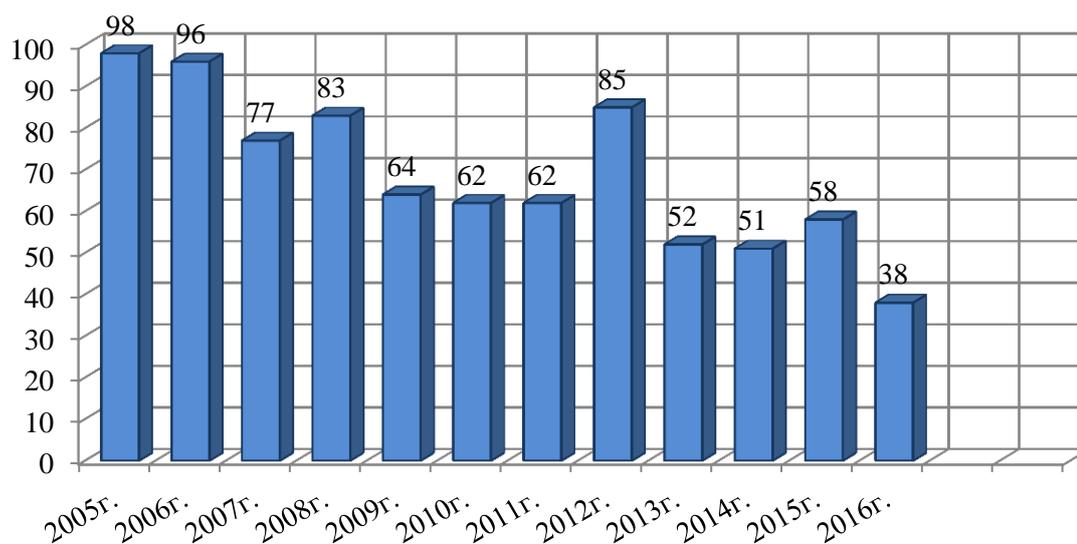


Рисунок 1.4 - Количество аварий на подъемных сооружениях с летальным исходом (по данным Ростехнадзора)

При проведении анализа установлено, что среди причин аварий и несчастных случаев преобладают следующие факторы, представленные на схеме, рисунок 1.5.

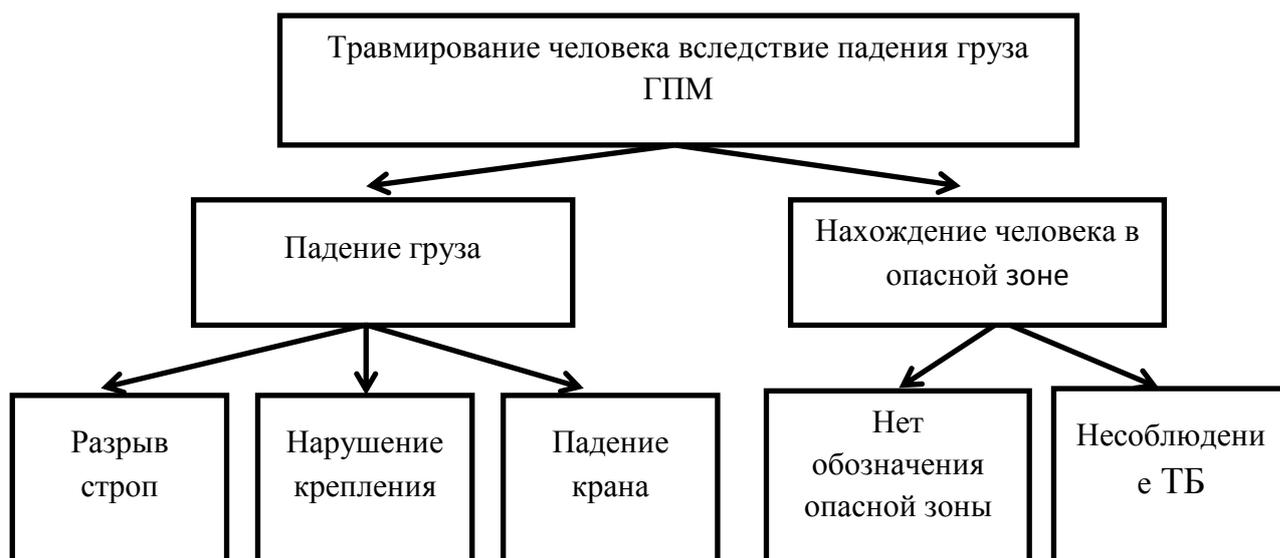


Рисунок 1.5 - Причины аварий и несчастных случаев

Одной из основных причин аварий и несчастных случаев является несвоевременное проведение плановых осмотров, ремонтов и технических освидетельствований подъемных сооружений. Также к числу причин аварий и несчастных случаев относятся низкий уровень трудовой дисциплины и нарушение технологии производства работ.

Исходя из анализа [75,233,234], можно сделать вывод - число несчастных случаев и количество погибших в несчастных случаях, произошедших при эксплуатации подъемных сооружений, значительно превышает число аварий (примерно в три раза).

В рамках анализа статистики и причин смертельного травматизма на опасных производственных объектах применяется показатель, учитывающий как количество погибших, так и число зарегистрированной в Ростехнадзоре и эксплуатируемой поднадзорными организациями грузоподъемной техники соответствующего вида – коэффициент смертельного травматизма на 1000 единиц техники, таблица 1.3, рисунок 1.6.

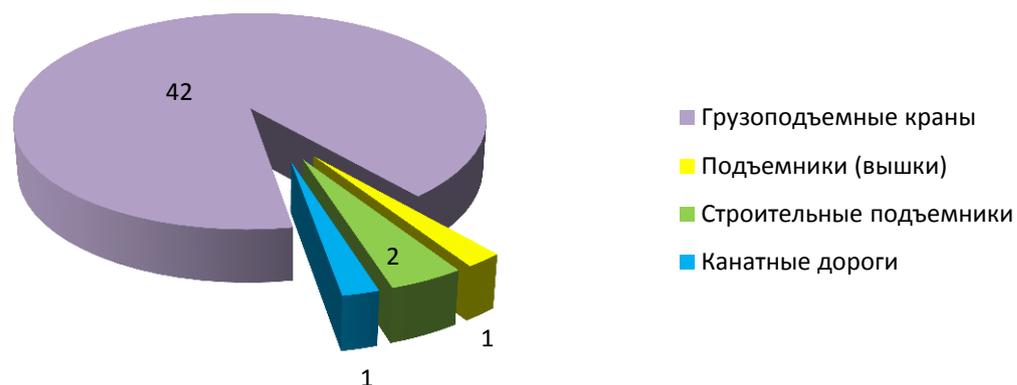


Рисунок 1.6 - Распределение аварий по видам техники (2016 г.)

Таблица 1.3 – Коэффициенты опасности за 2016 год

Техника	Количество техники	Количество погибших	Коэффициент смертельного травматизма
Башенные краны	17403	10	0,57
Автомобильные краны	61875	6	0,1
Мостовые краны	71648	7	0,1
Козловые краны	13254	3	0,23
Гусеничные краны	9294	0	0
Краны-манипуляторы	12413	1	0,08
Портальные краны	3023	0	0

Видно, что наибольшие коэффициенты смертельно травматизма фиксируются при эксплуатации кранов различного назначения.

### 1.2.1 О состоянии аварийности и травматизма на поднадзорных предприятиях Уральского управления Ростехнадзора

Проанализируем состояние аварийности и травматизма на предприятиях Уральского управления Ростехнадзора, таблица 1.4, рисунок 1.7 [233,234].

Таблица 1.4 - Данные аварийности и травматизма Уральского управления Ростехнадзора

Год	Количество аварий	Количество несчастных случаев	Количество пострадавших	Количество с летальным исходом	Материальные потери, тыс. руб.
2016	20	14	20	17	8077,246
2017	13	10	13	9	13544,77
2018	12	12	11	11	Информация отсутствует

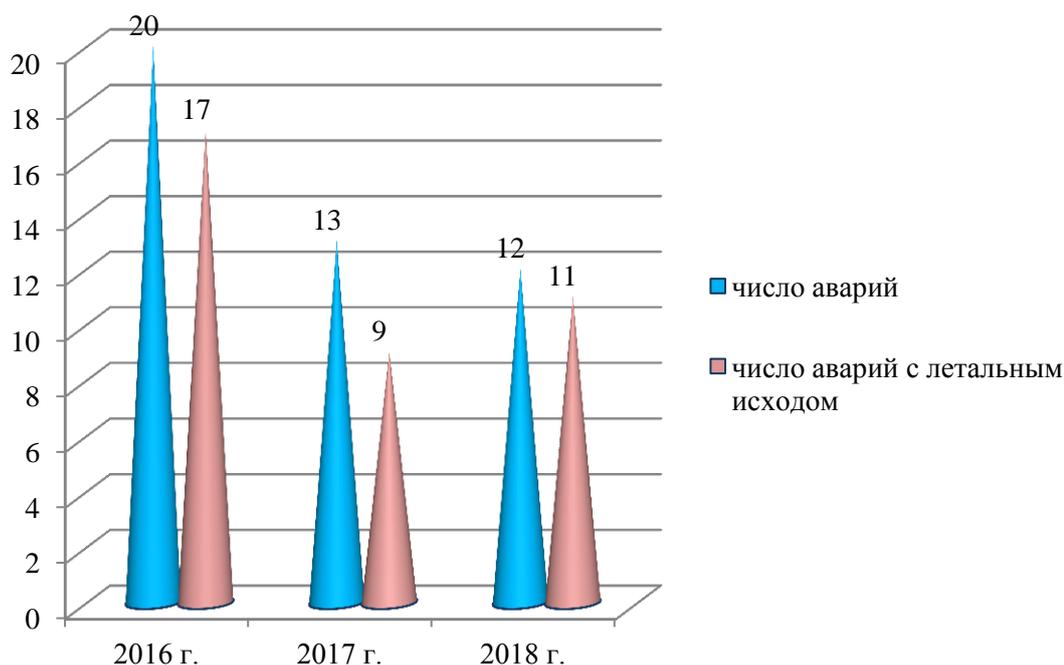


Рисунок 1.7 - Изменение количества аварий в Уральском управлении Ростехнадзора

Состояние аварийности и травматизма на поднадзорных предприятиях Уральского управления Ростехнадзора за 6 месяцев 2020 г. отображено в таблицах 1.5 и 1.6 соответственно.

Таблица 1.5 - Динамика аварийности на поднадзорных предприятиях

Уральского управления Ростехнадзора

Вид надзора	Количество аварий		Число пострадавших во время аварий				Ущерб от аварии, тыс. руб.	
			всего		в т. ч. со смертельным исходом			
	6 мес. 2019	6 мес. 2020	6 мес. 2019	6 мес. 2020	6 мес. 2019	6 мес. 2020	6 мес. 2019	6 мес. 2020
Свердловская область								
Надзор за подъемными сооружениями	2	1	4	1	2	1	2 184,648	Не завершено
Челябинская область								
Надзор за подъемными сооружениями	2	1	0	0	0	0	1 853,8	Расследование продолжается
Надзор за металлургическими и коксохимическими производствами и объектами	1	0	2	0	2	0	16 668	
Курганская область								
Аварий за 6 мес. 2019, 2020 года нет								
Итого	5	2	6	1	4	1	20 706,448	

Таблица 1.6 - Динамика производственного травматизма на поднадзорных предприятиях Уральского управления Ростехнадзора

Виды Надзора	Кол-во несчастных случаев						Кол-во смертельно пострадавших, чел.		Кол-во смертельно пострадавших в групповых	
	всего		из них групповых		из них со смертельным исходом		6 мес. 2019	6 мес. 2020	6 мес. 2019	6 мес. 2020
	6 мес. 2019	6 мес. 2020	6 мес. 2019	6 мес. 2020	6 мес. 2019	6 мес. 2020				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Свердловская область										
Надзор в горнорудной и нерудной промышленности, на объектах подземного строительства	3	2	0	2	3	0	3	0	0	0
Надзор за металлургическими и коксохимическими производствами и объектами	3		1		2		2		0	
Надзор за электроустановками потребителей		1		1		1		3		3
Надзор за подъемными сооружениями	4	2	2	0	3	2	4	2	2	0

Продолжение таблицы 1.6

Челябинская область										
Надзор за металлургическими и коксохимическими производствами и объектами	1	1	1	0	1	1	2	1	2	0
Надзор в горнорудной и нерудной промышленности, на объектах подземного строительства		2		0		2		2		0
Курганская область										
Надзор за электрическими сетями		1		0		1		1		0
Несчастных случаев за 6 мес. 2019, 2020 года нет										
Итого:	11	9	4	3	9	7	11	9	4	3

Таким образом, за 6 месяцев 2019 г и 2020 г на предприятиях, подконтрольных Уральскому Управлению Ростехнадзора произошло 5 аварий с суммой ущерба 20706,448 тыс. руб и 11 несчастных случаев, из них 11 – смертельно. Сумма ущерба достаточно высока, чтобы ее игнорировать, а человеческая жизнь вообще бесценна.

Проанализируем информацию по областям Уральского Управления Ростехнадзора с 2007 по 2020 гг., рисунки 1.8-1.10.

25.05.2020 в результате порыва ветра произошло опрокидывание козлового кран ЛТ-62, машинист получил смертельную травму.

При разгрузке металлолома из полувагона железнодорожным краном, стропальщику была нанесена смертельная травма головы электромагнитной шайбой, навешенной на крюковую подвеску крана.

За 6 месяцев 2020 г. на предприятии ООО СК «КРАНБЮРО», зарегистрированном на территории Челябинской области, произошло разрушение стрелы башенного крана при эксплуатации грузоподъемного механизма на территории Свердловской области.

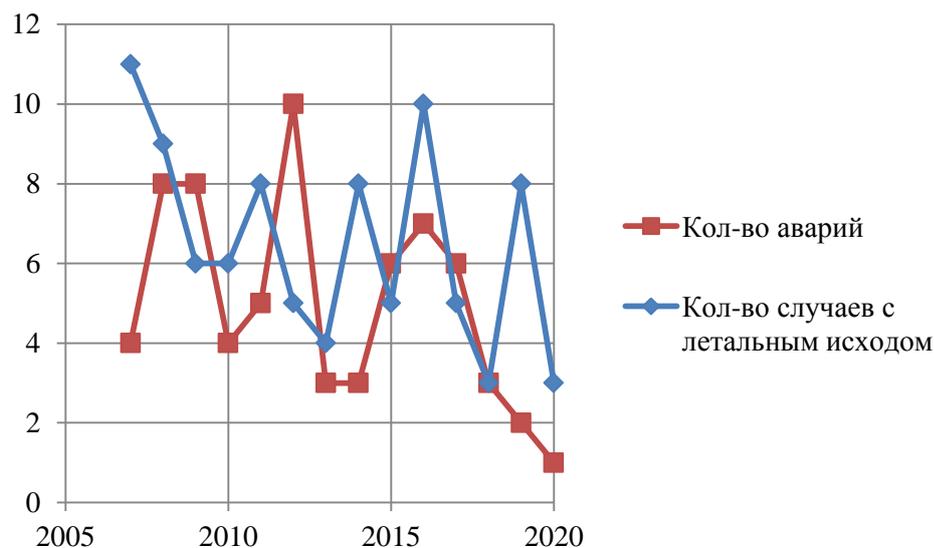


Рисунок 1.8 – Динамика аварийности и смертельного травматизма в Свердловской области по годам

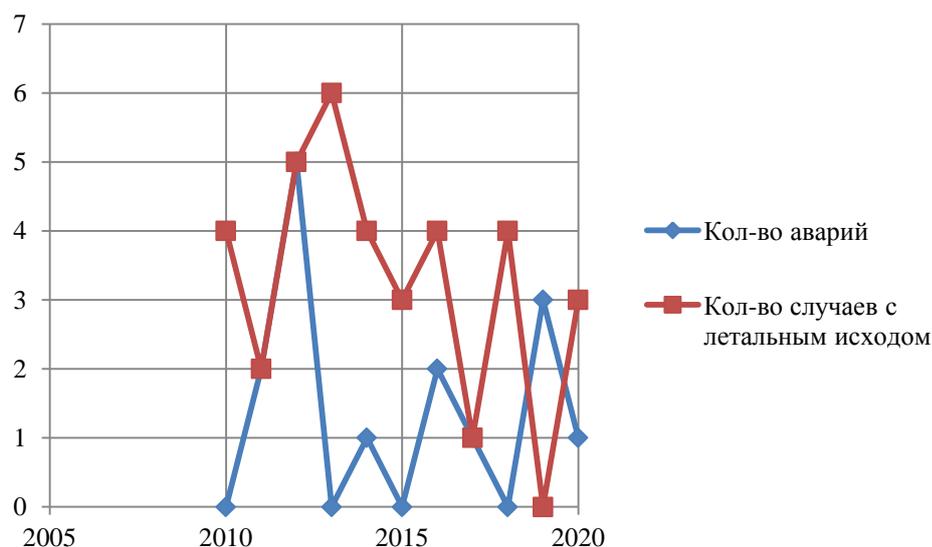


Рисунок 1.9 – Динамика аварийности и смертельного травматизма в Челябинской области по годам

В Курганской области за рассматриваемые периоды аварий и случаев с летальным исходом не зарегистрировано.



Рисунок 1.10 – Распределение несчастных случаев с тяжелым исходом по отраслям надзора за 6 месяцев 2019-2020 гг. в Челябинской области

### 1.3 Научные принципы риск-анализа конструкций

В общем случае вероятность риска аварии (отказа) рассматривается как вероятность потерь, и как величина, обратная надежности [19-25,77-80]:

$$R = W * P, \quad (1.5)$$

где  $R$  – риск;  $W$  – потери;  $P$  – вероятность;

$$R = W * \lambda, \quad (1.6)$$

где  $\lambda$  – частота;

$$R = 1 - P, \quad (1.7)$$

$P$  – вероятность безаварийной (в общем случае безотказной) эксплуатации.

Технический риск в этом случае оценивает только вероятность критического отказа, приводящего систему к аварии (катастрофе), но не может измерить потери. Такой подход при современном состоянии технических систем и объектов слишком упрощен, так как эти системы обладают избыточностью элементов.

Примем, что любая техническая система или объект  $\Sigma$  неизбежно выделяет энергию в некотором объеме (в том числе внешней среде), рисунок 1.11.

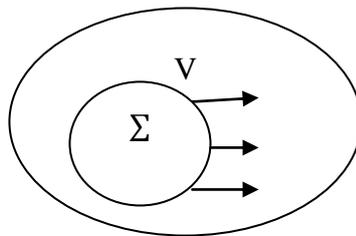


Рисунок 1.11 - Выделение энергии технической системой

Состав любой технической системы можно представить как систему, состоящую из  $a$  подсистем и  $e$  элементов:

$$\Sigma = \bigcup_i a_i (\bigcup_j e_{ij}); i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, m. \quad (1.8)$$

Считаем, что система изменяется следующим образом:

$$\Sigma_0 \rightarrow \Sigma_t \rightarrow \Sigma_f. \quad (1.9)$$

Конечность формулы (1.9) определяется не только аварией или катастрофой, но и ограниченным сроком эксплуатации технической системы [19-22]. Индекс  $0$  – начало эксплуатации,  $t$  – время гарантийной эксплуатации,  $f$  – время разрушения.

$$J(t) = \frac{E(t)}{V(t)}, \quad (1.10)$$

где  $J(t)$  – интенсивность;

-  $E(t)$  – энергия, выделяемая системой в течение времени;

-  $V(t)$  – некоторый объем системы.

Но, принимая во внимание вероятностную природу аварий и катастроф, риск можно представить в виде превышения порогового значения  $J_c$  (интенсивности):

$$R(t) = P\{J(t) > J_c\}. \quad (1.11)$$

Установим связь риска с функцией безопасности технической системы – вероятностью устойчивости системы при отказах и повреждениях ее элементов:

$$S_{\Sigma}(t) = P\{t: var[e_{ij}] \in \Omega_S\}. \quad (1.12)$$

$$R_{\Sigma}(t) = P\{t: H \geq var[e_{ij}] \notin \Omega_S\}. \quad (1.13)$$

$H$  – вектор опасностей, возникающий при выходе элементов из множества устойчивых состояний  $\Omega_S$ . Он может оценить соответствующие экономические потери через определенные преобразования.

Оценим содержательно конструкционный риск, составляющим основу технических систем.

С позиций механики катастроф разрушение конструкции происходит при достижении определенных видов предельных состояний подсистем и элементов.

К ним относятся:

- кратковременное разрушение (хрупкое, квазихрупкое, вязкое);
- разрушение в условиях ползучести;
- усталостные и коррозионно-усталостные разрушения;
- недопустимые пластические деформации;
- потеря устойчивости элементов.

Для вида предельного состояния можно выделить комплекс характеристик и критериев, по которому формулируется уравнение предельного состояния [20]:

$$F_{N,t,T} \{ \{ \sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}, l, N, t, T \} = F_c \}, \quad (1.14)$$

где  $\sigma_{ij}$  – компоненты напряжений;  $\varepsilon_{ij}$  – компоненты деформаций;  $l$  – размер технологического дефекта или трещины;  $N$  – число циклов;  $t$  – время нагружения;  $T$  – температура среды;  $F_c$  – критическое значение функции.

При анализе риска необходимо определить различные методологические понятия [125].

Риск аварии – мера опасности, характеризующая возможность возникновения аварии и тяжесть ее последствий. Основными количественными показателями риска аварии являются:

- технический риск – вероятность отказа технических устройств с последствиями определенного уровня (класса) за определенный период функционирования;
- индивидуальный риск – частота поражения отдельного человека в результате воздействия исследуемых факторов опасности аварий;
- потенциальный территориальный риск – пространственное распределение частоты реализации негативного воздействия определенного уровня;

- коллективный риск – ожидаемое количество пораженных в результате возможных аварий за определенное время;

- социальный риск, или  $F/N$  кривая – зависимость частоты возникновения событий  $F$ , в которых пострадало на определенном уровне не менее  $N$  человек, от этого числа  $N$ . Характеризует тяжесть последствий (катастрофичность) реализации опасностей и представляется в виде соответствующей  $F/N$ -кривой;

- ожидаемый ущерб – математическое ожидание величины ущерба от возможной аварии за определенное время;

- материальный риск, рисунок 1.12.

Комплексным показателем риска, характеризующим пространственное распределение опасности по объекту и близлежащей территории, является потенциальный территориальный риск – частота реализации поражающих факторов в рассматриваемой точке территории.

Потенциальный территориальный или потенциальный риск не зависит от факта нахождения объекта воздействия (например, человека) в данном месте пространства. Предполагается, что условная вероятность нахождения объекта воздействия равна 1 (т.е. человек находится в данной точке пространства в течение всего рассматриваемого промежутка времени). Потенциальный риск не зависит от того, находится ли опасный объект в многолюдном или пустынном месте, и может меняться в широком интервале. Потенциальный риск, в соответствии с названием, выражает собой потенциал максимально возможной опасности для конкретных объектов воздействия (реципиентов, находящихся в данной точке пространства).



Рисунок 1.12 – Схема риска аварии

Количественной интегральной мерой опасности объекта является коллективный риск, определяющий ожидаемое количество пострадавших в результате аварий на объекте за определенный период времени.

Относительной характеристикой опасности является индивидуальный риск – частота поражения отдельного индивидуума в результате воздействия исследуемых факторов опасности. В общем случае количественно (численно) индивидуальный риск выражается отношением числа пострадавших людей к общему числу рискующих за определенный период времени. При расчете распределения риска по территории объекта индивидуальный риск определяется потенциальным территориальным риском и вероятностью нахождения человека в районе возможного действия опасных факторов. Индивидуальный риск во многом

определяется квалификацией и готовностью индивидуума к действиям в опасной ситуации, его защищенностью. Индивидуальный риск, как правило, следует определять не для каждого человека, а для групп людей, характеризующихся примерно одинаковым временем пребывания в различных опасных зонах и использующих одинаковые средства защиты. Рекомендуется оценивать индивидуальный риск отдельно для персонала объекта и для населения прилегающей территории, или, по возможности, для более узких групп, например, для обслуживающего персонала (операторов, ремонтных бригад). В целях сравнения оценок риска с критериями приемлемого риска (оценивания риска) рекомендуется рассчитывать максимальное значение индивидуального риска для определенной группы лиц (рискующих).

Социальный риск характеризует масштаб и вероятность (частоту) аварий и определяется функцией распределения потерь (ущерба), который графически отображается -  $F/N$ -кривой. Для практики оценки риска рекомендуется выделять значения  $F(1)$  и  $F(10)$  – частоты аварий с гибелью (травмированием) не менее 1 и 10 человек, соответственно.

Для целей экономического регулирования промышленной безопасности и страхования важным является такой показатель риска, как – риск материальных потерь – зависимость частоты возникновения сценариев аварий  $F$ , в которых причинен ущерб на определенном уровне потерь не менее  $G$ , от количества этих потерь  $G$ . Для этих целей рекомендуется оценивать статистически ожидаемый ущерб в стоимостных или натуральных показателях.

Одной из наиболее часто употребляемых характеристик опасности является индивидуальный риск – вероятность (или частота) поражения отдельного индивидуума в результате воздействия исследуемых факторов опасности.

Обычно индивидуальный риск измеряется вероятностью гибели в исчислении на одного человека в год. Если говорится, что величина индивидуального риска, связанная с дорожно-транспортным происшествием,

равна  $1 \cdot 10^{-4}$  1/год, то в статистическом плане это означает, что в течение года в автокатастрофах погибнет каждый десятитысячный человек.

В общем случае количественно индивидуальный риск  $R$  выражается отношением числа пострадавших людей  $n$  к общему числу рискующих  $N$  за определенный период времени  $t$  (обычно год):

$$R = \frac{n}{N \cdot t}. \quad (1.15)$$

При расчете распределения риска по территории вокруг объекта индивидуальный риск определяется потенциальным территориальным риском и вероятностью нахождения человека в районе возможного действия опасных факторов.

Уравнения для определения показателей риска приведены в таблице 1.7.

Таблица 1.7 - Уравнения для вычисления показателей риска

Виды риска	Расчет
Потенциальный территориальный риск	$RI(x, y) = \sum_{ij} P(A)_i * P_{ij}(x, y) * P(L)_j$
Индивидуальный риск	$RI(x, y) = \sum_{ij} P(A)_i * P_{ij}(x, y) * P(L)_j * f_k$
Средний индивидуальный риск	$\bar{R} = \left[ \sum_{x,y} R(x, y) * N(x, y) \right] / \sum_{x,y} N(x, y)$
Коллективный риск (общее число летальных исходов)	$RN = \sum_{x,y} RI(x, y) * N(x, y) = \sum_{j=1}^J N_r^j * Q_j$

где  $(x, y)$  – численность людей на площадке с координатами  $(x, y)$ ;

-  $N_r^j$  – ожидаемое количество погибших при реализации сценария развития аварии  $j$ ;

-  $Q_j$  – частота реализации в течение года  $j$ -го сценария развития аварии, при котором ожидаемо количество погибших  $N_r^j$ , 1/год;

-  $J$  – число сценариев развития аварий.

### 1.3.1 Анализ динамики и оптимизация металлургических мостовых кранов

Анализ динамики современных сложных механических систем таких, как металлургические мостовые краны, представляет острую проблему в силу ее серьезного влияния на показатели безопасности как показатели качества. Такие системы состоят из очень большого количества различных элементов. Важным аспектом этой проблемы является так называемое конструкционное качество.

Выявить отдельные элементы или участки механической системы, которые определяют параметр  $P(t)$  – вероятность риска аварии, выработать практические меры по исключению опасных резонансных зон – основная цель при совершенствовании и оптимизации параметров конструкционного качества.

Процесс перехода потенциальной энергии в кинетическую движущихся масс и обратно сопровождается возникновением колебаний в системе и динамических нагрузок на ее элементы [32]. Колебательное движение металлургического мостового крана можно описать дифференциальным уравнением в форме Лагранжа следующего вида:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_i} \right) - \left( \frac{\partial T}{\partial \varphi_i} \right) + \frac{\partial \Pi}{\partial \varphi_i} = Q_i, \quad (1.16)$$

где  $\varphi_i, \dot{\varphi}_i$  - перемещение  $i$ -го элемента крана и ее первая производная;

-  $Q_i$  – вынужденная внешняя нагрузка в виде изгибающей или какой-либо другой силы;

-  $T$  – кинетическая энергия свободно колеблющейся системы.

При свободных колебаниях принимается [32] нулевое значение правой части формулы (1.16) ( $Q_i = 0$ ).

$$T = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (J_i \dot{\varphi}_i)^2, \quad (1.17)$$

где  $J_i$  – параметр инерционности элемента в виде момента инерции или величины массы;

-  $\Pi$  – потенциальная энергия свободно колеблющейся системы

$$\Pi = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n-1} [c_i (\varphi_i - \varphi_{i+1})^2], \quad (1.18)$$

где  $c_i$  – параметр жесткости.

Имея, что

$$\left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_i} \right) = 0,$$

получим

$$\begin{aligned} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_i} \right) &= J_i \dot{\varphi}_i \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_i} \right) = J_i \ddot{\varphi}_i; \\ \left( \frac{\partial \Pi}{\partial \varphi_i} \right) &= c_i (\varphi_i - \varphi_{i+1}) - c_{i-1} (\varphi_{i-1} - \varphi_i). \\ J_i \ddot{\varphi}_i + c_i (\varphi_i - \varphi_{i+1}) - c_{i-1} (\varphi_{i-1} - \varphi_i) &= 0. \end{aligned} \quad (1.19)$$

Для системы, имеющей  $n$  масс, количество уравнений (1.19) будет равно  $n$ . Полученная система дифференциальных уравнений решается известными методами. Частное решение такой системы принимаем в виде

$$\varphi_i = \sum_{i=1}^n A_i \sin(\omega_{ci} t + \alpha_i), \quad (1.20)$$

где  $A_i$  – амплитуда колебаний  $i$ -й системы;

- $\omega_{ci}$  – частота свободных колебаний системы;
- $\alpha_i$  – фаза колебаний системы.

Подставив решение в систему дифференциальных уравнений, получим систему однородных дифференциальных уравнений относительно неизвестных

амплитуд колебаний. Решая его, получим частотное уравнение свободных колебаний системы относительно неизвестных частот  $\omega$ .

Для такой сложной механической системы как металлургический кран применяется матричный метод решения частотного уравнения. Для этого система дифференциальных уравнений  $n$ -массовой системы записывается в операторном виде:

$$\vec{J}\ddot{\vec{\varphi}} + \vec{C}\dot{\vec{\varphi}} = 0, \quad (1.21)$$

где  $J$  - диагональная матрица параметров масс элементов крана;

- $C$  - симметричная матрица коэффициентов жесткости;
- $\varphi$  – вектор-столбец перемещений элементов системы.

Анализ динамики сложных механических систем имеет серьезное значение при оценке параметров надежности и безопасности.

Расчетная динамическая схема системы должна удовлетворять двум главным требованиям: во-первых, она должна быть адекватна реальной системе и, насколько это возможно, отражать основные физические свойства исследуемой системы; во-вторых, она должна быть не очень сложной, чтобы решение динамической задачи оказалось не слишком трудоемким.

Основу мостового крана представляет металлоконструкция, состоящая из несущих и концевых балок, которые вместе образуют жесткую конструкцию, способную выдерживать приложенные нагрузки, рисунок 1.13.

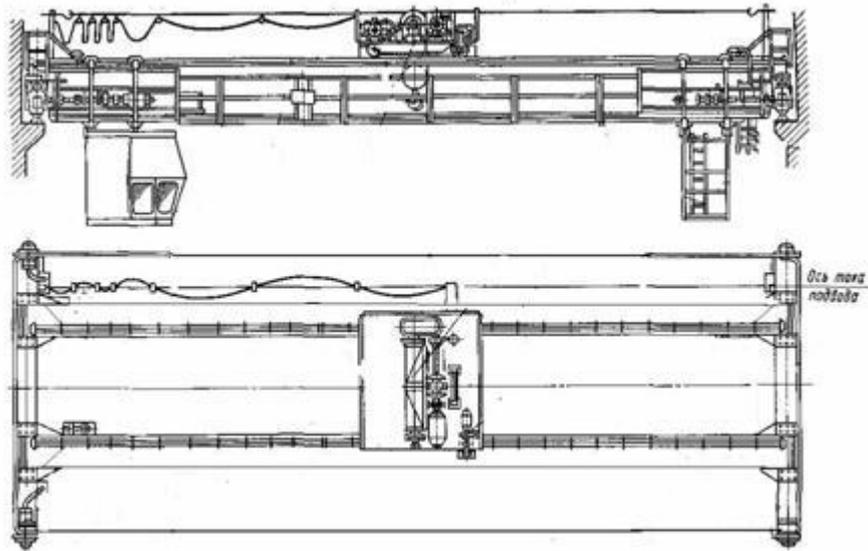


Рисунок 1.13 – Общий вид мостового крана

Балки испытывают нагрузки согласно следующей схеме, изображенной на рисунке 1.14

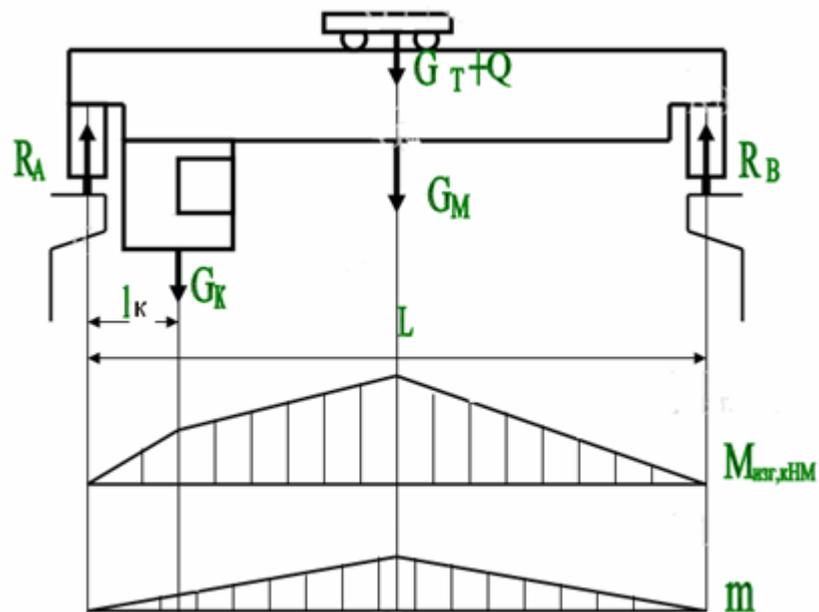


Рисунок 1.14 – К построению динамической модели мостового крана

На следующем этапе анализа динамической расчетной схемы выявляются те участки несущих конструкций и элементов механизмов подъема металлургического мостового крана, которые будут определять динамику всей

системы и ее нагруженность, для определения входных и выходных параметров системы.

При выполнении динамических расчетов рассматриваемой механической системы будем исследовать движение конструкции крана, испытывающей внешние механические силовые воздействия, которые возбуждают изгибные колебания в виде линейных перемещений элементов с возникновением перегрузок (амплитуд ускорений) и динамических воздействий на них.

Принятый метод анализа механической системы предполагает получение точного решения дифференциальных уравнений, описывающих ее движение с учетом упругих деформаций, а затем уточнение, разработку и применение вероятностных методов прогнозирующего расчета определяющего параметра  $P(t)$  на основании исследования случайного процесса изменения входных параметров.

#### 1.4 Постановка цели, задач и методов исследования

Таким образом, можем структурно представить цели, задачи и методы исследования.

Ввиду отсутствия или мало уделяемого внимания оценке фактического качества конструкций тяжело-нагруженных и энерго-насыщенных объектов металлургического предприятия можем сформулировать цель, задачи и методологию исследования.

**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.

Все эти задачи необходимо решить при помощи теоретических и расчетно-экспериментальных исследований оценки качества объектов металлургического предприятия на примере кранового оборудования на основе конструкционного риск-анализа, 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 аналитические выкладки и расчеты, математическое и имитационное моделирование, 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 металлургических мостовых кранов.

#### Выводы по главе 1

Современное состояние металлургической отрасли предполагает дальнейшее развитие системы оценки и прогнозирования качества таких объектов металлургического предприятия как крановое оборудование на основе риск-анализа конструкций для увеличения их безотказной и надежной работы на этапах гарантийной и послегарантийной эксплуатации, а также снижения риска аварийных ситуаций.

В требованиях ISO 9001:2015 напрямую указано на расчет, учет и нормирование рисков. Металлургические краны представляют собой достаточно многочисленный класс объектов металлургического предприятия. Исследованию качества их основных конструкций на современном этапе времени уделяется недостаточное внимание, состояние известного научно-методического аппарата

не в полной мере позволяет учитывать риски и ущербы при тяжелых и сверхтяжелых режимах работы.

Учитывая анализ опасностей и последствий разрушений основных несущих конструкций кранов металлургического предприятия необходимо совершенствовать и развивать оценку их качества на основе риск-анализа конструкций, используя при этом новые подходы и теории. К ним отнесем методы вероятностного анализа, нелинейной динамики, квалиметрии, многомерных статистических методов, строительной механики, теории случайных процессов, Марковских случайных процессов.

## ГЛАВА 2 КОНСТРУКЦИОННЫЙ РИСК-АНАЛИЗ – НАУЧНАЯ ОСНОВА ВЫБОРА И ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕМЕНТОВ КРАНОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

### 2.1 Концепция оценки качества элементов кранового оборудования на основе риск-анализа

Для объектов металлургического предприятия характерно многогранное понятие качества объекта, которое схематично можно представить рисунком 2.1.



Рисунок 2.1 - Обобщенные показатели качества технической системы

Все эти показатели имеют важное значение для построения системы оценки качества объектов металлургического предприятия. Из такого большого количества показателей необходимо выбрать главные, наиболее значимые или, по другому, критичные.

В рассматриваемой концепции можно записать

$$K(t) = f(B(t), H(t), \mathcal{E}(t)), \quad (2.1)$$

где  $K(t)$  – функция качества объекта;

-  $B(t)$  – функция безопасности;

-  $H(t)$  – функция надежности;

-  $\mathcal{E}(t)$  – функция, учитывающая экономическую эффективность показателя.

Свяжем эти функции в виде обобщающего условия анализа и оценки качества на основе риск-анализа следующим образом

$$R(t) = \sum_i P_i(t) * U_i(t) \leq [R(t)] = \frac{R_c(t)}{n_R} = m_Z Z(t); \quad (2.2)$$

при его реализации будем учитывать следующее

- под риском  $R(t)$  надо понимать сочетание вероятностей  $P(t)$  возникновения аварий и катастроф и ущербов  $U(t)$  от них;

-  $n_R$  – запас по рискам ( $n_R \geq 1$ );

-  $R_c(t)$  – критический риск;

- для оценки заданного уровня качества необходимо предусматривать комплексы мероприятий с затратами  $Z(t)$ , связанными с формирующимися рисками  $R(t)$ ;

-  $m_Z$  – коэффициент эффективности затрат ( $m_Z \geq 1$ ).

Или [19-25]:

$$R(t) = P_A \cap P_f(a) \cap E \cap Z; \quad (2.3)$$

где  $P_A$  – априорные вероятности состояния элементов оборудования;

-  $P_f(a)$  – вероятности аварий или катастроф элементов оборудования;

-  $E$  – коэффициент эскалации состояния;

-  $Z$  – экономические показатели.

Формула (2.3) будет учитывать самый предельный случай, в остальных случаях будет стоять знак объединения.

Ключевым элементом диссертации является анализ определяющего параметра  $P(t)$ .

Будем вести единую методическую линию, увязанную с обобщающим условием безопасности и надежности, экономических показателей как основных составляющих качества.

Очевидно, что функция качества элемента (объекта) будет:

$$K(t) = \frac{1}{R(t)} = \frac{1}{\sum_i P_i(t) * U_i(t)} \geq [K(t)] = \frac{1}{[R(t)]} = \frac{n_R}{R_c(t)} = \frac{1}{m_z Z(t)}; \quad (2.4)$$

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

Так как вероятность наступления неблагоприятного события – величина безразмерная, а ущерб измеряется в денежных единицах, то и риск можем измерять в денежных единицах. Таким образом, качество определяется функцией, обратной функции риска, соответственно имеет обратную размерность.

Вероятность возникновения аварий и катастроф технических систем можем считать редкими катастрофическими событиями. Именно такие события играют особую роль в теории конструкционного риска. Они связаны с так называемой жесткой турбулентностью – возникновением редких пространственно локализованных пиков гигантской амплитуды на турбулентном фоне. В течение основного времени система ведет себя так, как будто в ней есть небольшой набор параметров порядка, эффективно описывающих всю эволюцию. Но иногда система становится как будто очень многомерной.

Однако расчеты и их анализ не означают полного понимания моделируемого явления. В некоторых науках понимаю – значит, могу

предложить. В нелинейной динамике понимаю – значит, могу предложить простую конечномерную модель.

Таким образом, при оценке качества технологического оборудования можно сделать переход на безопасность, надежность и экономическую эффективность, рассматривая в качестве реакции системы на длительно действующее входное возмущение процесс накопления деградационных эффектов в виде усталостных изменений в материале конструкций, а также дефектов. Такие процессы являются показателями и мерой рабочего (качественного) состояния конструкции, определяя ее выходные параметры при длительной и тяжелой эксплуатации. В этом случае инженеры проводят наблюдения и обрабатывают их результаты или составляют и анализируют функциональные модели соответствующего физического процесса. При расчете таких показателей необходимо учитывать режимы работы системы с превышениями нагрузкой ее допустимого уровня и систематическое повторение от начала эксплуатации конструкции до выхода ее из строя.

Для реализации такой концепции необходимо решить следующие задачи:

1. Снизить размерность задачи в оценке качества элементов рассматриваемого кранового оборудования.
2. Провести анализ опасных факторов и выделить потенциальные зоны разрушений. Здесь с использованием численных методов, систем автоматического проектирования и анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкций определяются наиболее напряженные зоны. Пример численного анализа в среде ANSYS приведен на рисунке 2.2.

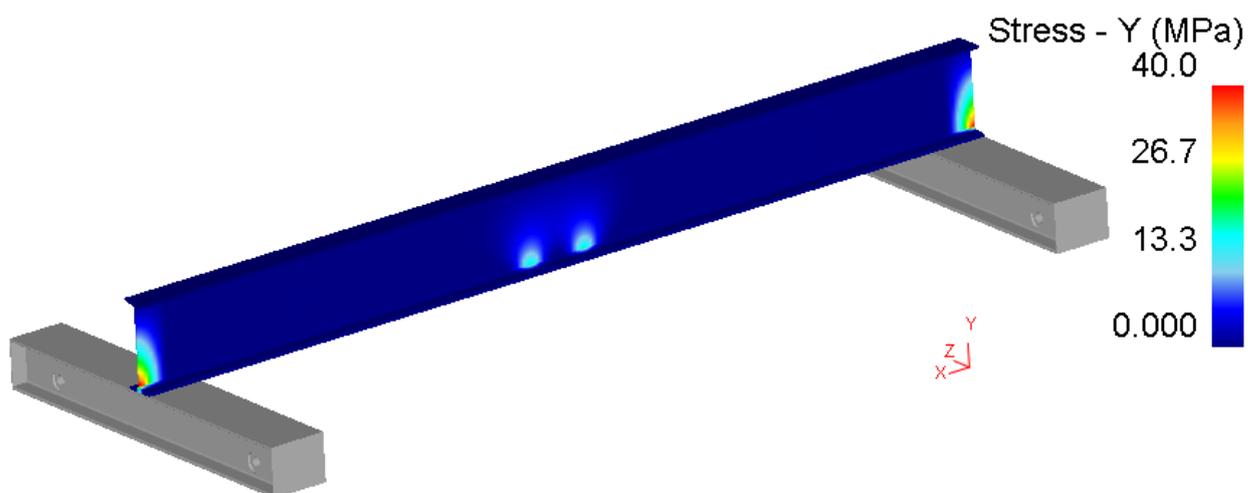


Рисунок 2.2 - Анализ НДС конструкции

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. Осуществляется нетривиальная комбинация критериальных рисков с учетом вклада каждого вида предельных состояний.
7. Оценить конструкционный риск.

Задачи 1 – 5 – могут быть решены по схеме

$$R_{\Sigma} \rightarrow \{R_i\} \rightarrow \{R_{ij}\} \rightarrow \{R_{ijk}\}. \quad (2.5)$$

Задачи 6 – 7 позволяют осуществить риск-синтез по схеме

$$\{R_{ijk}\} \rightarrow \{R_{ij}\} \rightarrow \{R_i\} \rightarrow \{R_{\Sigma}\}. \quad (2.6)$$

Здесь аналитическим ядром служат системные и проблемно ориентированные модели риска.

## 2.2 Снижение размерности в задаче оценки качества сложных технических систем металлургического предприятия

Деятельность любого предприятия всегда необходимо оценивать, то есть оценивать показатели качества производства. В работах [75-105] показана важность рассмотрения показателей качества элементов кранового оборудования металлургических предприятий как сложной технической системы. К одним из важнейших характеристик качества таких систем относят показатели: надежность, безопасность, экономические и другие.

Международный стандарт ГОСТ Р ИСО 9000-2015 [55] предусматривает тщательную разработку измеримых показателей деятельности для облегчения проведения мониторинга оценки деятельности.

Согласно ГОСТ Р ИСО 9000-2015 [55] “...лишь тщательно продуманные показатели облегчают проведение мониторинга и оценки деятельности”. С целью определения наиболее значимых показателей целесообразно произвести снижение размерности пространства разнородных данных с помощью статистического инструмента – метода главных компонент.

Различают большое количество многомерных методов снижения размерности: компонентный анализ, метод опорных векторов, метод неотрицательной матричной факторизации, метод нелинейного снижения размерности и визуализации многомерных данных t-SNE [37,38,115]. Однако практически все эти методы за исключением компонентного анализа требуют больших трудоемких вычислительных затрат. В наиболее выгодном положении здесь оказывается метод главных компонент, потому что имеется дополнительная информация о состоянии рассматриваемых конструкций кранов. В методе главных компонент линейные комбинации случайных величин определяются характеристическими векторами ковариационной матрицы. Главные компоненты представляют собой ортогональную систему координат, в которой дисперсии компонент характеризуют их статистические свойства.

Метод главных компонент – это метод, который переводит большое количество связанных между собой (зависимых, коррелирующих) переменных в

меньшее количество независимых переменных, так как большое количество переменных часто затрудняет анализ и интерпретацию информации.

Необходимо выделить показатели в области качества, значения которых оказывают существенное влияние на производственную деятельность, что очень важно в дальнейшем для принятия управленческих решений. На основе [19-25,80-82] выделим 15 показателей исследуемых технических систем, смоделированных и известных в процессе эксплуатации металлургического предприятия на протяжении 15 лет и представим в таблице 2.1.

В показателях надежности учитываются и экономические, так как выше было показано, что риск представляет собой произведение вероятности неблагоприятного события и ущерба, выраженного в денежных единицах. Отсутствие неблагоприятных событий приводит к увеличению прибыли, рентабельности производства.

Реализуем метод главных компонент.

В таблице 2.2 представлены показатели процессов по годам (г) эксплуатации и их нормированные данные.

Нормирование показателей необходимо для последующей обработки данных.

С целью получения нормированных данных, по каждому показателю вычислено среднее значение ( $X$ ), среднее квадратическое отклонение  $S$  (стандартное отклонение) (2.7).

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - X)^2}, \quad (2.7)$$

где  $X$  – среднее значение.

С помощью полученных данных произведено нормирование переменных по формуле (2.8).

$$u_i = \frac{(x_i - X)}{S}. \quad (2.8)$$

Далее построена матрица корреляции, коэффициент корреляции  $r$  вычислим по формуле (2.9).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n ((x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}))}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}. \quad (2.9)$$

Во всех случаях пользуемся стандартными функциями MS-Excel и его надстройкой «Анализ данных».

Затем были найдены собственные значения  $\lambda$  и собственные векторы вида (2.10).

$$\lambda_n \begin{pmatrix} x_{n1} \\ x_{n\dots} \\ x_{n15} \end{pmatrix}. \quad (2.10)$$

Через определитель (детерминант) суммы матриц  $A$  и  $A$  получено выражение (2.13), правая часть которого является характеристическим уравнением (2.14), решение которого необходимо для нахождения собственных значений матрицы.

Таблица 2.1 – 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 ТО, %
6	Выполнение Промежуточных экспертных обследований (ПЭО) и Генеральных экспертных обследований (ГЭО), %	13	Социальные и индустриальные риски, количество
7	Величина ущерба, рисковые затраты, %	14	Экологические риски, количество
		15	Техногенные риски, количество

$$\det(A + \lambda) = k_{15}\lambda^{15} + k_{\dots}\lambda^{15-n} + \dots + k_1\lambda; \quad (2.13)$$

$$k_{15}\lambda^{15} + k_{\dots}\lambda^{15-n} + \dots + k_1\lambda = 0; \quad (2.14)$$

где  $k$  – коэффициенты, полученные при нахождении определителя.

Корни уравнения  $\lambda_1, \lambda_2 \dots \lambda_{15}$  есть собственные значения матрицы.

После этого для каждого собственного значения (15 значений) построена матрица 2.15 для последующего нахождения собственных векторов матрицы.

$$A_n = \begin{pmatrix} \lambda_n & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \lambda_n \end{pmatrix}. \quad (2.15)$$

Нормированные показатели и матрица корреляции отражены в таблицах 2.2 и 2.3.

Затем произведено сложение исходной матрицы (2.11) с матрицей (2.15).

$$B_n = A + A_n = \begin{pmatrix} a_{11} + \lambda_n & \cdots & a_{1\ 15} + \lambda_n \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{15\ 1} + \lambda_n & \cdots & a_{15\ 15} + \lambda_n \end{pmatrix} \quad (2.16)$$

и умножение матрицы (2.16) на искомый собственный вектор:

$$B_n X_n = \begin{pmatrix} a_{11} + \lambda_n & \cdots & a_{1\ 15} + \lambda_n \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{15\ 1} + \lambda_n & \cdots & a_{15\ 15} + \lambda_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{1n} \\ \vdots \\ x_{15n} \end{pmatrix}. \quad (2.17)$$

Полученная матрица представлена в виде системы уравнений (2.18)

$$\begin{cases} (a_{11} + \lambda_n)x_{1n} + \cdots + (a_{1\ 15} + \lambda_n)x_{1n} = 0 \\ \vdots \\ (a_{15\ 1} + \lambda_n)x_{15n} + \cdots + (a_{15\ 15} + \lambda_n)x_{15n} = 0 \end{cases}. \quad (2.18)$$

Таблица 2.2 - Нормирование показателей качества конструкции в процессе эксплуатации

Показатели	г	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	1	15	18000	95	90	95	100	100	0	100	1	15	10	0	0	0
	2	15	19000	95	90	90	100	99	0	100	1	14	2	0	0	0
	3	15	20000	95	85	95	95	99	0	100	1	13	2	0	0	0
	4	15	17000	90	85	95	95	100	1	100	5	12	3	1	1	1
	5	14	16000	90	85	95	95	99	2	100	6	11	5	2	1	1
	6	14	18000	90	70	90	90	100	5	100	7	10	11	5	4	4
	7	15	18000	85	75	90	90	100	1	90	8	2	12	1	1	1
	8	13	19000	85	80	95	90	100	0	90	2	3	5	0	0	0
	9	13	20000	85	85	95	100	90	0	95	1	5	5	0	0	0
	10	13	18000	80	75	85	95	80	3	95	1	5	5	3	1	2
	11	14	18000	80	80	85	85	85	4	95	1	4	3	4	4	4
	12	12	18000	80	80	85	80	80	2	95	5	3	2	2	1	0
	13	15	18000	70	70	85	95	80	1	90	3	2	2	1	1	1
	14	14	18000	70	60	80	95	80	0	90	1	1	1	0	0	0
	15	14	18000	65	60	80	95	85	1	95	2	2	2	1	1	1
X	14	18200	83,667	78	89,333	93,333	91,8	1	95,667	3	6,8	4,667	1	1	1	
S	0,747	693,333	7,600	7,733	4,800	4,222	8,347	1,244	3,467	2,133	4,560	2,711	1,244	0,800	0,933	

Продолжение таблицы 2.2

1	1,250	-0,288	1,491	1,552	1,181	1,579	0,982	-1,071	1,250	-0,938	1,798	1,967	-1,071	-1,250	-1,071
2	1,250	1,154	1,491	1,552	0,139	1,579	0,863	-1,071	1,250	-0,938	1,579	-0,984	-1,071	-1,250	-1,071
3	1,250	2,596	1,491	0,905	1,181	0,395	0,863	-1,071	1,250	-0,938	1,360	-0,984	-1,071	-1,250	-1,071
4	1,250	-1,731	0,833	0,905	1,181	0,395	0,982	-0,268	1,250	0,938	1,140	-0,615	-0,268	0,000	0,000
5	-0,089	-3,173	0,833	0,905	1,181	0,395	0,863	0,536	1,250	1,406	0,921	0,123	0,536	0,000	0,000
6	-0,089	-0,288	0,833	-1,034	0,139	-0,789	0,982	2,946	1,250	1,875	0,702	2,336	2,946	3,750	3,214
7	1,250	-0,288	0,175	-0,388	0,139	-0,789	0,982	-0,268	-1,635	2,344	-1,053	2,705	-0,268	0,000	0,000
8	-1,429	1,154	0,175	0,259	1,181	-0,789	0,982	-1,071	-1,635	-0,469	-0,833	0,123	-1,071	-1,250	-1,071
9	-1,429	2,596	0,175	0,905	1,181	1,579	-0,216	-1,071	-0,192	-0,938	-0,395	0,123	-1,071	-1,250	-1,071
10	-1,429	-0,288	-0,482	-0,388	-0,903	0,395	-1,414	1,339	-0,192	-0,938	-0,395	0,123	1,339	0,000	1,071
11	-0,089	-0,288	-0,482	0,259	-0,903	-1,974	-0,815	2,143	-0,192	-0,938	-0,614	-0,615	2,143	3,750	3,214
12	-2,768	-0,288	-0,482	0,259	-0,903	-3,158	-1,414	0,536	-0,192	0,938	-0,833	-0,984	0,536	0,000	-1,071
13	1,250	-0,288	-1,798	-1,034	-0,903	0,395	-1,414	-0,268	-1,635	0,000	-1,053	-0,984	-0,268	0,000	0,000
14	-0,089	-0,288	-1,798	-2,328	-1,944	0,395	-1,414	-1,071	-1,635	-0,938	-1,272	-1,352	-1,071	-1,250	-1,071
15	-0,089	-0,288	-2,456	-2,328	-1,944	0,395	-0,815	-0,268	-0,192	-0,469	-1,053	-0,984	-0,268	0,000	0,000

Таблица 2.3 - Матрица корреляции

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
1	1	-	0,088	0,283	0,132	0,207	0,490	0,462	0,249	0,256	0,059	0,473	0,153	0,249	0,057	0
2	-	1	0,140	0,154	0,150	0,190	0,028	0,399	0,118	0,534	0,019	0,119	0,399	0,323	-0,31	
3	0,283	0,140	1	0,847	0,847	0,224	0,817	0,063	0,698	0,134	0,853	0,407	0,063	0,086	0,082	
4	0,132	0,154	0,847	1	0,8	0,201	0,563	0,211	0,571	0,089	0,712	0,125	0,211	0,227	0,246	
5	0,207	0,150	0,847	0,800	1	0,304	0,818	0,253	0,477	0,152	0,66	0,38	0,253	0,242	0,233	
6	0,490	0,190	0,224	0,201	0,304	1	0,27	0,539	0,282	-0,41	0,457	0,006	0,539	0,539	0,377	
7	0,462	0,028	0,817	0,563	0,818	0,270	1	0,164	0,506	0,334	0,685	0,533	0,164	0,078	0,075	
8	-	-	-	-	-	-	-	1	0,18	0,395	-0,08	0,274	1	0,927	0,924	
9	0,256	0,118	0,698	0,571	0,477	0,282	0,506	0,180	1	0,034	0,904	0,088	0,18	0,131	0,126	
10	0,059	0,534	0,134	0,089	0,152	0,410	0,334	0,395	0,034	1	0,034	0,528	0,395	0,37	0,272	
11	0,473	0,019	0,853	0,712	0,660	0,457	0,685	0,080	0,904	0,034	1	0,178	-0,08	0,097	0,073	
12	0,153	0,119	0,407	0,125	0,380	0,006	0,533	0,274	0,088	0,528	0,178	1	0,274	0,261	0,295	
13	-	-	-	-	-	-	-	1,000	0,180	0,395	0,080	0,274	1	0,927	0,924	
14	0,057	0,323	0,086	0,227	0,242	0,539	0,078	0,927	0,131	0,370	0,097	0,261	0,927	1	0,961	
15	0,000	0,310	0,082	0,246	0,233	0,377	0,075	0,924	0,126	0,272	0,073	0,295	0,924	0,961	1	

Полученная матрица представлена в виде системы уравнений (2.18)

$$\begin{cases} (a_{11} + \lambda_n)x_{1n} + \dots + (a_{1\ 15} + \lambda_n)x_{1n} = 0 \\ \dots \\ (a_{15\ 1} + \lambda_n)x_{15n} + \dots + (a_{15\ 15} + \lambda_n)x_{15n} = 0 \end{cases} \quad (2.18)$$

Выражены корни уравнений через общий множитель  $c$  (2.19).

$$\begin{aligned} x_{1n} &= p_1 c \\ &\vdots \\ x_{15n} &= p_{15} c \end{aligned} \quad (2.19)$$

Далее записаны корни системы уравнений в виде вектора (2.20)

$$X_n = \begin{pmatrix} x_{1n} \\ \vdots \\ x_{15n} \end{pmatrix} = c \begin{pmatrix} p_1 \\ \vdots \\ p_{15} \end{pmatrix}. \quad (2.20)$$

Где  $p$  определяются при операции (2.17), а  $c$  – выбран произвольным положительным минимальным значением, и  $X_n$  собственный вектор.

Все вычисления были выполнены в пакете Maple 17 (в соавторстве с Анисимовым А.Л.): были найдены собственные значения  $\lambda$  и собственные векторы, удовлетворяющие соотношению (2.13) и (2.14).

В таблице 2.4 из 15 столбцов (значений  $\lambda$ ) выбраны два значения  $\lambda$ , берущие на себя всю информационную нагрузку (два максимальных значения  $\lambda$ ).

Таблица 2.4 – Таблица максимальных собственных значений и собственных векторов

		Lambda	
		4,362	5,458
Показатели	1	-0,143	-0,186
	2	0,172	-0,076
	3	0,346	-0,173
	4	0,312	-0,662
	5	0,657	0,139
	6	-0,219	-0,533
	7	-0,282	0,225
	8	0,001	-0,225
	9	0,310	0,165
	10	0,156	0,064
	11	-0,018	0,190
	12	-0,045	-0,153
	13	0,151	0,125
	14	-0,197	0,123
	15	0,001	-0,006

На основе таблицы 2.4 построен график – рисунок 2.3: собственный вектор, соответствующий собственному значению 4,362 (синяя линия); собственный вектор, соответствующий по величине собственному значению 5,458 (красная линия).

В соответствии с полученным графиком производится отбор показателей, оказывающих наибольшее влияние на качество конструкции с позиции конструкционного риск-анализа.

Максимальные значения в области качества приняли значения «Показатели надежности» (5). Под показателями надежности понимаем вероятность безаварийной работы, безотказность, ремонтпригодность, долговечность. Кроме этого, максимальные значения векторов наблюдаем у показателей безопасности (9) и экономических показателей (7).

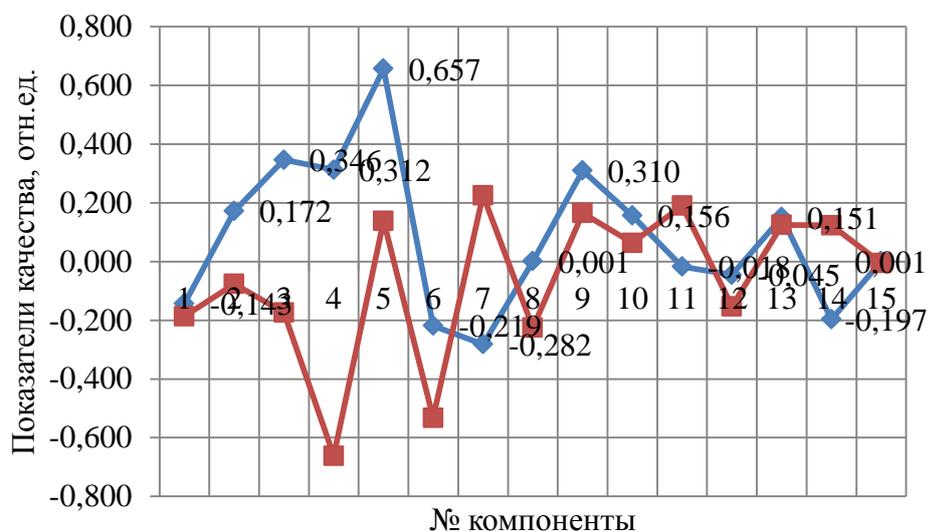


Рисунок 2.3 - График показателей качества эксплуатации конструкции

Исходя из этого, можно сделать вывод о том, что наибольшее влияние на качество элементов кранового оборудования металлургического предприятия оказывают показатели надежности, безопасности и экономические показатели.

Минимальные значения в области качества имеют показатели, связанные с количеством конструкций (1). Но это говорит лишь о том, что оценка качества каждой конструкции стандартизирована.

После анализа была проверена точность результатов анализа, с помощью формулы (2.21).

$$\text{Вклад } i \text{ — ой главной компоненты} = \frac{\lambda_i}{\text{Размер выборки}} * 100. \quad (2.21)$$

В данном исследовании удельный вклад 1 главной компоненты равен 29,1%, удельный вклад 2 главной компоненты равен 36,4%. Суммарные вклады по 2 главным компонентам равны 65,5%.

Таким образом, доля дисперсии первых двух компонент составляет 65,5 % (из 15 компонент), что представляется удовлетворительным результатом. Следовательно, данные из первых двух компонент могут быть использованы без существенной потери информации и анализ методом главных компонент можно считать проведенным успешно.

Применение метода главных компонент структурирует показатели посредством сведения множества переменных к меньшему числу переменных, которые объясняют большую часть вариации в значениях исследуемых данных.

В данном исследовании из 15 показателей (7 показателей надежности и 8 показателей безопасности) были выявлены наиболее значимые 9 показателей, которые существенно оказывают влияние на качество эксплуатации элементов кранового оборудования:

показатели надежности (5 показателей):

- Число наработанных циклов (2);
- наработка без перерывов (3);
- уровень ремонтпригодности (4);
- вероятность безаварийной работы (5);
- величина ущерба, рисковые затраты;

и показатели безопасности (4 показателя):

- тяжело-нагруженные режимы работы (9);
- нарушения правил эксплуатации (10);
- нарушения стандартов качества по эксплуатации (11);
- социальные и индустриальные риски (13).

Ущерб и рисковые затраты в экономических показателях рассматриваются при наличии неблагоприятных событий.

К показателям надежности будем относить вероятность безаварийной (безотказной) работы конструкции, уровень ремонтпригодности, долговечность, к показателям безопасности – режимы работы конструкций, нарушения стандартов качества эксплуатации, связанные с ними социальные, индустриальные, экологические и техногенные риски.

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

### 2.3 Вероятностная оценка риска конструкций

Рассматривая вероятность превышения функцией выхода системы критического уровня и учитывая ее не только при проектировании, но и эксплуатации технологического оборудования, возможно обеспечить наиболее надежную и долговечную конструкцию с достаточно высокой гарантией этих качественных показателей, тем самым увеличивая ее работоспособность и качество выпускаемой ею продукцию. Кроме этого, значительно снижаются затраты, что актуально всегда.

Такие превышения значения выходных параметров не являются характерными и связаны в каждом случае с пиками и предвестниками пиков в режимах нагружения, отклонениями в технологии производства или в прочностных характеристиках материала.

Исследуемой частью выхода из строя должны быть концентрированные накопленные повреждения в ответственном месте конструкции.

Таким образом, оценка качества может быть проведена с учетом риск-анализа пиков и предвестников пиков экстремальных значений случайной функции выше допустимого уровня.

Определим выражение для математического ожидания [32, 77-80] числа пиков за некоторый промежуток времени  $T$ :

$$\bar{n}\left(\frac{X^*(t)}{T}\right) = T \int_0^{\infty} x'(t) p[X^*(t), x'(t)] d[x'(t)], \quad (2.22)$$

где  $x'(t)$  - скорость изменения  $X(t)$ ;

$X^*(t)$  - допускаемое значение случайной функции;

$p[X^*(t), x'(t)]$  - плотность распределения допускаемых значений случайной функции и скорости ее изменения.

Число пиков в единицу времени:

$$\bar{n}^*(X^*(t)) = \frac{\bar{n}\left(\frac{X^*(t)}{T}\right)}{T} = \int_0^{\infty} x'(t) p[X^*(t), x'(t)] d[x'(t)]. \quad (2.23)$$

Расчет вероятностных свойств предполагаемых зон разрушения в виде совместной функции распределения вероятностей  $f(\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}, l, J_c, N)$  представляет крайне сложную некорректную стохастическую задачу. Упростим задачу, предполагая, что базисные переменные будут независимы. Поэтому вместо многопараметрической функции будем рассматривать  $f(\sigma_{ij})$  или  $f(\varepsilon_{ij})$ ,  $f(N)$ .

Для нормального стационарного процесса значения случайных функций и скорость их изменения являются величинами независимыми и некоррелированными [32, 77-82]:

$$p(X^*, x') = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_{x'}} e^{-\frac{(X^*-\bar{x})^2}{2\sigma_x^2}} e^{-\frac{(x')^2}{2\sigma_{x'}^2}}, \quad (2.24)$$

где  $\sigma_{x'}^2$  - дисперсия скорости изменения случайной функции;

-  $\sigma_x^2$  - дисперсия допускаемых значений случайной функции.

Подставим (2.24) в (2.23):

$$\begin{aligned} & \bar{n}^*(X^*(t)) \\ &= \int_0^{\infty} x'(t) \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_{x'}} e^{-\frac{(X^*-\bar{x})^2}{2\sigma_x^2}} e^{-\frac{(x')^2}{2\sigma_{x'}^2}} d[x'(t)] \\ &= \frac{\sigma_{x'}^2}{2\pi\sigma_x\sigma_{x'}} e^{-\frac{(X^*-\bar{x})^2}{2\sigma_x^2}} \int_0^{\infty} d \left[ e^{\frac{(x')^2}{2\sigma_{x'}^2}} \right]. \end{aligned} \quad (2.25)$$

Найдем вероятность выхода из строя системы за время  $T$  (с учетом закона распределения пиков амплитуд нагрузки за допустимый уровень) в следующем виде:

$$n^*(X^*) \approx P\left(x > \frac{X^*}{T}\right) \approx \frac{T}{2\pi} * \frac{\sigma_{x'}^1}{\sigma_x} e^{-\frac{(X^* - \bar{x})^2}{2\sigma_x^2}} \int_0^\infty d\left[e^{\frac{(x')^2}{2\sigma_{x'}^2}}\right]. \quad (2.26)$$

Выразив  $\sigma_x$  и  $\sigma_{x'}$  через спектральную плотность процесса :

$$\sigma_x^2 = \int_0^\infty \Phi_x(\omega) d\omega \text{ и } \sigma_{x'}^2 = \int_0^\infty \omega^2 \Phi_x(\omega) d\omega.$$

Тогда (2.26) принимает вид:

$$n^*(X^*) \approx P\left(x > \frac{X^*}{T}\right) \approx \frac{T}{2\pi} * \sqrt{\frac{\int_0^\infty \omega^2 \Phi_x(\omega) d\omega}{\int_0^\infty \Phi_x(\omega) d\omega}} e^{-\frac{(X^* - \bar{x})^2}{2 \int_0^\infty \Phi_x(\omega) d\omega}} \int_0^\infty d\left[e^{\frac{(x')^2}{2 \int_0^\infty \omega^2 \Phi_x(\omega) d\omega}}\right]. \quad (2.27)$$

Имея данные величинам  $\sigma_x$  и  $\sigma_{x'}$  процесса и принимая, что  $\frac{\sigma_{x'}}{\sigma_x} = \omega_0$  – средняя частота процесса, формула (2.27) будет:

$$n^*(X^*) \approx P\left(x > \frac{X^*}{T}\right) \approx \frac{T\omega_0}{2\pi} * e^{-\frac{(X^* - \bar{x})^2}{2 \int_0^\infty \Phi_x(\omega) d\omega}} \int_0^\infty d\left[e^{\frac{(x')^2}{2 \int_0^\infty \omega^2 \Phi_x(\omega) d\omega}}\right]. \quad (2.28)$$

Если рассматриваемая механическая система подвержена воздействию стационарных случайных нагрузок, перегрузки ее элементов (например, с возникновением напряжений, близких по величине к пределу текучести) зарождаются, когда она попадает в область околорезонансных колебаний.

При достижении области резонанса происходит интенсивный рост всех статистических и частотных характеристик процесса (амплитуд, величин перегрузки и среднего числа пиков за допусаемый уровень), которые при определенных условиях могут достигать предельных значений и приводят к выходу системы из строя.

Конструкция должна работать вне этой так называемой пиковой области, а перегрузки, которые 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.

В рассматриваемых конструкциях число пиков достаточно мало и их появление можно считать независимыми катастрофическими редкими событиями. Примем появление пиков амплитуд нагрузок за допустимый уровень приближенно подчиняющимся закону  $\chi^2$  – распределения Пирсона, тогда вероятность того, что для стационарного процесса нагружения системы (2.28) за время  $T$  случайная функция превысит уровень  $X^*$ , будет:

$$n^*(X^*) \approx P\left(x > \frac{X^*}{T}\right) \approx \frac{T}{2\pi\psi(m_0)} \int_{v_0^*}^{\infty} v^{m_0-1} e^{-\frac{v^2}{2}} dv, \quad (2.29)$$

где  $v$  - параметр распределения Пирсона:

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

-  $\psi(m_0)$  – нормировочная постоянная распределения:

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

-  $v_0^*$  - нижний предел интегрирования, представляющий минимальное значение параметра распределения:

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

-  $x_0$  – 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 (2.29) 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.

При исследовании процесса нагружения в механической системе интеграл (2.26) будем рассматривать в пределах  $v_0^* - v_{max}^*$ . Тогда (2.26):

$$P\left(x > \frac{X^*}{T}\right) = \frac{T}{2\pi} \{P[(v_0^*)^2, m_0] - P[(v_{max}^*)^2, m_0]\}, \quad (2.30)$$

где  $v_{max}^*$  - верхний предел интегрирования, представляющий максимальное значение случайной функции нормального процесса:

$$v_{max}^* = \frac{\sigma_{x\ max}}{\sigma'_{x\ max}} e^{-\frac{(X^* - \bar{x}_{max})^2}{2\sigma_{x\ max}^2}} \int_0^{\infty} d \left[ e^{\frac{(x'_{max})^2}{2\sigma_{x\ max}^2}} \right].$$

Построим теоретическую кривую безотказной работы механической системы металлургического крана.

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 2.4.

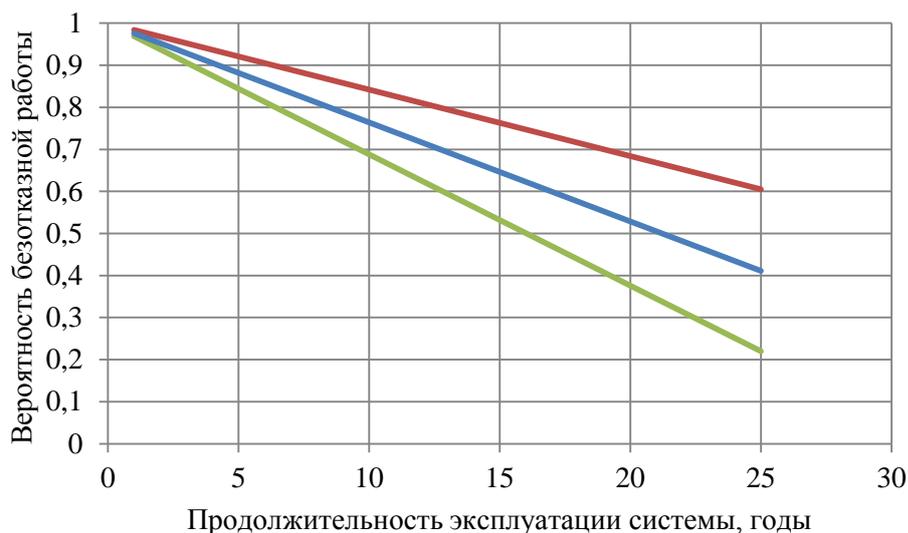


Рисунок 2.4 – Теоретическая кривая безотказной работы технической системы

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».

Эксплуатация кранов металлургического предприятия всегда связано с высокой степенью опасности. В настоящее время риски аварий и катастроф только увеличиваются, потому что задерживается замена устаревшей техники, многократно продлевается время ее эксплуатации за гарантийными сроками, снижается профессиональная подготовка обслуживающего персонала.

Несмотря на то, что достаточное количество лет эксплуатируются металлургические заводы, механизм оценки качества конструкций их ответственных объектов или их элементов отсутствует.

Одним из важных объектов металлургического предприятия является различное крановое оборудование, сталь-ковши, мостовые краны и другие. Поэтому имеет смысл исследовать безопасность и риски для такого оборудования.

Изменение задач, которые должен решать выбранный металлургический объект и оборудование, его моральное и физическое старение приводят к необходимости его модернизации и покупке нового такого оборудования.

Краны металлургического предприятия имеют достаточно большой жизненный цикл, известны случаи эксплуатации от 15 до 30 и более лет, в среднем 28 лет [116].

Основной задачей оценки качества таких объектов металлургического предприятия является формализация процессов перехода от штатных эксплуатационных состояний к аварийным и катастрофическим, их аналитическое описание и на этой основе разработка методик количественного определения и задания требований к показателям рисков кранового оборудования металлургического предприятия как интегральным показателям качества в процессе гарантийной и послегарантийной эксплуатации.

#### 2.4 Качество и риски технологического оборудования

Наиболее общей характеристикой любой механической системы является качество, то есть совокупность свойств, обуславливающих его пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с назначением. Качество определяет пригодность к эксплуатации во всех ее режимах, рисунок 2.5.

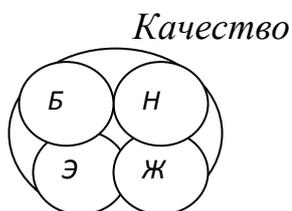


Рисунок 2.5 - Взаимосвязь свойств механической системы: *Б* – безопасность; *Н* – надежность; *Э* – экономические показатели (эффективность); *Ж* – живучесть

Под надежностью понимают свойство объекта (системы) сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих

способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях. Надежность – это основная часть качества, развернутая во времени.

Для определения надежности необходимо:

- 1) задать объект (систему);
- 2) определить все режимы и время его эксплуатации;
- 3) назначить эксплуатационные показатели для каждого режима и допустимые пределы их изменения.

Следующим за понятиями надежности, безопасности и эффективности технологического оборудования является свойство живучести. Живучесть – свойство объекта (системы) сохранять работоспособное состояние при внешних воздействиях, превышающих установленные эксплуатационные уровни. Объект может быть высоконадежен, но маложивуч. Например, в обычных эксплуатационных режимах объект (система) работает хорошо и в течение длительного времени, но при превышении внешних нагрузок сразу же отказывает. И наоборот, объект не может безотказно работать долго, но легко переносит нагрузки выше эксплуатационных режимов. При этом свойство живучести не пересекается со свойством надежности, а входит в него.

Безопасность – это такое состояние в течение жизненного цикла, при котором не наступает опасных последствий (аварий и катастроф).

Под аварией будем понимать такое изменение в состоянии техники, которое приводит ее не только в неработоспособное состояние, но и требует внепланового ремонта.

Катастрофа – это такое последствие ухода из штатного состояния, при котором с определенной вероятностью  $P$  наносится серьезный ущерб  $U$  здоровью персонала и самим объектам.

Для оценки риска  $R$  будут использованы определения надежности, которые использованы для раскрытия свойств безопасности рисунок 2.6.

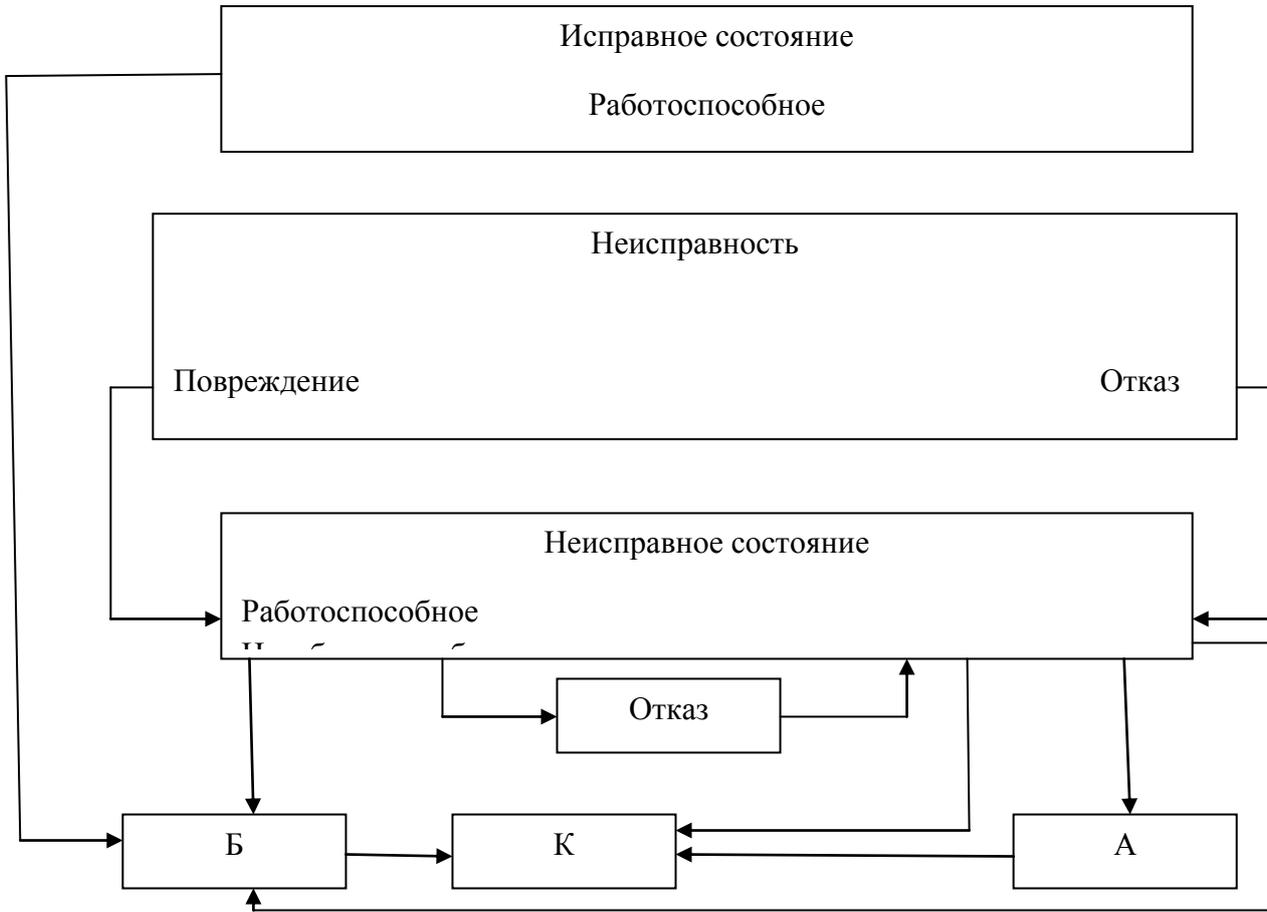


Рисунок 2.6 - Схема возникновения опасных и безопасных состояний технологического оборудования:  $B$  – безопасное;  $K$  – катастрофическое;  $A$  – аварийное

Для оценки и анализа техногенного риска технологического оборудования металлургических предприятий необходимо аналитически выразить совместное влияние опасных факторов на безопасность и риски в каждом эксплуатационном процессе.

Технологическое оборудование металлургического предприятия характеризуется целой совокупностью весьма опасных факторов. Здесь присутствуют перемещение больших грузов, жидкий расплавленный металл, высокие температуры, широкий спектр частот колебаний – вибраций.

Развитая система такого комплекса оборудования, большое количество различных агрегатов опасны для производства и для персонала (механические повреждения, падения с высоты).

Следующими внутренними по отношению к технологическому оборудованию опасными факторами являются ошибки в конструкторской, технологической и эксплуатационной документациях.

Существенным источником опасности является персонал, работающий на оборудовании. К авариям и катастрофам может приводить недостаточная обученность людей, а также нарушается последовательность операций.

Для количественной оценки безопасности и риска любого элемента или совокупности элементов технологического оборудования металлургических предприятий необходимо иметь количественные значения параметров опасных факторов:

- детерминированная, когда значения рассматриваются как неслучайные величины, назначенные из практических соображений;
- параметр является случайной величиной, что позволяет давать вероятностные оценки появления опасности и рисков;
- выражение опасного фактора как случайного  $n$ -мерного вектора;
- описание функции  $Z$  случайных величин, когда собственно функциональная зависимость детерминирована, но в нее входят случайные величины с известными законами распределения.

Наиболее интересной формой определения неблагоприятных условий предполагается их запись в виде случайных функций (процессов).

Такой является форма канонического разложения:

$$X(t) = m_x(t) + \sum_{i=1}^{\infty} V_i \varphi_i(t), \quad (2.31)$$

где  $X(t)$  - случайная функция;

-  $m_x(t)$  - функция математического ожидания;

- $V_i$  - случайные некоррелированные центрированные величины;
- $\varphi_i(t)$  – координатные функции.

Такое разложение заменяет случайную функцию набором случайных величин и неслучайных функций. Ограничиваемся несколькими ( $k$ ) первыми членами:

$$X(t) = m_x(t) + \sum_{i=1}^k V_i \varphi_i(t). \quad (2.32)$$

Полной характеристикой случайной функции является многомерный закон распределения в каждой точке процесса. Для канонического разложения (2.31) и (2.32) достаточно знать дисперсии  $\Delta_i(V_i)$  случайных величин и координатные функции.

Для нестационарной случайной функции координатные функции имеют произвольный вид и могут быть определены множеством способов, так же как вектор в пространстве можно разложить на составляющие бесчисленными количеством вариантов. Например [19-25]:

$$\varphi_i(t) = \left\{ \begin{array}{l} \frac{K_x(t_i, t) - \sum_{r=1}^{i-1} \varphi_r(t) \varphi_r(t_i) \sigma_r^2}{\sigma_r^2}, t \geq t_i \\ 0, t > t_i. \end{array} \right\}, \quad (2.33)$$

$$\sigma_i^2 = K_x(t, t_i) - \sum_{r=1}^{i-1} [\varphi_r(t_i)]^2 \sigma_r^2,$$

где  $K_x(t, t_i)$  - корреляционная матрица.

Если случайный процесс на интервале  $(0, t)$  дифференцируемый, то можно найти вероятность  $P_0(t)$  отсутствия его выбросов (неблагоприятных ситуаций) за неслучайные пределы  $X_H, X_B$  за время  $t$ , что является особенно важно для оценки риска и безопасности процесса. Будем полагать, что случайные выбросы, как редкие события, распределены по закону Пуассона:

$$P(X = x) = \frac{a^x}{x!} e^{-a}, \quad (2.34)$$

$$x = 0, 1, 2, \dots; m_x = a; \sigma = \sqrt{a}.$$

Кроме этого, полагаем, что выбросы за нижний и верхний пределы независимы:

$$P_0(t) = 1 - \int_0^t \left\{ \int_0^\infty \left[ f\left(X_B, \frac{v}{t}\right) + f\left(X_H, \frac{v}{t}\right) \right] v dv \right\} dt, \quad (2.35)$$

$$\frac{v}{t} = \frac{dX(t)}{dt}.$$

Упростим (2.35), учитывая, что эта вероятность близка к единице:

$$P_0(t) = \exp \left\{ - \int_0^t \left\{ \int_0^\infty \left[ f\left(X_B, \frac{v}{t}\right) + f\left(X_H, \frac{v}{t}\right) \right] v dv \right\} dt \right\}. \quad (2.36)$$

Для стационарной случайной функции в более строгом смысле все ее вероятностные характеристики не меняются при любом сдвиге по оси  $t$ . В практических целях свойство стационарности используют в широком смысле, требуя выполнения только одного условия

$$K_x(t, t_i) = K_x(\tau) = K_x(0)\rho(\tau), \quad (2.37)$$

где  $K_x(0) = \sigma_x^2$  - дисперсия процесса;

$\rho(\tau)$  - нормированная корреляционная функция.

При существенном изменении математического ожидания изучают центрированный процесс

$$X_0(t) = X(t) - m_x(t). \quad (2.38)$$

В стационарном центрированном случайном процессе на интервале  $(0, t)$  каноническое разложение принимает вид:

$$X_0(t) = \sum_{i=0}^{\infty} (V_i \cos \omega_i t + v_i \sin \omega_i t) = \sum_{i=1}^k (V_i \cos \omega_i t + v_i \sin \omega_i t), \quad (2.39)$$

где  $V_i, v_i$  - случайные центрированные некоррелированные величины с дисперсиями  $\sigma_i^2$ ;

$$\omega_i = \frac{i\pi}{T}; \sigma_i^2 = \frac{2}{T} \int_0^T K_x(\tau) \cos \omega_i \tau d\tau \quad (i \neq 0); \sigma_0^2 = \frac{1}{T} \int_0^T K_x(\tau) d\tau.$$

$$S(\omega) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty K_x(\tau) \cos \omega \tau d\tau. \quad (2.40)$$

Дисперсия процесса, постоянна по определению, связана со спектральной плотностью

$$\sigma_x^2 = \int_0^{\infty} S(\omega) d\omega. \quad (2.41)$$

Для стационарного дифференцируемого процесса:

$$P_0(t) = \exp \left\{ -t \int_0^{\infty} \left[ f \left( X_B, \frac{v}{t} \right) + f \left( X_H, \frac{v}{t} \right) \right] v dv \right\}. \quad (2.42)$$

Для стационарного дифференцируемого процесса, распределенного нормально

$$P_0(t) = \exp \left\{ -\frac{t}{2\pi} \sqrt{\frac{-K''_{xx}(0)}{K_x(0)}} \left[ e^{-\frac{(X_B - m_x)^2}{2\sigma_x^2}} + e^{-\frac{(X_H - m_x)^2}{2\sigma_x^2}} \right] \right\}, \quad (2.43)$$

где  $K''_{xx}(0) = -\frac{d^2 K_x(0)}{d\tau^2} = -\sigma_v^2$  – дисперсия скорости процесса с отрицательным знаком. Для дифференцируемого стационарного процесса всегда существует вторая производная корреляционной функции.

В качестве модельного примера произведем расчет по формулам для главной балки мостового металлургического крана грузоподъемностью 50 т.

Пусть работа несущей конструкции крана при подъеме, перемещении и опускании груза – изменение действующих изгибных напряжений является случайным стационарным дифференцируемым процессом с нормальным распределением. Постоянное математическое ожидание  $m_\sigma = 165$  МПа, дисперсия  $\sigma^2 \approx 8300$  МПа<sup>2</sup>, корреляционная функция процесса имеет вид

$$K_\sigma(\tau) = \sigma^2 e^{-\alpha^2 \tau^2},$$

где  $\alpha = 0,035$  с<sup>-1</sup>.

Нормированная корреляционная функция  $\rho(\tau) = e^{-\alpha^2 \tau^2}$  представлена на рисунке 2.6.

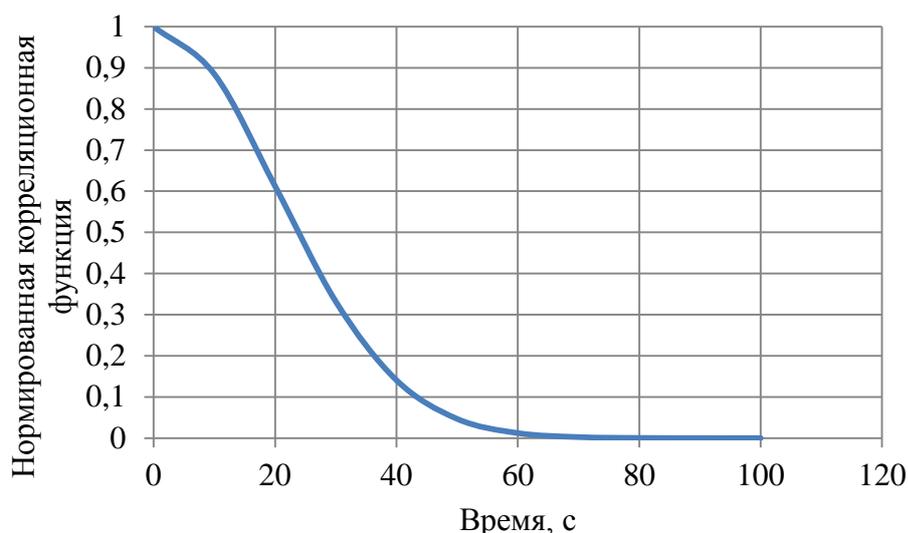


Рисунок 2.6 - Нормированная корреляционная функция случайной функции напряжения в несущей конструкции крана

Модельный пример.

Пусть установлены неслучайные пределы – верхний  $\sigma_B = 256$  МПа и нижний предел  $\sigma_H = 74$  МПа, выход за которые процесса приводит к аварии. Необходимо найти вероятность того, что в течение 100 с не произойдет ни одного выброса (неблагоприятной ситуации) за установленные пределы, если выбросы вверх и вниз независимы.

Анализ нормированной корреляционной функции показывает, что случайные отклонения действующих напряжений, происшедшие в произвольный момент времени, в среднем достаточно долго не затухают. Даже через 100 с работы отклонение, возникшее в начальный момент, будет еще заметно сказываться на отклонениях в сечении  $t=100$  с. Реализация такого процесса – гладкие функции без резких колебаний.

Для расчета вероятности по (2.43) найдем вторую производную от корреляционной функции:

$$K_{\sigma}(\tau) = \sigma^2 e^{-\alpha^2 \tau^2},$$

$$K'_{\sigma}(\tau) = -2\alpha^2 \tau \sigma^2 e^{-\alpha^2 \tau^2},$$

$$K''_{\sigma}(\tau) = -2\alpha^2 \sigma^2 e^{-\alpha^2 \tau^2} + 4\alpha^2 \tau^2 \sigma^2 e^{-\alpha^2 \tau^2},$$

$$\tau = 0:$$

$$K_{\sigma}(0) = \sigma^2, K'_{\sigma}(0) = 0, K''_{\sigma}(0) = -2\alpha^2\sigma^2.$$

Подставим полученные значения в (2.43):

$$P_0(t) = \exp \left\{ -\frac{100}{2\pi} \sqrt{2 * (0,035)^2 \left[ e^{-\frac{(256-165)^2}{2*8300}} + e^{-\frac{(74-165)^2}{2*8300}} \right]} \right\} = e^{-0,8686}$$

$$= 0.4195.$$

Вероятность риска аварии при этом будет:

$$R = 1 - P_0(t) = 1 - 0.4195 = 0.5805.$$

Если взять в качестве объектов металлургического предприятия, например, 10 мостовых кранов грузоподъемностью 50 т, то из-за возможного выхода действующих напряжений за установленные пределы в несущих конструкциях возможно М аварий или катастроф:

$$M = n * R = 10 * 0,5805 = 5,805,$$

что, безусловно, при данных условиях неприемлемо. Такой расчет может помочь не только эксплуатационникам, но и проектировщикам при выборе допустимых пределов  $\sigma_H, \sigma_B$ , выход напряжений за которые ведет к аварии. Следует отметить при расчетах важность назначения коэффициента  $\alpha$ .

Изменим  $\sigma_H, \sigma_B$  и  $\alpha$ :

$$P_0(t) = \exp \left\{ -\frac{100}{2\pi} \sqrt{2 * (0,035)^2 \left[ e^{-\frac{(166-165)^2}{2*0,0625}} + e^{-\frac{(164-165)^2}{2*0,0625}} \right]} \right\} = e^{-0,0204}$$

$$= 1 - 0.0204 = 0,9796.$$

Вероятность риска аварии при этом будет:

$$R = 1 - P_0(t) = 1 - 0.9796 = 0,0204.$$

Если взять основное технологическое оборудование металлургических предприятий, например, 10 мостовых кранов грузоподъемностью 50 т, то из-за возможного выхода действующих напряжений за установленные пределы в несущих конструкциях возможно М аварий или катастроф:

$$M = n * R = 10 * 0,0204 = 0,204,$$

что можно считать приемлемым.

Таким образом, можно сделать следующий вывод: если кран эксплуатируется при нагрузках, закрепленных в нормативной документации, вероятность риска аварии значительно снижается.

Источники опасности разделяются на четыре группы: собственно техника, люди, документация, внешние факторы. Первые три группы факторов характеризуются параметрами, которые меняются в процессе жизненного цикла.

Доработки техники значительно уменьшают опасность аварий и катастроф, соответственно повышают их качество.

Другой причиной изменения параметров опасных факторов являются старение, износ, выработка ресурса, что снижает безопасность и повышает риски.

Опасность проявляется только при эксплуатации (само по себе ничего не происходит).

С учетом того, что исходные опасные факторы, влияющие на оборудование, случайны, выходные обобщенные характеристики безопасности и риска целесообразно представлять в виде вероятностных величин.

Основным показателем безопасности можно считать вероятность безопасной эксплуатации за определенное время или весь срок эксплуатации.

Производными от этого показателя могут быть среднее время эксплуатации до первой аварии, число аварий за время.

Вероятность отражает характеристику генеральной совокупности объектов, так как вероятность – это мера множества.

Рассмотрим период падения вероятности на интервале после окончания срока гарантийного обслуживания. На этом интервале поток можно принять пуассоновским, так как возникновение двух и более аварий на бесконечно малом отрезке времени мала (свойство ординарности), а также практически отсутствует последствие (вероятность возникновения аварии на данном отрезке времени почти не зависит от числа и моментов появления аварий на других отрезках – отсутствие последствия):

$$P_x = \frac{a^x}{x!} e^{-a}, x = 0, 1, 2, \dots; m_x = a; \sigma = \sqrt{a}. \quad (2.44)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} P_6(T_r, T_3) = \exp\left[-\int_{T_r}^{T_3} \lambda(\tau) d\tau\right]; \\ T_0 = \int_{T_r}^{T_3} P_6(t) dt; \end{array} \right. \quad (2.45)$$

где  $T_0$  – среднее время эксплуатации до первой аварии;  $\lambda(t)$  - переменная условная плотность вероятности аварии, при условии, что до этого момента авария не наступила. Иногда этот показатель упрощенно и неточно называют интенсивностью потока событий.

Для проектных расчетов, то есть для прогноза необходимо задать эту функцию на рассматриваемом интервале. Для этого, по накопленному опыту эксплуатации подобных объектов необходимо задать сам интервал и характер изменения этой плотности.

Аварии – события редкие, поэтому интервалы должны быть значительными (порядка одного года). Полную же гистограмму можно получить только после окончания эксплуатации оборудования и использовать для новых прогнозов или по результатам первых лет экстраполировать ход кривой.

Для того чтобы перейти к статистическому оцениванию на каждом интервале можно считать  $\lambda(T_i) = \lambda_i = const$ .

Первая проблема – состав генеральной совокупности. Полагаем, что такая совокупность бесконечная, так как количество оборудования составляет порядка 1200 единиц. Необходимо отметить, что оборудование выпущено серийно, в разные годы и могут отличаться друг от друга, представлены в одном или нескольких экземплярах. Все это накладывает различные ограничения на использование оценок при бесконечной генеральной совокупности.

Вторая проблема – определение статистического плана испытаний.

Таким образом,  $\lambda(t)$  – параметр экспоненциального закона распределения. Для него известны оценки максимального правдоподобия и законы распределения этих оценок, позволяющие найти доверительные интервалы [20,21].

Запишем простое выражение для расчета оценки

$$\hat{\lambda}_i = \frac{\hat{m}_i}{n_i * T_i}, \quad (2.46)$$

где  $\hat{m}_i$  – количество аварий за определенное время;  $n$  – количество единиц техники.

Это случайное число имеет закон распределения Пуассона, поэтому верхний односторонний доверительный предел может быть выражен через распределение  $\chi^2$ :

$$\hat{\lambda}_{iB} = \frac{1}{2n_i * T_i} \chi_{\gamma 1}^2(2\hat{m}_i + 2), \quad (2.47)$$

так как квантили распределения Пуассона и квантили «хи-квадрат» связаны соотношением

$$a_\alpha(k) = \frac{1}{2} \chi_{1-\alpha}^2(2k + 2). \quad (2.48)$$

Для случая отсутствия аварий двусторонний доверительный предел будет иметь вид:

$$\hat{\lambda}_{iH} = 0; \hat{\lambda}_{iB} \approx \frac{3,0}{n_i * T_i}. \quad (2.49)$$

Для экспоненциального закона, зная верхний доверительный интервал параметра  $\hat{\lambda}_{iB}$  можно найти нижний доверительный предел  $\hat{P}_{iH}$  вероятности непоявления аварии на интервале  $T_i$ , с той же доверительной вероятностью

$$\hat{P}_{iH}(T_i) = e^{-\hat{\lambda}_{iB} T_i}. \quad (2.50)$$

Заметим, что в силу нелинейности функции вероятности оценка максимального правдоподобия будет смещенной, однако на практике обеспечивается  $p \geq 0.9$  и предыдущее выражение линеаризуется

$$\hat{P}(t) \approx 1 - \hat{\lambda}t. \quad (2.51)$$

Оценка вероятности безаварийной эксплуатации будет асимптотически почти несмещенной эффективной состоятельной.

Таким образом, получим для интервалов ряд оценок и доверительных пределов [20,21]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{P}_1(T_1) = e^{-\hat{\lambda}_1 T_1}; \hat{P}_{H1}(T_1) = e^{-\hat{\lambda}_{B1} T_1}; \\ \hat{P}_2(T_2) = e^{-\hat{\lambda}_2 T_2}; \hat{P}_{H2}(T_2) = e^{-\hat{\lambda}_{B2} T_2}; \\ \dots \dots \dots; \dots \dots \dots; \\ \hat{P}_i(T_i) = e^{-\hat{\lambda}_i T_i}; \hat{P}_{Hi}(T_i) = e^{-\hat{\lambda}_{Bi} T_i}; \\ \dots \dots \dots; \dots \dots \dots; \\ \hat{P}_k(T_k) = e^{-\hat{\lambda}_k T_k}; \hat{P}_{Hk}(T_k) = e^{-\hat{\lambda}_{Bk} T_k}. \end{array} \right. \quad (2.52)$$

Полагая независимость аварий на различных интервалах времени, можно записать выражение для оценки  $\hat{P}(T_3 - T_\Gamma)$  вероятности безаварийной работы всего оборудования [20,21]:

$$\begin{aligned} \hat{P}(T_3 - T_\Gamma) &= \hat{P}\left(\sum_{i=1}^k T_i\right) = \prod_{i=1}^k \hat{P}_i(T_i) \\ &= \exp\left(-\sum_{i=1}^k \hat{\lambda}_i T_i\right) \approx 1 - \sum_{i=1}^k \hat{\lambda}_i T_i. \end{aligned} \quad (2.53)$$

Аналогично для нижнего доверительного предела получим

$$\widehat{P}_H(T_3 - T_\Gamma) = 1 - \sum_{i=1}^k \hat{\lambda}_i T_i. \quad (2.54)$$

$$T_i = \frac{T_3 - T_\Gamma}{k} = \frac{T}{k}. \quad (2.55)$$

Приведем модельный пример.

Исследуем металлургические мостовые краны, работающие в тяжелых и сверхтяжелых режимах, гарантийный срок эксплуатации которых составляет 15 лет.

Между небольшими подъемами после технического обслуживания вероятности безаварийной работы следует неуклонное падение и рост рисков аварий.

$$R(t) = [1 - P_0(t)]M(U), \quad (2.56)$$

где  $R$  – риск оборудования;  $M(U)$  – математическое ожидание ущерба.

$$P(t) = P_0 \exp\left[-\int_0^t \lambda(\tau) d\tau\right]. \quad (2.57)$$

$$T_0 = \int_0^{\infty} P(t) dt. \quad (2.58)$$

По опыту эксплуатации примем функцию интенсивности аварий линейной:

$$\lambda(\tau) = 0,005 + 0,003\tau. \quad (2.59)$$

$$P(t) = 0,990 \exp\left[-\int_0^t (0,005 + 0,003\tau) dt\right]. \quad 0 \leq t \leq 5 \text{ (лет)}.$$

После интегрирования получим

$$P(t) = 0,990 \exp\left[-0,005t - \frac{0,003t^2}{2}\right].$$

Результаты приведены в таблице 2.5 и на рисунках 2.7, 2.8 соответственно.

Таблица 2.5 Вероятность безаварийной эксплуатации  
и качества оборудования за пределами гарантийных  
сроков эксплуатации

t	0	1	2	3	4	5
P(t)	0,992	0,986	0,976	0,964	0,949	0,932
R(t)	0,008	0,014	0,024	0,036	0,051	0,068
K(t)	125,00	71,43	41,67	27,78	19,61	14,71

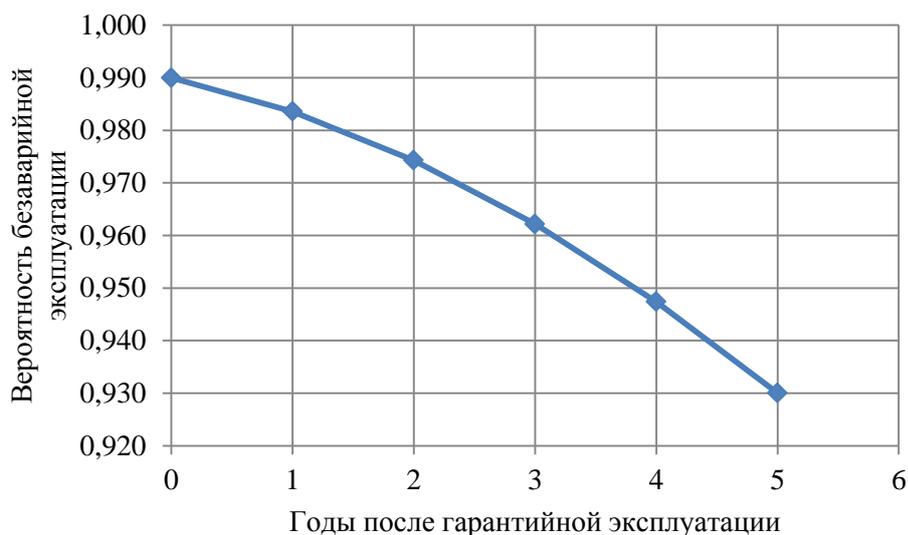


Рисунок 2.7 - Вероятность безаварийной эксплуатации за пределами гарантии



Рисунок 2.8 - Качество оборудования за пределами гарантии по годам

Используя методику и расчеты, можем оценить аварийность за пределами гарантийных сроков эксплуатации.

Аппроксимируем  $P(t) = 0,992 - 0,01204t$ ,  $t$  – годы.

$$T_0 = \int_0^{\infty} P(t)dt = \int_0^5 (0,992 - 0,01204t)dt = (0,992t - 0,006t^2)_0^5 = 4,81 \text{ года.}$$

Это позволяет количественно оценить качество эксплуатируемого оборудования. Так видно, что в относительных единицах качества ниже 20 (красная линия) единиц (без учета денежных единиц) дальнейшая эксплуатация оборудования после гарантийных сроков эксплуатации нецелесообразна или невозможна, то есть продление эксплуатации в этом случае возможно на 4,81 года, если не выполнять никаких технических мероприятий по его повышению.

## 2.5 Метод расчета вероятности безаварийной эксплуатации кранового оборудования

Оценим:

- вероятность безопасной работы (риск) в течение гарантийного срока эксплуатации;
- статистически риска.

Две задачи прогнозирования изменения вероятности безаварийной работы:

- 1) основного периода эксплуатации оборудования;
- 2) периода за пределами гарантийных сроков.

Второй случай был рассмотрен в предыдущем разделе.

Этап эксплуатации с регламентами и техническим обслуживанием 10 кранов.

Спрогнозируем изменение функции вероятности безаварийности на объектах в течение  $(0, T)$ , равного 10 годам таблица 2.5, рисунок 2.9 соответственно.

$$P(t) = P_{1s}P_{2k}. \quad (2.60)$$

Таблица 2.5 – Моделирование вероятности безаварийности

i	T, год	p1	1-p1	p2	1-p2	pi=p1p2	1-pi
0	0,2	0,900	0,100	0,944	0,056	0,850	0,150
1	0,5	0,900	0,100	0,954	0,046	0,859	0,141
2	0,9	0,900	0,100	0,962	0,038	0,866	0,134
3	1	0,953	0,047	0,969	0,031	0,923	0,077
4	2	0,953	0,047	0,975	0,025	0,929	0,071
5	3	0,953	0,047	0,979	0,021	0,933	0,067
6	4	0,978	0,022	0,983	0,017	0,961	0,039
7	5	0,978	0,022	0,986	0,014	0,964	0,036
8	6	0,978	0,022	0,989	0,011	0,967	0,033
9	7	0,990	0,010	0,991	0,009	0,981	0,019
10	8	0,990	0,010	0,992	0,008	0,982	0,018
11	9	0,990	0,010	0,994	0,006	0,984	0,016
12	10	0,995	0,005	0,995	0,005	0,990	0,010

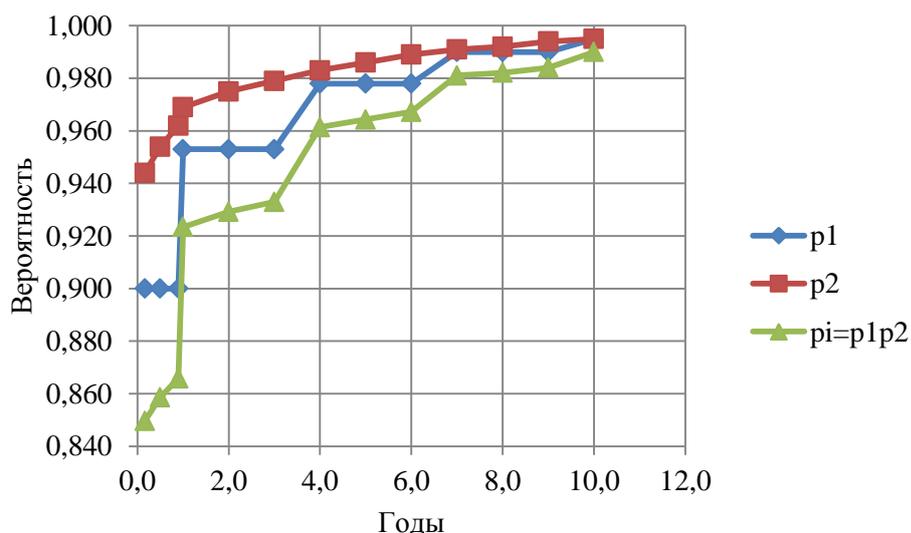


Рисунок 2.9 - Вероятность безаварийной эксплуатации в течение гарантийных сроков эксплуатации при принятом порядке проводимых регламентов и техническом обслуживании

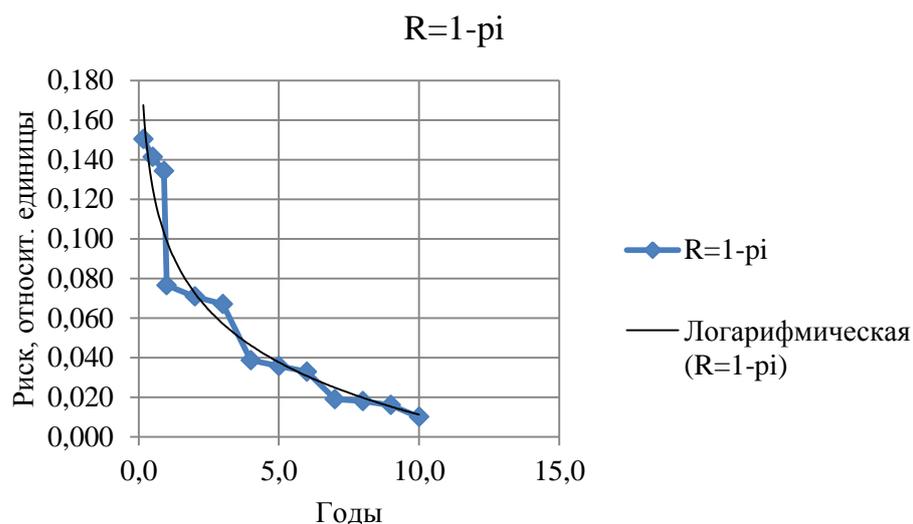


Рисунок 2.10 - Риск аварий в течение гарантийных сроков эксплуатации

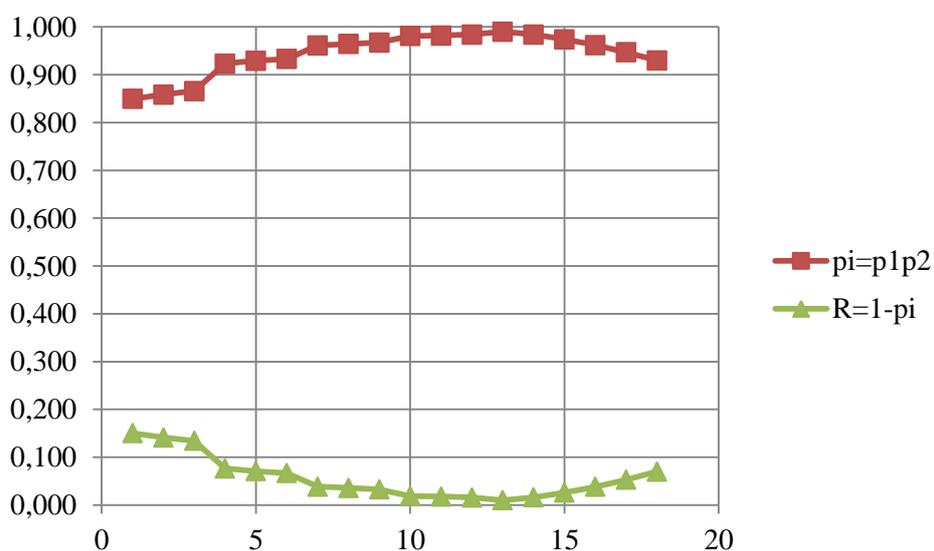


Рисунок 2.11 - Оценка вероятности безаварийной эксплуатации и риска аварий в течение гарантийных сроков эксплуатации

Проведенные расчеты носят иллюстративный характер, они охватывают два основных этапа процесса эксплуатации: до окончания гарантии и после. В расчет не входили возможные аварии и катастрофы, не связанные с этими процессами.

Предлагаемая концепция позволяет прогнозировать динамику изменения рисков кранов - объектов металлургического предприятия, а, значит, и оценивать их качество.

## Выводы по главе 2

В настоящее время обеспечение необходимого уровня качества различных технических систем характеризуется системой международных стандартов ИСО 9000. Многогранное понятие качества таких объектов включает множество показателей, основные из которых: надежность, безопасность, живучесть и характеристики экономической эффективности. Эти показатели имеют важное значение для построения системы оценки качества объектов металлургического предприятия.

При оценке качества объектов металлургического предприятия можно сделать переход на безопасность, надежность и живучесть, рассматривая в качестве реакции системы на длительно действующее входное возмущение процесс накопления деградиционных эффектов в виде усталостных изменений в материале конструкций, а также дефектов. Такие процессы являются показателями и мерой рабочего (качественного) состояния конструкции, определяя ее выходные параметры при длительной и тяжелой эксплуатации. В этом случае инженеры и конструкторы проводят наблюдения и обрабатывают их результаты или составляют и анализируют функциональные модели соответствующего физического процесса. При расчете таких показателей необходимо учитывать режимы работы системы с превышениями нагрузкой ее допускаемого уровня и систематическое повторение от начала эксплуатации конструкции до выхода ее из строя, а также мониторинг действующих напряжений и деформаций.

Различные варианты описания опасных факторов от детерминированного значения до нестационарного случайного процесса дают различную информацию о факторе. Таким образом, чем сложнее аналитическое описание, тем полнее информация о возможной аварии или катастрофе.

Только представление опасных факторов в виде случайных величин и случайных функций раскрывает путь к определению характеристик техногенного

риска и безопасности эксплуатации технологического оборудования металлургических предприятий.

Рассмотренные группы опасных факторов характеризуются параметрами, которые меняются в процессе жизненного цикла рассматриваемого оборудования. Одной из причин изменения служат доработки, которые уменьшают опасность аварий и катастроф.

Обобщенное уравнение предельного состояния элемента конструкции крана представляет собой гиперповерхность, разделяющую область безопасности и область риска. Функции безопасности и риска представлены как интегральные функции от плотности распределения вероятностей от различных факторов, влияющих на вероятность возникновения аварий или катастроф, выхода машин из строя.

Учитывая, что тяжело-нагруженные машины эксплуатируются в установившихся режимах, то с достаточной достоверностью можно предположить, что такие случайные процессы являются стационарными гауссовскими процессами. Изучение вероятностной динамики характеристик безопасной эксплуатации проводится при помощи компьютерного имитационного моделирования.

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

В соответствии с этим предлагаемая методология позволяет прогнозировать динамику изменения рисков и оценку качества потенциально опасных металлургических объектов – металлургических мостовых кранов, а значит, и управлять технологическими процессами, процессами снижения рисков.

Для таких потенциально опасных металлургических объектов этот подход был применен впервые. Модельный пример показал его достаточную работоспособность.

Предложенный метод расчета статистических и вероятностных характеристик безопасности эксплуатации и рисков оборудования позволяет при приемлемых допущениях решить задачу количественных оценок безопасности его эксплуатации. Примененный подход к потокам событий может быть расширен. Так, можно отдельно оценить риски аварий от отдельных опасных факторов или систем и агрегатов, что будет способствовать более полному описанию потока аварий, а математический аппарат будет таким же.

Такая оценка качества может быть применена и к другим потенциально опасным объектам металлургического предприятия. В конечном итоге она может быть распространена и дополнена и на все металлургическое предприятие в целом.

### **ГЛАВА 3 РАСЧЕТ ПОЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ ФЕРМЫ НЕСУЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ МОСТОВОГО МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КРАНА ГРУЗОПОДЪЕМНОСТЬЮ 300 Т**

На основании ГОСТ 28609-90 [62] расчеты кранов и их элементов должны выполняться в соответствии с утвержденной нормативно-технической документацией. В обоснованных случаях допускается проводить расчеты на основе результатов теоретических и экспериментальных исследований или с использованием инженерных методик.

Такие расчеты должны обеспечивать сохранение несущей способности крана и его элементов, а также надежности при заданных эксплуатационных характеристиках в течение установленного срока службы при условии изготовления, установки и использования крана.

В качестве методов расчета используют выраженные в детерминированной форме методы предельных состояний (для металлических конструкций) и допускаемых напряжений (для механизмов), а также при наличии необходимых исходных данных можно применять вероятностные методы.

Расчеты выполнены в программном комплексе (ПК) "ЛИРА-САПР" при технической помощи аспирантки кафедры механики Ступак А.А.

#### **3.1 Расчет фермы несущей конструкции мостового металлургического крана грузоподъемностью 300 т**

ПК «ЛИРА-САПР» — многофункциональный программный комплекс для проектирования и расчёта строительных и машиностроительных конструкций различного назначения. Реализованный метод расчета — метод конечных элементов (МКЭ). Выполняется расчёт на статические (силовые и деформационные) и динамические воздействия. Производится подбор и проверка

сечений стальных конструкций, армирование сечений железобетонных и сталежелезобетонных конструкций. Выдаются чертежи стадии «рабочий проект» марок КЖ, КМ. Множественные специализированные системы, позволяют моделировать работу массивов грунта, рассчитывать мостовые сооружения, моделировать работу сооружения в процессе монтажа, исследовать поведение конструкции под динамическими воздействиями во времени и многое другое.

Результаты статического и динамического расчета доступны в виде эпюр, мозаик, а также в виде стандартных и интерактивных таблиц, изображенных на рисунке 3.1.

Анализ

НДС  
схемы

Деформации

Мозаика/  
изополя

Усилия в стержнях

Напряжения в пластинах и объемных ЭЭ

Усилия в спец. элементах

Усилия в одноузловых ЭЭ

Инструменты

Документация

Редактор форм

- Узлы
- Перемещения
- Элементы
- Параметры грунта
- Жесткости
- Узловые нагрузки
- Динамические узловые нагрузки
- Местные нагрузки
- Усилия (стержни)
- Усилия (пластины)
- Арматура (пластины)
- Усилия (спец. элем.)
- Усилия (объем элем.)
- Арматура (объем элем.)
- Коэффициенты для РСН
- Частоты
- Формы колебаний
- Весы масс
- Ускорение
- Инерция
- Параметры РСУ
- Коэффициенты для РСУ
- РСУ (стержни)

Создать новую форму

Удалить форму

Сохранить список форм

Стандартные таблицы

TXT  HTML  RPT

Параметры таблиц

- Протокол решения
- Перемещения
- Усилия
- РСУ расчетные
- РСУ расчетные (длительнействующие)
- РСУ нормативные
- РСУ нормативные (длительнействующие)
- Перемещения от РСН
- Усилия от РСН
- Периоды колебаний
- Формы колебаний
- Инерционные силы
- Распределение весов масс

Просмотр

- Стандартные таблицы
- Интерактивные таблицы
- ДОКУМЕНТАТОР
- Таблицы системы МОСТ
- Пояснительная записка
- Отчет

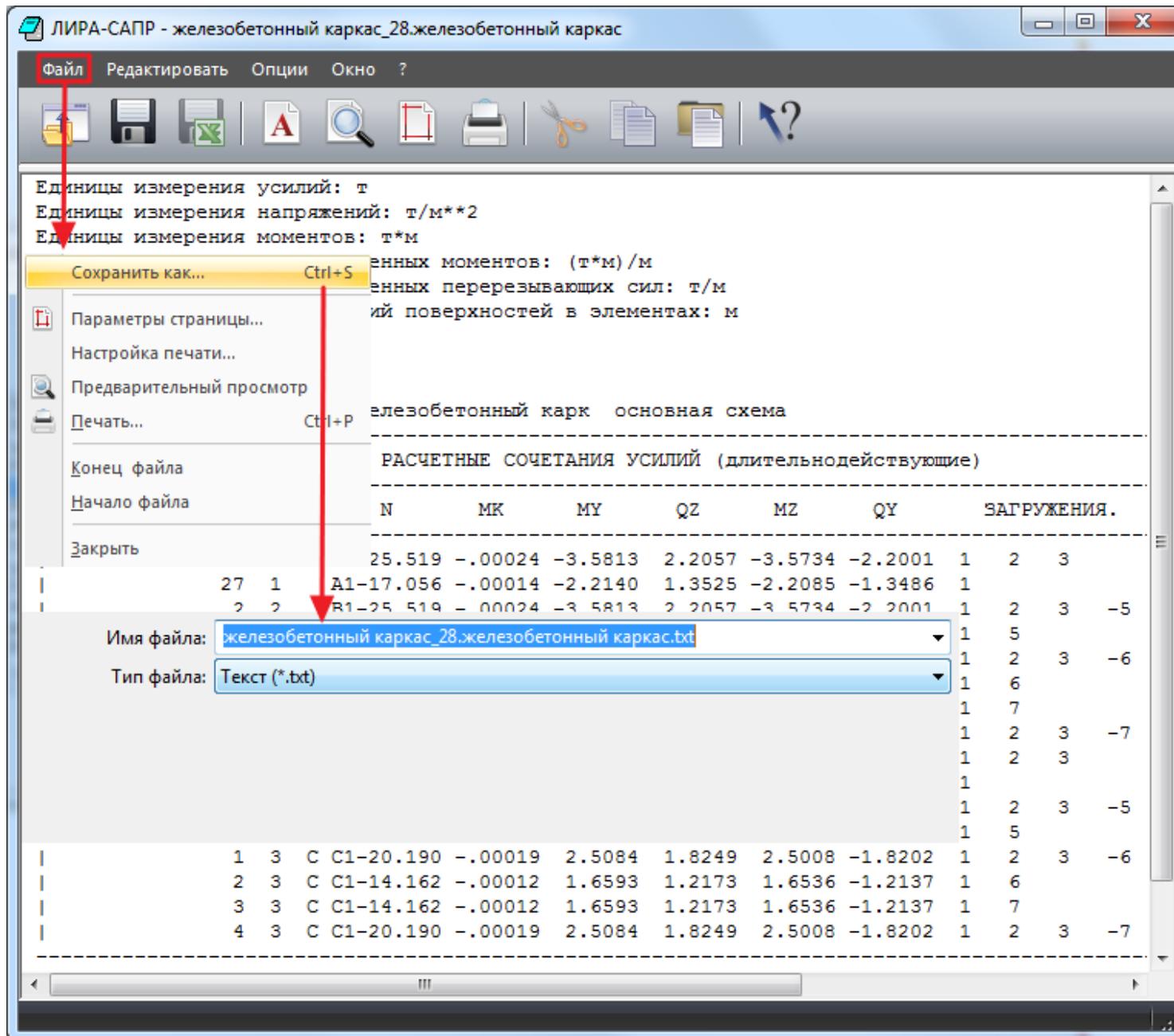


Таблица РСУ

Файл Редактировать Опции

Таблица РСУ

№ элем	№ сечен	№ столбца	Кран/сейсм	Группа РСУ	Критерий	Усилия						№№ загруз
						N (т)	Mk (т*м)	Mу (т*м)	Qz (т)	Mz (т*м)	Qу (т)	
6753	1	2	-	A1	2	- 32.644	0.000	- 4.732	2.924	- 4.722	- 2.917	1 2 3
	В отчет		-	A1	27	- 17.056	0.000	- 2.214	1.353	- 2.209	- 1.349	1
	Копировать для докум.		-	B1	2	- 33.146	0.002	- 5.235	3.289	- 4.787	- 2.956	1 2 3 -5
	Копировать для Excel Ctrl+C		-	B1	8	- 32.142	- 0.003	- 4.229	2.559	- 4.658	- 2.877	1 2 3 5
	Сохранить файл для Excel ...		-	B1	27	- 16.499	- 0.003	- 1.655	0.947	- 2.136	- 1.305	1 5
	Продолжить		-	B1	32	- 17.614	0.003	- 2.773	1.758	- 2.281	- 1.392	1 -5
	Закреть		C	C1	2	- 28.735	0.011	- 7.064	4.568	- 4.032	- 2.486	1 2 3 -6
			C	C1	3	- 11.952	- 0.012	1.466	- 1.127	- 1.553	- 0.946	1 6
6753	1	3	C	C1	7	- 12.153	0.009	- 1.729	1.061	1.471	1.121	1 7
6753	1	3	C	C1	8	- 28.534	- 0.010	- 3.870	2.381	- 7.057	- 4.553	1 2 3 -7
6753	1	3	C	C1	32	- 18.749	0.011	- 5.451	3.562	- 2.422	- 1.482	1 -6
6753	2	2	-	A1	1	- 31.324	0.000	4.039	2.924	4.028	- 2.917	1 2 3
6753	2	1	-	A1	27	- 15.736	0.000	1.844	1.353	1.837	- 1.349	1
6753	2	2	-	B1	1	- 31.826	0.002	4.632	3.289	4.082	- 2.956	1 2 3 -5
6753	2	2	-	B1	4	- 30.822	- 0.003	3.447	2.559	3.975	- 2.877	1 2 3 5
6753	2	1	-	B1	27	- 15.179	- 0.003	1.185	0.947	1.778	- 1.305	1 5
6753	2	1	-	B1	32	- 16.294	0.003	2.502	1.758	1.897	- 1.392	1 -5
6753	2	3	C	C1	1	- 27.547	0.011	6.732	4.568	3.495	- 2.486	1 2 3 -6
6753	2	3	C	C1	2	- 10.764	- 0.012	- 2.007	- 1.127	1.216	- 0.946	1 6
6753	2	3	C	C1	3	- 10.965	0.009	1.351	1.061	- 1.982	1.121	1 7
6753	2	3	C	C1	4	- 27.346	- 0.010	3.375	2.381	6.693	- 4.553	1 2 3 -7
6753	2	3	C	C1	32	- 17.561	0.011	5.325	3.562	2.092	- 1.482	1 -6

Рисунок 3.1 – Оболочка ЛИРА-САПР



Перпендикулярно фермам устанавливаются фермы жесткости, которые имеют ту же схему, что и главные. Их постановка обеспечивает устойчивость и жесткость конструкции в целом. Расчет прочности кранового моста ведется в предположении, что полезная нагрузка от веса крана и тележек передается только на главные фермы.

Определение усилий в стержнях фермы может быть произведено несколькими способами (аналитический, графический или по линиям влияния).

Поскольку по нижнему поясу фермы перемещаются тележки с грузом, наиболее подходящим является метод линий влияния.

Все стержни на схемах показаны растянутыми (от узлов). Используется метод сечений. Выражаем искомые продольные усилия через известные линии влияния опорных реакций.

В основу расчета положен метод конечных элементов в перемещениях. В качестве основных неизвестных приняты следующие перемещения узлов

-  $X$  по оси  $X$ ;

-  $Z$  по оси  $Z$ ;

- в ПК "ЛИРА-САПР" реализованы положения нормативных и регламентирующих документов, приведенных в приложении В.

Типы используемых конечных элементов указаны в документе 1. В этом документе, кроме номеров узлов, относящихся к соответствующему элементу, указываются также номера типов жесткостей.

Тип 10. Универсальный пространственный стержневой КЭ.

Координаты узлов и нагрузки, приведенные в развернутых документах 4,6,7, описаны в правой декартовой системе координат. Расчет выполнен на статическое нагружение. Чтение результатов счета отражено в приложении Г.

В разделе 5 в табличной форме выпечтываются перемещения узлов рассчитываемой задачи. Размерность перемещений указана в шапке таблицы.

В первой графе находится номер загрузки и индексация перемещений. В остальных графах - номера узлов в порядке возрастания и величины перемещений, им соответствующие.

Линейные перемещения считаются положительными, если они направлены вдоль осей координат. Положительные угловые перемещения соответствуют вращению против часовой стрелки, если смотреть с конца соответствующей оси.

В разделе 6 в табличной форме выводятся усилия в элементах рассчитываемой задачи. Размерность усилий указана в шапке таблицы. В первой графе указывается тип КЭ из библиотеки конечных элементов, номер загрузки и индексация усилий.

В последующих графах указываются:

- в первой строке шапки - номер элемента и номер сечения в этом элементе, для которого печатаются усилия;
- во второй строке - номера первых двух узлов.

Конечный элемент воспринимает следующие виды усилий:

- $N$  осевое усилие; положительный знак соответствует растяжению.
- $M_K$  крутящий момент относительно оси  $X_1$ ; положительный знак соответствует действию момента против часовой стрелки, если смотреть с конца оси;
- $X_1$ , на сечение, принадлежащее концу стержня.
- $M_Y$  изгибающий момент относительно оси  $Y_1$ , положительный знак соответствует действию момента против часовой стрелки, если смотреть с конца оси;

- $Y1$ , на сечение, принадлежащее концу стержня.
- $MZ$  изгибающий момент относительно оси  $Z1$ ; положительный знак соответствует действию момента против часовой стрелки, если смотреть с конца оси;
- $Z1$ , на сечение, принадлежащее концу стержня.
- $QY$  перерезывающая сила вдоль оси  $Y1$ ; положительный знак соответствует совпадению направления силы с осью  $Y1$  для сечения, принадлежащего концу стержня.
- $QZ$  перерезывающая сила вдоль оси  $Z1$ ; положительный знак соответствует совпадению направления силы с осью.

Исходная схема изображена на рисунках 3.2 и 3.3 соответственно.

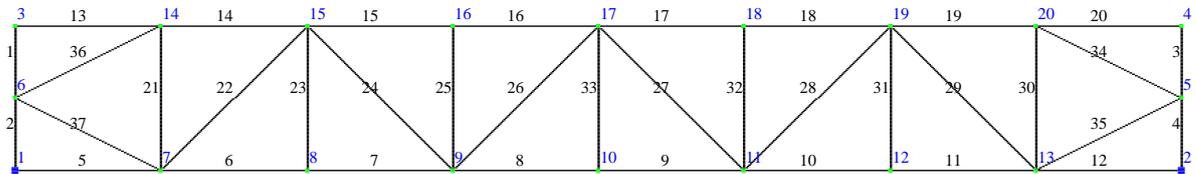


Рисунок 3.3 - Исходная схема фермы длиной 24 м, высотой 3 м с нумерацией узлов и элементов

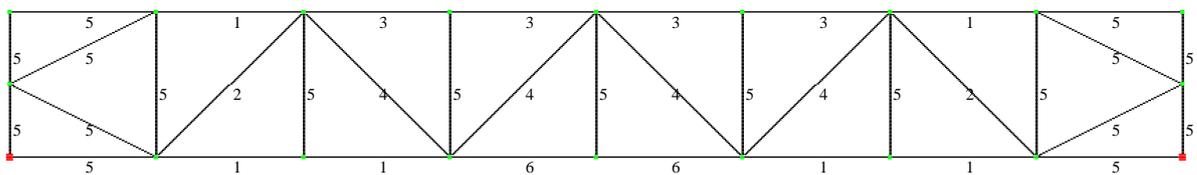


Рисунок 3.4 - Исходная схема фермы с нумерацией сечения элементов

Таблица 3.1 – Характеристики сечений

Тип жесткости	Имя	Параметры (сечения-(см) жесткости-(т,м) расп. вес-(т,м))
1	Двутавр 30Ш2	$q=0.0592433$
		$EF=158596, EI_y=2.53e+003$
		$EI_z=366, GI_k=3.29$
		$Y_1=2.3, Y_2=2.3, Z_1=10.8, Z_2=10.8, RU_Y=0, RU_Z=0$
2	Двутавр 30Ш3	$q=0.0682672$
		$EF=182754, EI_y=2.95e+003$
		$EI_z=421, GI_k=4.93$
		$Y_1=2.3, Y_2=2.3, Z_1=10.8, Z_2=10.8, RU_Y=0, RU_Z=0$
3	Двутавр 40Ш1	$q=0.0960448$
		$EF=257115, EI_y=7.22e+003$
		$EI_z=1.32e+003, GI_k=6.65$
		$Y_1=3.43, Y_2=3.43, Z_1=14.5, Z_2=14.5, RU_Y=0, RU_Z=0$
4	Двутавр 26Ш1	$q=0.0426631$
		$EF=114210, EI_y=1.31e+003$
		$EI_z=205, GI_k=1.59$
		$Y_1=1.99, Y_2=1.99, Z_1=9.12, Z_2=9.12, RU_Y=0, RU_Z=0$

Продолжение таблицы 3.1

5	Двутавр 20Ш1	$q=0.0305633$
		$EF=81819, EI_y=559$
		$EI_z=107, GI_k=0.879$
		$Y1=1.74, Y2=1.74, Z1=7.08, Z2=7.08, RU_Y=0, RU_Z=0$
6	Двутавр 35Ш1	$q=0.0750703$
		$EF=200966, EI_y=4.16e+003$
		$EI_z=685, GI_k=4.5$
		$Y1=2.73, Y2=2.73, Z1=12.2, Z2=12.2, RU_Y=0, RU_Z=0$

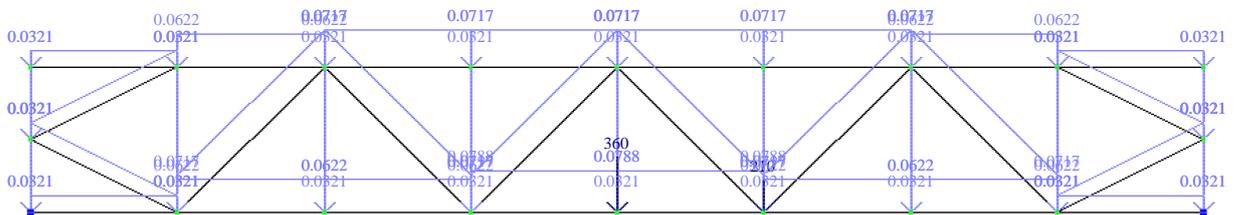
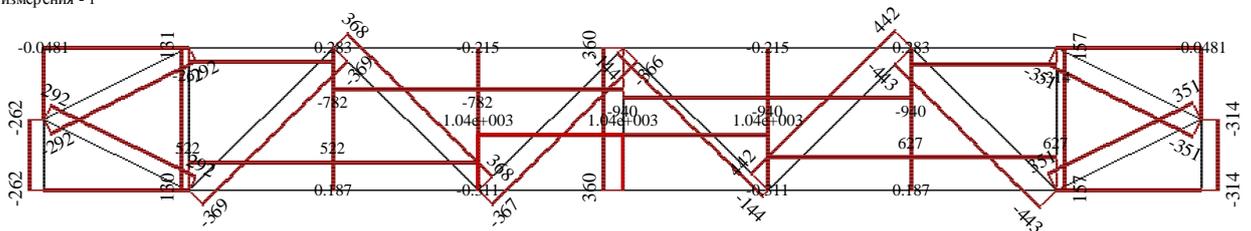


Рисунок 3.5 - Исходная схема загрузки

Эпюра N

Единицы измерения - т



Минимальное усилие -939.723  
Максимальное усилие 1041.4

Рисунок 3.6 – Эпюра продольных усилий

Таблица 3.2 – Внутренние усилия в элементах конструкции

№ элем	Усилия					
	N (Т)	M <sub>x</sub> (Т*М)	M <sub>y</sub> (Т*М)	Q <sub>z</sub> (Т)	M <sub>z</sub> (Т*М)	Q <sub>y</sub> (Т)
1	- 0.048	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	- 261.682	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3	- 0.048	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
4	- 314.134	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	0.000	0.000	0.000	0.048	0.000	0.000
6	522.220	0.000	0.000	0.093	0.000	0.000
7	522.220	0.000	0.000	0.093	0.000	0.000
8	1041.399	0.000	0.000	0.118	0.000	0.000
9	1041.399	0.000	0.000	0.118	0.000	0.000
10	627.220	0.000	0.000	0.093	0.000	0.000
11	627.220	0.000	0.000	0.093	0.000	0.000
12	0.000	0.000	0.000	0.048	0.000	0.000
13	0.000	0.000	0.000	0.048	0.000	0.000
14	- 261.430	0.000	0.000	0.093	0.000	0.000
15	- 782.223	0.000	0.000	0.108	0.000	0.000
16	- 782.223	0.000	0.000	0.108	0.000	0.000
17	- 939.723	0.000	0.000	0.108	0.000	0.000
18	- 939.723	0.000	0.000	0.108	0.000	0.000

## Продолжение таблицы 3.2

19	- 313.930	0.000	0.000	0.093	0.000	0.000
20	0.000	0.000	0.000	0.048	0.000	0.000
21	130.520	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
22	- 368.921	0.000	0.000	0.108	0.000	0.000
23	0.187	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
24	367.807	0.000	0.000	0.108	0.000	0.000
25	- 0.311	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
26	- 366.638	0.000	0.000	0.108	0.000	0.000
27	- 143.684	0.000	0.000	0.108	0.000	0.000
28	441.838	0.000	0.000	0.108	0.000	0.000
29	- 442.953	0.000	0.000	0.108	0.000	0.000
30	156.673	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
31	0.283	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
32	- 0.311	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
33	360.333	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
34	- 350.960	0.000	0.000	0.048	0.000	0.000
35	351.008	0.000	0.000	0.048	0.000	0.000
36	- 292.263	0.000	0.000	0.048	0.000	0.000
37	292.311	0.000	0.000	0.048	0.000	0.000

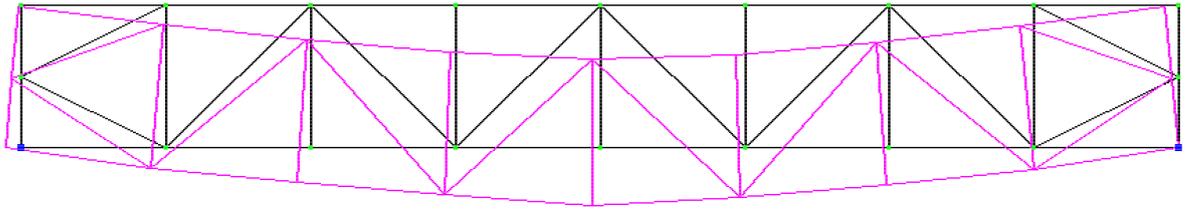


Рисунок 3.7 - Исходная и деформированная схема

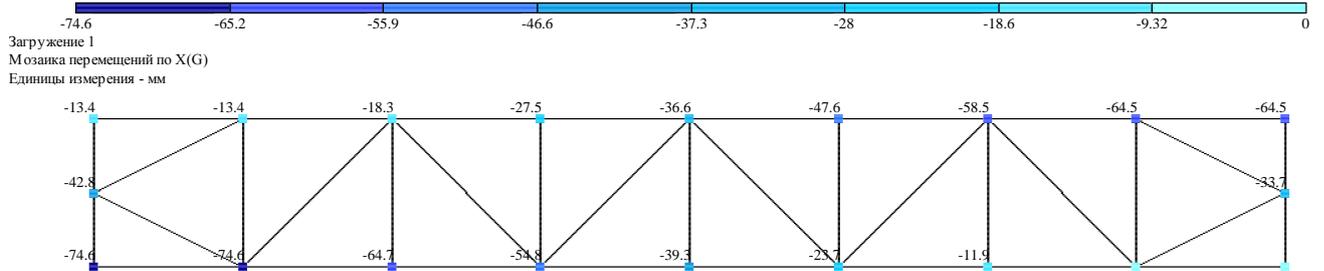


Рисунок 3.8 - Мозаика перемещения узлов по оси X

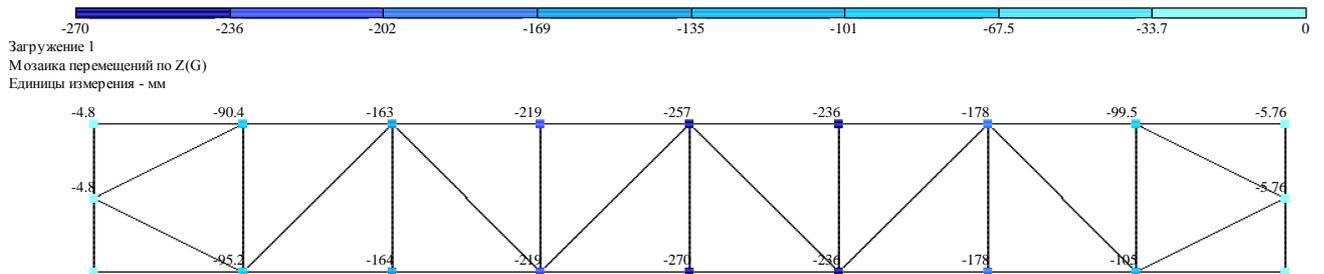


Рисунок 3.9 - Мозаика перемещения узлов по оси Z

Таблица 3.3 - Перемещения узлов

№ узла	Перемещения					
	X (мм)	Y (мм)	Z (мм)	UX (рад*1000)	UY (рад*1000)	UZ (рад*1000)
1	-74.571	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3	-13.394	0.000	- 4.798	0.000	0.000	0.000

## Продолжение таблицы 3.3

4	-64.462	0.000	- 5.761	0.000	0.000	0.000
5	-33.668	0.000	- 5.759	0.000	0.000	0.000
6	-42.786	0.000	- 4.797	0.000	0.000	0.000
7	-74.571	0.000	- 95.159	0.000	0.000	0.000
8	-64.693	0.000	-163.505	0.000	0.000	0.000
9	-54.815	0.000	-219.291	0.000	0.000	0.000
10	-39.272	0.000	-269.980	0.000	0.000	0.000
11	-23.728	0.000	-236.350	0.000	0.000	0.000
12	-11.864	0.000	-178.343	0.000	0.000	0.000
13	0.000	0.000	-105.268	0.000	0.000	0.000
14	-13.394	0.000	-90.375	0.000	0.000	0.000
15	-18.339	0.000	-163.496	0.000	0.000	0.000
16	-27.466	0.000	-219.301	0.000	0.000	0.000
17	-36.594	0.000	-256.770	0.000	0.000	0.000
18	-47.559	0.000	-236.359	0.000	0.000	0.000
19	-58.524	0.000	-178.334	0.000	0.000	0.000
20	-64.462	0.000	- 99.521	0.000	0.000	0.000



Продолжение таблицы 3.4

5	I35Ш3	ВСт3сп5
6	I40Ш1	ВСт3сп5
7	I40Ш2	ВСт3сп5
8	I40Ш4	ВСт3сп5
9	I60Ш2	ВСт3сп5
10	I90Ш*	ВСт3сп5

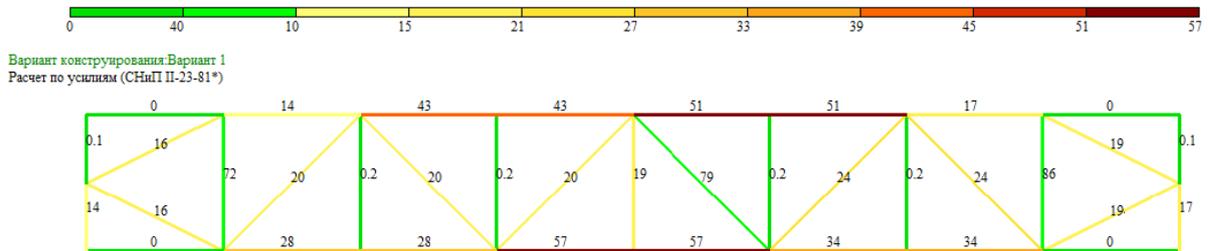


Рисунок 3.13 - Мозаика результатов проверки назначенных сечений по 1ПС

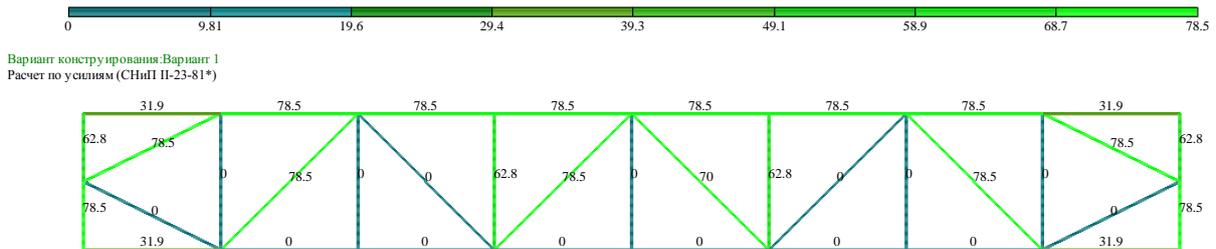


Рисунок 3.14 - Мозаика результатов проверки назначенных сечений по 2ПС

Была предложена ферма со шпренгелем.



Продолжение таблицы 3.5

4	1	- 313.093	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	1	0.000	0.000	0.000	0.046	0.000	0.000
6	1	520.307	0.000	0.000	0.046	0.000	0.000
7	1	520.307	0.000	0.000	0.046	0.000	0.000
8	1	1038.746	0.000	0.000	0.046	0.000	0.000
9	1	1038.746	0.000	0.000	0.046	0.000	0.000
10	1	625.307	0.000	0.000	0.046	0.000	0.000
11	1	625.307	0.000	0.000	0.046	0.000	0.000
12	1	0.000	0.000	0.000	0.046	0.000	0.000
13	1	0.000	0.000	0.000	0.046	0.000	0.000
14	1	- 260.447	0.000	0.000	0.046	0.000	0.000
15	1	- 779.826	0.000	0.000	0.046	0.000	0.000
16	1	- 779.826	0.000	0.000	0.046	0.000	0.000
17	1	- 937.326	0.000	0.000	0.046	0.000	0.000
18	1	- 937.326	0.000	0.000	0.046	0.000	0.000
19	1	- 312.947	0.000	0.000	0.046	0.000	0.000
20	1	0.000	0.000	0.000	0.046	0.000	0.000
21	1	129.975	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
22	1	0.092	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
23	1	- 0.345	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
24	1	156.134	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Продолжение таблицы 3.5

25	1	0.183	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
26	1	- 0.345	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
27	1	360.183	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
28	1	- 349.809	0.000	0.000	0.046	0.000	0.000
29	1	349.854	0.000	0.000	0.046	0.000	0.000
30	1	- 291.112	0.000	0.000	0.046	0.000	0.000
31	1	291.158	0.000	0.000	0.046	0.000	0.000
32	1	- 367.588	0.000	0.000	0.023	0.000	0.000
33	1	- 367.519	0.000	0.000	0.023	0.000	0.000
34	1	367.038	0.000	0.000	0.023	0.000	0.000
35	1	366.970	0.000	0.000	0.023	0.000	0.000
36	1	- 366.260	0.000	0.000	0.023	0.000	0.000
37	1	- 366.191	0.000	0.000	0.023	0.000	0.000
38	1	- 143.407	0.000	0.000	0.023	0.000	0.000
39	1	- 143.475	0.000	0.000	0.023	0.000	0.000
40	1	441.170	0.000	0.000	0.023	0.000	0.000
41	1	441.239	0.000	0.000	0.023	0.000	0.000
42	1	- 441.720	0.000	0.000	0.023	0.000	0.000
43	1	- 441.788	0.000	0.000	0.023	0.000	0.000
44	1	0.092	0.000	0.000	0.023	0.000	0.000
45	1	0.046	0.000	0.000	0.023	0.000	0.000

## Продолжение таблицы 3.5

46	1	0.092	0.000	0.000	0.023	0.000	0.000
47	1	0.046	0.000	0.000	0.023	0.000	0.000
48	1	0.092	0.000	0.000	0.023	0.000	0.000
49	1	0.046	0.000	0.000	0.023	0.000	0.000

Загружение 1

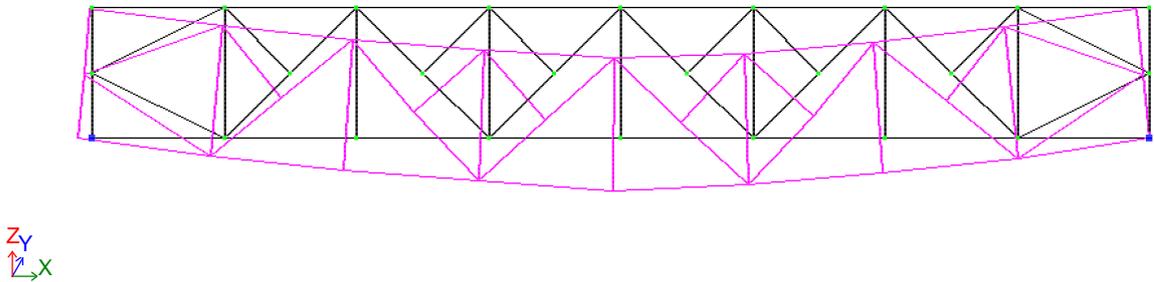


Рисунок 3.18 - Исходная и деформированная схема

Таблица 3.6 - Перемещения узлов

№ узла	Перемещения			UX (рад*1000)	UY (рад*1000)	UZ (рад*1000)
	X (мм)	Y (мм)	Z (мм)			
1	- 74.347	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3	- 13.356	0.000	- 4.779	0.000	0.000	0.000
4	- 64.276	0.000	- 5.742	0.000	0.000	0.000
5	- 33.570	0.000	- 5.740	0.000	0.000	0.000

Продолжение таблицы 3.6

6	- 42.661	0.000	- 4.778	0.000	0.000	0.000
7	- 74.347	0.000	- 94.837	0.000	0.000	0.000
8	- 64.505	0.000	- 162.970	0.000	0.000	0.000
9	- 54.663	0.000	- 218.627	0.000	0.000	0.000
10	- 39.160	0.000	- 269.253	0.000	0.000	0.000
11	- 23.656	0.000	- 235.685	0.000	0.000	0.000
12	- 11.828	0.000	- 177.808	0.000	0.000	0.000
13	0.000	0.000	- 104.947	0.000	0.000	0.000
14	- 13.356	0.000	- 90.073	0.000	0.000	0.000
15	- 18.283	0.000	- 162.965	0.000	0.000	0.000
16	- 27.382	0.000	- 218.638	0.000	0.000	0.000
17	- 36.482	0.000	- 256.048	0.000	0.000	0.000
18	- 47.419	0.000	- 235.696	0.000	0.000	0.000
19	- 58.356	0.000	- 177.803	0.000	0.000	0.000
20	- 64.276	0.000	- 99.220	0.000	0.000	0.000
21	- 49.248	0.000	- 125.968	0.000	0.000	0.000
22	- 45.849	0.000	- 200.173	0.000	0.000	0.000
23	- 45.826	0.000	- 237.084	0.000	0.000	0.000
24	- 33.659	0.000	- 249.458	0.000	0.000	0.000
25	- 29.736	0.000	- 218.015	0.000	0.000	0.000
26	- 25.651	0.000	- 137.848	0.000	0.000	0.000

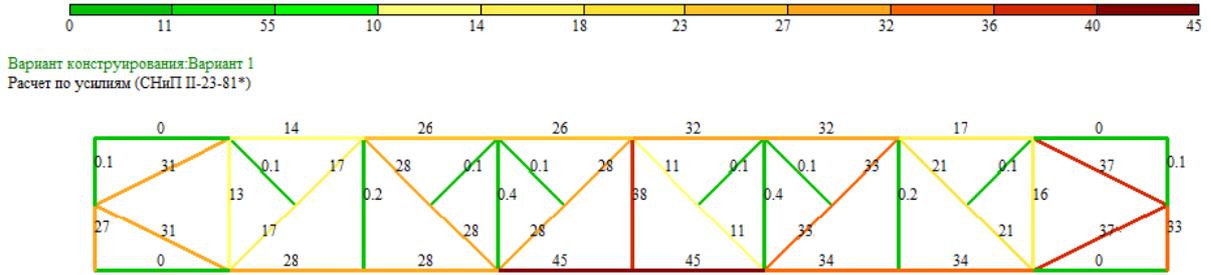


Рисунок 3.19 - Мозаика результатов проверки назначенных сечений по 1ПС

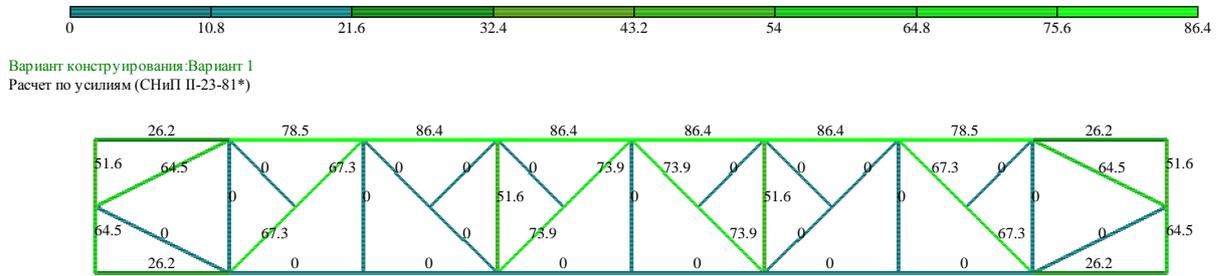


Рисунок 3.20 - Мозаика результатов проверки назначенных сечений по 2ПС

### 3.1.2 Расчет плоской системы, состоящей из шарнирно-стрелневых элементов на статические нагрузки пролетом 18 м

Выполним расчет металлической фермы пролетом  $L = 18$  м и (спроектируем) рассчитаем (подберем) сечение для максимальных значений продольных усилий, при движении по нижнему поясу фермы грузовых тележек и крана грузоподъемностью 300 т, рисунок 3.2.

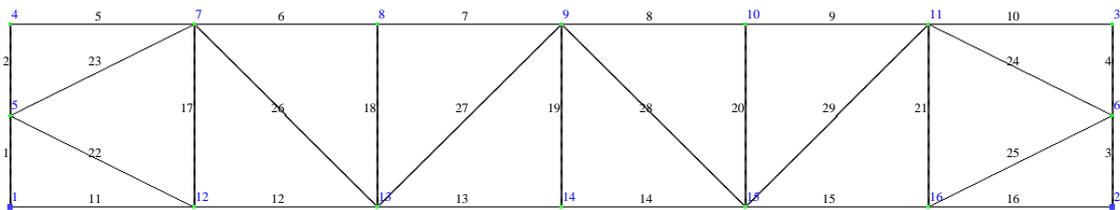


Рисунок 3.21 - Исходная схема фермы 18 м с нумерацией узлов и элементов

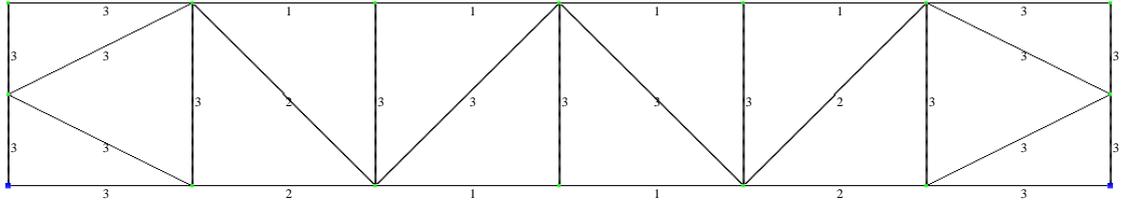


Рисунок 3.22 - Исходная схема с нумерацией сечения элементов

Таблица 3.7 – Заданные характеристики сечений

Тип жесткости	Имя	Параметры (сечения-(см) жесткости-(т,м) расп.вес-(т,м))
1	Двутавр 30Ш2	q=0.0609304
		EF=163113,EIy=2.56e+003
		EIz=365,GIk=3.53
		Y1=2.24,Y2=2.24,Z1=10.7,Z2=10.7,RU_Y=0,RU_Z=0
2	Двутавр 26Ш1	q=0.0426631
		EF=114210,EIy=1.31e+003
		EIz=205,GIk=1.59
		Y1=1.99,Y2=1.99,Z1=9.12,Z2=9.12,RU_Y=0,RU_Z=0
3	Двутавр 20Ш1	q=0.0305633
		EF=81819,EIy=559
		EIz=107,GIk=0.879
		Y1=1.74,Y2=1.74,Z1=7.08,Z2=7.08,RU_Y=0,RU_Z=0

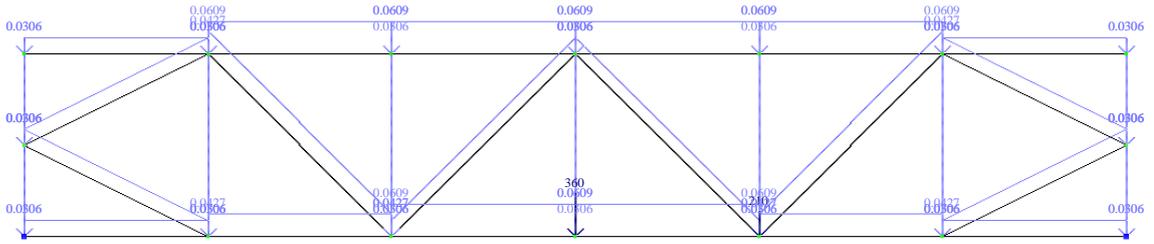
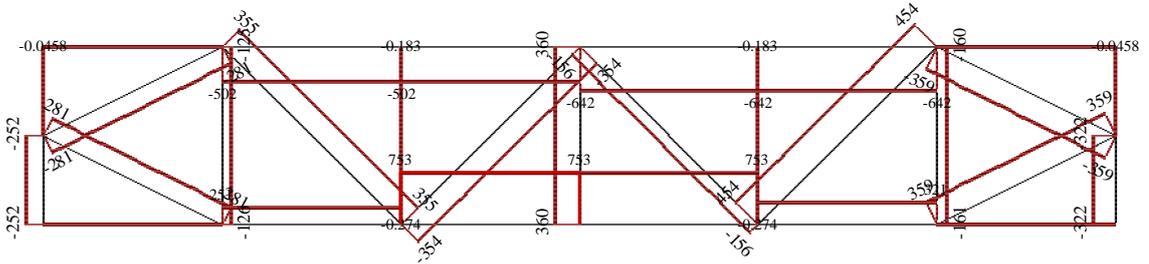


Рисунок 3.23 - Схема загрузки

Загрузка 1  
Эпора N  
Единицы измерения - т



Минимальное усилие -642.289  
Максимальное усилие 752.583

Рисунок 3.24 - Эпора продольных усилий

Таблица 3.8 - Внутренние усилия в элементах конструкции

№ элем	№ сечен	Усилия					
		N (т)	Mk (т*м)	My (т*м)	Qz (т)	Mz (т*м)	Qy (т)
1	1	- 251.651	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1	2	- 251.605	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	1	- 0.092	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	2	- 0.046	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3	1	- 321.651	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3	2	- 321.605	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Продолжение таблицы 3.8

4	1	- 0.092	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
4	2	- 0.046	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	1	0.000	0.000	0.000	0.046	0.000	0.000
5	2	0.000	0.000	0.000	- 0.046	0.000	0.000
6	1	- 502.289	0.000	0.000	0.091	0.000	0.000
6	2	- 502.289	0.000	0.000	- 0.091	0.000	0.000
7	1	- 502.289	0.000	0.000	0.091	0.000	0.000
7	2	- 502.289	0.000	0.000	- 0.091	0.000	0.000
8	1	- 642.289	0.000	0.000	0.091	0.000	0.000
8	2	- 642.289	0.000	0.000	- 0.091	0.000	0.000
9	1	- 642.289	0.000	0.000	0.091	0.000	0.000
9	2	- 642.289	0.000	0.000	- 0.091	0.000	0.000
10	1	0.000	0.000	0.000	0.046	0.000	0.000
10	2	0.000	0.000	0.000	- 0.046	0.000	0.000
11	1	0.000	0.000	0.000	0.046	0.000	0.000
11	2	0.000	0.000	0.000	- 0.046	0.000	0.000
12	1	251.410	0.000	0.000	0.064	0.000	0.000
12	2	251.410	0.000	0.000	- 0.064	0.000	0.000
13	1	752.583	0.000	0.000	0.091	0.000	0.000
13	2	752.583	0.000	0.000	- 0.091	0.000	0.000
14	1	752.583	0.000	0.000	0.091	0.000	0.000

Продолжение таблицы 3.8

14	2	752.583	0.000	0.000	- 0.091	0.000	0.000
15	1	321.410	0.000	0.000	0.064	0.000	0.000
15	2	321.410	0.000	0.000	- 0.064	0.000	0.000
16	1	0.000	0.000	0.000	0.046	0.000	0.000
16	2	0.000	0.000	0.000	- 0.046	0.000	0.000
17	1	- 125.452	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
17	2	- 125.544	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
18	1	- 0.183	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
18	2	- 0.274	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
19	1	360.274	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
19	2	360.183	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
20	1	- 0.183	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
20	2	- 0.274	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
21	1	- 160.452	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
21	2	- 160.544	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
22	1	281.063	0.000	0.000	0.046	0.000	0.000
22	2	281.108	0.000	0.000	- 0.046	0.000	0.000
23	1	- 281.108	0.000	0.000	0.046	0.000	0.000
23	2	- 281.063	0.000	0.000	- 0.046	0.000	0.000
24	1	- 359.325	0.000	0.000	0.046	0.000	0.000
24	2	- 359.371	0.000	0.000	- 0.046	0.000	0.000

Продолжение таблицы 3.8

25	1	359.325	0.000	0.000	0.046	0.000	0.000
25	2	359.371	0.000	0.000	- 0.046	0.000	0.000
26	1	354.860	0.000	0.000	0.064	0.000	0.000
26	2	354.732	0.000	0.000	- 0.064	0.000	0.000
27	1	- 354.014	0.000	0.000	0.046	0.000	0.000
27	2	- 353.923	0.000	0.000	- 0.046	0.000	0.000
28	1	- 155.933	0.000	0.000	0.046	0.000	0.000
28	2	- 156.024	0.000	0.000	- 0.046	0.000	0.000
29	1	453.727	0.000	0.000	0.064	0.000	0.000
29	2	453.855	0.000	0.000	- 0.064	0.000	0.000

Загружение 1

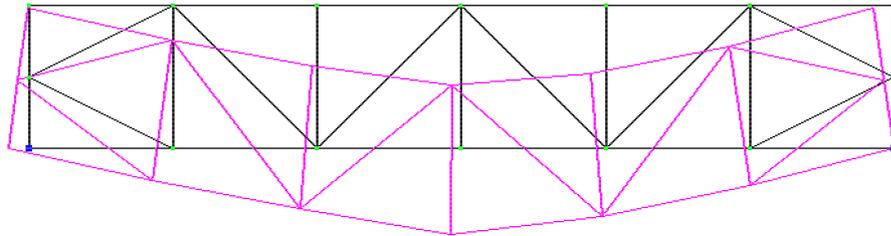


Рисунок 3.25 - Исходная и деформированная схема

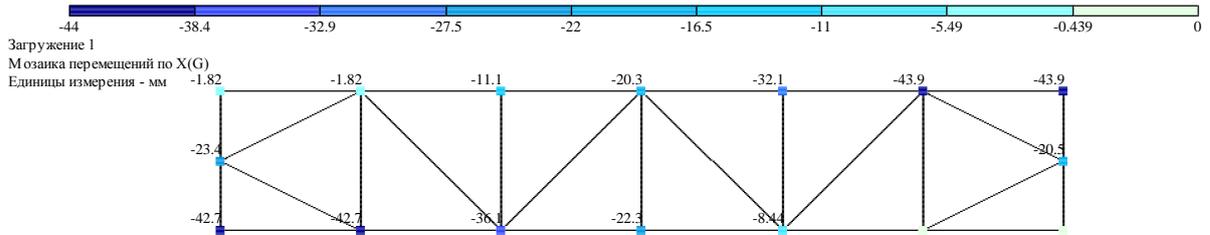


Рисунок 3.26 - Мозаика перемещения узлов по оси X

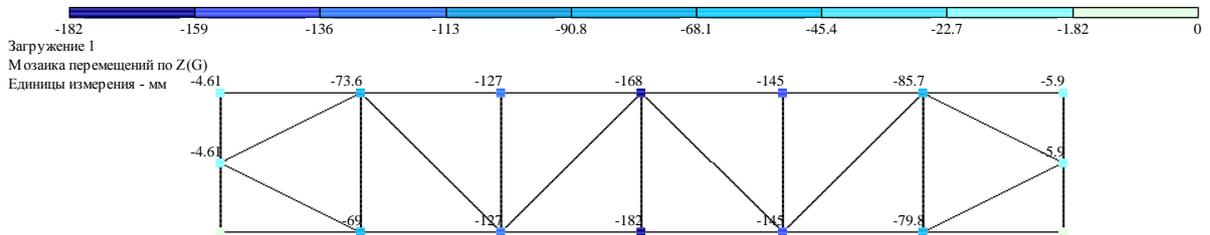


Рисунок 3.27 - Мозаика перемещения узлов по оси Z

Таблица 3.9 – Перемещения узлов

№ узла	Перемещения			UX (рад*1000)	UY (рад*1000)	UZ (рад*1000)
	X (мм)	Y (мм)	Z (мм)			
1	- 42.733	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3	- 43.927	0.000	- 5.898	0.000	0.000	0.000
4	- 1.822	0.000	- 4.614	0.000	0.000	0.000

## Продолжение таблицы 3.9

5	- 23.428	0.000	- 4.613	0.000	0.000	0.000
6	- 20.493	0.000	- 5.896	0.000	0.000	0.000
7	- 1.822	0.000	- 73.591	0.000	0.000	0.000
8	- 11.060	0.000	- 126.548	0.000	0.000	0.000
9	- 20.299	0.000	- 168.326	0.000	0.000	0.000
10	- 32.113	0.000	- 145.040	0.000	0.000	0.000
11	- 43.927	0.000	- 85.706	0.000	0.000	0.000
12	- 42.733	0.000	- 68.990	0.000	0.000	0.000
13	- 36.129	0.000	- 126.539	0.000	0.000	0.000
14	- 22.286	0.000	- 181.534	0.000	0.000	0.000
15	- 8.443	0.000	- 145.032	0.000	0.000	0.000
16	0.000	0.000	- 79.821	0.000	0.000	0.000

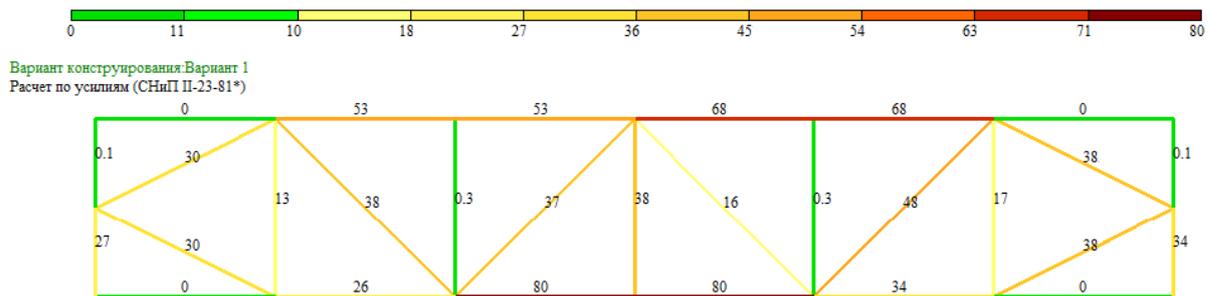


Рисунок 3.28 - Мозаика результатов проверки назначенных сечений по 1ПС



Рисунок 3.29 - Мозаика результатов проверки назначенных сечений по 2ПС

После подбора новых сечений.

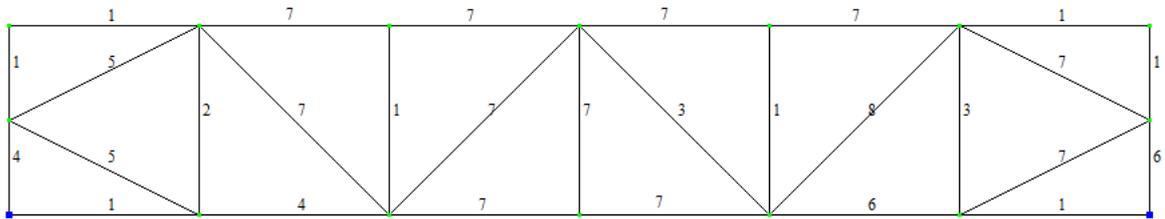


Рисунок 3.30 - Исходная схема с нумерацией сечения элементов

Таблица 3.10 – Характеристики сечений

Тип жесткости	Имя	Сталь
1	I20Ш1	ВСт3сп5
2	I26Ш2	ВСт3сп5
3	I30Ш1	ВСт3сп5
4	I35Ш3	ВСт3сп5
5	I40Ш1	ВСт3сп5
6	I40Ш1	ВСт3сп5
7	I40Ш3	ВСт3сп5
8	I70Ш1	ВСт3сп5



Рисунок 3.34 - Схема загрузки с обозначением жесткостей элементов

Загружение 1  
Эпора N  
Единицы измерения - т

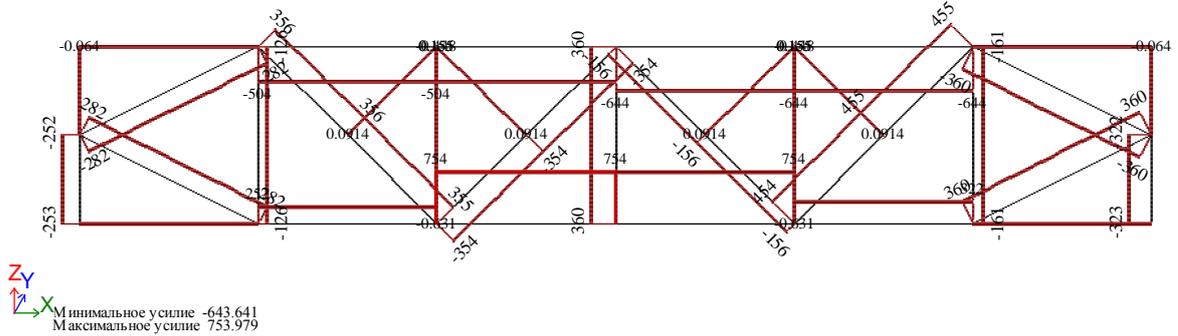


Рисунок 3.35 - Эпюра продольных усилий

Таблица 3.11 – Внутренние усилия в элементах конструкции

№ элем	№ сечен	Усилия					
		N (т)	Mk (т*м)	My (т*м)	Qz (т)	Mz (т*м)	Qy (т)
1	1	- 252.547	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	1	- 0.128	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3	1	- 322.547	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
4	1	- 0.128	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	1	0.000	0.000	0.000	0.064	0.000	0.000
6	1	- 503.641	0.000	0.000	0.091	0.000	0.000
7	1	- 503.641	0.000	0.000	0.091	0.000	0.000
8	1	- 643.641	0.000	0.000	0.091	0.000	0.000
9	1	- 643.641	0.000	0.000	0.091	0.000	0.000
10	1	0.000	0.000	0.000	0.064	0.000	0.000

Продолжение таблицы 3.11

11	1	0.000	0.000	0.000	0.091	0.000	0.000
12	1	252.185	0.000	0.000	0.091	0.000	0.000
13	1	753.979	0.000	0.000	0.091	0.000	0.000
14	1	753.979	0.000	0.000	0.091	0.000	0.000
15	1	322.185	0.000	0.000	0.091	0.000	0.000
16	1	0.000	0.000	0.000	0.091	0.000	0.000
17	1	- 125.655	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
18	1	- 0.448	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
19	1	360.366	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
20	1	- 0.448	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
21	1	- 160.655	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
22	1	281.919	0.000	0.000	0.064	0.000	0.000
23	1	- 281.983	0.000	0.000	0.064	0.000	0.000
24	1	- 360.181	0.000	0.000	0.064	0.000	0.000
25	1	360.181	0.000	0.000	0.064	0.000	0.000
26	1	355.658	0.000	0.000	0.046	0.000	0.000
27	1	355.535	0.000	0.000	0.046	0.000	0.000
28	1	- 354.202	0.000	0.000	0.046	0.000	0.000
29	1	- 354.078	0.000	0.000	0.046	0.000	0.000
30	1	- 155.997	0.000	0.000	0.046	0.000	0.000
31	1	- 156.120	0.000	0.000	0.046	0.000	0.000

Продолжение таблицы 3.11

32	1	454.438	0.000	0.000	0.046	0.000	0.000
33	1	454.562	0.000	0.000	0.046	0.000	0.000
34	1	0.091	0.000	0.000	0.032	0.000	0.000
35	1	0.155	0.000	0.000	0.032	0.000	0.000
36	1	0.091	0.000	0.000	0.032	0.000	0.000
37	1	0.155	0.000	0.000	0.032	0.000	0.000

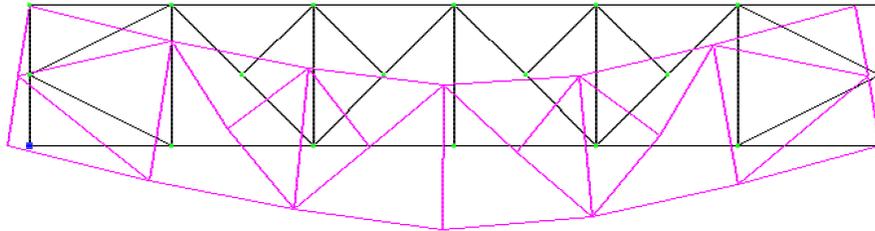


Рисунок 3.36 - Исходная и деформированная схема

Таблица 3.12 – Перемещения узлов

№ узла	Перемещения					
	X (мм)	Y (мм)	Z (мм)	UX (рад*1000)	UY (рад*1000)	UZ (рад*1000)
1	- 38.302	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3	- 41.130	0.000	- 2.967	0.000	0.000	0.000
4	1.075	0.000	- 2.323	0.000	0.000	0.000
5	- 19.192	0.000	- 2.322	0.000	0.000	0.000

Продолжение таблицы 3.12

6	- 19.826	0.000	- 2.966	0.000	0.000	0.000
7	1.075	0.000	- 61.372	0.000	0.000	0.000
8	- 8.189	0.000	- 109.200	0.000	0.000	0.000
9	- 17.453	0.000	- 138.426	0.000	0.000	0.000
10	- 29.291	0.000	- 121.167	0.000	0.000	0.000
11	- 41.130	0.000	- 69.231	0.000	0.000	0.000
12	- 38.302	0.000	- 59.059	0.000	0.000	0.000
13	- 33.663	0.000	- 109.190	0.000	0.000	0.000
14	- 19.795	0.000	- 145.053	0.000	0.000	0.000
15	- 5.926	0.000	- 121.157	0.000	0.000	0.000
16	0.000	0.000	- 66.275	0.000	0.000	0.000
17	- 24.202	0.000	- 93.190	0.000	0.000	0.000
18	- 24.176	0.000	- 125.191	0.000	0.000	0.000
19	- 16.179	0.000	- 134.283	0.000	0.000	0.000
20	- 13.422	0.000	- 105.301	0.000	0.000	0.000

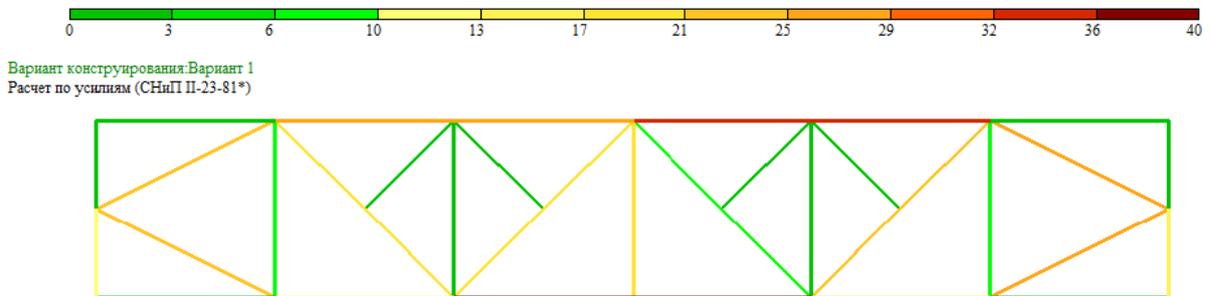


Рисунок 3.37 - Мозаика результатов проверки назначенных сечений по 1ПС

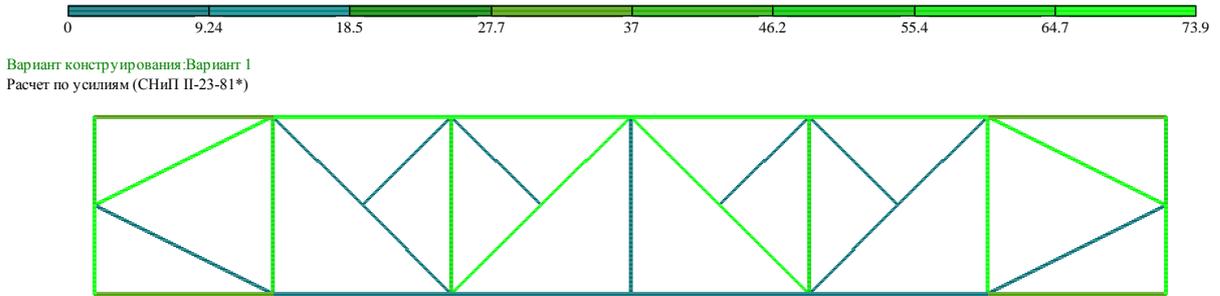


Рисунок 3.38 - Мозаика результатов проверки назначенных сечений по 2ПС

### 3.2 Расчетные исследования фермы мостового металлургического крана грузоподъемностью 300 т

Были получены расчетные данные - таблицы 3.13 – 3.15.

Таблица 3.13 – Ферма:  $L = 24$  м;  $d = 3$  м;  $h = 3$  м

Стержень		Усилие	Атрреб	Сечение (двугавр)	$A_x$	Длина	Момент инерции	Радиус инерции	$\lambda=l/r$	$\varphi$	$\sigma$
Верхний пояс	N1	-706,71	42,07	30Ш2	77,65	300,00	12200,0	12,53	23,9	0,94991	9581,143
	N4=N9	-1490,13	88,70	40Ш1	122,40	300,00	72530,0	24,34	12,3	0,97902	12435,15
Нижний пояс	N3=N6	1203,42	63,67	30Ш2	77,65	300,00	36340,0	21,63	13,9	1	15498
	N11	1565,58	82,83	35Ш1	96,67	300,00	19790,0	14,31	21,0	1	16195,1
Раскосы	N2	-803,27	47,81	30Ш3	87,00	424,26	14040,0	12,70	33,4	0,91842	10053,15
	N5	607,39	32,14	26Ш1	54,37	424,26	10400,0	13,83	30,7	0,92841	12032,8
	N10	-612,38	36,45	26Ш1	54,37	424,26	6225,0	10,70	39,6	0,927559	12142,89
Стойки	N7=N12	427,50	22,62	20Ш1	38,95	300,00	2660,0	8,26	36,3	1	10975,61

Таблица 3.14 – Ферма: L = 24 м; d = 3 м; h = 2 м

Стержень		Усилие	Атреб	Сечение (двугавр)	Ах	Длина	Момент инерции	Радиус инерции	$\lambda=l/r$	$\varphi$	$\sigma$
Верхний пояс	N1	- 1060,07	63,10	30Ш2	77,65	300,00	36340,0	21,63	13,9	0,97603	13987,11
	N4=N9	- 2235,20	133,05	40Ш2	141,6	300,00	39700,00	16,74	17,9	0,96683	16326,84
Нижний пояс	N3=N6	1805,13	95,51	40Ш1	122,40	300,00	72530,0	24,34	12,3	1	14747,79
	N11	2348,37	124,25	40Ш2	141,6	300,00	39700,00	16,74	17,9	1	16584,53
Раскосы	N2	- 1204,91	71,72	30Ш2	77,65	360,55	12200,0	12,53	28,8	0,93372	16618,66
	N5	911,08	48,21	26Ш1	54,37	360,55	10400,0	13,83	26,1	0,94209	17787,11
	N10	- 918,574	48,60	26Ш1	54,37	360,55	10400,0	13,83	26,1	0,94209	17933,39
Стойки	N7=N12	461,25	24,40	20Ш1	38,95	200,00	2660,0	8,26	24,2	1	11842,11

Таблица 3.15 – Ферма: L = 24 м; d = 3 м; h = 1 м

Стержень		Усилие	Атреб	Сечение (двутавр)	Ах	Длина	Момент инерции	Радиус инерции	$\lambda=l/r$	$\varphi$	$\sigma$
Верхний пояс	N1	- 2120,13	126,20	40Ш2	141,6	300,00	39700,00	16,74	17,9	0,96683	15486,35
	N4=N9	- 4470,39	266,09	60Ш4	298,34	300,00	182500,0	24,73	12,1	0,98017	15287,36
Нижний пояс	N3=N6	3610,26	191,02	50Ш3	199,20	300,00	84200,0	20,56	14,6	1	18123,8
	N11	4696,74	248,50	60Ш3	261,80	300,00	156900,0	24,48	12,3	1	17940,18
Раскосы	N2	- 2409,82	143,44	40Ш3	157,20	316,23	44740,0	16,87	18,7	0,96499	15885,79
	N5	1822,16	96,41	40Ш1	122,40	316,23	72530,0	24,34	13,0	0,9781	15220,27
	N10	- 1837,15	109,35	40Ш1	122,40	316,23	72530,0	24,34	13,0	0,9781	15345,44
Стойки	N7=N12	562,50	29,76	20Ш1	38,95	100,00	2660,0	8,26	12,1	1	14441,59

Расчетные данные позволили получить множество реализаций действующих напряжений для фермы, которые показаны на рисунках 3.39 – 3.41.

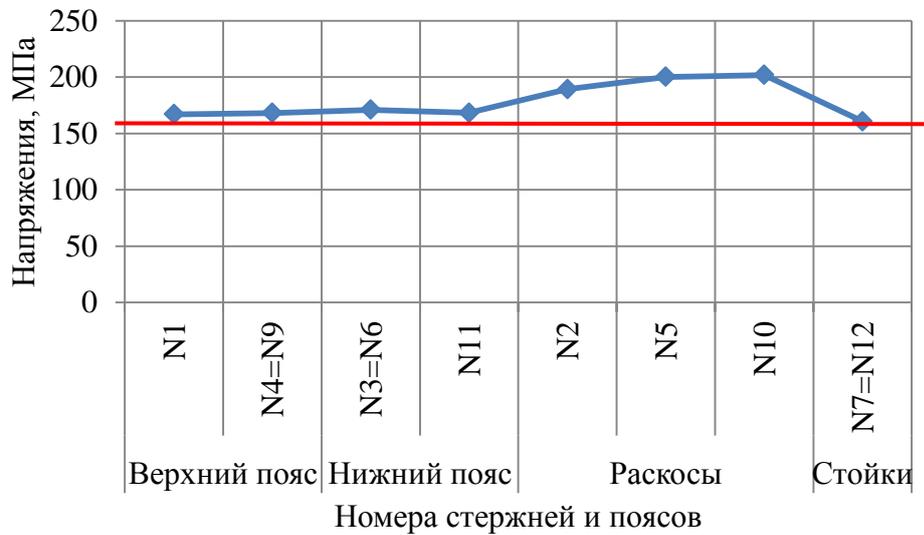


Рисунок 3.39 – Реализация действующих напряжений в ферме:  $L = 24$  м;

$d = 3$  м;  $h = 3$  м (красная линия -  $\sigma_T = 165$  МПа)

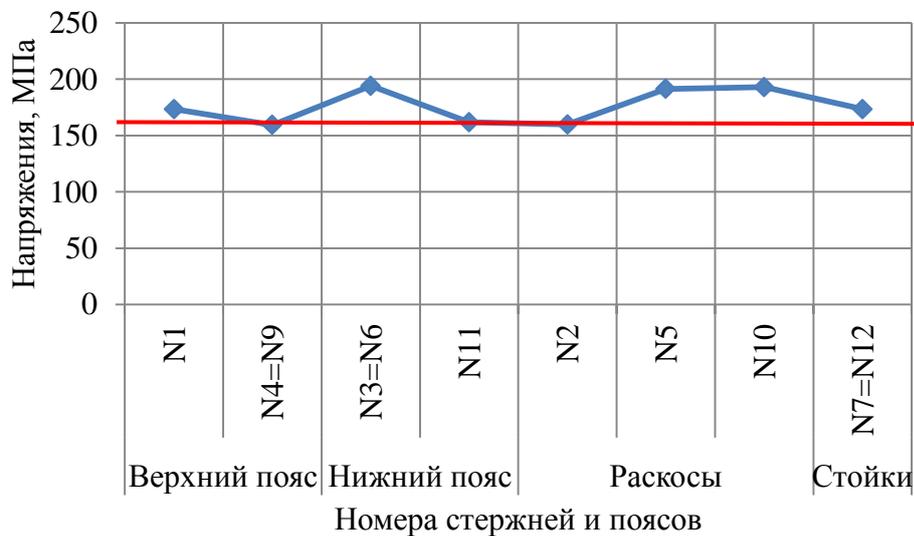


Рисунок 3.40 – Ферма:  $L = 24$  м;  $d = 3$  м;  $h = 2$  м (красная линия -  $\sigma_T = 165$  МПа)

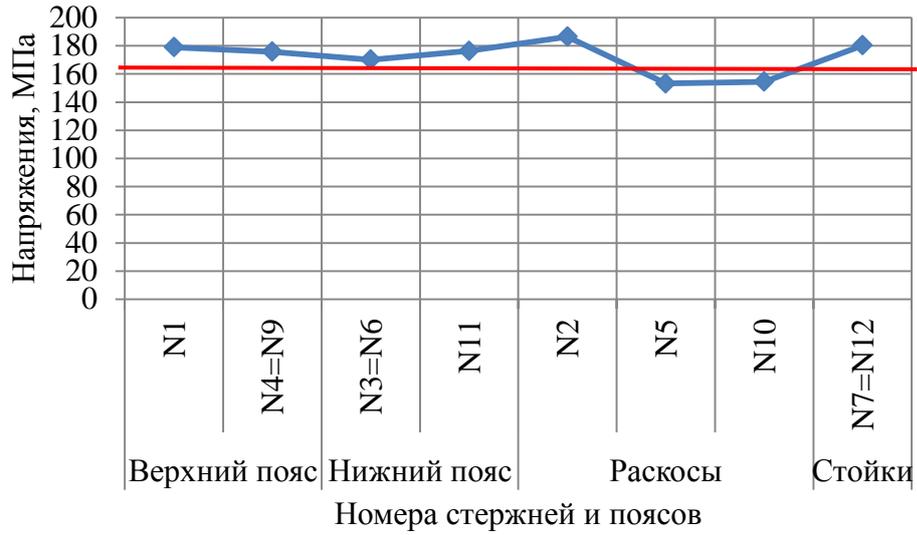


Рисунок 3.41 – Ферма:  $L = 24$  м;  $d = 3$  м;  $h = 1$  м (красная линия -  $\sigma_T = 165$  МПа)

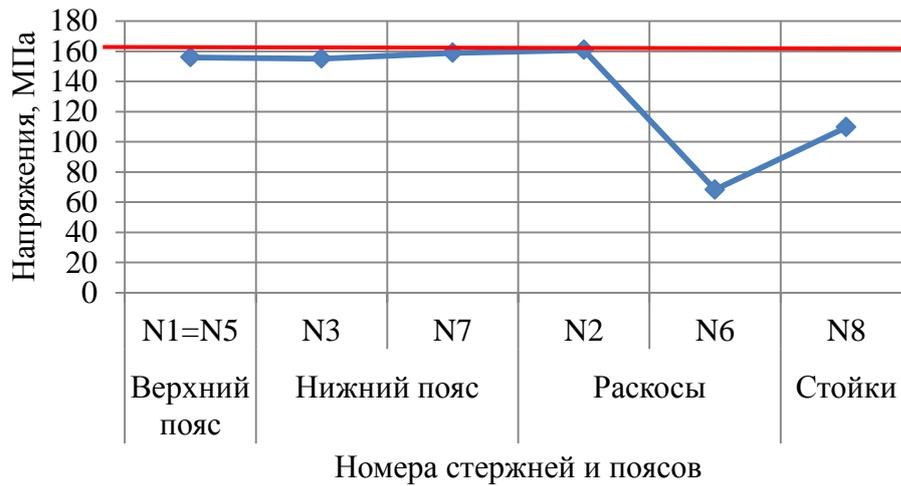


Рисунок 3.42 – Ферма:  $L = 18$  м;  $d = 3$  м;  $h = 3$  м (красная линия -  $\sigma_T = 165$  МПа)

Таблица 3.17 – Ферма: L = 18 м; d = 3 м; h = 2 м

Стержень		Усилие	Атреб	Сечение (двутавр)	Ах	Длина	Момент инерции	Радиус инерции	$\lambda=l/r$	$\varphi$	$\sigma$
Верхний пояс	N1=N5	- 1429,97	85,12	30Ш3	87,00	300,00	14040,0	12,70	23,6	0,95084	17286,23
	N3	907,11	53,99	30Ш2	77,65	300,00	36340,0	21,63	13,9	1	11682,03
Нижний пояс	N7	1568,07	93,34	40Ш1	122,40	300,00	72530,0	24,34	12,3	1	12811,03
	N2	940,74	56,00	30Ш2	77,65	360,55	36340,0	21,63	16,7	1	12115,13
Раскосы	N6	-592,81	35,29	20Ш1	38,95	360,55	2660,0	8,26	43,6	0,87888	17317,23
	N8	427,50	25,45	20Ш1	38,95	300,00	2660,0	8,26	36,3	1	10975,61

Таблица 3.18 – Ферма: L = 18 м; d = 3 м; h = 1 м

Стержень		Усилие	Атреб	Сечение (двутавр)	Ах	Длина	Момент инерции	Радиус инерции	$\lambda=l/r$	$\varphi$	$\sigma$
Верхний пояс	N1=N5	- 2859,93	170,23	50Ш3	199,20	300,00	84200,0	20,56	14,6	0,9755	14717,66
	N3	1814,22	107,99	40Ш1	122,40	300,00	72530,0	24,34	12,3	1	14822,06
Нижний пояс	N7	3136,14	186,68	50Ш3	199,20	300,00	84200,0	20,56	14,6	1	15743,67
	N2	1881,47	111,99	40Ш1	122,40	316,23	72530,0	24,34	13,0	1	15371,49
Раскосы	N6	- 1185,62	70,57	30Ш3	87,00	316,23	14040,0	12,70	24,9	0,94448	14428,91
	N8	427,50	25,45	20Ш1	38,95	300,00	2660,0	8,26	36,3	1	10975,61

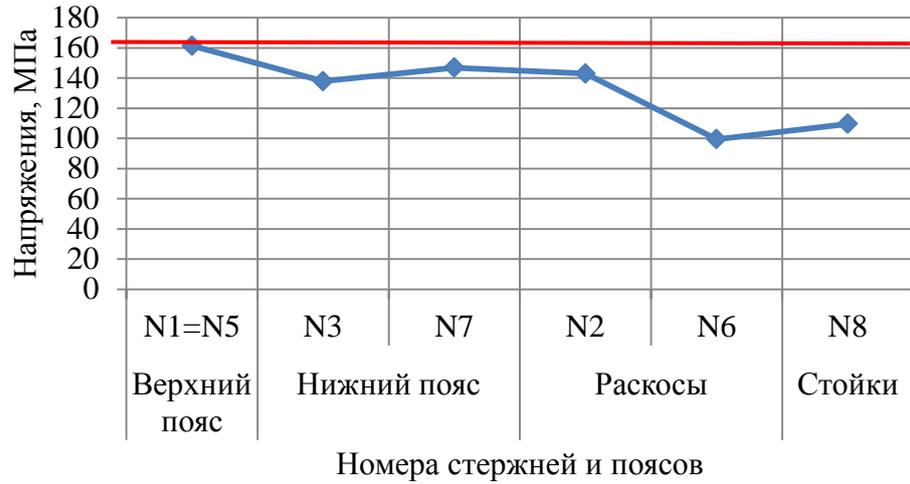


Рисунок 3.43 – Ферма:  $L = 18$  м;  $d = 3$  м;  $h = 2$  м (красная линия -  $\sigma_T = 165$  МПа)

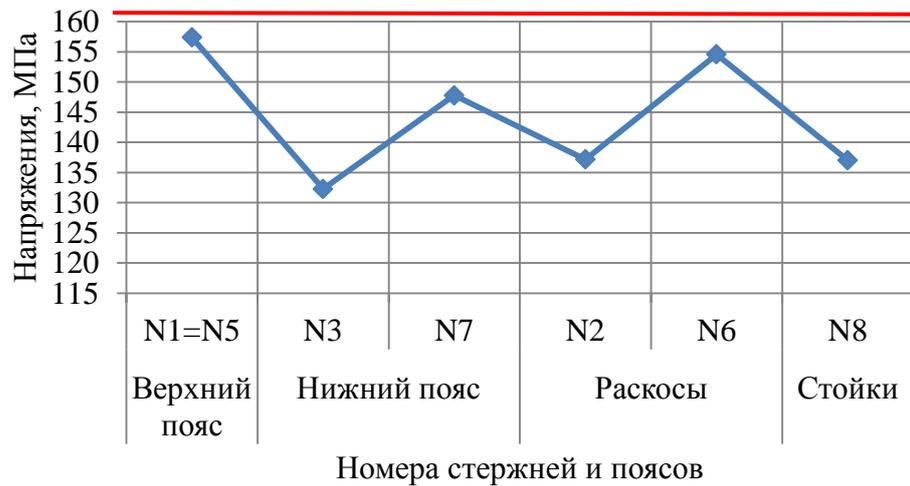


Рисунок 3.44 – Ферма:  $L = 18$  м;  $d = 3$  м;  $h = 1$  м (красная линия -  $\sigma_T = 165$  МПа)

Расчеты и проверка для напряжений проводились по первому предельному состоянию [62]. Для стали Вст3сп5 был принят предел текучести в 165 МПа.

К предельным состояниям первой группы относятся: общая потеря устойчивости формы; потеря устойчивости положения; разрушение любого характера; переход конструкции в изменяемую систему; качественное изменение конфигурации; состояния, при которых возникает необходимость

прекращения эксплуатации в результате текучести материала, сдвигов в соединениях, ползучести, недопустимых остаточных или полных перемещений или чрезмерного раскрытия трещин.

Первая группа по характеру предельных состояний разделяется на две подгруппы: по потере несущей способности (первые пять состояний) и по непригодности к эксплуатации (шестое состояние) вследствие развития недопустимых по величине остаточных перемещений (деформаций).

К предельным состояниям второй группы относятся состояния, затрудняющие нормальную эксплуатацию или снижающие долговечность вследствие появления недопустимых перемещений (прогибов, осадок, углов поворота, колебаний, трещин и т. п.).

Предельные состояния первой группы проверяются расчетом на максимальные (расчетные) нагрузки и воздействия, возможные при нарушении нормальной эксплуатации, предельные состояния второй группы – на эксплуатационные (нормативные) нагрузки и воздействия, отвечающие нормальной эксплуатации конструкций.

### 3.3 Динамика изменения характеристик безопасности эксплуатации как показателя качества мостового металлургического крана

Основным условием сохранения несущей способности элементов металлических конструкций и механизмов [62] является соблюдение требования, что действующие усилия в них не превышают его несущей способности.

В соответствии с характером напряжения и особенностями выполнения элемента, а также свойств материала за предельное напряжение принимают нормативные значения предела прочности, предела текучести или предела выносливости, а для случая потери устойчивости – критическое напряжение.

Будем исследовать достижение состояния, при котором дальнейшее увеличение нагрузок приведет к переходу конструкции или его элемента в

изменяемую систему вследствие достижения напряжениями в определенных зонах сечения предела текучести.

Расчетная зависимость первого предельного состояния имеет вид (1.2) [62].

Исходя из формулы (1.2) можно сделать вывод, что обобщенная несущая способность конструкции металлургического мостового крана зависит от обобщенных действующих нагрузок напряжений и деформаций, а также числа циклов.

Опираясь на подход [85-90], построим распределение плотности вероятности действующих напряжений, изображенное на рисунке 3.45 (на примере фермы 24 м, 3 м, 3 м).

Плотность распределения вероятностей в этом случае подчинена нормальному закону распределения

$$f(\sigma_{ij}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{ij}^2}} e^{-\frac{(\sigma_{ij}-\langle\sigma_{ij}\rangle)^2}{2\sigma_{ij}^2}}. \quad (3.1)$$

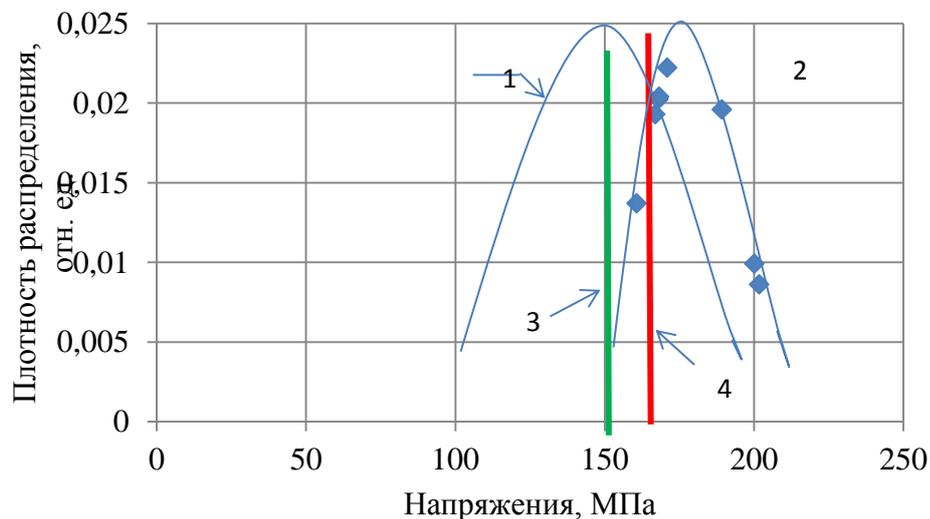


Рисунок 3.45 - Функция плотности распределения вероятностей действующих напряжений для фермы моста: 1- распределение для математического ожидания действующих напряжений 150 МПа; 2 - распределение действующих напряжений; 3 – напряжение 150 МПа; 4 – напряжение предела текучести  $\sigma_T$  165 МПа

Из рисунка 3.45 видно, эксплуатация при таких предельных нагрузках может привести к аварии – не выполняется условие (1.2). В связи с этим необходимо разработать ряд мероприятий. В нашем случае было предложено усиление сечений элементов шпренгелями, состоящими из двух уголков или двух швеллеров.

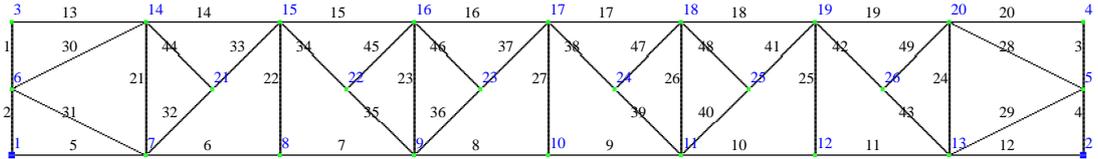


Рисунок 3.46 - Ферма со шпренгелем

При пересчете всех данных с учетом усиления шпренгеля плотность распределения вероятностей предельных действующих напряжений существенно снижена – переходит на графике в зону слева от предела текучести, что говорит о перспективности таких расчетов и использовании такой технологии на производстве.

Мостовые металлургические краны работают в сложных условиях. Как правило, здесь присутствуют высокие напряжения и деформации, резкие перепады температур, большое число циклов, длительность их эксплуатации, концентрации дефектов. Все это сопряжено с рисками аварий и катастроф, к которым может привести эксплуатация таких машин. Поэтому, представляется актуальным исследование изменения характеристик безопасности эксплуатации с точки зрения вероятностной динамики системы.

Взяв за исходное представления, изложенные в [19-25, 74-109], можно записать обобщенное уравнение предельного состояния зоны разрушения элемента конструкции тяжело-нагруженной машины при нагрузке:

$$F(\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}, l, N, t, T) = 0, \quad (3.2)$$

где  $\sigma_{ij}$  – напряжения;  $\varepsilon_{ij}$  – деформации;  $l$  – вид и размеры дефекта;  $N$  – число циклов;  $t$  – длительность эксплуатации;  $T$  – температура.

Уравнение (3.2) представляет собой гиперповерхность, разделяющую область безопасности и область риска.

Введем  $n$ -мерную плотность распределения вероятностей  $f(\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}, l, N, t, T) = f(X)$ .

Тогда функции безопасности и риска можно представить в виде:

$$P_S(t) = P\{F(\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}, l, N, t, T)\} = \int f(X) dX; \quad (3.3)$$

$P_S$  – вероятность безопасного состояния (функция во времени);

$$P_R(t) = 1 - P\{F(\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}, l, N, t, T)\} = 1 - \int f(X) dX; \quad (3.4)$$

$P_R$  – вероятность риска (опасного состояния функция во времени).

Представленные формулы дают возможность оценить опасность запредельных напряжений, деформаций, дефектов, температур, числа циклов, длительности эксплуатации в терминах риск-анализа конструкции [4,25] с позиций механики разрушения и безопасности [7-24].

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

$$\langle \sigma_{ij} \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} \sigma_{ij} f(\sigma_{ij}) d\sigma_{ij}, \quad (3.5)$$

$$\langle \varepsilon_{ij} \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} \varepsilon_{ij} f(\varepsilon_{ij}) d\varepsilon_{ij}, \quad (3.6)$$

$$\langle N \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} N f(N) dN, \quad (3.7)$$

дисперсиями:

$$\sigma_{ij}^2 = \int_{-\infty}^{\infty} \sigma_{ij}^2 f(\sigma_{ij}) d\sigma_{ij}, \quad (3.8)$$

$$\varepsilon_{ij}^2 = \int_{-\infty}^{\infty} \varepsilon_{ij}^2 f(\varepsilon_{ij}) d\varepsilon_{ij}. \quad (3.9)$$

$$N^2 = \int_{-\infty}^{\infty} N^2 f(N) dN. \quad (3.10)$$

Плотность распределения вероятностей в этом случае подчинена нормальному закону распределения:

$$f(\sigma_{ij}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{ij}^2}} e^{-\frac{(\sigma_{ij}-\langle\sigma_{ij}\rangle)^2}{2\sigma_{ij}^2}}, \quad (3.11)$$

$$f(\varepsilon_{ij}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\varepsilon_{ij}^2}} e^{-\frac{(\varepsilon_{ij}-\langle\varepsilon_{ij}\rangle)^2}{2\varepsilon_{ij}^2}}. \quad (3.12)$$

$$f(N) = \frac{1}{\sqrt{2\pi N^2}} e^{-\frac{(N-\langle N \rangle)^2}{2N^2}}. \quad (3.13)$$

Расчеты проводим для тяжело-нагруженного элемента рассматриваемого крана – фермы рамы несущей конструкции мостового металлургического крана грузоподъемностью 300 т. Эксплуатация 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. Нормальное постоянное математическое ожидание напряжений  $\langle\sigma_{ij}\rangle = 150$  МПа, деформаций  $\langle\varepsilon_{ij}\rangle = 0,785 \cdot 10^{-3}$ ; дисперсия  $\sigma_{ij}^2 \approx 8300$  МПа<sup>2</sup>, предельные напряжения  $\geq 165$  Мпа, предельные деформации  $1,219 \cdot 10^{-3}$ . Изучение вероятностной

динамики характеристик безопасной эксплуатации проводилось при помощи имитационного моделирования.

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

$$P_S(t) = P\{F(\sigma_{ij})\} = \int \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{ij}^2}} e^{-\frac{(\sigma_{ij}-\langle\sigma_{ij}\rangle)^2}{2\sigma_{ij}^2}} d\sigma_{ij}; \quad (3.14)$$

$$P_S(t) = P\{F(\varepsilon_{ij})\} = \int \frac{1}{\sqrt{2\pi\varepsilon_{ij}^2}} e^{-\frac{(\varepsilon_{ij}-\langle\varepsilon_{ij}\rangle)^2}{2\varepsilon_{ij}^2}} d\varepsilon_{ij}; \quad (3.15)$$

$$P_R(t) = 1 - P\{F(\sigma_{ij})\} = 1 - \int \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{ij}^2}} e^{-\frac{(\sigma_{ij}-\langle\sigma_{ij}\rangle)^2}{2\sigma_{ij}^2}} d\sigma_{ij}; \quad (3.16)$$

$$P_R(t) = 1 - P\{F(\varepsilon_{ij})\} = 1 - \int \frac{1}{\sqrt{2\pi\varepsilon_{ij}^2}} e^{-\frac{(\varepsilon_{ij}-\langle\varepsilon_{ij}\rangle)^2}{2\varepsilon_{ij}^2}} d\varepsilon_{ij}. \quad (3.17)$$

Результаты моделирования представлены на рисунках 3.47 и 3.48:

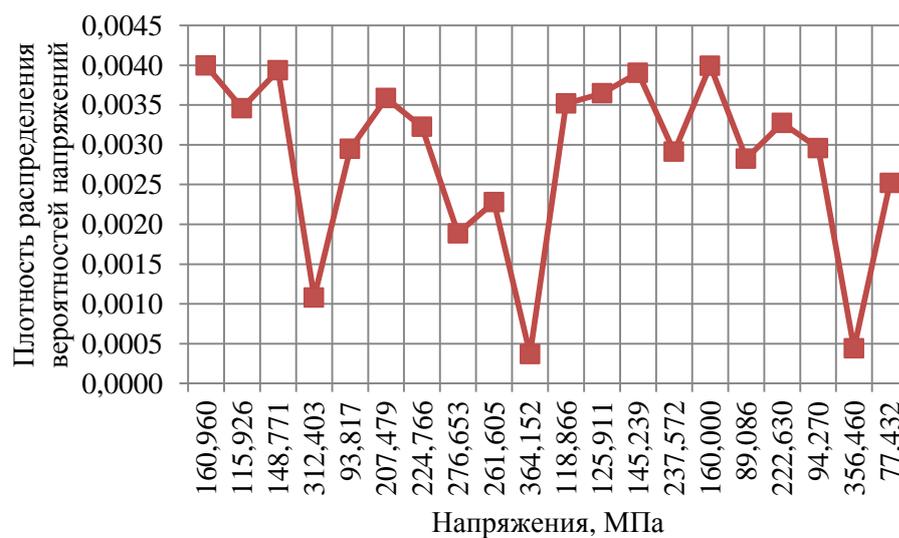


Рисунок 3.47 - Функция плотности распределения вероятностей от действующих напряжений

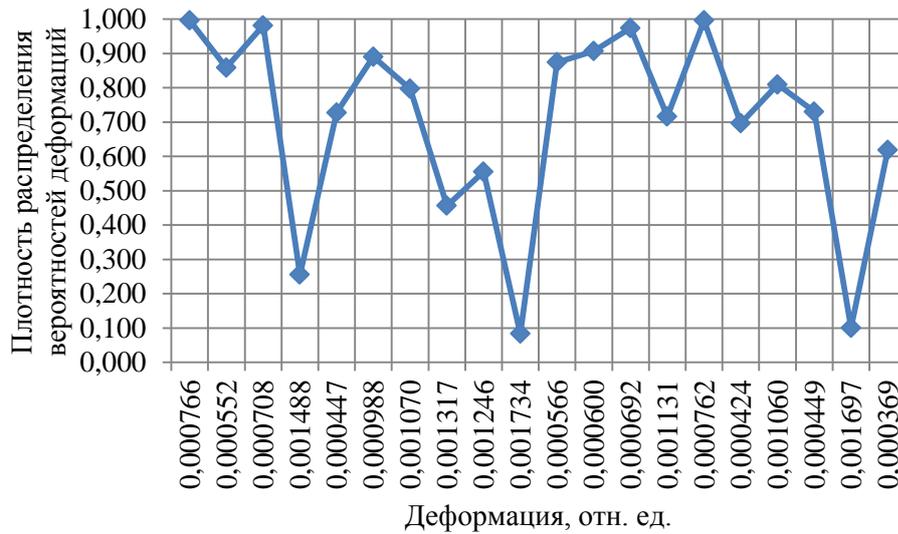


Рисунок 3.48 - Функция плотности распределения вероятностей от деформаций

Полученные смоделированные кривые вероятностной нагруженности основной конструкции крана грузоподъемностью 300 т позволили получить уравнения плотностей вероятностей в виде

$$f(\sigma_{ij}) = 0,008e^{-0,006\sigma_{ij}}, \quad (3.18)$$

$$f(\varepsilon_{ij}) = 0,597e^{\varepsilon_{ij}}. \quad (3.19)$$

Все коэффициенты полученных моделей статистически значимы по критерию Фишера.

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

$$P_S(t) = P\{F(\sigma_{ij})\} = \int 0,008e^{-0,006\sigma_{ij}} d\sigma_{ij}, \quad (3.20)$$

$$P_S(t) = P\{F(\varepsilon_{ij})\} = \int 0,597e^{\varepsilon_{ij}} d\varepsilon_{ij}, \quad (3.21)$$

$$P_R(t) = 1 - P\{F(\sigma_{ij})\} = 1 - \int 0,008e^{-0,006\sigma_{ij}} d\sigma_{ij}, \quad (3.22)$$

$$P_R(t) = 1 - P\{F(\varepsilon_{ij})\} = 1 - \int 0,597e^{\varepsilon_{ij}} d\varepsilon_{ij}. \quad (3.23)$$

Полученные зависимости позволили построить схемы опасных и безопасных состояний при оценке качества металлургических кранов различной нагруженности, рисунок 3.49.

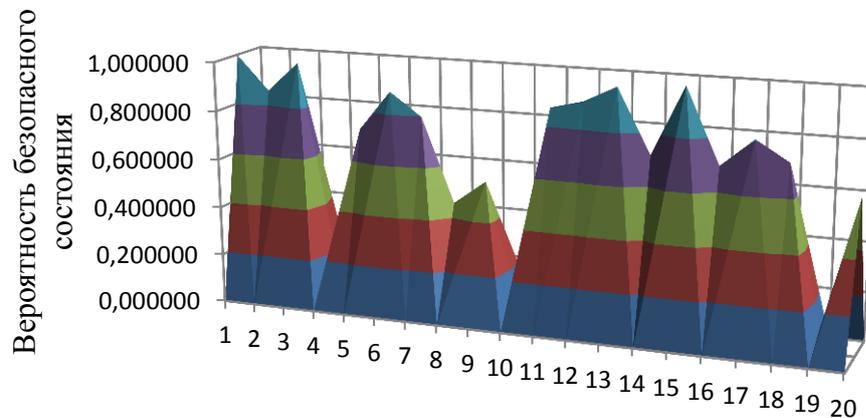


Рисунок 3.49 - Схема опасных и безопасных состояний при оценке качества металлургических кранов

Провалы на приведенной схеме представляют собой потенциально опасные зоны риска, когда эксплуатационные напряжения и деформации превосходят предельные величины.

### Выводы по главе 3

Риск-анализ конструкций в настоящее время набирает обороты. Все существующие методы в первую очередь направлены на получение количественной оценки безопасности и риска конструкций.

Сочетание расчетных и вероятностных данных позволяют сделать вывод о перспективности такой тематики.

Представленный междисциплинарный подход к оценке динамики характеристик безопасной эксплуатации тяжело-нагруженных машин

является перспективным направлением риск-анализа. Особенно это важно, когда необходимо количественная оценка безопасности или риска.

Было принято исследовать вероятностные свойства полей напряжений и деформаций. В этом случае был привлечен математический аппарат случайных процессов и программный комплекс «ЛИРА-САПР».

Расчеты и проверки проводились по первому предельному состоянию. На основании расчетных данных и вероятностных представлениях нагруженности потенциальных зон разрушения построена плотность распределения вероятностей предельных и безопасных действующих напряжений.

Для снижения негативных последствий предложено усиление элементов фермы моста шпренгелем. Такая технология позволит существенно снизить показатели риска аварий и увеличения безопасной эксплуатации не только металлургических кранов, но и других сложных конструкций.

## **ГЛАВА 4 КВАЛИМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РИСКА И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОГЕННЫМ РИСКОМ – ИНТЕГРАЛЬНЫМ ПОКАЗАТЕЛЕМ КАЧЕСТВА ОБЪЕКТОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ**

### **4.1 Квалиметрия при расчете риска аварии объектов металлургического предприятия**

Квалиметрия – это наука об измерении и количественной оценке качества всевозможных предметов и процессов [8]. Основные положения и методы квалиметрии были разработаны в работах Азгальдова Г.Г. совместно с различными авторами [8]. В [14] достаточно подробно освещены вехи развития квалиметрической научной школы в Магнитогорском государственном техническом университете им. Г.И. Носова (МГТУ). В данных работах рассматривались квалиметрические методы для продукции металлургического предприятия Магнитогорского металлургического комбината. На наш взгляд представляется интересным количественная оценка не только продукции, но и других 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. Во многих работах по квалиметрии предлагается несколько способов и методов. Специальные металлургические краны относятся к опасным производственным объектам, определяющие в большинстве своем в некоторых случаях доминирующие и компенсирующие свойства.

Несмотря на все многообразие различных методов, наиболее применяемым на сегодняшний день является экспертный метод. Рассматривая такие объекты металлургического предприятия, как специальные краны, можно сказать, что применить к оценке их качества

статистический и экономический затруднительно, а иногда практически невозможно. Объективно – отсутствует необходимая информация либо трудоемкость ее получения.

Таким образом, для развития оценки качества объектов металлургического предприятия – специальных металлургических кранов необходимо разработать квалиметрический метод его количественной оценки, что представляет собой актуальную задачу.

Рассмотрим несущую конструкцию металлургического мостового крана. Его функция – поднимать, перемещать, опускать грузы. Выделим основные конструкции крана металлургического предприятия:

- 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: общие деформации балок; местные деформации нижних поясов;
- 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:

$$P_k = \sum_{i=1}^4 P_{ai}, \quad (4.1)$$

или

$$P_k = \prod_{i=1}^4 P_{ai}. \quad (4.2)$$

В каждой группе несущей конструкции крана выделим элементы с наименьшими  $p_1$  и наибольшими  $p_2$ , причем ( $p_2 > p_1$ ) уровнями надежности. Уровни надежности  $p_1$  и  $p_2$  с позиции квалиметрии будем считать

единичными показателями доминирующего свойства такого объекта - 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 конструкционной безопасности – закон равномерной плотности, математическая модель которого представлена (4.3):

$$f(p) = \frac{1}{p_2 - p_1}. \quad (4.3)$$

Математическое ожидание уровня надежности несущих конструкций определяется по следующей формуле (4.4):

$$m_p = \frac{p_1 + p_2}{2}. \quad (4.4)$$

Дисперсия (4.5):

$$D_p = \frac{(p_2 - p_1)^2}{12}. \quad (4.5)$$

В процессе эксплуатации математическое ожидание уменьшается – смещается влево. Причины здесь могут быть самые различные: снижение несущей способности конструкций до ошибок персонал, которые их эксплуатируют.

В конкретный момент времени показателями качества технического состояния несущей конструкции специального металлургического крана будут являться величины уровней надежности и их математическое ожидание. Все вместе эти показатели образуют необходимую и достаточную информацию для определения среднего значения риска аварии  $R$ , который в соответствии с принципами квалиметрии можем принять за интегральный показатель качества объекта металлургического предприятия, (4.6).

$$R = 1 - \prod_{i=1}^n m_{pi}, \quad (4.6)$$

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

Таким образом, задача количественной оценки риска объекта сведется к задаче определения уровней надежности (риска) 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», таблица 4.1.

Таблица 4.1 – Назначение уровня риска конструкции

Уровень опасности	Вид риска	Ранг уровня	Степень переменной	Уровень риска
1	Нормальный риск	1	очень <sup>0,01</sup>	0,006
		2	очень <sup>0,5</sup>	0,270
		3	очень <sup>0,7</sup>	0,356
2	Предельно-допустимый риск	1	очень <sup>1,10</sup>	0,500
		2	очень <sup>1,30</sup>	0,559
		3	очень <sup>2,0</sup>	0,716
3	Катастрофический риск	-	очень <sup>2,20</sup>	0,750

Значение фактического риска аварии позволяет отнести техническое состояние элемента конструкции крана к одному из трех возможных состояний, таблица 4.2.

Таблица 4.2 - Значения риска для элемента конструкции

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

Данные получены путем компьютерного моделирования риск-ситуаций конструкции рассматриваемого металлургического крана [5,6].

В результате для каждой из четырех групп несущей конструкции получены уровни надежности, рисунок 4.1.

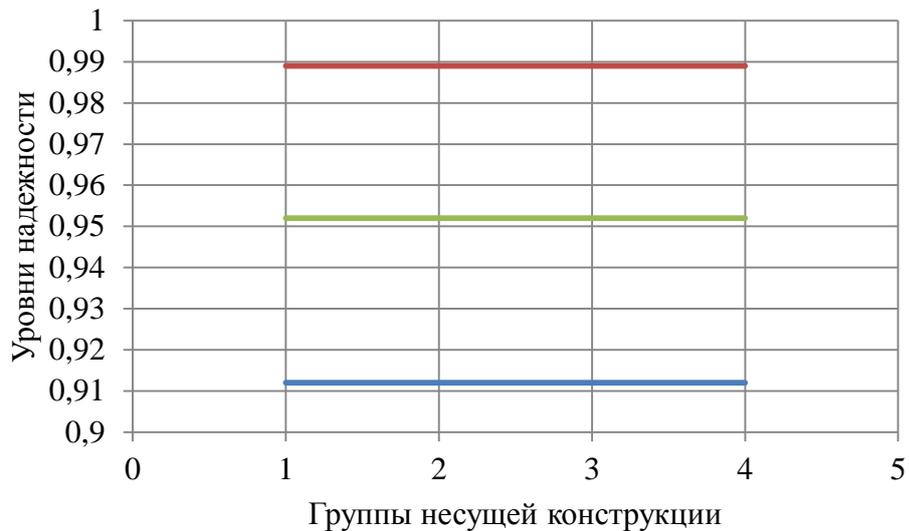


Рисунок 4.1 - Уровни надежности для четырех групп несущей конструкции крана

В результате эксплуатации уровни надежности снижаются, тем самым снижая безопасный ресурс специального 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. 4.1), то кран можно будет эксплуатировать. Если этого не учитывать, то дальнейшая эксплуатация может привести к авариям, катастрофам, соответственно к ущербам, которые могут быть несоизмеримо выше стоимости ремонтно-восстановительных работ. Данный квалиметрический метод упростит работу экспертов при принятии решения об эксплуатации такого объекта, и обеспечит экономический эффект, который может быть сопоставим с ценой нового специального металлургического крана и ввода его в эксплуатацию.

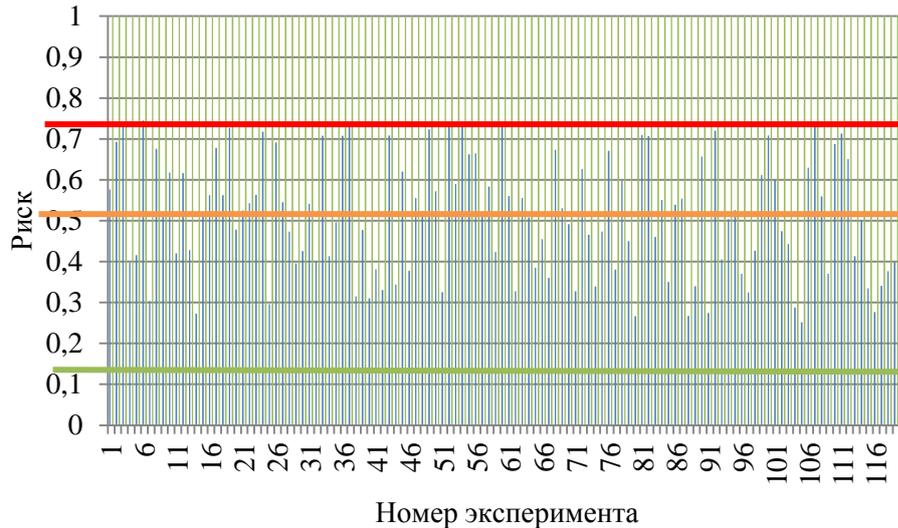


Рисунок 4.2 – Вычислительный эксперимент

На рисунке 4.2 зеленая линия указывает нормальный риск – 0,159, оранжевая линия – на предельно-допустимый риск – 0,521, красная линия – на предельный риск – 0,749.

#### 4.2 Конструкционный риск-анализ основных конструкций металлургического мостового крана

Рассмотрим конструкционный риск-анализ таких объектов металлургического предприятия как краны литейные (миксерные, заливочные, разлилочные) – краны мостового типа, оборудованные механизмами подъема и опрокидывания литейного ковша, предназначенные для разливки и заливки жидкого металла. Механизм главного подъема имеет два привода, соединенные между собой кинематически и имеющих храповые передачи для возможности работы одного привода при аварийной остановке другого.

Рассмотрим основные конструкции крана исходя из научной теории риск-анализа и позиций целостности и иерархичности. Выделим два уровня: на первом - блоки, локальные по множеству критериальных функций; на втором – выделим блоки, локальные по множеству варьируемых параметров, определяющих критериальные функции.

Подсистема 1 – металлоконструкция моста: ферма моста; пролетные и концевые балки главного и вспомогательного мостов; зоны приварки кронштейнов проходных галерей моста к стенкам балок; нижние пояса балок;

подсистема 2 – пролетные балки вспомогательного моста: общие деформации балок; местные деформации нижних поясов;

подсистема 3 – траверса механизма главного подъема: крюки; металлоконструкция траверсы;

подсистема 4 – храповая передача механизма главного подъема: храповое колесо; собачки; оси крепления собачек; прижимные пружины; осевое крепление храпового колеса.

Таким образом, имеем 4 блока (подсистемы) первого уровня и десять элементов второго уровня.

Тогда конструкционный риск определим

$$R = P\{W|F = F_c\}, \quad (4.7)$$

а также вероятность аварии (катастрофы) по заданному виду предельного состояния

$$P_f = P\{F = F_c\}. \quad (4.8)$$

Запишем модель конструкционного риска (4.9).

$$\sum = \bigcup_i a_i \left( \bigcup_j e_{ij} \right); i = 1, \dots, 4; j = 1, \dots, 10. \quad (4.9)$$

Тогда

$$R_{\Sigma A}(t) = P\{t: H | var[a_i] \notin \Omega_S\}, \quad (4.10)$$

предполагая, что блоки (подсистемы) первого уровня представляют собой потенциальные зоны разрушения. Для оценки [157, 158] конструкционного риска предполагает разложение  $R$ -характеристик, изложенное во 2 главе.

Будем рассматривать два крайних случая: суммирование ущербов и умножение ущербов в процессе эскалации повреждений.

$$R_{\Sigma} = \sum_{i=1}^4 a_i \sum_{j=1}^{10} a_{ij} \sum_k R_{ijk}; \quad (4.11)$$

$$R_{\Sigma} = \prod_{i=1}^4 \left\{ \prod_{j=1}^{10} \left( \prod_k R_{ijk}^{a_{ijk}} \right)^{a_{ij}} \right\}^{a_i}. \quad (4.12)$$

Коэффициенты  $a$  представляют собой веса значимости всех подсистем и элементов конструкции, они должны удовлетворять следующим условиям:

$$\sum_{i=1}^4 a_i = 1; \quad \sum_{j=1}^{10} a_{ij} = 1; \quad \sum_k a_{ijk} = 1. \quad (4.13)$$

Для рассматриваемой группы конструкций будем учитывать следующее:

- анализу подвергаются маловероятные события;
- большая неопределенность, обусловленная случайным характером внешних воздействий и процессов в элементах конструкций.

Будем считать все четыре подсистемы потенциальными зонами разрушения  $Z_k$ :

$$\Sigma = \bigcup_k Z_k = \bigcup_4 Z_k. \quad (4.14)$$

Функция риска (4.15).

$$R_{\Sigma}(t) = P\{t: H | var[Z_k] \notin \Omega_s\}. \quad (4.15)$$

Таким образом, достаточно исследовать вариации  $var[Z_k]$  состояний этих четырех потенциальных зон разрушения и определить вероятности выхода этих вариаций из области безопасности  $\Omega_s$ . Это позволяет нам снизить размерность задачи конструкционного риск-анализа.

Достаточно сложным вопросом конструкционного риск-анализа является учет роста трещин в различных моделях разрушения.

Инициаторами могут быть как технологические дефекты, так и конструктивные концентраторы или структурные неоднородности материала. В первом случае происходит изменение во времени плотности распределения  $f_V(l)$  размеров дефектов в определенном объекте, во втором случае изменяются как плотность  $f_V(k)$ , так и  $f_V(l)$ , потому что могут зарождаться новые трещины.

Для учета этих изменений необходимо решить задачу преобразования функций распределения дефектов [125]:

$$f_V(k, t_0) \rightarrow f_V(k, t), \quad (4.16)$$

$$f_V(l, t_0) \rightarrow f_V(l, t), \quad (4.17)$$

где  $t_0$  – момент времени, для которого определяется исходная или технологическая дефектность;

- $t$  – расчетное время риск-анализа.

Сегодняшний анализ различных литературных источников не дает должного ответа на решение поставленной задачи. Главными задачами исследователей и инженеров являются моделирование случайных траекторий изменения размеров отдельной трещины при случайном нагружении с оценкой вероятностных функций распределения этих размеров в определенный момент времени.

Исследуем рост трещин в стержнях фермы несущей конструкции мостового металлургического крана грузоподъемностью 300 т пролетом 24 м, высотой и шагом 3 м. Исходная схема нагружения представлена на рисунке 4.3.

Материал стержней фермы – конструкционная сталь ВстЗсп5. Расчет фермы проводился программным комплексом «ЛИРА-САПР».  $\Delta\sigma = 50 - 100$  МПа (мегапаскаль). Получены данные по изменению напряжений в стержнях фермы.

Учитывая, что  $\Delta K < K_{fc}$ , трещина развивается, можно рассчитать ресурс работы данной несущей конструкции.

$$N = 10^{-7} \int_{l_0}^{l_c} \left( \frac{K_{fc}}{\Delta K} \right)^n dl; \quad (4.18)$$

К сожалению, характеристики циклической трещиностойкости ВстЗсп5 найти не удалось. Учитывая, что металлургический мостовой кран грузоподъемностью 300 т работает в тяжелых и сверхтяжелых режимах работы, а общее количество циклов за гарантийный срок службы 15 лет составляет  $2,34 * 10^7$ , можно смоделировать интегральную функцию распределения роста трещин в стержнях несущей конструкции при действующих напряжениях и деформациях. Будем использовать распределение Вейбулла:

$$F(l) = 1 - e^{-\left(\frac{l}{\beta}\right)}, l \geq 0. \quad (4.19)$$

Результаты моделирования представлены на рисунке 4.5.

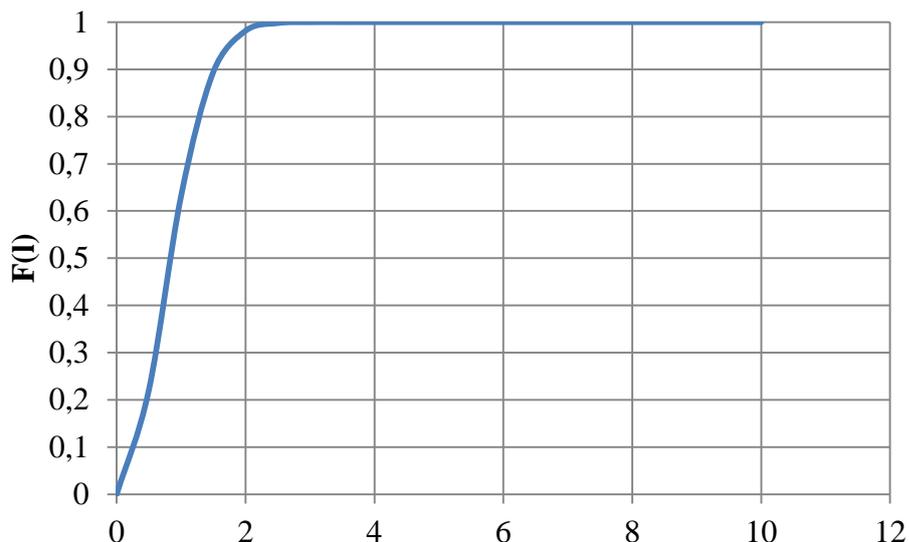


Рисунок 4.3 – Функция распределения роста трещин при действующей нагрузке в стержнях фермы крана

Видим, что при таких режимах, напряжениях и деформациях в течение гарантийного и послегарантийного срока эксплуатации исследуемых конструкций с большой долей вероятности неизбежен рост количества трещин. Это накладывает серьезные требования и ограничения. Предполагается, что начальный размер трещины в соединении стержней 10 см. Критическим размером для конструкции считаем трещину в 1 м, на практике такие встречаются нередко.

Трещиностойкость больших конструкций является серьезной проблемой. Учет количества и размеров различных дефектов и трещин представляет собой важную научно-техническую задачу.

Для больших конструкций и конструкций с пролетами предполагается наличие как технологической (исходной), так и дефектности эксплуатационной. Само по себе наличие дефектов и трещин может и не представлять опасности. Для начала процесса разрушения, как правило, необходим комплекс различных дополнительных факторов, способствующих разрушению.

Вероятностное моделирование роста трещин в потенциальной зоне разрушения мостового металлургического крана – ферме несущей конструкции должно включать в себе плотности распределения дефектов с учетом времени риск-анализа.

Из-за отсутствия данных по циклической трещиностойкости для конструкционной стали на сегодняшний день пока не удастся построить плотности распределения дефектов и трещин для таких конструкций.

Однако расчетные данные по действующим напряжениям и деформациям позволяют смоделировать рост трещин с использованием распределения Вейбулла, а полученные данные удовлетворительно согласуются с эксплуатационными.

Таким образом, представленный обзор и предложенная структурная схема блоков и элементов металлургического крана определяют необходимый набор конструкционного риск-анализа как основы оценки его качества. Особенностью такого подхода является вероятностная природа риска разрушения и безопасности.

Таким образом, оценивая конструкционный риск как вероятность катастрофического разрушения такой группы объектов, как металлургические краны, позволяют сформулировать и аналитически определить параметры оценки их качества по показателям надежности и экономической эффективности.

Таким образом, можно полагать, что риск-анализ основных конструкций кранов металлургического предприятия будет рассматриваться как многоэтапный процесс, анализирующий различные иерархические уровни, включающий различные, соответствующие данному уровню, модели и опирающийся на различные информационные базы.

#### 4.3 Вероятностные представления нагруженности конструкции

Поля напряжений  $\sigma(r, t)$  или деформаций  $\varepsilon(r, t)$  разложим в ряд по формам собственных колебаний  $\varphi(r)$ :

$$\sigma_i(r, t) = \sum_{i=1}^{\infty} u_i(t) \varphi_i(r), \quad (4.20)$$

$$\varepsilon_i(r, t) = \sum_{i=1}^{\infty} v_i(t) \varphi_i(r); \quad (4.21)$$

где  $i$  – номер формы колебаний;

-  $u, v$  – коэффициенты ряда, которые представляют случайные функции

времени.

Другой удобной формой является спектральное представление:

$$\sigma_j(r, t) = \langle \sigma_j(r, t) \rangle + \int_0^{\infty} U_j(r, \omega) e^{i\omega t} d\omega; \quad (4.22)$$

$$\varepsilon_j(r, t) = \langle \varepsilon_j(r, t) \rangle + \int_0^{\infty} V_j(r, \omega) e^{i\omega t} d\omega; \quad (4.23)$$

где  $U, V$  – случайные поля в пространстве  $r, \omega$ .

Для установившихся режимов эксплуатации конструкций с достаточной достоверностью можно полагать, что указанные случайные процессы являются стационарными Гауссовскими процессами с математическим ожиданием

$$\langle \sigma_{ij} \rangle = E[\sigma_{ij}(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} \sigma_{ij} f(\sigma_{ij}) d\sigma_{ij} \quad (4.24)$$

и дисперсией

$$\tilde{\sigma}_{ij}^2 = E\left[(\sigma_{ij} - \sigma_{ij}(t))^2\right] = \int_{-\infty}^{\infty} (\sigma_{ij} - \sigma_{ij}(t))^2 f(\sigma_{ij}) d\sigma_{ij}. \quad (4.25)$$

Плотность распределения вероятностей напряжений в этом случае будет выражена следующим образом

$$f(\sigma_{ij}) = \frac{1}{\tilde{\sigma}_{ij}\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\langle \sigma_{ij} \rangle - \sigma_{ij}}{\tilde{\sigma}_{ij}}\right)^2\right\}. \quad (4.26)$$

$$f(\varepsilon_{ij}) = \frac{1}{\tilde{\varepsilon}_{ij}\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\langle \varepsilon_{ij} \rangle - \varepsilon_{ij}}{\tilde{\varepsilon}_{ij}}\right)^2\right\}. \quad (4.27)$$

При заданной корреляционной функции  $K_\sigma$  или спектральной плотности  $S_\sigma$  процесса дисперсия может быть вычислена:

$$\tilde{\sigma}_{ij}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_\sigma(\omega) d\omega, \quad (4.28)$$

$$S_{\sigma}(\omega) = 2 \int_0^{\infty} K_{\sigma}(t) \cos \omega t dt. \quad (4.29)$$

При моделировании стационарных случайных процессов рассматриваются процессы с затухающей корреляционной функцией

$$K_{\sigma}(t) = \tilde{\sigma}_{ij}^2 e^{-\alpha|t|} \quad (4.30)$$

или процессы с гармоническими составляющими в корреляционной функции

$$K_{\sigma}(t) = \tilde{\sigma}_{ij}^2 e^{-\alpha|t|} [\cos(\omega t) + \mu \sin(\omega t)]. \quad (4.31)$$

Также можно представить характеристики плотности распределения деформаций  $f(\varepsilon_{ij}, t)$ .

При невозможности вычисления корреляционных функций и спектральных плотностей средние значения напряжений и деформаций мы получили при помощи численных методов, что было выполнено в главе 3.

Воспользуемся формулой вероятности разрушения для  $k$  видов дефектов в элементе конструкции объемом  $V$ :

$$P_f(V, k) = 1 - \exp \left\{ - \sum_{i=1}^k \int \mu_i(l_c) \frac{dV}{V_0} \right\}, \quad (4.32)$$

где  $\mu_i(l_c)$  – математическое ожидание числа дефектов критических размеров.

Параметр  $V_0$  принимает эталонный объем, для которого задано значение  $\mu$ . Эту формулу будем использовать как метод решения задачи оценки безопасного остаточного ресурса, непосредственно учитывающего допустимую вероятность аварии. Для этого вводится функция живучести несущей конструкции мостового крана:

$$F_l(t, k) = 1 - \exp \left\{ - \sum_{i=1}^k \int \mu_i(l_c, t) \frac{dV}{V_0} \right\}, \quad (4.33)$$

где  $t$  – моменты времени условий эксплуатации конструкции.

Путем подстановки параметра  $\mu$  конкретных функций распределения можно получить конкретный вид живучести для конструкции мостового крана, которая будет представлять собой вероятность аварии в момент времени  $t$ .

Хочется отметить, что остаточный ресурс является величиной, относящейся к отдельному элементу конструкции. По результатам работ [75-86] было продолжено моделирование поведения фермы металлургического мостового крана и получены результаты живучести в зависимости от времени, представленные на рисунке 4.4.

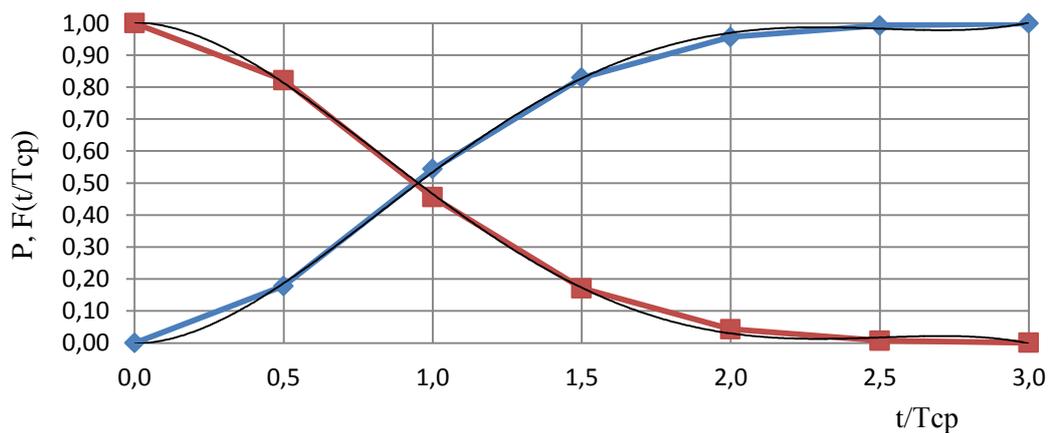


Рисунок 4.4 – Зависимость P безаварийной эксплуатации и F живучести фермы крана от времени

Таким образом, можно определить алгоритм конструкционного риск-анализа технической системы, рисунок 4.5.

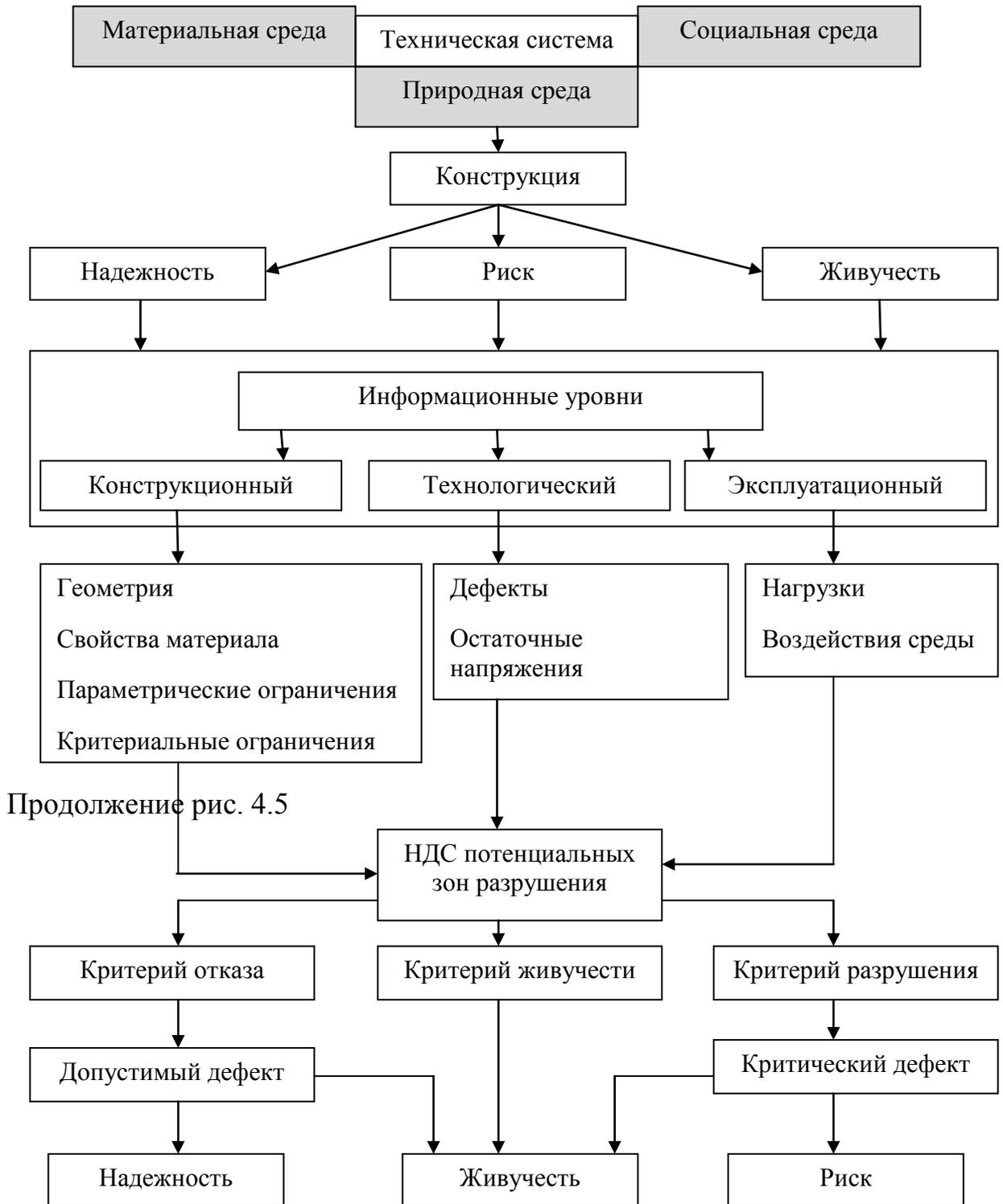


Рисунок 4.5 – Алгоритм конструкционного риск-анализа технической системы

#### Выводы по главе 4

В течение последних лет металлургические предприятия используют устаревшее оборудование, которое слабо модернизируется, восстанавливается, эксплуатируется за пределами гарантийных сроков. К таким опасным производственным объектам относятся мостовые металлургические краны. Их качество также необходимо оценивать. Несмотря на множество методов оценки качества такого объекта, в приоритете остается экспертный метод. Статистические и экономические методы на сегодняшний день здесь применить не представляется возможным.

При помощи рассмотренного квалиметрического метода оценки качества объекта металлургического предприятия определены показатели, которые определяют доминирующие свойства конструкции крана. К ним относятся функция плотности распределения вероятностей уровней надежности элементов, составляющих основу конструкции. К интегральному показателю относится среднее значение риска.

Полученные количественные оценки уточняют существующие методики оценки технического состояния исследуемых объектов металлургического предприятия и развивают квалиметрическую теорию при помощи конструкционного риск-анализа.

Теория случайных процессов однозначно может быть применима для решения оценки фактического технического состояния различных конструкций ответственного назначения.

Предложенный подход и алгоритм конструкционного риск-анализа сделают более точными оценки риска объектов металлургического предприятия.

## ГЛАВА 5 РАСЧЕТНОЕ И ОРГАНИЗАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ НАУЧНЫХ ОСНОВ ВЫБОРА И АНАЛИЗА ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ОБЪЕКТОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

### 5.1 Оценка упругопластической деформации методом преобразования вероятностей

Важной составляющей риск-анализа конструкций является оценка их фактического технического состояния. В некоторых работах автор провел анализ состояния аварийности несущих конструкций и предложил метод, который позволил сформулировать подход к оценке уровня пластической (упругой) деформации основных несущих конструкций мостовых металлургических кранов в зависимости от величины действующей нагрузки как определяющего параметра при управлении техногенной безопасностью и рисками.

Для аналитической оценки будем использовать метод вероятностного синтеза преобразования вероятностей для механической системы, в которой основными процессами, определяющими ее долговечность, являются процессы усталости и пластической и упругопластической деформации и потери устойчивости.

Определенные факторы влияют на величину пластической деформации, а именно:

$$\Delta\varepsilon_{\text{пр}} = f(\varepsilon_{\text{пр}}), \quad \Delta\varepsilon_{\sigma} = f(\sigma_{\text{ср}}), \quad (5.1)$$

$$\Delta\varepsilon_{K_{\sigma}} = f(K_{\sigma}), \quad (5.2)$$

где  $\varepsilon_{\text{пр}}$  - предварительная пластическая деформация «критического объема»;

-  $\sigma_{\text{ср}}$  - среднее напряжение в цикле нагружения;

-  $K_{\sigma}$  - структурные особенности материала.

Внешние параметры системы будут представлять нагрузки, действующие на основные конструкции металлургического мостового крана. В совокупности с внутренними они определяют входные параметры системы, случайным образом воздействующие на нее в виде случайного процесса «входа» системы.

Результат воздействия внешних возмущающих нагрузок и внутренних факторов определяется необратимыми изменениями в материале деталей системы, а критерии таких изменений показывают на степень повреждаемости материала при их воздействии. Очевидно, выходные параметры – это величина пластической деформации и потеря устойчивости, которая представляет собой реакцию системы на действие внешних и внутренних входных факторов.

Представим функциональную зависимость между входными и выходными параметрами системы на основании [32] в следующем виде:

$$\Delta\varepsilon = \left(\frac{\sigma}{E}\right)^n, \quad (5.3)$$

где  $E$  – модуль упругости материала;

-  $n$  – показатель степени, определяемый экспериментально.

Решив уравнение (5.2) относительно  $\sigma$ , представим выражение статистической динамики в виде:

$$p(\Delta\varepsilon, t_1) = p\left(\Delta\varepsilon^{\frac{1}{n}}E, t_1\right) \frac{d\left(\Delta\varepsilon^{\frac{1}{n}}E\right)}{d\varepsilon}, \quad (5.4)$$

которая представляет собой плотность вероятности выходного параметра системы.

При условии независимости входных параметров по нормальному закону распределения получим функцию  $p(\Delta\varepsilon)$  после решения и преобразований уравнения (5.4):

$$p(\Delta\varepsilon) = \frac{(\Delta\varepsilon)^{\frac{1-n}{n}} E}{2\pi s_\sigma} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[ \frac{(\sigma - \bar{\sigma})^2}{s_\sigma^2} \right] \right\}, \quad (5.5)$$

где  $\bar{\sigma}$  - среднее значение действующих напряжений;

-  $s_\sigma$  - среднеквадратическое отклонение действующих напряжений.

Таким образом, располагая опытными или эксплуатационными данными о предельных величинах остаточной деформации и построив кривую плотности вероятности  $p(\Delta\varepsilon)$ , можно судить о возможных величинах выходных параметров для режима нагружения и требуемого срока эксплуатации. Это можно установить также при наличии статистических характеристик распределения – математического ожидания  $M[\Delta\varepsilon]$  и дисперсии  $D[\Delta\varepsilon]$ , которые определяются следующими выражениями:

$$M(\Delta\varepsilon) = \int_0^{\Delta\varepsilon_{max}} \Delta\varepsilon p(\Delta\varepsilon) d(\Delta\varepsilon), \quad (5.6)$$

$$D(\Delta\varepsilon) = \int_0^{\Delta\varepsilon_{max}} \Delta\varepsilon^2 p(\Delta\varepsilon) d(\Delta\varepsilon) - 2 \int_0^{\Delta\varepsilon_{max}} (\Delta\varepsilon) M(\Delta\varepsilon) p(\Delta\varepsilon) d(\Delta\varepsilon) + \int_0^{\Delta\varepsilon_{max}} [M(\Delta\varepsilon)]^2 p(\Delta\varepsilon) d(\Delta\varepsilon). \quad (5.7)$$

Для прогнозирующего расчета интегральная функция распределения  $\Delta\varepsilon$  является очень важным показателем, потому что определяет вероятность выхода из строя системы. Определим ее как интеграл от  $p(\Delta\varepsilon)$ , подставив выражения для  $\sigma$  из (5.3) в уравнение (5.4):

$$p(\Delta\varepsilon) = \frac{E}{s_\sigma \sqrt{2\pi}} \int_0^{\Delta\varepsilon_{max}} \Delta\varepsilon^{\frac{1-n}{n}} \exp \left\{ -\frac{(E\Delta\varepsilon^{\frac{1}{n}} - L^{\frac{1}{n}})^2}{2s_\sigma^2} \right\} d(\Delta\varepsilon), \quad (5.8)$$

где  $L = (E\bar{\Delta\varepsilon})$ .

Введем обозначения в интеграле (5.8):

$$\frac{\left(E\Delta\varepsilon^{\frac{1}{n}} - L^{\frac{1}{n}}\right)^2}{2s_{\sigma}^2} = F. \quad (5.9)$$

Определим выражение для  $\Delta\varepsilon$ , возьмем производную  $d(\Delta\varepsilon)$  и подставим полученные выражения в формулу (5.8).

Взяв интеграл в пределах 0 -  $F_{max}$ , будем иметь

$$J = \frac{1}{\sqrt{2}} s_{\sigma} n E \Gamma\left(\frac{1}{2}, F_{max}\right), \quad (5.10)$$

где  $\Gamma\left(\frac{1}{2}, F_{max}\right)$  - неполная гамма-функция, значение которой определяются из таблиц [6].

Если случайным процессом в системе, в том числе, является процесс усталости и его показателем – рост остаточной деформации и потеря устойчивости, тогда интегральная функция вероятности выхода из строя рассматриваемого крана системы будет определяться:

$$p(\Delta\varepsilon) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \Gamma\left(\frac{1}{2}, F_{max}\right), \quad (5.11)$$

а математическое ожидание и дисперсия определяются в соответствии с формулами (5.6), (5.7).

Предложенный метод исследуем на действующем мостовом металлургическом кране, используемом в производстве на кислородно-конвертерном цехе (ККЦ) ПАО ММК.

Для определения напряжений и деформаций необходимо рассчитать режим работы крана – характеристику, указывающую можно ли эксплуатировать кран без ущерба его фактического технического состояния и надежности работы механизмов, воспользуемся таблицей 5.1.

Режим работы крана – показатель, который учитывает его использование по грузоподъемности и времени, а также число циклов работы.

Количество циклов работы крана за срок его службы, рассчитывается по формуле рабочих циклов:

$$CT = C_c * P_{\text{дн}} * T_k, \quad (5.12)$$

где  $C_c$  – количество циклов работы крана в сутки;

-  $P_{\text{дн}}$  – количество дней работы крана в году;

-  $T_k$  – количество лет работы крана.

Режим нагружения крана характеризуется величиной коэффициента распределения нагрузок  $K_p$ .

Будем исследовать краны грузоподъемностью 50 и 300 т, которые работают в кислородно-конвертерном цехе металлургического предприятия 260 дней в году. Среднее число циклов совершаемых краном в две смены 600. Нормативный срок службы крана 15 лет. Общее количество циклов работы кранов за весь срок их службы составит:

$$CT = 600 * 260 * 15 = 2,34 * 10^6 \text{ циклов.}$$

По таблице определяем класс их использования как U7 и U8.

Таблица 5.1 – Группы классификации (режима) кранов в целом

Режим нагружения	Коэффициент распределения нагрузок	Класс использования									
		U0	U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8	U9
		максимальное число рабочих циклов									
		16000	32000	63000	125000	250000	500000	1000000	2000000	4000000	более 4000000
Q1 - легкий	0,125			A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
Q2 - умеренный	0,250		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	
Q3 - тяжелый	0,500	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8		
Q4 - весьма тяжелый	1,000	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8			

В массе перемещаемых краном грузоподъемностью 50 тонн грузов: 90% составляют грузы массой до 40 тонн, 10% - грузы массой до 10 тонн.

Определим коэффициент распределения нагружения:

$$K_p = 0.9 * \left(\frac{40}{40}\right)^2 + 0.1 * \left(\frac{10}{40}\right)^2 = 0.9 + 0.00625 = 0.90625.$$

В массе перемещаемых краном грузоподъемностью 300 т грузов: 90% составляют грузы массой до 290 т, 10% - грузы массой до 10 т.

Определим коэффициент распределения нагружения:

$$K_p = 0.9 * \left(\frac{290}{290}\right)^2 + 0.1 * \left(\frac{10}{290}\right)^2 = 0.9 + 0.00119 = 0.90119.$$

Данному коэффициенту распределения нагрузок соответствует режим нагружения Q3 – тяжелый, Q4 – весьма тяжелый.

Общая группа классификации (режима работы) для класса использования U7, U8 и режимов нагружения Q3, Q4 - будет A8.

Расчет элементов машин на сопротивление усталости будем проводить по условию:

$$\sigma \leq [\sigma_{Rk}] = \frac{\sigma_{Rk}}{n_1}, \quad (5.13)$$

где  $\sigma_{Rk}$  - длительный предел выносливости, определяемый с учетом асимметрии  $R$ , эффективного коэффициента концентрации напряжений  $k$ , размеров детали и ее термообработки;

–  $[\sigma_{Rk}]$  - допускаемое напряжение;

–  $n_1$  - коэффициент сопротивления усталости.

Определим характер появления деформаций и потери устойчивости при помощи метода преобразования вероятностей.

При полученных данных  $\varepsilon_{max} = 1,276$  в относительных единицах, а  $\sigma = 165$  МПа,  $\varepsilon = 0,786$  имеем:

$$M(\Delta\varepsilon) = \int_0^{1,276} \Delta\varepsilon p(\Delta\varepsilon)d(\Delta\varepsilon) = 0,773.$$

$$D(\Delta\varepsilon) = \int_0^{\Delta\varepsilon_{max}} \Delta\varepsilon^2 p(\Delta\varepsilon)d(\Delta\varepsilon) - 2 \int_0^{\Delta\varepsilon_{max}} (\Delta\varepsilon)M(\Delta\varepsilon)p(\Delta\varepsilon)d(\Delta\varepsilon) + \int_0^{\Delta\varepsilon_{max}} [M(\Delta\varepsilon)]^2 p(\Delta\varepsilon)d(\Delta\varepsilon) = 0,658.$$

Определим параметр F из формулы (5.9)  $\frac{(E\Delta\varepsilon^{\frac{1}{n}} - L^{\frac{1}{n}})^2}{2s\sigma^2} = 0.0093 - 1.3947$ .

Используем функцию, возвращающую натуральный логарифм гамма-функции. Исходя из адекватности рассчитываемых данных, построим график вероятности появления номинальной и предельной деформации элементов несущей конструкции крана, которые могут повлечь выход из строя рассматриваемой конструкции, рисунок 5.1.

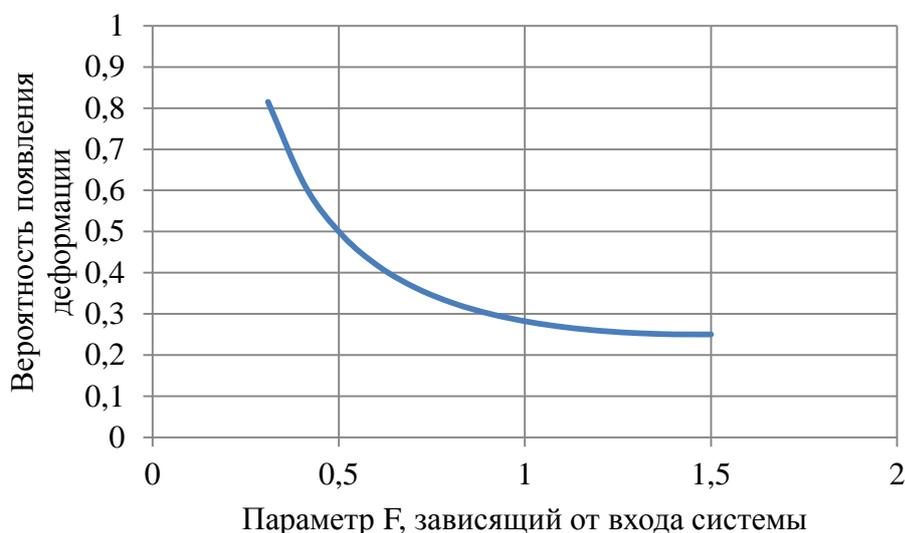


Рисунок 5.1 – Вероятность появления деформации от параметра F

Тогда вероятность критической деформации и выхода из строя крана грузоподъемностью 50 т и 300 т будет равна  $p(\Delta\varepsilon) = 0,25$  и  $0,457$  соответственно. Возвращаясь к риск-анализу конструкции в целом и, учитывая, что металлургический кран состоит из множества ответственных деталей, риск будет оцениваться как  $10^{-4}$  и выше.

Полученные данные согласуются с известными данными рисков металлургических предприятий и их различных элементов, что говорит о правомерности описанного подхода к прогнозированию и оценке надежности как

показателю качества основных конструкций мостовых кранов металлургических предприятий.

Полученная вероятность выхода из строя механической системы из-за роста остаточной деформации и увеличения прогибов достаточно высокая, это позволяет дополнить теорию конструкционного риск-анализа методом преобразования вероятностей и его дальнейшим развитием для предотвращения аварий и несчастных случаев и управления промышленной безопасностью сложных технических систем.

## 5.2 Оценка несущей способности конструкции методами теории катастроф

Металлургические мостовые краны относятся к крупногабаритным техническим конструкциям. Они могут быть описаны потенциальной функцией, минимум которой определит локально устойчивое состояние конструкции. Значительные нагрузки, которые испытывают элементы данных конструкций могут привести к разрушению. Равновесие, устойчивость и потеря устойчивости – вопросы, которые рассматриваются теорией катастроф.

Металлургические мостовые краны состоят из очень большого числа элементов. Анализ процесса разрушения проводится методами теории бифуркаций.

Для описания реальной конструкции введем координаты системы  $x_1, x_2, \dots, x_n, c_1, c_2, \dots, c_k$ , которые будут представлять нагрузку, эксплуатационные дефекты и дефекты, возникающие при изготовлении элементов.

$$E = KE + PE; \quad (5.14)$$

где  $E$  – общая энергия системы,  $KE$  – кинетическая энергия,  $PE$  – потенциальная энергия.

$$KE = \frac{1}{2} M_{ij} \dot{x}_i \dot{x}_j; PE = V(x; c); x \in R^n; c \in R^k. \quad (5.15)$$

Конструкция определяется минимумом  $E$  и в этом случае условия равновесия, устойчивости и потери устойчивости:

$$\nabla V = 0; V_{ij} \cong M_k^n, k = 0; \det V_{ij} = 0. \quad (5.16)$$

При отсутствии дефектов определяющими параметрами являются только внешние силы  $F$ , действующие на конструкцию.

Реальные конструкции, работающие в тяжелых современных условиях, далеки от совершенства. Критическая нагрузка  $F_c$ , которую не выдержит такая конструкция, определим из условия:

$$\det V_{ij}(F, \varepsilon) = 0. \quad (5.17)$$

Таким образом, при помощи теории катастроф можно представить снижение несущей способности такой конструкции в количественном виде [2]:

$$F_c = F_p - k|\varepsilon|^p; \quad (5.18)$$

где  $k$  – положительная постоянная,  $p$  – положительная рациональная дробь,  $\varepsilon$  – параметр несовершенства конструкции.

Для металлургических мостовых кранов основной причиной снижения несущей способности конструкции могут быть соответствующие динамические нагрузки. При этом среднюю кинетическую энергию будем рассматривать как динамический параметр несовершенства. Физически это означает, что система остается в локально устойчивом состоянии при нулевых и малых колебаниях до тех пор, пока кинетическая энергия не станет настолько большой, что система может перейти потенциальный барьер в другую равновесную конфигурацию.

Основная балка моста крана – конструкция, работающая на изгиб. Если малые нагрузки не вызывают деформации балки, то чрезмерные нагрузки могут привести к потере ею несущей способности – разрушению. Определим критическую нагрузку, что будет происходить с конструкцией при

промежуточных нагрузках. Тогда равновесная форма такой балки при отсутствии нагрузки определится:

$$y(x) = a_1^0 \sin \frac{\pi x}{l}. \quad (5.19)$$

Вычисления ряда Фурье могут быть выполнены в бесконечномерном пространстве состояний, в котором переменными состояниями являются его коэффициенты  $a$ . Энергия, накопленная в балке моста металлургического крана будет определена

$$\frac{B}{2} \int_0^l \left( \frac{d^2 y}{dx^2} \right)^2 dx = \frac{B}{2} \left( \frac{l}{2} \right) \sum_{j=1}^{\infty} \left( \frac{j\pi}{l} \right)^4 a_j^2. \quad (5.20)$$

$B$  – изгибная жесткость.

Рассмотрим уменьшение несущей способности балки моста при динамическом нагружении. Критическая нагрузка определится из выражения:

$$\Delta E = \frac{1}{2} (F_p - F) x^2 - \frac{1}{4} x^4. \quad (5.21)$$

$$F_c = F_p - 2|\Delta E|^{\frac{1}{2}}. \quad (5.22)$$

Кроме того, уменьшение несущей способности конструкции может быть определено из масштабных соображений, что в нашем случае очень уместно. Высокая чувствительность к статическому несовершенству перекрывается еще большей чувствительностью к динамическому несовершенству. Поверхность потери несущей способности конструкции может быть построена исходя из канонических свойств катастрофы сборки.

### 5.3 Критерии приемлемости риска ферм несущих конструкций мостовых металлургических кранов

Металлургический мостовой кран в своем составе имеет большое количество источников опасности, в пределах которых вероятно определенное

негативное воздействие на соответствующие для нее объекты или элементы. Поэтому построение полей потенциального риска и критериев приемлемости риска для каждого из выделенных источников опасности является актуальной задачей.

Анализу и оценке риска уделяется достаточно большое внимание [101-121]. Однако особенности решения о возможности эксплуатации на основе риск-анализа сложных технических систем по ресурсу и по состоянию заключаются в том, что требуется задание нормы приемлемых рисков  $[R_f]$  на допустимую вероятность разрушения, аварии или катастрофы.

Будем следовать концептуальной основе анализа риска сложной технической системы, которую можно представить на рисунке 5.2.

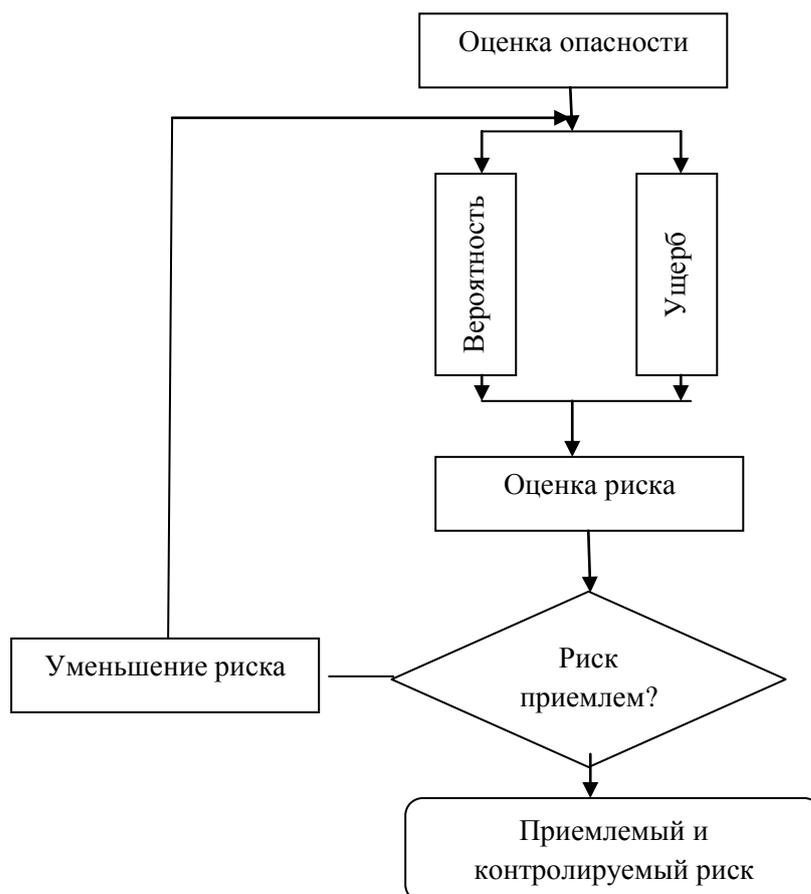


Рисунок 5.2 - Блок-схема анализа риска технической системы

Контроль характеристик риска на стадии эксплуатации в настоящее время практически не учитывается, нормативные значения приемлемого риска не установлены, а обеспечение безопасности производится путем экспертной оценки с применением методов технической диагностики [101,102]. Поэтому, когда обнаруживается дефект или повреждение в элементах конструкций сложных технических систем, закономерен поиск ответа на вопрос – насколько они опасны?

Схема принятия решения зависит от двух методов эксплуатации: техническая эксплуатация по ресурсу и техническая эксплуатация по состоянию. По первому методу техническая система эксплуатируется до выработки нормативного ресурса, второй метод допускает эксплуатацию до достижения отказа или до состояния с высокой вероятностью отказа (аварии, катастрофы).

Сформулируем задачу риск-анализа конструкции металлургического мостового крана на стадии эксплуатации как технической системы и предпримем попытку ее решения.

Пусть в какой-либо момент времени  $t$  проводится оценка состояния конструкции с измеримыми параметрами  $Q(t)$ . По этой оценке с помощью критериев необходимо определить состояние  $s_i$  технической системы на множестве возможных состояний  $S$ :

$$s_i(Q, t_k) \in S. \quad (5.23)$$

После этого выполняется прогнозирование динамики состояния объекта на определенный заданный интервал времени  $\Delta t$ :

$$s_i(Q, t_k) \rightarrow s_j(Q, t_k + \Delta t). \quad (5.24)$$

В этом случае интервал  $\Delta t$  необходимо увязывать с проектным ресурсом. Если  $t_k + \Delta t$  выходит за пределы нормативного ресурса, то переход в это состояние не допускается и техническая система снимается с эксплуатации. В обратном случае объект эксплуатируется с последующей оценкой его состояния.

При эксплуатации по состоянию приемлемым будем считать следующее. Состояние системы не должно принадлежать к множеству состояний отказа (аварии, катастрофы)  $S_f$ :

$$s_i(Q, t_k) \notin S_f. \quad (5.25)$$

Вероятность  $P$  попадания на множество состояний отказа (аварии, катастрофы) в момент времени  $t_k + \Delta t$  не будет превышать заданного значения:

$$P\{s_i(Q, t_k + \Delta t) \in S_f\} \leq [R_f]. \quad (5.26)$$

$R_f$  – допускаемое значение приемлемого риска.

Примем в качестве основных параметров характеристики действующих напряжений и деформаций, характеристики механических свойств металла.

На первом этапе устанавливаются требования приемлемого риска. В результате определяются безопасные или приемлемые и фактические напряжения и деформации, характеристики механических свойств металла.

Затем устанавливают критерии приемлемости риска. Критерием приемлемости допускаемого состояния служит критическое напряжение и соответствующая деформация. Если фактические значения оказываются меньше приемлемых допускаемых, то текущее состояние определяется как безопасное. Если прогнозируемая величина напряжений и деформаций оказывается меньше критических, то система эксплуатируется на заданном интервале. В другом случае эксплуатация прекращается.

Несмотря на точные расчеты напряжений и деформаций, траектория их на интервале эксплуатации остается случайной и неизвестной. В этом случае состояние конструкции характеризуется плотностью распределения ресурса или плотностью распределения напряжений и деформаций. При известной плотности ресурса определяем вероятностную оценку остаточного ресурса, а при известной плотности напряжений и деформаций оценим вероятность перехода конструкции

в предельное состояние отказа (разрушения, аварии, катастрофы). Учитывая ущербы и потери, связанные с принятием неправильных управленческих решений, осуществляем риск-анализ по ущербу от ошибок.

Таким образом, при эксплуатации мостового металлургического крана три схемы риск-анализа: по ресурсу, по состоянию, по принятым управленческим решениям.

Допуская, что состояние конструкции может быть отнесено к безопасному множеству  $S_0$  - гипотеза 1 или предаварийному множеству  $S_f$  - гипотеза 2, составим таблицу решения по отнесению к тому или иному множеству на основе сопоставления фактических и безопасных приемлемых значений напряжений и деформаций, таблица 5.2.

Таблица 5.2 – Решения по приемлемым рискам

Состояние системы	$S_0$	$S_f$
Решение	1	0
	1	1
	0	1
	1	1

1 – отнесение к данному множеству; 0 – неотнесение к данному множеству.

Данная таблица заполняется по результатам диагностического исследования и фактических данных.

Плотности значений деформаций и напряжений могут быть описаны известными методами. Для оценки вероятностей гипотез  $P(S)$  требуется применение новых особых методов теории вероятностей или, например, нелинейной динамики, в терминах русел и джокеров.

В настоящее время приемлемые нормы допустимого риска и допустимые вероятности разрушения разрабатываются только для конструкций ядерных реакторов.

#### 5.4 Математическое моделирование показателей надежности, безопасности и риска основных конструкций мостовых металлургических кранов

Учитывая, что риск будет зависеть от типа аварии и не связан с вероятностью аварии, а также рассматривая повреждения потенциальных зон разрушения как равновозможные события можно перейти к моделированию изучаемых показателей.

Сложность, а в некоторых случаях, невозможность проведения натурального или лабораторного эксперимента для проверки адекватности результатов математического моделирования предполагают численный эксперимент. В качестве исходных данных будем использовать таблицу 5.3 весовых коэффициентов а для элементов конструкции металлургического крана первого – четвертого блока двух уровней [9,10].

Таблица 5.3 - Значения весовых коэффициентов элементов конструкции

Количество элементов	Первый уровень	Второй уровень
3	3/10	1/10;1/10;1/10
2	2/10	1/10;1/10
2	2/10	1/10;1/10
3	3/10	1/10;1/10;1/10
Сумма 10	Сумма 1	Сумма 1

Значения весовых коэффициентов назначены исходя из равновозможности потенциального разрушения любой подсистемы или элемента конструкции рассматриваемого крана металлургического предприятия, эксплуатирующегося за пределами гарантийных сроков. Увязывая показатели надежности, безопасной эксплуатации и риска элементов оборудования введем исходные данные для оценки риска аварийной работы, таблица 5.4.

Таблица 5.4 – Риск аварийной работы конструкции за пределами гарантийных сроков эксплуатации

t	0	1	2	3	4
R(t)	0,010	0,016	0,026	0,038	0,053

Под  $t$  предполагаем годы после гарантийного срока эксплуатации конструкции крана. Считая, что гарантийный срок эксплуатации – пятнадцать лет, 0 – соответствует шестнадцатому году.

Будем различать аварии трех типов:

- аварии, не приводящие к остановке крана и производственного процесса;
- аварии, приводящие к остановке крана и его ремонту;
- катастрофические аварии, которые могут привести к разрушению конструкции, срыву производственного процесса и гибели людей.

В численном эксперименте будем использовать MS-Excel и модельное распределение. На основании проведенного численного эксперимента и известных данных рассчитаем ущерб от аварий различных типов в условных единицах. Расчет произведем в предположении работы на металлургическом предприятии 600 мостовых кранов в течение пяти лет после гарантийных сроков эксплуатации.

Полученный ущерб при суммировании  $R_{\Sigma} = 600 * 5 * 0,0325 * 2,1 = 204,75$  условных единиц.

Полученный ущерб при умножении  $R_{\Pi} = 600 * 5 * 0,0288 * 2,1 = 181,44$  условных единиц.

Расчетные данные интерпретируем следующим образом. Вероятность риска при выходе из строя одного или нескольких элементов конструкции металлургического мостового крана или нахождение вне безопасной области эксплуатации равна 0,0325. Вероятность же риска при выходе из строя всех элементов конструкции одновременно и попадание в опасную область эксплуатации равна 0,0288.

Ущерб будет соответствовать 21 аварии первого типа, 2 авариям второго типа, 0,2 авариям третьего типа при суммировании ущербов и, по аналогии, 18 авариям первого типа, 1,8 авариям второго типа, 0,18 авариям третьего типа, рисунок 5.3.

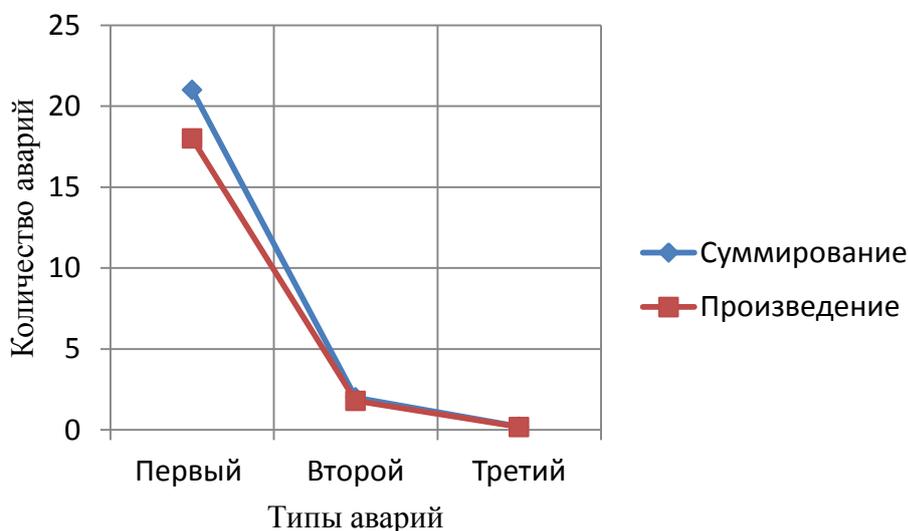


Рисунок 5.3 - Суммарный и ущерб от произведения аварий различных типов

Проведенное математическое моделирование развивает теорию конструкционного риск-анализа и позволяет принимать правильные инженерные управленческие решения при эксплуатации рассматриваемого оборудования, а

именно, пересматривать межремонтные сроки, регламенты и другие виды технического обслуживания для обеспечения надежной и безопасной, безаварийной работы его элементов.

Задача оценивания рисков различных технических систем в настоящее время является достаточно актуальной и востребованной. Несмотря на то, что существует множество подходов и программных средств к решению этой задачи, расчет рисков и связанных с ним показателей надежности и безопасности для рассматриваемых элементов оборудования металлургического предприятия – несущей конструкции мостового металлургического крана является относительно новым, сложным и должен содержать в своем составе единую методическую линию. Предполагается, что для этого необходимо математическое моделирование всех этих характеристик.

Риск аварии того или иного вида несущей конструкции рассчитан исходя из рассмотрения двух предельных случаев: сложения и произведения ущербов в процессе накопления повреждений.

Выполненное математическое моделирование представляет собой модельное решение важной проблемы оценки рисков, безопасной и надежной эксплуатации оборудования металлургического предприятия, к которому относятся мостовые краны. Они эксплуатируются в тяжелых и сверхтяжелых режимах, зачастую за пределами гарантийных сроков. Адекватность моделирования подтверждена численным моделированием и согласованностью с известными данными об авариях и ущербах от них.

Несмотря на то, что расчеты модельные и условны, они, безусловно, могут быть перенесены на технологические расчеты реальных других технических систем.

Такой подход может быть использован следующим образом: при эксплуатации рассматриваемых элементов кранов можно все оставить как есть, то есть не вкладывая инвестиций, определить конечный срок послегарантийной

работы, а затем собственнику купить новый кран. В другом случае, можно рассчитать количество инвестиций для поддержания безопасной, безаварийной и надежной эксплуатации крана на определенном увеличенном участке эксплуатации за пределами гарантийных сроков, что существенно повысит ее эффективность.

#### 5.5 Построение исследовательской программы анализа и управления риском на основе нелинейной динамики и Марковских случайных процессов

Известны исследования управления техногенным риском на ядерно-технических установках, ракетно-космической технике, объектах химической и нефтегазовой промышленности [61-71]. Оценке и управлению техногенным риском на предприятиях металлургической промышленности уделяется внимание на недостаточном уровне. На металлургических предприятиях также присутствуют и возможны крупные техногенные аварии и катастрофы, приводящие к загрязнению окружающей среды, остановке производства и многочисленным жертвам. Для этого используется междисциплинарный подход, который учитывает возникновение новых свойств сложной системы, состоящей из взаимодействующих элементов, которыми они не обладают.

Нелинейная динамика может оказаться очень полезной и для оценки спектра возможностей персонала в анализе и парировании техногенных рисков. В ее основе лежит концепция параметров порядка (определяющие поведение остальных переменных и процессов). Знание этих параметров позволяет выявить в явлении главное и описывать достаточно просто сложные системы в штатных и нештатных условиях эксплуатации.

Задачи, которые возникают при анализе риска объектов металлургической промышленности, являются в основном некорректными. Краны, сталь-ковши, станы и другое оборудование должны служить достаточно долгое время. Их аварии и катастрофы представляют огромную опасность и наносят серьезные

экономические ущербы. Публикаций по управлению техногенным риском явно недостаточно.

При рассмотрении таких фактов малые возмущения, которыми в других случаях пренебрегают, оказываются весьма существенными. Безопасность, например, металлургического крана в целом начинает определяться множеством малых параметров. Такие задачи не похожи на стандартную схему и требуют разработки новых подходов. Многие элементы технологического оборудования служат достаточно длительное время, потому что имеют многократный запас прочности и мягкие условия эксплуатации. В современных же условиях приходится рассматривать более жесткие динамические, эксплуатационные, реакционные нагрузки. Кроме этого, ряд конструкций создается не со слишком большим запасом прочности.

Состояние несущей конструкции мостового металлургического крана характеризуется координатами точки  $(x_1, \dots, x_4)$  в 4-мерном пространстве, а будущее такой системы характеризуется ее настоящим. В таком фазовом пространстве будут находиться области, которые связаны с большим риском. Такие области будем называть джокерами – правилами, в соответствии с которыми с некоторой вероятностью  $P(t)$  исследуемый объект в фазовом пространстве может совершить скачок – направиться в некоторую точку русла или к другому джокеру. Джокер может резко изменить диаграмму бифуркаций и подавить возникновение хаоса.

Джокер соответствует тому, что ряд существенных переменных изменяется очень быстро, и их число может возрасти. Такими переменными в исследуемом объекте являются усталость несущей конструкции, накопленные повреждения (дефекты), запредельные действующие напряжения и деформации. Их переход (скачок) может привести к недопустимым рискам  $R(t) > [R(t)]$ .

Необходимо искать область, где мы можем предсказать динамику изменения состояния несущей конструкции по вышеуказанным четырем

параметрам, то есть искать русло. В настоящий момент такая задача трудноразрешима, но возможно предложить следующий алгоритм:

- найти проекцию малой размерности ортонормальных векторов, определяющих поведение несущей конструкции мостового крана;
- соответственно найти область (русло), где будет найдена функциональная зависимость между усталостью, накопленными повреждениями, напряжениями и деформациями и состоянием несущей конструкции известными методами.

Анализ зависимости руслов и джокеров в конкретной ситуации позволяет определить уровень техногенного риска пока только в терминах алгебры логики.

Рассматриваемая система с руслами и джокерами в отличие от стандартных моделей рисков позволяет учесть качественные (скачкообразные) переходы. Такой учет техногенного риска позволит эффективно управлять им.

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, 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  $S$  конструкции. Такая задача представляется трудноразрешимой, но кажется интересным представить следующие соображения.

Считаем, что несущую способность конструкции  $S$  определяет большое количество переменных – усталость несущей конструкции, различные дефекты, в том числе, накопленные, количество циклов, превышающие допустимые нормы, а также действующие при этом напряжения и деформации и многие другие.

Найдем проекцию малой размерности ортонормальных векторов, которые будут определять динамику несущей способности исследуемой конструкции  $S$ . Тогда, очевидно, можем записать:

$$S(t) = F(\vec{N}, \vec{\sigma}, \vec{\varepsilon}). \quad (5.27)$$

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

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.

В предыдущих работах было показано, что функцию плотности вероятности количества циклов, действующих напряжений и деформаций конструкций, работающих в тяжело-нагруженных условиях, подчинена нормальному закону распределения. Таким образом, математическое ожидание  $\bar{S}$ , дисперсию  $S^2$  и функцию плотности вероятности несущей способности можем представить в виде:

$$f(S) = \frac{1}{\sqrt{2\pi S^2}} e^{-\frac{(S-\bar{S})^2}{2S^2}}, \quad (5.28)$$

$$\bar{S} = \int S f(S) dS, \quad (5.29)$$

$$S^2 = \int S^2 f(S) dS - \bar{S}^2. \quad (5.30)$$

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 по:

$$S = F(\vec{G}_1; \vec{G}_2; \vec{G}_3). \quad (5.31)$$

Джокеры представлены в векторной форме.

В настоящее время анализ русел и джокеров представлен только в терминах алгебры логики [37]. 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, состоящих из четырех основных подсистем.

Матрицу несущей способности конструкции представим в виде таблиц 5.5-5.7:

Таблица 5.5 - Несущая способность в начале эксплуатации

G1	G2	G3
0,8410	0,1090	0,0500
0,3710	0,4790	0,1500
0,2500	0,5000	0,2500

Таблица 5.6 - Несущая способность через 15 лет эксплуатации

G1	G2	G3
0,4257	0,4855	0,0889
0,4568	0,3539	0,1894
0,4425	0,3200	0,2375

Таблица 5.7 - Несущая способность через 25 лет эксплуатации

G1	G2	G3
0,3157	0,2959	0,3883
0,3154	0,2935	0,3911
0,3156	0,2946	0,3898

В матрице указана вероятность надежной (безаварийной) эксплуатации конструкции. Это позволило получить следующую диаграмму, рисунок 5.4.

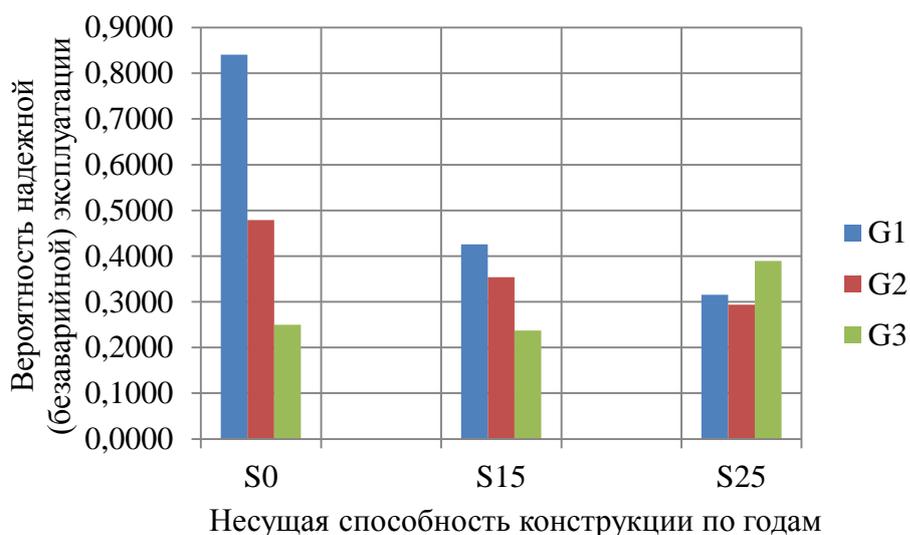


Рисунок 5.4 – Несущая способность конструкции

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 мостовых кранов металлургического назначения составляет 25-30 лет, предложенный подход достаточно адекватно описывает реальную ситуацию.

Таким образом, можно управлять состоянием несущей способности большой конструкции, устанавливая уровень технического обслуживания либо постоянного дистанционного мониторинга.

Будем рассматривать неоднородную марковскую цепь, для которой вероятности перехода  $p_{ij}$  будут меняться от шага к шагу. Обозначим  $p_{ij}^k$ -вероятность перехода из состояния  $S_i$  конструкции в состояние  $S_j$  на  $k$ -м шаге и предположим, что нам известны матрицы  $P_k$  вероятностей перехода на каждом шаге, тогда уравнение Колмогорова-Чепмена:

$$\overline{p(k)} = \overline{p(k-1)}P_k. \quad (5.32)$$

Уравнение (5.32) является примером рекуррентного соотношения, позволяющего вычислить вероятности состояний Марковского случайного процесса на любом шаге при наличии информации о предшествующих состояниях.

$$P^{(k)} = P_1 * P_2 * \dots * P_k. \quad (5.33)$$

Формула (5.33) будет определять вероятность перехода за  $k$  шагов из начального состояния. Можно заметить, что для некоторых матриц  $P$  при больших  $k$  элементы в столбцах становятся практически неотличимыми, что означает независимость предельных вероятностей состояний от начального: это означает, что вероятность системы находиться в состоянии  $S_j$ , практически не зависит от того, что было в далеком прошлом, то есть на самом деле имеет место теорема Маркова.

Таким образом, можем перейти к решению практической задачи применения теории случайных процессов к оценке фактического технического состояния конструкции.

Любая конструкция в процессе длительной эксплуатации может рассматриваться как физическая система, которая в результате ее оценки может находиться в одном из следующих состояний:

$S_1$  – конструкция (система) исправна;

$S_2$  – конструкция (система) имеет незначительные неисправности, но при этом может решать поставленные эксплуатационные задачи;

$S_3$  – конструкция (система) имеет существенные неисправности, но при этом решает ограниченный класс эксплуатационных задач;

$S_4$  – конструкция (система) вышла из строя, разрушилась, претерпела аварию.

Будем рассматривать протекающий в такой системе процесс как неоднородную марковскую цепь (один шаг – одна плановая проверка конструкции крана после 15 лет эксплуатации) с соответствующими матрицами перехода:

$$p(t) = p_0 \exp\left[-\int_0^t \lambda(t) dt\right]. \quad (5.34)$$

$$\lambda(t) = 0,005 + 0,003t, \quad (5.35)$$

-  $p(t)$  – значения вероятности безаварийной эксплуатации после гарантийных сроков эксплуатации;

-  $p_0$  – начальное значение исправной конструкции ( $S_1$ );

-  $\lambda(t)$  – функция интенсивности аварий.

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.

Найдем предельные вероятности в стационарном (установившемся) режиме, то есть при  $t \rightarrow \infty$ , используя теорему: если число состояний системы конечно и из каждого из них можно за конечное число шагов перейти в любое другое состояние, то предельные вероятности существуют.

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, рисунок 5.5.

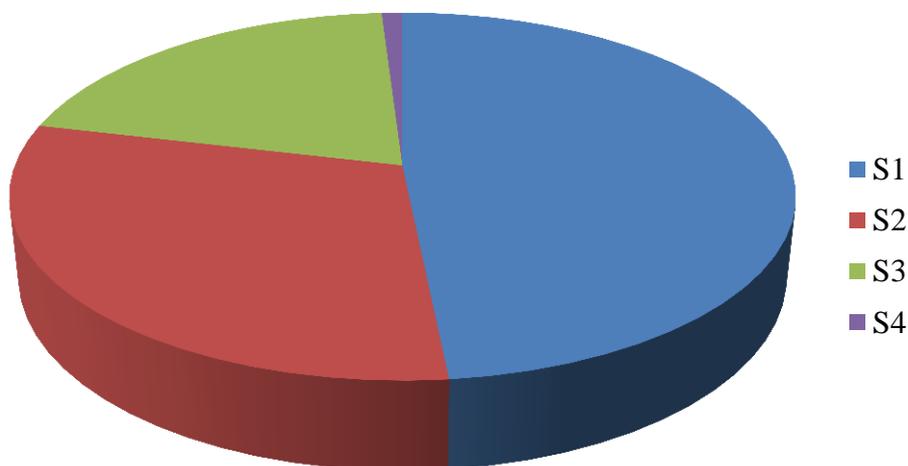


Рисунок 5.5 – Предельные вероятности состояний конструкции

Говоря об адекватности данного применения теории случайных процессов к реальной технологической задаче, можно подтвердить, что оно применимо, так как вписывается в реальные сроки эксплуатации кранов металлургического назначения, а полученные значения предельных вероятностей согласуются с реальными данными.

Применение такого подхода безусловно уточняет существующие методы и методики, снижая энтропию неопределенности информации, которая присутствует в таких задачах.

### 5.6 Методика расчета ущерба и принятия решения в управлении риском несущих конструкций мостовых металлургических кранов

На основе разрабатываемой и уточняемой теории конструкционного риск-анализа определим модели принятия решений по управлению риском мостовых металлургических кранов.

Предложим описать состояние крана целым числом  $n = 0$ , что будет соответствовать авариям с недопустимым уровнем ущерба  $U(t)$ . Если  $n$  будет больше, то в более безопасном состоянии будет находиться рассматриваемый объект. Безусловно, здесь состояние объекта должно рассматриваться вероятностным образом.

Полагаем, что в момент сдачи в эксплуатацию крана  $t = t_0 = 0$ , он имел оценку надежности  $n_0$  и риска  $R(t_0)$ . Считаем, что стоимость производства равна  $C$  и не зависит от оценок безопасности, а затраты, направленные на снижение рисков будут  $Z(p)$ .

В этом случае модель принятия решений будет включать стратегию управления риском и оценки экономического эффекта от работы крана.

Модель гарантированной надежности.

Рассмотрим случай, когда, несмотря на все принимаемые меры, состояние крана будет ухудшаться. Тогда время эксплуатации до аварии будет определяться только  $n_0$ . Экономическая составляющая эффекта от работы будет:

$$D_1 = (C - Z(p))n_0. \quad (5.36)$$

Это тот случай, когда кран, отработавший гарантийный срок эксплуатации более не эксплуатируется. Плюс такой модели принятия решений – не нужен мониторинг. Минус – 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:

$$R(t) = (1 - p)^{n_0}. \quad (5.37)$$

Если  $p$  близка к единице, а  $n_0$  большое, то риск аварии будет очень малым.

Как мы показали выше, это практически идеальная ситуация.

Модель штатных аварий.

При проектировании кранов обязательно учитываются так называемые штатные или нормальные аварии. В этом случае среднее время до аварии будет:

$$\bar{M} = \sum_{m=1}^{\infty} m * p(m|n_0). \quad (5.38)$$

$m$  – момент времени.

Тогда экономическая составляющая в отличие от (5.36) становится случайной величиной с математическим ожиданием:

$$\bar{D}_2 = \sum_{m=0}^T m [(C - Z(p))p(m|n) - p(m|n)L], \quad (5.39)$$

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.

### 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:

$$\bar{D}_3 = (C - Z(p) - N) \sum_{m=0}^{\infty} m * p(m, n). \quad (5.40)$$

Модель принятия решений на изменения технического состояния металлургических мостовых кранов.

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.

В соответствии с [19-25] модель принятия решений в управлении риском аварий мостовых кранов металлургического предприятия может быть получена в трех направлениях.

Первое направление связано с новым междисциплинарным подходом к рискам и безопасности на первом этапе хотя бы несущих конструкций рассматриваемых объектов.

На сегодняшний день существует достаточно большое количество подходов и научных и конструкторских разработок в каждой области технологий, есть свои понятия и надежности и риске, но, к сожалению, между ними нет ничего общего.

В этом случае модель принятия решений должна быть чисто нормативной, отраслевой, объектовой.

На самом деле в России сейчас ресурсов, чтобы вывести из эксплуатации деградировавшие краны и заменить их новыми, а также внедрить современные наукоемкие идеальные системы мониторинга и снизить риск аварий до нормативных требований в больших количествах попросту нет. Поэтому представляется допустимым сохранить максимально то, что эксплуатируется с приемлемыми рисками, а затем вводить новые проекты по снижению риска аварий.

Рассмотрим экономические составляющие для различных моделей принятия решений. В предыдущих работах показано, что аварии мостовых кранов на металлургическом предприятии могут быть трех типов: мелкие, незначительные аварии, катастрофические. 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:

$$\bar{U} = N * G * \tilde{C}, \quad (5.41)$$

- $N$  – количество эксплуатирующихся кранов;
- $G$  – срок гарантийной эксплуатации;
- $\tilde{C}$  - нижняя граница суммарного ущерба.

Тогда для всей совокупности мостовых кранов:

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

1 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 (5.37):

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

Задаваясь значением надежности и вероятностью аварий, можно увидеть распределение конструкционного риска металлургических мостовых кранов по годам при заданной надежности, рисунок 5.6.

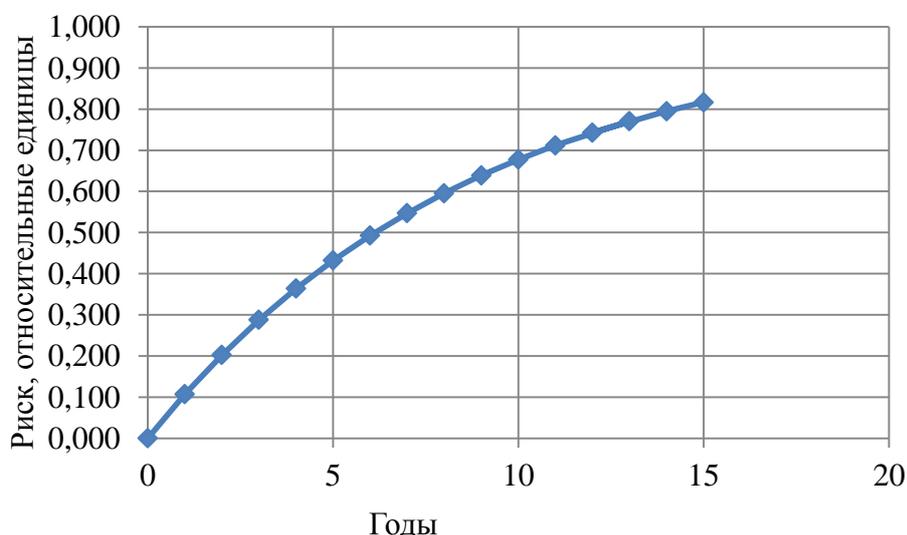


Рисунок 5.6 - Распределение конструкционного риска мостовых кранов по годам

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

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

$$\bar{D}_3 = 378360 \text{ усл. ед.}$$

Полученные расчетные данные удовлетворительно согласуются с реальными данными.

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 рисунок 5.7.

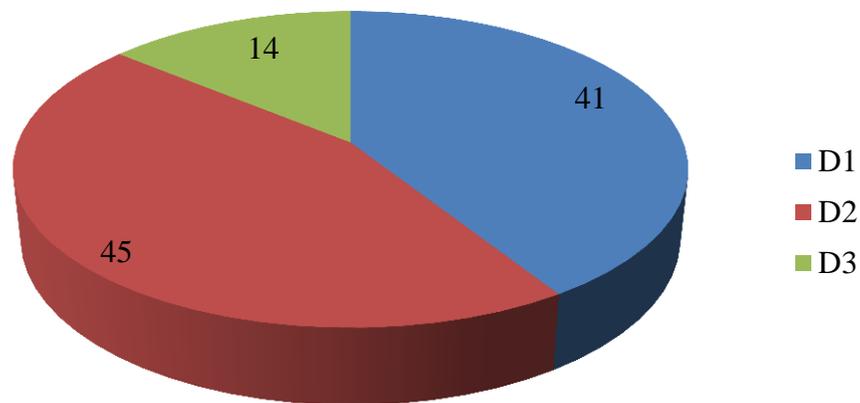


Рисунок 5.7 – Экономический эффект при различных моделях принятия решений

Хотя первая модель принятия решений может конкурировать со второй, но как было сказано выше – это практически идеальная ситуация.

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

5.7 Стандартизация и регламентация в сфере промышленной безопасности, технические требования к качеству кранов металлургического предприятия на основе конструкционного риск-анализа

Стандартизации и регламентации в области промышленной безопасности в настоящее время уделяется не такое большое внимание, о чем свидетельствуют таблица 5.8 и рисунок 5.8.

Таблица 5.8 - Нормативная документация по анализу безопасности и рисков

Орган государственной власти	Количество документов			Всего
	"безопасность"	"опасность"	"риск"	
Правительство РФ	3109	312	370	3791
Федеральное Собрание РФ	1706	190	208	2104
Президент РФ	1469	62	149	1680
Госкомэкология и Минприроды	568	127	78	773
Госгортехнадзор	331	63	43	437
МЧС России	60	24	12	96
Минобороны России	72	13	10	95
Росстрахнадзор	11	4	59	74
Госатомнадзор	34	4	2	40
Минатом России	10	0	0	10
Совет Безопасности РФ	2	0	1	3
Итого	7372	799	932	9103

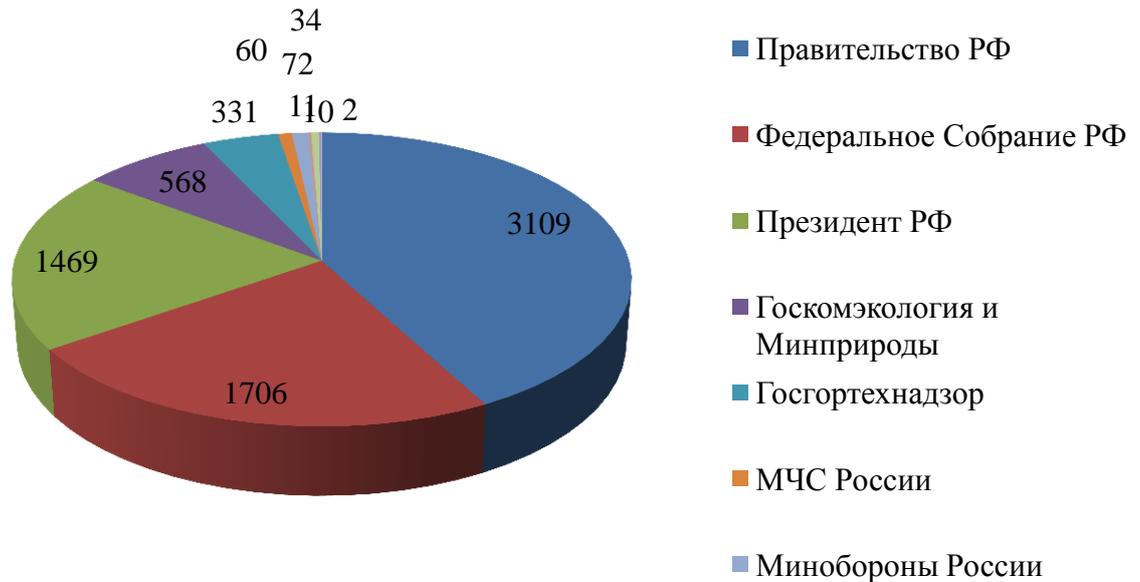


Рисунок 5.8 - Количество документов "безопасность"

Исходя из этого, определим пути снижения риска аварий конструкций:

- 1) Закрепление методических указаний в распорядительной и технической документации;
- 2) организация постоянной работы исследовательских, технологических, конструкторских, эксплуатирующих, контролирующих и надзорных организаций;
- 3) организация страхования ущерба;
- 4) разработка и нормативное закрепление предлагаемых методик и методологии;
- 5) развитие экономических механизмов управления риском как интегральной оценки качества объектов металлургического предприятия.

Таким образом, для имеющейся группировки металлургических кранов 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 следующим образом, изображенном на рисунке 5.9.

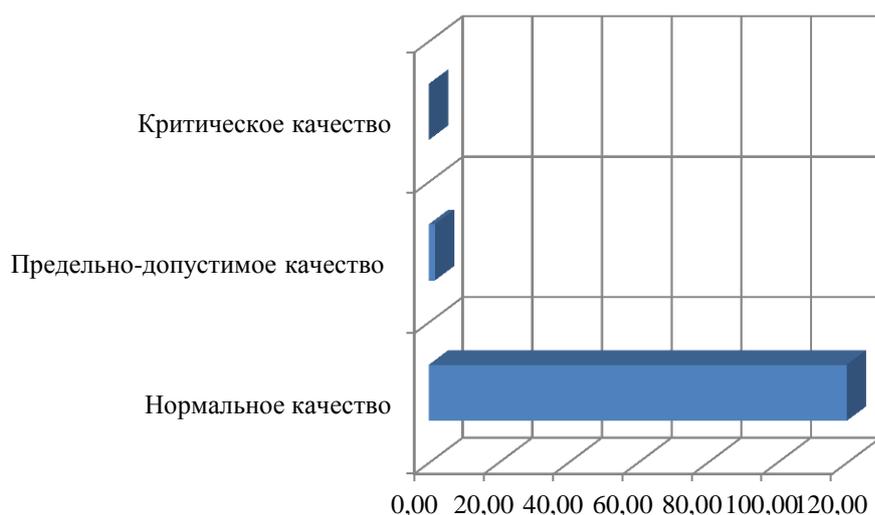


Рисунок 5.9 - Нормирование качества мостового металлургического крана ККЦ ПАО ММК (по горизонтали качество в условных единицах)

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

Таким образом, на основе имеющегося нормирования можем определить текущее фактическое техническое состояние специального металлургического крана. Данные значения качества позволяют связать количество отработанных циклов, действующие напряжения и деформации ранее, построить таблицы для

групп режимов, то есть это делает возможным уточнение характеристического числа для оценки нормативного срока службы, оценки несущей способности конструкции и применения алгоритма оценки качества.

Современное состояние специального кранового хозяйства металлургических предприятий характеризуется его эксплуатацией в насыщенных тяжелых и сверхтяжелых режимах работы. Стандарты, которые используются при принятии решений об их дальнейшей эксплуатации избыточны и недостаточны. Время требует их пересмотра, перехода на высокопроизводительные и высокоинформативные вероятностные методы анализа. Таким методом является конструкционный риск-анализ, который позволяет представить и нормировать качество несущих конструкций в простом виде и является удобным при проведении алгоритма его оценки.

Риск-анализ вписывается в сложившуюся картину эксплуатации исследуемых объектов, расчетные данные удовлетворительно сходятся с реальными, что говорит о его актуальности и правомерности такого подхода и, кроме этого, уточняет современные стандарты, а также может быть использован при разработке технических требований к новым стандартам в области качества объектов металлургического предприятия.

#### 5.8 Технические требования, организационные и методические рекомендации по экспертному обследованию крана

Положения нормативных правовых актов в области промышленной безопасности, устанавливающие требования к объекту.

1. Федеральный закон № 116-ФЗ от 27.07.1997 г. (с изменениями на 02.06.2016г.) «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» (статья № 13).

2. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности опасных производственных объектов, на которых используются подъемные сооружения» (с изменениями на 12.04.2016 г.), (п. 23 (а, б, г, д, ж, м), п. 25 (а, б), п. 150 (а, б, г, д, е) п. 261, п. 265 (а, б, в, с), п.269, п. 270, п. 274).

3. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору № 538 от 14 ноября 2013 г. «Правила проведения экспертизы промышленной безопасности» (п. 13-27).

Цель экспертного обследования – оценка соответствия объекта, козлового контейнерного крана МККС-42К, зав. № 31, рег. № 29167, предъявляемым требованиям промышленной безопасности, основывающаяся на принципах независимости, объективности, всесторонности и полноты исследований, проводимых с использованием современных достижений науки и техники. Экспертное обследование проводилось ООО «ИТЦ «Промтехаудит».

*Паспортные данные по крану*

Грузоподъемность, т	35,0*
Группа классификации (режима работы)	A5
Климатическое исполнение по ГОСТ 15150	Не указано
Может быть установлен в ветровом районе по ГОСТ 1451-77	Не указано
Нижний и верхний пределы по температуре рабочего состояния	От минус 40°С до плюс 40°С
Возможность установки в пожароопасной среде	Паспортом не предусмотрено

Возможность установки во взрывоопасной среде	Паспортом не предусмотрено
Производился ли капитальный ремонт	Записи в паспорте крана

*Соответствие фактических условий использования крана паспортным данным*

По виду выполняемых работ	Соответствует	
По группе классификации (режиму работы)	Соответствует	
По нижнему и верхнему пределам температур места установки	Соответствует	
По ветровому району места установки	Соответствует	
По характеристикам среды (пожароопасная, взрывоопасная, агрессивная и т.п.)	Соответствует	
Достижение предела по установленной группе классификации	Предел не перейден	
Необходимость выполнения оценки остаточного ресурса («да» или «нет»)	Нет	
Общее число дефектов (по ведомости дефектов)	14	
В том числе	устранены при проведении экспертного обследования	
	требуют устранения до начала дальнейшей эксплуатации	12

	должны быть устранены за срок, указанный в согласованных корректирующих мероприятиях	2
	должны быть устранены при очередном ТО и Р	
Масса груза при проведении статических испытаний, т		43,76
Масса груза при проведении динамических испытаний, т		38,86
Дефекты по результатам испытаний		Отсутствуют

5.9 Программа экспертного обследования подъемного сооружения  
**СОГЛАСОВАНО**  
(Исполнитель)

**УТВЕРЖДАЮ**  
(Заказчик)

Генеральный директор

ООО «ИТЦ «Промтехаудит»

\_\_\_\_\_ С.А Кустубаев

\_\_\_\_\_ 2021 г.

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_ /

\_\_\_\_\_ 2021 г.

## ПРОГРАММА

проведения экспертного обследования

подъемного сооружения

1. Подготовительный этап:

- ознакомление с эксплуатационной документацией, подготовка выписки из паспорта подъемного сооружения;
- проверка предоставленной справки о характере работы ПС;
- проверка условий и места проведения обследования подъемного сооружения;
- проведение инструктажа по технике безопасности для членов комиссии.

2. Рабочий этап:

- обследование технического состояния металлоконструкций;
- проверка геометрических параметров деформаций базовых конструкций ПС;
- обследование механического оборудования;
- обследование канатно-блочной системы;
- обследование электрооборудования;
- обследование приборов безопасности;
- **расчет риска аварии как показателя качества крана с учетом сроков эксплуатации.**

3. Рабочий этап оформления результатов обследования:

- сбор и анализ результатов обследования;
- составление ведомости дефектов;

- оформление актов ВИК, актов испытаний приборов безопасности;
- оформление акта обследования;
- расчет фактического режима работы ПС.

4. Заключительный этап:

- обследование ПС после устранения дефектов;
- проверка отремонтированных узлов и ремонтной документации (при необходимости);
- итоговая проверка и оформление акта испытаний приборов безопасности;
- проведение статических и динамических испытаний ПС;
- выработка решения о возможности и условиях эксплуатации ПС;
- оформление технического отчета по результатам экспертного обследования с выработкой рекомендаций (условий) по обеспечению дальнейшей безопасной эксплуатации ПС.

Представитель Исполнителя:

Эксперт ООО «ИТЦ «Промтехаудит»

\_\_\_\_\_ /С.А. Усольцев/

\_\_\_\_\_ 2020 г.

Представитель Заказчика:

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_ /

\_\_\_\_\_ 2020 г.

## ПЕРЕЧЕНЬ ИСПОЛЬЗУЕМОЙ НОРМАТИВНОЙ, ТЕХНИЧЕСКОЙ И МЕТОДИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

- 99-ФЗ от 04.05.2011 г. Федеральный закон «О лицензировании отдельных видов деятельности» (с изменениями и дополнениями).
- 116-ФЗ от 21.07.1997 г. - Федеральный закон «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» с изменениями от 02.06.2016 г.
- 283-ФЗ от 19.10.2011 г. - Федеральный закон «Об обязательном страховании гражданской ответственности владельца опасного объекта за причинение вреда в результате аварии на опасном объекте».
- Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности опасных производственных объектов, на которых используются подъемные сооружения». Утв. Приказом № 533 от 12.11.2013 г.
- ИСО 4301/1 «Краны грузоподъемные. Классификация».
- ГОСТ 27584-88 «Краны мостовые и козловые электрические. Общие технические условия».
- ГОСТ 29266-92 ИСО 9373-89 «Краны грузоподъемные. Требования к точности измерения параметров при испытаниях».
- ГОСТ 28609-90 «Краны грузоподъемные. Основные положения расчёта».
- ГОСТ 5264-80. «Ручная дуговая сварка. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры».
- ГОСТ 34-13-915-85. «Краны грузоподъемные. Монтаж. Технические требования».
- РД 10-112-1-04. «Рекомендации по экспертному обследованию грузоподъемных машин. Общие положения».
- РД 10-112-5-97 «Методические указания по обследованию грузоподъемных машин с истекшим сроком службы. Часть 5. Краны мостовые и козловые».
- ПУЭ. «Правила устройства электроустановок» (шестое и седьмое издание,

- переработанное и дополненное с изменениями). г. Новосибирск, 2010 г.
- МПОТ. «Межотраслевые правила по охране труда (правила безопасности) при эксплуатации электроустановок» (шестое и седьмое издание, переработанное и дополненное с изменениями). г. Новосибирск, 2010 г.
  - ПТЭ. «Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей». Утверждены Минэнерго России № 6 от 13.01.2003 г. (шестое и седьмое издание, переработанное и дополненное с изменениями). г. Новосибирск, 2010 г.
  - РД РОСЭК 012-97. «Канаты стальные. Контроль и нормы браковки».
  - РД РОСЭК-006-97 «Машины грузоподъемные. Конструкции металлические. Толщинометрия ультразвуковая. Основные положения».
  - РД 24.090.52-90. «Подъемно-транспортные машины. Материалы для сварных металлических конструкций». (утв. Минтяжмашем СССР 01.10.1990 № С4-002-1-9254).
  - РД 24. 090. 97-98. «Оборудование подъемно-транспортное. Требования к изготовлению, ремонту и реконструкции металлоконструкций г/п кранов».
  - РД 03-606-03. «Инструкция по визуальному и измерительному контролю».
  - РД 10-138-97 «Комплексное обследование крановых путей грузоподъемных машин», с изменениями № 1 РДИ 10-349(138)-00 от 30.03.2000 г.
  - РД 50:48:0075.01.05. «Рекомендации по устройству и безопасной эксплуатации наземных крановых путей».
  - РД 50:48:0075-02.05. «Тупиковые упоры. Общие требования к проектированию, изготовлению и эксплуатации».
  - РД 10-197-98 Инструкция по оценке технического состояния болтовых и заклёпочных соединений грузоподъемных кранов.
  - Приказ № 538 от 14.11.2013 г. Об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила проведения экспертизы промышленной безопасности».

## Выводы по главе 5

Нелинейная динамика таких больших и сложных конструкций как мостовые краны металлургического назначения является актуальной и насущной проблемой. Изучение реальных объектов представляет собой интереснейшую задачу.

И хотя задача действительно трудно разрешается, однако можно использовать следующее: выделить векторы, которые определяют несущую способность конструкции; найти функциональную, логическую зависимость между этими векторами и несущей способностью конструкции.

Располагая такими зависимостями, возможно постоянно осуществлять мониторинг таких сложных конструкций, что является безусловной основой их успешной эксплуатации, а также может быть базой для создания так называемых цифровых двойников такого оборудования.

По мере наполнения этих уровней осуществляется предварительный анализ опасностей. Он завершается детальными исследованиями напряженно-деформированного состояния (НДС) потенциально опасных зон разрушения. Для каждой зоны определяются критерии отказа, живучести и разрушения.

По критериям аварийности вычисляются допустимые размеры отклонений напряжений и деформаций, дефектов, а по критериям разрушения – критические размеры дефектов. Завершающим этапом риск-анализа служит вычисление функций надежности, живучести и риска на заданном интервале времени.

Теория случайных процессов однозначно может быть применима для решения оценки фактического технического состояния различных конструкций ответственного назначения.

Полученные значения предельных вероятностей состояния конструкции позволят принимать верные технические и конструкторские решения их дальнейшей эксплуатации.

Предложенный подход сделает более точными оценки риска конструкций ответственного назначения.

Металлургическое предприятие в своем составе имеет большое количество единиц грузоподъемного оборудования, счет идет на тысячи. Большая часть такого оборудования эксплуатируется за пределами гарантийных сроков. Принятие решений в управлении риском здесь является важной научно-технической проблемой.

Предполагается, что принятие решений может осуществляться по трем моделям: модель гарантированной надежности, модель штатных аварий, модель с идеальным мониторингом.

Принятие решение в таких условиях предполагает учет параметров конструкционного риска и приемлемого конструкционного риска, надежности, безопасности, социальных, психологических и экономических.

На сегодняшний день в России ресурсов для покупки новых кранов металлургического производства взамен устаревших, а также для высокотехнологичной системы идеального мониторинга нет.

Поэтому за основу предлагается взять вторую модель принятия решений, которая позволяет рассчитать уровень риска, приемлемого риска, технического обслуживания и спроектировать дальнейший срок эксплуатации.

В качестве модельного примера рассчитана экономическая составляющая всех трех моделей, из которых видно, что, как и предполагалось, модель штатных аварий оптимальна.

Предполагается, что приведенные исследования могут быть положены в основу новых математических моделей управления риском мостовых металлургических кранов, аварии и катастрофы на которых происходят не случайно, а в тех случаях, когда превышает некоторый критичный уровень сложности и уровень незнания или неучета динамики опасных процессов.

Данное обоснование позволило определить технические требования, организационные и методические рекомендации по обследованию реального объекта кранового оборудования, а также сформировать программу экспертного обследования, в которую вошел расчет риска аварии как показателя качества с учетом сроков эксплуатации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование теоретических вопросов оценки качества объектов металлургического предприятия на примере кранового оборудования с использованием конструкционного риск-анализа позволило решить серьезную народнохозяйственную проблему снижения аварий и катастроф на таком оборудовании и привело к следующим результатам.

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 ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Федеральный закон Российской Федерации «О безопасности» от 28.12.2010 г. - № 390-ФЗ. – Москва, 2010.
2. Закон Российской Федерации «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» от 21.07.1997 г. - №116-ФЗ. – Москва, 1997.
3. Закон Российской Федерации «О защите населения и территории от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» от 21.12.1994 г. - №68-ФЗ. – Москва, 1995.
4. Закон Российской Федерации «О техническом регулировании» (с изменениями от 09.05.2005 г.). - №184-ФЗ. – Москва, 2005.
5. Аварии и катастрофы. Предупреждение и оценка последствий. В 4-х томах / под ред. К.Е. Кочеткова, В.А. Котляровского. - М.: Ассоциация строительных вузов, 1995-1997.
6. Адлер, Ю. П. Практическое руководство по статистическому управлению процессами / Ю.П. Адлер, В.Л. Шпер. – М.: Альпина Паблишер, 2019. - 234 с.
7. Адлер, Ю. П. Управление качеством. Часть 1: Семь простых методов: Учебное пособие для вузов / Ю.П. Адлер, Т.М. Полховская, П.А. Нестеренко. - М.: МИСИС, 1999. -163 с.
8. Азгальдов, Г. Г. О квалитметрии / Г.Г. Азгальдов, Э.П. Райхман. - М.: Стандарты, 1972. – 172 с.
9. Акимов, В. А. Надежность технических систем и техногенный риск / В.А. Акимов, В.Л. Лапин, В.М. Попов [и др.]. - М.: Деловой экспресс, 2002. – 343 с.
10. Акимов, В. А. Основы анализа управления риском в природной ситуации: опасности, угрозы, риски / В.А. Акимов, В.В. Лесных, Н.Н. Радаев. - М.: Деловой экспресс, 2002. – 342 с.
11. Акимов, В. А. Природные и техногенные чрезвычайные ситуации: опасности, угрозы, риски / В.А. Акимов, В.Д. Новиков, Н.Н. Радаев. - М.: ЗАО ФИО «Деловой мир», 2002. – 343 с.

12. Алымов, В. Т. Анализ техногенного риска: Учебное пособие для студентов вузов / В.Т. Алымов, В.П. Крапчатов, Н.П. Тарасова. - М.: Круглый год, 2000. – 160 с.: ил.
13. Анализ риска и его нормативное обеспечение / В.Ф. Мартынюк, М.В. Писарев, Е.В. Кловач, В.И Сидоров // Безопасность труда в промышленности. - 1995. - №11. - С. 55-62.
14. 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>.
15. Архипова, Н. И. Управление в чрезвычайных ситуациях / Н.И. Архипова, В.В. Кульба. - М.: Рос.гос. гуманит. ун-т, 1998. – 316 с.
16. Ахметханов, Р. С. Теория фракталов и риски / Р.С. Ахметханов // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. - М.: ВИНТИ. – 2006. - №4. - С. 22-26.
17. 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.
18. Бархоткин, В. В. Запас прочности / В.В. Бархоткин, Ю.А. Извеков, С.Р. Миникаев // ТехНадзор. - 2014. - № 6 (91). - С. 86-87.
19. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Анализ риска и проблем безопасности. В 4-х частях // Ч. 1. Основы анализа и регулирования безопасности: научн. руковод. К.В. Фролов. – М.: МГФ «Знание», 2006. – 640 с: ил.
20. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Анализ риска и проблем безопасности. В 4-х частях // Ч. 2. Безопасность гражданского и оборонного комплексов и управление рисками: научн. руковод. К.В. Фролов. – М.: МГФ «Знание», 2006. – 752 с: ил.

21. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Анализ риска и проблем безопасности. В 4-х частях // Ч. 3. Прикладные вопросы анализа рисков критически важных объектов: научн. руковод. К.В. Фролов. – М.: МГФ «Знание», 2007. – 816 с: ил.
22. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Анализ риска и проблем безопасности. В 4-х частях // Ч. 4. Научно-методическая база анализа риска и безопасности: научн. руковод. К.В. Фролов. – М.: МГФ «Знание», 2007. – 864 с: ил.
23. Высокотехнологичный комплекс и безопасность России: Часть I. Высокотехнологичный комплекс России: основы экономического развития и безопасности. - М.: МГФ «Знание», 2003.– 576 с.
24. Безопасность России. Высокотехнологичный комплекс и безопасность России: Часть II. Проблемы обеспечения безопасности оборонно–промышленного комплекса России. - М.: МГФ «Знание», 2003. – 624 с.
25. Безопасность России. Защита населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера. - М.: МГФ «Знание», 1999. – 592 с.
26. Безопасность России. Промышленная безопасность. - М.: МГФ «Знание». ГУП «НТЦ «Промышленная безопасность», 2002. – 464 с.
27. Безопасность России. Региональные проблемы безопасности с учетом риска возникновения природных и техногенных катастроф. - М.: МГФ «Знание», 1999. – 672 с.
28. Безопасность России. Словарь терминов и определений. Издание второе, дополненное - М.: МГФ «Знание», 1999. – 368 с.
29. Безопасность России. Функционирование и развитие сложных народнохозяйственных, технических, энергетических, транспортных систем, систем связи и коммуникаций. Раздел первый. - М.: МГФ «Знание», 1998. – 448 с.
30. Безопасность России. Функционирование и развитие сложных народнохозяйственных, технических, энергетических, транспортных систем, систем связи и коммуникаций. Раздел второй. - М.: МГФ «Знание», 1998. – 416 с.

31. Белов, П. Г. Системный анализ и моделирование опасных процессов в техносфере / П.Г. Белов. - М.: Академия, 2003. – 512 с.
32. Бирюков, М. П. Динамика и прогнозирующий расчет механических систем / М.П. Бирюков. - Минск: Вышэйш. школа, 1980. - 190 с. : ил.
33. Богданофф, Дж. Вероятностные модели накопления повреждений / Дж. Богданофф, Ф. Козин // пер. с англ. - М.: Мир, 1989. – 342 с.
34. Болотин, В. В. Ресурс машин и конструкции / В.В. Болотин. - М.: Машиностроение, 1990. – 448 с.
35. Бородулин, А. И. Статистическое описание распространения аэрозолей в атмосфере: метод и приложения / А.И. Бородулин, А.И Майстренко, Б.М. Чалдин. - Новосибирск: Изд-во Новосибирского ун-та, 1992. - 123 с.
36. Быков, А. А. Проблемы анализа безопасности человека, общества и природы /А.А. Быков, Н.В. Мурзин. - СПб.: Наука, 1997. – 248 с.
37. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. - М.: Высшая школа, 1998. - 576 с.: ил.
38. Вентцель, Е. С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. - М.: Наука, 1991. – 384 с.
39. Вероятностный риск-анализ конструкций технических систем / А.М. Лепихин, Н.А. Махутов [и др.]. - Новосибирск: Наука, 2003. - 174 с.
40. ВИНТИ «Итоги науки и техники». Серия «Проблемы Безопасности : чрезвычайные ситуации». - Т.1. - М.: Наука, 1991. – 204 с.
41. Владимиров, В. А. Управление риском / В.А. Владимиров, Ю.Л. Воробьев, С.С. Салов. - М: Наука, 2000. – 432 с.
42. Владимиров, В. А. Оценка риска и управление техногенной безопасностью / В.А. Владимиров, В.И. Измалков, А.В. Измалков // М.: Деловой экспресс, 2002. – 184 с.
43. Волков, Л. И. Безопасность ракетных и ракетно-космических комплексов / Л.И. Волков. - М.: Издательство СИП РИА, 2002. – 135 с.
44. Волков, О. М. Пожарная безопасность резервуаров с нефтепродуктами / О.М. Волков. - Санкт-Петербург : Изд-во Политехнического ун-та, 2010. - 397 с.

45. Воробьев, Ю. Л. Стратегические риски России. Оценка и прогноз / Ю.Л. Воробьев. - М.: Деловой экспресс, 2005. – 392 с.
46. Воробьев, Ю. Л. Основы формирования и реализации государственной политики в области снижения рисков чрезвычайных ситуаций / Ю.Л. Воробьев. - М.: ФИД «Деловой экспресс», 2000. – 248 с.: ил.
47. Воронков, В. А. Измерение высоты корневой трещины с помощью двух ультразвуковых преобразователей / В.А. Воронков, И.Н. Ермолов // Дефектоскопия. – 1990. - №11. - С.7-13.
48. Временные методические рекомендации. Программа проведения экспертизы промышленной безопасности в части идентификации производственных объектов. РД- 02- 98.- М.: Госгортехнадзор России, 1998.
49. Гадакчан, Н. П. Уменьшение разрушений при аварийных детонационных взрывах газо- и паровоздушных смесей / Н.П. Гадакчан, Д.З. Хуснутдинов, В.П. Кочегаров. В кн. Взрывобезопасность в строительстве. – М.: МИСИ, 1983. - С.104-109.
50. Гетман, А. Ф. Ресурс эксплуатации сосудов и трубопроводов АЭС / А.Ф. Гетман. - М.: Энергоатомиздат, 2000. - 427с., ил.
51. Гетман, А. Ф. Концепция безопасности «течь перед разрушением» для сосудов и трубопроводов АЭС / А.Ф. Гетман, В.Г. Васильев, Н.Н. Давиденко. - М.: Энергоатомиздат, 1999. – 289 с.
52. Гетман, А. Ф. Неразрушающий контроль и безопасность эксплуатации сосудов и трубопроводов давления / А.Ф. Гетман, Ю.Н. Козин. - М.: Энергоатомиздат, 1998. – 290 с.
53. Гик, Дж. Ван. Прикладная общая теория систем [в 2-х томах] / Дж. Ван. Гик. - М.: Мир, 1981.
54. Горбулин, В. Д. Методика прогнозирования и оценка параметров очага аварий и масштабов аварийной химической обстановки при разливе (выбросе) вредных веществ / В.Д. Горбулин, А.Ю. Иванов. - М.: МНПО «Синтез», 1992. – 187 с.

55. ГОСТ Р ИСО 9000-2015. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь (с поправкой). - М.: Стандартиформ, 2015. – 53 с.
56. ГОСТ 12.1.004-91. ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования. - М.: Госстандарт, 1991. – 64 с.
57. ГОСТ 12.1.044-2018. ССБТ. Взрывобезопасность. Общие требования. - М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. – 5 с.
58. ГОСТ 12.1.044-89. ССБТ. Пожаровзрывобезопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения. – М.: Стандартиформ, 2006. – 99 с.
59. ГОСТ Р 12.3.047-2012. ССБТ. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля. – М.: Стандартиформ, 2014. – 60 с.
60. ГОСТ 27.310-95. Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения. – Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, сертификации и метрологии, 1995. – 12 с.
61. ГОСТ Р 22.1.02-95. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Мониторинг и прогнозирование. Термины и определения. – М.: ИПК Издательств стандартов, 1996. – 5 с.
62. ГОСТ 28609-90. Межгосударственный стандарт. Краны грузоподъемные. Основные положения расчета.– М.: Стандартиформ, 2008. – 5 с.
63. Гражданкин, А. И. Показатели и критерии опасности промышленных аварий / А.И. Гражданкин, М.В. Лисанов, А.Ф. Печеркин [и др.] // Безопасность труда в промышленности – 2003. - №3. - С. 30-32.
64. Гражданкин, А. И. Экспертная система оценки техногенного риска опасных производственных объектов / А.И. Гражданкин, П.Г. Белов // Безопасность труда в промышленности. – 2000. - №11. - С.6-10.
65. Двойняшников, А. Е. Экспериментальное моделирование диаграммы разрушения резервуаров под действием воздушной УВ / А.Е. Двойняшников, С.Б. Дорофеев // Физика горения и взрыва. - 1992. - Т. 28. - № 3. - С.112-116.

66. Елохин, А. В. Результаты комплексной оценки природных и техногенных рисков для населения Новгородской области / А.В. Елохин [и др.] // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. - М.: ВИНТИ, 1996. - Вып. 11. – С. 34-56.
67. Елохин, А. Н. Анализ и управление риском: теория и практика / А.Н. Елохин. - М.: ООО «ПолеМЕдиа», 2002. – 192 с.
68. Емельянов, В. В. Введение в интеллектуальное имитационное моделирование сложных дискретных систем и процессов Язык РДО / В.В. Емельянов, С.И. Ясиновский. - М.: АНВИК, 1998. – 426 с.
69. Жизненный цикл и реализация летательного аппарата / Б.В. Бойцов, В.Д. Борисов, Н.М. Киселев, В.Г. Подколизин. - М.: Изд-во МАИ, 2005. - 519 с. : ил.
70. Зайнетдинов, Р. И. К вопросу определения фрактальной размерности и показателя Херета случайных процессов нагружения несущих конструкций / Р.И. Зайнетдинов // Депонир. рукопись. - М.: ВИНТИ РАН, 1995. - №3485-В95. – 21 с.
71. Зайнетдинов, Р. И. Подтверждение мультифрактальной природы последовательности отказов с использованием вейвлет-анализа / Р.И. Зайнетдинов // Методы менеджмента качества. - 2000. - №9. - С.21-26.
72. Замышляев, Б. В. Прогноз ингаляционного поражения человека при аварийном выбросе аммиака и хлора / Б.В. Замышляев, Н.Н. Литвинов, З.П. Григорьевская [и др.] // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. - М.: ВИНТИ, 2001. – Вып.5. – С. 153-175.
73. Иванов, В. И. Оценка дополнительного времени эксплуатации объектов с применением акустико-эмиссионного контроля / В.И. Иванов // Дефектоскопия. - 1982. - №11. - С.60-64.
74. Иванов, В. И. Параметры многочастотной ультразвуковой дефектоскопии / В.И. Иванов // Дефектоскопия. - 1978.- №1. - С.62-67.
75. 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).

76. 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).
77. 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).
78. 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).
79. 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).
80. 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.
81. 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.
82. 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.
83. 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.
84. 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.
85. 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>.
86. Извеков, Ю. А. Риск-анализ оборудования металлургических производств. Подход. Концепция. Анализ / Ю.А. Извеков. – Saarbrücken: Lap Lambert, 2013. – 56 с.
87. 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.
88. 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.
89. 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.
90. Извеков, Ю. А. Вероятностный синтез сложной механической системы / Ю.А. Извеков // Молодой ученый. – 2014. - № 4. - С. 179-182.
91. 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.

92. 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.
93. Извеков, Ю. А. Методология прогнозирования риска металлургического производства как сложной социально-природно-техногенной системы / Ю.А. Извеков, Н.А. Лосева // Актуальные проблемы современной науки, образования и культуры: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Сибай, 2012. - С. 352-354.
94. 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.
95. Извеков, Ю. А. Математическое моделирование оценки упругопластической деформации несущих конструкций механических систем / Ю.А. Извеков // Современные тенденции в образовании и науке: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции. В 26 частях. – Тамбов, 2013. - С. 57-58.
96. 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.
97. Извеков, Ю. А. Междисциплинарный подход к оценке безопасности основных металлургических производств / Ю.А. Извеков // 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.
98. Извеков, Ю.А. О междисциплинарном подходе к оценке техногенной безопасности / Ю.А. Извеков, Е.В. Рыбалко, С.С. Хрипунова // Актуальные

вопросы технических наук: Материалы IV Международной научной конференции. – Краснодар, 2017. - С. 66-67.

99. Извеков, Ю. А. Математическое моделирование конструкционного риска сложных механических систем / Ю.А. Извеков, Е.М. Гугина // Дифференциальные уравнения и смежные проблемы: сборник трудов конференции. – Стерлитамак, 2018. - Т.2. - С. 208-211.

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

101. 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: МГТУ им. Г.И. Носова, 2018. - С. 164-165.

102. 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 ред. А.М. Маркова, А.В. Балашова, М.В. Доц. – Барнаул, 2018. - С. 233-237.

103. 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: МГТУ им. Г.И. Носова, 2019. - С. 122.

104. 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. - С. 118-119.

105. 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.

106. Измалков, В. И. Безопасность и риск при техногенных воздействиях / В.И. Измалков, А.В. Измалков. - М.СПб.: НИЦЕБ РАН, 1994. – 250 с.

107. 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).

108. Карасев, В. В. Логико-вероятностные модели риска потери качества (РПК) и их обучение / В.В. Карасев, Е.Д. Соложенцев // Современные фундаментальные проблемы и прикладные задачи теории точности и качества машин, приборов, систем: труды 3-й сессии Международной школы. Под ред. В.П. Булатова, А.С. Захаржевского. - С.Петербург: Изд-во Института проблем машиноведения РАН, 1998.– - С.79-93.

109. Касти, Дж. Большие системы. Связность, сложность и катастрофы / Дж. Касти. - М.: Мир, 1982. - 216 с.

110. Ким, Д. Х. Опыт ликвидации последствий крупной аварии на нефтепроводе в сложных гидрогеологических условиях / Д.Х. Ким, Ю.И. Блохин, А.Г. Могилевич // Трубопроводный транспорт нефти. – 1994. - №10. - С.19-20.

111. Ким, Д. Х. Оценка объема поверхностного и подземного распространения нефти при крупных авариях на нефтепроводе / Д.Х. Ким, Ю.И. Блохин // Трубопроводный транспорт нефти. – 1994. - №12. - С. 13-15.

112. Ким, Д. Х. Управление безопасностью производственного объекта / Д.Х. Ким, Л.И. Маслов // Безопасность труда в промышленности. – 1997. - № 6. - С. 12-16.

113. Клемин, А. И. Надежность ядерных энергетических установок. Основы расчета / А.И. Клемин. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - 344 с.
114. Ковалевич, О. М. Некоторые проблемы риска и управления риском: сб. статей / О.М. Ковалевич. – М.: НТЦ по ядерной и радиационной безопасности, 2003. – 96 с.
115. Колмогоров, А. Н. Вероятностное пространство. Вероятность математическая / А.Н. Колмогоров. – 3-е изд. – М.: БЭС «Математика», 1998. – С.118-119.
116. Короткий, А. А. Управление промышленной безопасностью подъемных сооружений (методологические основы) / А.А. Короткий // Вестник Владикавказского научного центра. - 2008. - Том №3. - С. 65-73.
117. Котельников, В. С. Методы диагностики и риск-анализа металлоконструкций грузоподъемных машин в управлении их безопасностью: дисс ... доктора техн. наук : 05.05.04 / Котельников Владимир Семенович. – Новочеркасск, 2006. – 374 с.
118. Котляревский, В. А. Безопасность резервуаров и трубопроводов / В.А. Котляревский, А.А. Шаталов, Х.М. Хануков. - М.: Экономика и информатика, 2000. - 555 с.: ил.
119. Кофф, Г. А. Сейсмический риск (виды, оценка, управление) / Г.А. Кофф, Е.В. Рюмина. - М.: ПОЛТЕКС, 2003. - 108 с.
120. Кравцов, Ю. А. Случайность, детерминированность, предсказуемость / Ю.А. Кравцов // Успехи физических наук. – 1989. - Т.158. - Вып. 1. - С. 93-122.
121. Кузьмин, И. И. Безопасность и риск: эколого-экономические аспекты / И.И. Кузьмин, Н.А. Махутов, С.В. Хетагуров. - СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского гос. университета экономики и финансов, 1997. – 163 с.
122. Кузьмин, И. И. Концепция безопасности: от риска «нулевого» - к «приемлемому» / И.И. Кузьмин, Д.А. Шапошников // Вестник РАН. - 1994. - Т.64. - №5. – С. 402- 408.
123. Курбатов, А. С. Природный риск для городов России / А.С. Курбатов, С.М. Мягков, А.Л. Шныпарков. - М.: НИиПи экологии города, 1997. – 240 с.

124. Кучмент, Л. С. О прогнозировании возможного загрязнения окружающей среды при авариях на магистральных нефтепроводах / Л.С. Кучмент // Трубопроводный транспорт нефти – 1995. - № 5. – С.23-26.
125. Лепихин, А. М. Риск-анализ конструкций потенциально опасных объектов на основе вероятностных моделей механики разрушения: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / А.М. Лепихин. - Красноярск, 2000. - 341 с. : ил.
126. Мазур, И. И. Конструкционная надежность и экологическая безопасность трубопроводов / И.И. Мазур, О.М. Иванцов, О.И. Молдованов. - М.: Недра, 1990. - 263 с.
127. Мартынюк, В. Ф. Методология применения анализа риска в целях применения промышленной безопасности на объектах нефтегазового комплекса: дисс...доктора техн. наук : 05.26.03 / Мартынюк Василий Филиппович. - Москва, 2009. – 334 с.
128. Мартынюк, В.Ф. Анализ риска и его нормативное обеспечение / В.Ф. Мартынюк, М.В. Лисанов, Е.В. Кловач, В.И. Сидоров // Безопасность труда в промышленности. – 1995. - №11. - С. 55-62.
129. Маршалл, Б. Основные опасности химических производств: пер. с англ / Б. Маршалл. - М.: Мир, 1989. – 672 с.
130. Маслов, Л. И. Структура техногенного риска. Анализ и оценка риска пригородных рисков в строительстве / Л.И. Маслов, П. Монкарц. - М.: ПНИИС, 1997. - 173 с.
131. Маслов, Л. И. Структура техногенного риска / Л.И. Маслов, А.Д. Седых // Нефтегазовая вертикаль. – 1998. - №1. – С. 98-100.
132. Махутов, Н. А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность. Ч.2. Обоснование ресурса безопасности / Н.А. Махутов. - Новосибирск: Наука, 2005. - 610 с.
133. Махутов, Н. А. Научно-методические подходы и разработка мер по обеспечению защищенности критически важных для национальной безопасности объектов инфраструктуры от угроз техногенного и природного характера / Н.А.

- Махутов // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. - М.: ВИНТИ, 2004. - №1. - С. 38.
134. 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.
135. Модели и механизмы управления безопасностью / В. Н. Бурков, Е. В. Грацианский, С. И. Дзюбко, А. В. Щепкин. - М. : СИНТЕГ, 2001. - 153 с.
136. Махутов, Н. А. Стратегические риски в техногенной сфере / Н.А. Махутов, М.М. Гадеин // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций: информационный сборник, 2003. - №4. - С.1-20.
137. Махутов, Н. А. Принципы повышения безопасности сложных систем / Н.А. Махутов, А.Г. Котоусов // Защита металлов. – 1996. - Т. 32. - № 4. - С. 346-351.
138. Махутов, Н. А. Ресурс безопасной эксплуатации сосудов и трубопроводов / Н.А. Махутов, В.Н. Пермяков. - Новосибирск: Наука, 2005. - 516 с.
139. Махутов, Н. А. Природно-техногенно-социальные системы и риски / Н.А. Махутов, В.П. Петров, Р.С. Ахметханов // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2004. - №3. - С. 3-29.
140. РД 03-260-99. Методические рекомендации по идентификации опасных производственных объектов. - М.: ЗАО НТЦ ПБ, 1999. - 13 с.
141. РД 03-496-02. Методические рекомендации по оценке ущерба от аварий на опасных производственных объектах. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2010. – 48 с.
142. РД 03-418-01. Методические рекомендации по проведению анализа риска опасных производственных объектов. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2010. – 40 с.
143. Методические рекомендации по разработке и подготовке к принятию проектов технических регламентов (первая редакция). Утверждены приказом Минпромэнерго России от 21 декабря 2004 года № 176.
144. РД 03-357-00. Методические рекомендации по составлению декларации промышленной безопасности опасного производственного объекта. - М.: ГУП

«Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России », 2001.- 136 с.

145. Моделирование распространения паровоздушного облака тяжелого газа при его мгновенном выбросе и непрерывном истечении / А.П. Шевчук, Ю.Н. Шебеко, Л.В. Гуринович, И.М. Смолин // Химическая промышленность. - 1992. - №10. - с. 54-57.

146. Можаяев, А. С. Современное состояние и некоторые направления развития логико- вероятностных методов анализа систем // Теория и информационная технология моделирования безопасности сложных систем. Часть I / А.С. Можаяев. - СПб.: Препринт ИПМАШ РАН 101, 1994. - С.23-53.

147. Можаяев, А. С. Теоретические основы общего логико-вероятностного метода автоматизированного моделирования систем / А.С. Можаяев, В.Н. Громов. - СПб.: ВИТУ, 2000. – 145 с.

148. Мушик, Э. Методы принятия технических решений / Э. Мушик, П. Мюллер. - М.: Мир, 1990. - 208 с.

149. Надежность технических систем: справочник / Ю.К. Беляев, В.А. Богатырев, В.В. Болотин [и др] // под ред. И.А. Ушакова. – М.: Радио и связь, 1985. - 608 с.

150. Научно-методические аспекты анализа аварийного риска / В.Г. Горский, Г.А. Моткин, В.А. Петрунин [и др.]. - М.: Экономика и информатика, 2002. – 260 с.

151. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник / В.В. Ключев, Ф.Р. Соснин, А.В. Ковалев [и др.] // под ред. В.В. Ключева. 2-е изд. - М.: Машиностроение, 2003. - 656 с.

152. Перспективы нормативного обеспечения анализа риска магистральных нефтепроводов / М.В. Лисанов, А.С. Печеркин, В.И. Сидоров, С.М. Лыков, Е.В. Ханин // Тезисы Второго Всероссийского семинара «Проблемы управления промышленной безопасностью». – М.: Транспресс, 2001. - С.70-71..

153. 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.
154. Оценка и управление природными рисками: материалы Всероссийской конференции «РИСК-2003». - М.: Издательство Российского университета дружбы народов, 2003. - Т.1. - 416 с.
155. Оценка и управление природными рисками: материалы Всероссийской конференции «РИСК- 2003». - М.: Издательство Российского университета дружбы народов, 2003. - Т.2. - 408 с.
156. Перелет, Р. А. Технологический риск и обеспечение безопасности производства / Р.А. Перелет, Г.С. Сергеев. - М.: Знание, 1988. – 62 с.
157. Портнов, В.А. Энергоинформационные основы анализа риска при создании и использовании технических систем / В.А. Портнов, Н.А. Махутов, В.А. Зеленев // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2003. - Вып. 2. – С. 16-27.
158. Порфирьев, Б. Н. Экологическая экспертиза и риск технологий / Б.Н. Порфирьев // Итоги науки и техники. Сер. Охрана природы и воспроизводство природных ресурсов. - М.: ВИНТИ, 1990. - Т. 27. - 204 с.
159. Поспелов, Д. А. Ситуационное управление: теория и практика / Д.А. Поспелов. - М.: Наука, 1986. - 288 с.
160. 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: материалы 75-й межрегиональной научно-технической конференции. - Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова,. Магнитогорск – 2017. - Т.1. - С. 159-162.
161. Потапов, А. А. Фракталы в радиофизике и радиолокации: Топология выборки / А.А. Потапов. - М.: Университетская книга, 2005. - 848 с.
162. Потапов, Б. В. Экономика природного и техногенного рисков / Б.В. Потапов, Н.Н. Радаев. - М.: ЗАО ФИД «Деловой экспресс», 2001. - 513 с.

163. Проблемы разрушения, ресурса и безопасности технических систем: сборник научных трудов. - Красноярск: Ассоциация КОДАС – СибЭРА, 1997. - 520 с.
164. Региональные риски чрезвычайных ситуациях и управление природной и техногенной безопасности муниципальных образований // Материалы девятой Всероссийской научно-практической конференции по проблемам защиты населения и территории от чрезвычайных ситуаций. – М.: Триада, Лтд., 2004. – 472 с.
165. Решетов, Д. Н. Надежность машин / Д.Н. Решетов, А.С. Иванов, В.В. Фадеев. - М.: Высшая школа, 1988. - 238 с.
166. Рачков, В. И. Основные положения теории опасных систем / В.И. Рачков, М.Х. Ибрагимов. - М.: Изд - во МГОУ, 1993. - 61 с.
167. Рябинин, И. А. Надежность и безопасность сложно-структурных систем / И.А. Рябинин. - СПб.:Изд-во «Политехника», 2000. - 248 с.
168. Рябинин, И. А. Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем / И.А. Рябинин, Г.Н. Черкасов. - М.: Радио и связь, 1981. - 264 с.
169. Саати, Т. Принятие решений : Метод анализа иерархий / Т. Саати; Пер. с англ. Р. Г. Вачнадзе. - М.: Радио и связь, 1993. – 314 с.
170. Сафонов, В. С. Теория и практика анализа риска в газовой промышленности / В.С. Сафонов, Г.Э. Одишария, А.А. Швыряев. - М.: Изд-во НУМЦ Госкомэкологии, 1996. - 208 с.
171. Седых, А. Д. Методы оценки состояния трубопроводов по результатам диагностики / А.Д. Седых, Е.В. Дедиков, А.И. Гриценко, В.В. Харионовский, Г.С. Клишин, В.Е. Селезнев, В.В. Алешин // Газовая промышленность. – 1998. - №8. - С.58-60.
172. Селихов, А. Ф. Вероятностные методы в расчетах прочности самолета / А.Ф. Селихов, В.Н. Чижов. - М.: Машиностроение, 1987. - 240 с.
173. Синергетика и проблемы теории управления: под ред. Н.А. Колесникова. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. - 504 с.

174. Слотин, Ю. С. Математические методы оптимизации эксперимента при создании изделий ракетно-космической техники / Ю.С. Слотин. М.: ЦНТИ «ПОИСК», Изд-во ГОНТИ 1, 1987. – 115 с.
175. Современные методы математического моделирования природных и антропогенных катастроф: тезисы докладов V научной конференции. - Красноярск: ИВМ СО РАН, 1999. - 192 с.
176. Соложенцев, Е. Д. Сценарное логико-вероятностное управление риском в бизнесе и технике / Е.Д. Соложенцев. - СПб: Изд. Дом «Бизнес-пресса», 2004. - 415 с.
177. Соложенцев, Е. Д. Логико-вероятностные модели риска в банках, бизнесе и качестве / Е.Д. Соложенцев, В.В. Карасев, В.Е. Соложенцев. - СПб.: Наука, 1999. - 118 с.
178. Статические методы анализа безопасности сложных технических систем / Л.Н. Александровская, И.З. Аронов, А.И. Елизаров [и др.]. - М.: Логос, 2001. - 232 с.: ил.
179. Степашин, С. В. Вопросы безопасности в системе государственного и муниципального управления Российской Федерации / С.В. Степашин, В.Л. Шульц, Р.Ф. Идрисов. - Казань: ГУП ПИК «Идел-Пресс», 2001. - 408 с.
180. Стратегические риски России: оценка и прогноз / под ред. Ю.Л. Воробьева. - М.: Деловой экспресс, 2005. - 392 с.
181. Стратегические риски чрезвычайных ситуаций: оценка и прогноз: материалы восьмой Всероссийской научно-практической конференции по проблемам защиты населения и территории от чрезвычайных ситуаций. - М.: Триада, Лтд., 2003. - 400 с.
182. Теория и информационная технология моделирования безопасности сложных систем / под ред. И. Рябина, Е. Соложенцева. - СПб.: ИПМАШ РАН, 1994-1995. - Вып.1-5. - 400 с.
183. Техническое законодательство в Российской Федерации. Система технических регламентов и стандартов. - М.: Национальный институт технического регулирования, 2004.

184. Тимашев, С. А. Рекомендации по оценке надежности строительных конструкций / С.А. Тимашев. – Свердловск: Уральский Промстройпроект, 1974. - 103 с.
185. Тимашев, С. А. Надежность больших механических систем / С.А. Тимашев. - М.: Наука, 1982. - 184 с.
186. Тимашев, С. А. Метод оценки и величины ущербов от различных видов отказов строительных конструкций. В кн.: Исследование в области надежности инженерных сооружений / С.А. Тимашев, В.В. Власов. - Л.: Ленпромстройпроект, 1979. - С. 25-35.
187. Тимашев, С. А. Оценка оптимального ресурса по критерию роста усталостной трещины / С.А. Тимашев, В.А. Копнов // Проблемы машиноведения и надежности машин. - 1982. - №1. – С. 65-70.
188. Трахтенгерц, Э. А. Принятие решений на основе компьютерного анализа / Э.А. Трахтенгерц. - М.: ИПУ РАН, 1996. – 69 с.
189. Трофимов, Р. С. Вероятностные методы планирования испытания сложных технических систем / Р.С. Трофимов. - М.: Молния, 1987. - 417 с.
190. Трофимов, Р. С. Надежность двигателей летательных аппаратов / Р.С. Трофимов, Х.В. Кесаев. - М.: Машиностроение, 1982. - 137 с.
191. Управление риском: риск, устойчивое развитие, синергетика / В.А. Владимиров, Ю.Л. Воробьев, С.С. Салов, М.И. Фалеев, Н.М. Архипова [всего 17 авторов]. - М.: Наука, 2000. – 409 с.
192. Феллер, В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения. В 2-х томах. Пер. с англ. / В. Феллер. - М.: Мир, 1984.
193. Хенли, Э. Дж. Надежность технических систем и оценка риска. Пер. с англ. / Э. Дж. Хенли, Х. Кумамото. - М.: Машиностроение, 1984. - 528 с.
194. Цховребов, Ю. В. Страхование высоко-рисковых производств: некоторые инженерные аспекты / Ю.В Цховребов, А.Н Юлохин. - М.: ООО «ПолиМЕдия, 2002. - 128 с.

195. 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.
196. Шахов, В. В. Теория и управление рисками в страховании / В. В. Шахов, В. Г. Медведев, А. С. Миллерман. - Москва: Финансы и статистика, 2003. – 222 с.
197. Шахраманьян, Н. А. Оценка природной и техногенной безопасности России: теория и практика / Н.А. Шахраманьян, В.А. Акимов, К.А. Козлов. - М.: ФИД «Деловой экспресс», 1998. - 218 с.
198. Шашко, Б. А. О мостовых кранах для предприятий цветной металлургии / Б.А. Шашко // Промышленный транспорт. - 1987. - №10. – С.64.
199. Шпер, В. Л. Новые тенденции развития теории качества машин и приборов. В препринте 132 «Новые в теории точности и качества машин и приборов». Вып.6 / В.Л. Шпер. - СПб.: ИПМАШ РАН, 1998. - С. 2-5.
200. Экономическая безопасность предприятия / А. К. Моденов, Е. И. Белякова, М. П. Власов, Т. А. Леявина. - СПб.: СПбГАСУ, 2019. – 550 с.
201. Anon. Dutch National Environmental Policy Plan – Premises for Risk Management. Second Chamber of the States General Session / Anon. – 1988. – Vol. 5(9). – Paper 21137.
202. Anon. Risk Analysis, Perception, Management. The Royal Society / Anon. – London, UK, 1993.
203. Anon. Nomenclature for Hazard and Risk Assessment in the Process Industries. Inst. of Chemical Engineers / Anon. – London, UK, 1985.
204. Anon. Risk Criteria for Land Use Planning in the Vicinity of Major Industrial Hazards. U.K Health and Safety Executive, Her Majesty's Stationary Office / Anon. – London, UK, 1989.
205. Bloch, H. P. Practical Machinery Management for Process Plants. Machinery Failure Analysis and Troubleshooting / H.P. Bloch. 3rd Edition. Gulf Publishing Company. – Houston, Texas, 1999. - Vol. 2.
206. Glay, G.A. Risk assessment for Installations where liquefied petroleum gas (LPG) is stored in bulk vessels above ground / G.A. Glay, R.D. Fitzpatric, N.W. Hurst,

- D.A. Carter, P.J. Crossthwalte // Journal of Hazardous Materials. – 1988. – Vol. 20(1-3). - P. 357-374.
207. Analysis of Explosion Hazards on Spontaneous Release of Inflammable Gases into the Atmosphere / H. Glesbrecht, G. Hemmer, K. Hess, W. Leuckel, A. Stoeckel // German Chemical Engineering. – 1981. – Vol. 4(5). – P. 315-325.
208. 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.
209. 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. – Paper 012177.
210. 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. – Paper 012178.
211. 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. Lecture Notes in Mechanical Engineering. – Springer, 2018. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-95630-5\\_182](https://doi.org/10.1007/978-3-319-95630-5_182).
212. 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. – Paper 066007.
213. 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. – Paper 066008.
214. 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. – Paper 042012. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/971/4/042012>.

215. 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.

216. Kumamoto, H. Probabilistic Risk Assessment and Management for Engineers and Scientists. Second Edition / H. Kumamoto, E.J. Henley. – N.Y.: IEEE Press, 1996. – 598 p.

217. Lawrence, W. E. Design for Limiting Explosion Damage / W.E. Lawrence, E.E. Johnson // Chemical Engineering. – 1974. – Vol. 81(1). – P. 96-104.

218. Malyukova, M. G. Residual Life of Pipeline with Longitudinal Initial Cracks / M.G. Malyukova, S.A. Timashev. – ASME/JSME PVP'98, 1998. – Vol. 373. – P. 99-104.

219. 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.

220. 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.

221. Martinsen, W. E. Determining Spacing by Radiant Heat Limits / W.E. Martinsen, D.W. Johnson D.W., S.B. Millsap // Plant Operations Progress. – 1989. – Vol. 8(1). – P. 25-28.

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

223. Pietersen, C. M. Consequences of accidental releases of hazardous material / C.M. Pietersen // J. Loss Prev. Process Ind. – 1990. – Vol. 3(1). – P. 136-141.

224. Proceedings 9th Annual Conference. Risk Analysis: Facing the New Millennium. Ed. by L.H.J. Goossens. Rotterdam – The Netherlands. October 10-13. Delft University Press. - 1999. – 910 p.
225. Puredy, G. An analysis of the risk arising from the transport of liquefied gases in Great Britain / G.Puredy // J. Hazardous materials. - 1988. - Vol. 20(1-3). – p. 335-355.
226. Risk Assessment and Management Handbook: For Environmental, Health and Safety Professionals / R. Kolluru, S. Bartell, P. Pit-blade, S. Stricoff. – N.Y.: McGraw-Hill, 1995.
227. Ryabinin, I. A. Reliability of Engineering Systems Principles and Analysis / I.A. Ryabinin. – Moscow: Mir Publishers, 1976. – 532 p.
228. Shebeko, Yu.N. Fire and explosion risk assessment for LPG storage / Yu.N. Shebeko, A. Ya. Korolchenko, A.P. Shevchuk // Fire Science and Technology. – 1995. – Vol. 15(1-2). – P. 37-45.
229. Complex methodology of safety regulation-system of dynamic barrier (SOB) preventing the development of transients at nuclear power plants / A.S. Stebenev, A.P. Eperin, M.M. Khoudiakov, I.D. Rakitin // International Conference on Informatics and Control: proceedings. St.Petersburg June 9-13, 1997. – P. 1142-1148.
230. Steven, U. Hanna. Handbook on Atmospheric Diffusion / U. Hanna Steven, Gary A. Briggs, Rayford P. Hosker. - Technical Information Center U.S. Department of Energy, 1982. – 91 p.
231. Taguchi, G. Introduction to Quality Engineering. Designing Quality into Products and Processes / G. Taguchi. – Tokyo: Asian Productivity Organization, 1986. – 191 p.
232. Weldon, G.E. Damage – Limiting Construction / G.E. Weldon // Fire Technology. – 1973. – Vol. 9(4). – P. 263-270.
233. [http://www.gosnadzor.ru/about\\_gosnadzor/](http://www.gosnadzor.ru/about_gosnadzor/) (дата обращения 28.03.2021).
234. <http://ural.gosnadzor.ru/about/contacts/info/> (дата обращения 28.03.2021).

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

УТВЕРЖДАЮ:



Проректор по учебной работе

ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»

*О.Л. Назарова* О.Л. Назарова

02 2021 г.

### АКТ ВНЕДРЕНИЯ

в учебный процесс ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

результатов диссертационной работы Извекова Юрия Анатольевича

Результаты диссертационной работы Извекова Юрия Анатольевича на соискание ученой степени доктора технических наук «Научные основы выбора и оценки показателей качества кранового оборудования металлургического предприятия на основе конструкционного риск-анализа» использованы при выполнении научно-исследовательских и выпускных квалификационных работ по направлениям подготовки 01.03.02, 01.04.02, 01.06.01, 22.03.02, 15.04.02, изложенные в научных статьях:

- Извеков Ю.А. Научные основы методологии оценки и повышения качества технических систем металлургического предприятия. 5-я Международная научно-техническая конференция в дистанционном формате «Живучесть и конструкционное материаловедение» (ЖивКоМ – 2020): Сборник трудов конференции (Москва, 27-29 октября 2020) / М: Изд-во ИМАШ РАН, 2020, электронный формат – 282с. С. 118-119.

- Извеков Ю.А., Гугина Е.М., Анисимов А.Л., Шеметова В.В. Снижение размерности в задачах оценки качества мостовых кранов металлургического предприятия. Современные наукоемкие технологии. 2019. № 3-2. С. 171-176.

Начальник УМУ

/Бычик С.А./

Зам. директора ИЕиС по учебной работе

/Сомова Ю.В./

Директор ИЕиС

/Мезин И.Ю./

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б



Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»  
(ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»)

«Научно-исследовательский институт промышленной безопасности»  
(НИИ «Промбезопасность»)  
455000, Россия, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38  
Телефон: +7 (3519) 29-84-02 Факс: +7 (3519) 23-92-35 e-mail: mgtu@magtu.ru  
ИНН 7414002238, КПП 745601001 ОГРН 1027402065437



Утверждаю:  
Директор НИИ «Промбезопасность»  
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»

М.Ю. Наркевич  
2021 г.

### АКТ № Н-21/1

#### об использовании результатов диссертационного исследования Извекова Юрия Анатольевича на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.02.23 «Стандартизация и управление качеством продукции»

Среди направлений деятельности НИИ «Промбезопасность» значительное место занимает деятельность по оценке рисков, которая является неотъемлемой частью при разработке таких документов как: декларация промышленной безопасности; обоснование безопасности опасных производственных объектов; документация на техническое перевооружение, консервацию и ликвидацию опасных производственных объектов. Также, знания в области оценки рисков необходимы при проведении экспертизы промышленной безопасности указанной выше документации.

Уточнение показателей и количественная оценка качества кранового оборудования с позиции конструкционного риск-анализа представляет существенный интерес.

Разработанные в диссертационной работе Извекова Ю.А. подходы по выбору и оценке показателей качества кранового оборудования представляют практическую ценность и были использованы специалистами НИИ «Промбезопасность» для оценки риска наступления аварийной ситуации при отступлении от требований промышленной безопасности в ходе погрузки мостовыми кранами железнодорожных колёс в полувагоны в колесопркатном цехе АО «Выксунский металлургический завод». Данная работа проведена в рамках разработки обоснования безопасности опасного производственного объекта.

Потенциальный интерес представляют результаты исследований и моделирования, апробации разработанных теоретических моделей на примере мостовых кранов грузоподъемностью до 300 тонн, эксплуатируемых в металлургическом производстве. Указанные модели также могут быть использованы для сравнительной оценки уровня показателей качества различных типов кранов на соответствие требованиям документов по стандартизации, что в значительной степени расширяет практическую сферу применения теоретических разработок. Кроме того, появляется возможность проводить сравнение требований различных стандартов, что может быть использовано при проведении экспертизы нормативной и технической документации.

Можно констатировать, что результаты диссертационной работы Извекова Юрия Анатольевича, представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.02.23 – «Стандартизация и управление качеством продукции» являются актуальными и могут служить теоретической базой при решении конкретных практических задач.

Председатель комиссии

В.Д. Корниенко

Члены комиссии

В.С. Барбин  
Ю.В. Сомова

## ПРИЛОЖЕНИЕ В



Акционерное общество  
"Магнитогорский институт по проектированию  
металлургических заводов"



### АО "МАГНИТОГОРСКИЙ ГИПРОМЕЗ"

Пр. ЛЕНИНА, 68, г. МАГНИТОГОРСК, ЧЕЛЯБИНСКАЯ ОБЛАСТЬ, РОССИЯ, 455044  
Телефон (3519) 26-07-21 Факс (3519) 28-92-12 E-mail: office@gipromez-mg.ru www.gipromez-mg.ru

УТВЕРЖДАЮ  
Генеральный директор, ктн

  
Ю.А. Тверской

АКТ

об использовании результатов диссертационной работы  
Извекова Юрия Анатольевича



Среди направлений деятельности АО «МАГНИТОГОРСКИЙ ГИПРОМЕЗ» г. Магнитогорске Челябинской области значительное место занимают работы по обследованию и разработке ремонтной документации мостовых кранов. Уточнение показателей и количественная оценка состояния металлоконструкций мостов кранов с позиции конструкционного риск-анализа представляет существенный интерес.

Разработанные в диссертационной работе Извекова Ю.А. подходы по выбору и оценке показателей качества кранового оборудования представляют практический интерес и используются АО «МАГНИТОГОРСКИЙ ГИПРОМЕЗ» при разработке ремонтной и конструкторской документации мостовых кранов.

Можно констатировать, что результаты диссертации Извекова Юрия Анатольевича, представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.02.23 – Стандартизация и управление качеством продукции являются актуальными, своевременными и могут являться теоретической базой при решении конкретных практических задач.

Зам. генерального директора  
по производству, ктн



А.Г. Соловьев

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

УТВЕРЖДАЮ:

Директор ООО «ССЦ «ТехЭксперт»

Кустубаев С.А.



2020 г.

## АКТ ВНЕДРЕНИЯ

в производственный процесс предприятия

результатов диссертационной работы Извекова Юрия Анатольевича

Комиссия в составе: председатель – Кустубаев С.А., члены комиссии – Никандров О.А., Липатов А.В., Мухаметзянов М.М., составили настоящий акт в том, что алгоритм конструкционного риск-анализа и математические модели, разработанные в диссертационной работе Извекова Юрия Анатольевича на соискание ученой степени доктора технических наук, позволяющие количественно оценить вероятность риска аварий в фермах металлургических мостовых кранов, реализованы в конструкторской и нормативно-технической документации предприятия.

Использование результатов диссертационной работы Извекова Юрия Анатольевича позволит при необходимости принимать научно-обоснованные технические решения при управлении качеством несущих конструкций кранового оборудования.

Председатель комиссии:

Директор  
ООО «ССЦ «ТехЭксперт»

/ С.А. Кустубаев /

Члены комиссии:

Технический директор  
ООО «ССЦ «ТехЭксперт»

/ О.А. Никандров /

Главный инженер  
ООО «ССЦ «ТехЭксперт»

/ А.В. Липатов /

Начальник МСУ  
ООО «ССЦ «ТехЭксперт»

/ М.М. Мухаметзянов /

## ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Матрица для снижения размерности показателей качества (Метод главных компонент)

Показатели	г	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	1	15	18000	95	90	95	100	100	0	100	1	15	10	0	0	0
	2	15	19000	95	90	90	100	99	0	100	1	14	2	0	0	0
	3	15	20000	95	85	95	95	99	0	100	1	13	2	0	0	0
	4	15	17000	90	85	95	95	100	1	100	5	12	3	1	1	1
	5	14	16000	90	85	95	95	99	2	100	6	11	5	2	1	1
	6	14	18000	90	70	90	90	100	5	100	7	10	11	5	4	4
	7	15	18000	85	75	90	90	100	1	90	8	2	12	1	1	1
	8	13	19000	85	80	95	90	100	0	90	2	3	5	0	0	0
	9	13	20000	85	85	95	100	90	0	95	1	5	5	0	0	0
	10	13	18000	80	75	85	95	80	3	95	1	5	5	3	1	2
	11	14	18000	80	80	85	85	85	4	95	1	4	3	4	4	4
	12	12	18000	80	80	85	80	80	2	95	5	3	2	2	1	0
	13	15	18000	70	70	85	95	80	1	90	3	2	2	1	1	1
	14	14	18000	70	60	80	95	80	0	90	1	1	1	0	0	0
	15	14	18000	65	60	80	95	85	1	95	2	2	2	1	1	1
X		14	18200	83,667	78	89,333	93,333	91,8	1	95,667	3	6,8	4,667	1	1	1
S		0,747	693,333	7,600	7,733	4,800	4,222	8,347	1,244	3,467	2,133	4,560	2,711	1,244	0,800	0,933

Продолжение приложения Д

Нормированные показатели	1	1,250	-0,288	1,491	1,552	1,181	1,579	0,982	-1,071	1,250	-0,938	1,798	1,967	-1,071	-1,250	-1,071
	2	1,250	1,154	1,491	1,552	0,139	1,579	0,863	-1,071	1,250	-0,938	1,579	-0,984	-1,071	-1,250	-1,071
	3	1,250	2,596	1,491	0,905	1,181	0,395	0,863	-1,071	1,250	-0,938	1,360	-0,984	-1,071	-1,250	-1,071
	4	1,250	-1,731	0,833	0,905	1,181	0,395	0,982	-0,268	1,250	0,938	1,140	-0,615	-0,268	0,000	0,000
	5	-0,089	-3,173	0,833	0,905	1,181	0,395	0,863	0,536	1,250	1,406	0,921	0,123	0,536	0,000	0,000
	6	-0,089	-0,288	0,833	-1,034	0,139	-0,789	0,982	2,946	1,250	1,875	0,702	2,336	2,946	3,750	3,214
	7	1,250	-0,288	0,175	-0,388	0,139	-0,789	0,982	-0,268	-1,635	2,344	-1,053	2,705	-0,268	0,000	0,000
	8	-1,429	1,154	0,175	0,259	1,181	-0,789	0,982	-1,071	-1,635	-0,469	-0,833	0,123	-1,071	-1,250	-1,071
	9	-1,429	2,596	0,175	0,905	1,181	1,579	-0,216	-1,071	-0,192	-0,938	-0,395	0,123	-1,071	-1,250	-1,071
	10	-1,429	-0,288	-0,482	-0,388	-0,903	0,395	-1,414	1,339	-0,192	-0,938	-0,395	0,123	1,339	0,000	1,071
	11	-0,089	-0,288	-0,482	0,259	-0,903	-1,974	-0,815	2,143	-0,192	-0,938	-0,614	-0,615	2,143	3,750	3,214
	12	-2,768	-0,288	-0,482	0,259	-0,903	-3,158	-1,414	0,536	-0,192	0,938	-0,833	-0,984	0,536	0,000	-1,071
	13	1,250	-0,288	-1,798	-1,034	-0,903	0,395	-1,414	-0,268	-1,635	0,000	-1,053	-0,984	-0,268	0,000	0,000
	14	-0,089	-0,288	-1,798	-2,328	-1,944	0,395	-1,414	-1,071	-1,635	-0,938	-1,272	-1,352	-1,071	-1,250	-1,071
	15	-0,089	-0,288	-2,456	-2,328	-1,944	0,395	-0,815	-0,268	-0,192	-0,469	-1,053	-0,984	-0,268	0,000	0,000

Продолжение приложения Д

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1	- 0,088	- 0,283	- 0,132	- 0,207	- 0,490	- 0,462	- 0,249	- 0,256	- 0,059	- 0,473	- 0,153	- 0,249	- 0,057	0
2	- 0,088	1	- 0,140	- 0,154	- 0,150	- 0,190	- 0,028	- 0,399	- 0,118	- 0,534	- 0,019	- 0,119	- 0,399	- 0,323	-0,31
3	0,283	0,140	1	- 0,847	- 0,847	- 0,224	- 0,817	- 0,063	- 0,698	- 0,134	- 0,853	- 0,407	- 0,063	- 0,086	0,082
4	0,132	0,154	0,847	1	- 0,8	- 0,201	- 0,563	- 0,211	- 0,571	- 0,089	- 0,712	- 0,125	- 0,211	- 0,227	0,246
5	0,207	0,150	0,847	0,800	1	- 0,304	- 0,818	- 0,253	- 0,477	- 0,152	- 0,66	- 0,38	- 0,253	- 0,242	0,233
6	0,490	0,190	0,224	0,201	0,304	1	- 0,27	- 0,539	- 0,282	- -0,41	- 0,457	- 0,006	- 0,539	- 0,539	0,377
7	0,462	0,028	0,817	0,563	0,818	0,270	1	- 0,164	- 0,506	- 0,334	- 0,685	- 0,533	- 0,164	- 0,078	0,075
8	- 0,249	- 0,399	- 0,063	- 0,211	- 0,253	- 0,539	- 0,164	1	0,18	0,395	-0,08	0,274	1	0,927	0,924
9	0,256	- 0,118	- 0,698	- 0,571	- 0,477	- 0,282	- 0,506	- 0,180	1	0,034	0,904	0,088	0,18	0,131	0,126
10	0,059	- 0,534	- 0,134	- 0,089	- 0,152	- 0,410	- 0,334	- 0,395	0,034	1	- 0,034	- 0,528	- 0,395	- 0,37	0,272
11	0,473	- 0,019	- 0,853	- 0,712	- 0,660	- 0,457	- 0,685	- 0,080	0,904	0,034	1	0,178	-0,08	0,097	0,073
12	0,153	- 0,119	- 0,407	- 0,125	- 0,380	- 0,006	- 0,533	- 0,274	0,088	0,528	0,178	1	0,274	0,261	0,295
13	- 0,249	- 0,399	- 0,063	- 0,211	- 0,253	- 0,539	- 0,164	- 1,000	0,180	0,395	0,080	0,274	1	0,927	0,924
14	- 0,057	- 0,323	- 0,086	- 0,227	- 0,242	- 0,539	- 0,078	- 0,927	0,131	0,370	0,097	0,261	0,927	1	0,961
15	0,000	- 0,310	- 0,082	- 0,246	- 0,233	- 0,377	- 0,075	- 0,924	0,126	0,272	0,073	0,295	0,924	0,961	1

Продолжение приложения Д

5,458	-0,186	-0,076	-0,173	-0,662	0,139	-0,533	0,225	-0,225	0,165	0,064	0,190	-0,153	0,125	0,123	-0,006
4,362	-0,143	0,172	0,346	0,312	0,657	-0,219	-0,282	0,001	0,310	0,156	-0,018	-0,045	0,151	-0,197	0,001
1,511	-0,326	-0,268	0,075	0,197	0,042	-0,081	0,046	-0,198	-0,022	0,635	-0,053	0,476	-0,448	0,470	-0,001
1,319	-0,320	-0,150	0,188	0,326	-0,127	-0,148	0,458	-0,267	0,282	-0,248	-0,430	-0,209	0,184	-0,174	0,001
0,910	-0,339	-0,180	-0,088	0,250	0,047	-0,002	0,245	0,516	0,148	-0,064	0,610	-0,012	-0,008	0,079	-0,002
0,511	-0,275	0,117	0,049	-0,451	0,199	0,547	-0,076	0,287	0,340	0,164	-0,295	0,166	0,059	0,068	-0,003
0,393	-0,302	-0,247	-0,237	-0,013	0,120	-0,171	-0,029	0,397	-0,531	-0,139	-0,414	-0,277	0,277	-0,036	-0,006
0,232	0,280	-0,348	0,177	0,043	0,034	0,118	-0,046	-0,003	0,123	0,240	0,075	-0,247	0,366	0,076	0,696
0,158	-0,215	-0,283	0,341	-0,096	-0,260	0,195	-0,499	-0,025	-0,002	-0,356	-0,005	-0,127	-0,153	0,206	0,001
0,074	0,085	-0,274	-0,548	0,001	-0,310	-0,026	-0,455	0,087	0,562	0,193	-0,164	0,089	-0,046	-0,229	0,007
0,052	-0,324	-0,236	0,217	-0,141	-0,141	0,059	-0,203	-0,182	-0,100	0,062	0,263	0,075	0,144	-0,584	0,009
0,019	-0,047	-0,283	-0,403	0,018	0,428	0,419	0,013	-0,479	-0,140	-0,277	0,102	-0,038	-0,017	-0,002	0,001
0,004	0,280	-0,348	0,177	0,043	0,034	0,118	-0,045	-0,002	0,122	0,241	0,076	-0,247	0,383	0,051	-0,717
-0,002	0,269	-0,342	0,149	-0,048	0,170	-0,241	0,159	0,132	-0,032	-0,311	-0,133	0,651	0,016	0,272	-0,008
0,000	0,255	-0,335	0,176	-0,136	0,278	-0,084	0,255	0,211	-0,032	0,010	-0,098	-0,151	-0,566	-0,407	0,024

**ПРИЛОЖЕНИЕ Е**

1. СП 16.13330 2011. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81.
2. СП 20.13330 2011. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85.
3. СП 35.13330 2011. Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03–84.
4. СНиП 2.01.07–85. Нагрузки и воздействия.
5. СНиП II–23–81. Стальные конструкции.
6. СНиП 2.05.03–84. Мосты и трубы.
7. ДБН В.2.3-14:2006. Сооружения транспорта. Мосты и трубы. Нормы проектирования.
8. ДБН В.1.2-2:2006. Нагрузки и воздействия. Нормы проектирования.

**ПРИЛОЖЕНИЕ Ж**

## Чтение результатов счета

Результаты счета разбиты на следующие разделы:

Раздел 1. Протокол работы процессора.

Раздел 2. Исходные данные.

Раздел 3. Диагностические сообщения.

Раздел 4. Перемещения узлов.

Раздел 5. Усилия (напряжения) в элементах.

Раздел 6. Реакции в узлах.

### ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Ферма L=24м d=3м h=3м

Усилие	Y1	Y2		ΣY2	Y3		ΣY3	w		Σw
		1	2		1	2		+	-	
Ya	1	1	0,875	1,875	1	0,875	1,875	12		12
Yb	1	1	0,875	1,875	1	0,875	1,875	12		12
N1	-0,875	-0,875	-0,746	-1,621	-0,875	-0,726	-1,601		-10,5	-10,5
N2	-1,061	-1,061	-0,878	-1,939	-1,061	-0,85	-1,911	0,303	-10,908	-10,605
N3	1,5	1,5	1,242	2,742	1,5	1,202	2,702	18		18
N4	-1,875	-1,875	-1,488	-3,363	-1,875	-1,428	-3,303		-22,5	-22,5
N5	0,884	0,884	0,704	1,588	0,884	0,673	1,557	7,575	-1,212	6,363
N6	1,5	1,5	1,242	2,742	1,5	1,202	2,702	18		18
N7	1	1	0	1	1	0	1	3		3
N8	0	0	0	0	0	0	0	0		0
N9	-1,875	-1,875	-1,488	-3,363	-1,875	-1,428	-3,303		-22,5	-22,5
N10	-1,061	-1,061	-0,878	-1,939	-1,061	-0,85	-1,911	2,727	-4,848	-2,121
N11	2	2	1,476	3,476	2	1,403	3,403	24		24
N12	1	1	0	1	1	0	1	3		3

Продолжение приложения 3

Ферма L=24м d=3м h=2м

Усилие	Y1	Y2		ΣY2	Y3		ΣY3	w		Σw
		1	2		1	2		+	-	
Ya	1	1	0,875	1,875	1	0,875	1,875	18	0	18
Yb	1	1	0,875	1,875	1	0,875	1,875	18	0	18
N1	-1,3125	-1,3125	-1,119	-2,4315	-1,3125	-1,089	-2,4015	0	-15,75	-15,75
N2	-1,5915	-1,5915	-1,317	-2,9085	-1,5915	-1,275	-2,8665	0,4545	-16,362	-15,9075
N3	2,25	2,25	1,863	4,113	2,25	1,803	4,053	27	0	27
N4	-2,8125	-2,8125	-2,232	-5,0445	-2,8125	-2,142	-4,9545	0	-33,75	-33,75
N5	1,326	1,326	1,056	2,382	1,326	1,0095	2,3355	11,3625	-1,818	9,5445
N6	2,25	2,25	1,863	4,113	2,25	1,803	4,053	27	0	27
N7	1	1	0	1	1	0	1	4,5	0	4,5
N8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N9	-2,8125	-2,8125	-2,232	-5,0445	-2,8125	-2,142	-4,9545	0	-33,75	-33,75
N10	-1,5915	-1,5915	-1,317	-2,9085	-1,5915	-1,275	-2,8665	4,0905	-7,272	-3,1815
N11	3	3	2,214	5,214	3	2,1045	5,1045	36	0	36
N12	1	1	0	1	1	0	1	4,5	0	4,5

## ПРИЛОЖЕНИЕ И

Ферма L=24м d=3м h=1м

Усилие	Y1	Y2		ΣY2	Y3		ΣY3	w		Σw
		1	2		1	2		+	-	
Ya	1	1	0,875	1,875	1	0,875	1,875	36	0	36
Yb	1	1	0,875	1,875	1	0,875	1,875	36	0	36
N1	-2,625	-2,625	-2,238	-4,863	-2,625	-2,178	-4,803	0	-31,5	-31,5
N2	-3,183	-3,183	-2,634	-5,817	-3,183	-2,55	-5,733	0,909	-32,724	-31,815
N3	4,5	4,5	3,726	8,226	4,5	3,606	8,106	54	0	54
N4	-5,625	-5,625	-4,464	-10,089	-5,625	-4,284	-9,909	0	-67,5	-67,5
N5	2,652	2,652	2,112	4,764	2,652	2,019	4,671	22,725	-3,636	19,089
N6	4,5	4,5	3,726	8,226	4,5	3,606	8,106	54	0	54
N7	1	1	0	1	1	0	1	9	0	9
N8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N9	-5,625	-5,625	-4,464	-10,089	-5,625	-4,284	-9,909	0	-67,5	-67,5
N10	-3,183	-3,183	-2,634	-5,817	-3,183	-2,55	-5,733	8,181	-14,544	-6,363
N11	6	6	4,428	10,428	6	4,209	10,209	72	0	72
N12	1	1	0	1	1	0	1	9	0	9

Ферма L=18м d=3м h=3м

Усилие	Y1	Y2		ΣY2	Y3		ΣY3	w		Σw
		1	2		1	2		+	-	
Ya	1	1	0,875	1,875	1	0,875	1,875	9		9
Yb	1	1	0,875	1,875	1	0,875	1,875	9		9
N1	-1,33	-1,33	-0,989	-2,319	-1,33	-0,936	-2,266	0	-12	-12
N2	0,943	0,943	0,699	1,642	0,943	0,661	1,604	6,787	-0,424	6,363
N3	0,83	0,83	0,661	1,491	0,83	0,634	1,464	7,5		7,5
N4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N5	-1,33	-1,33	-0,989	-2,319	-1,33	-0,936	-2,266	0	-12	-12
N6	-0,707	-0,707	-0,463	-1,17	-0,707	-0,426	-1,133	1,777	-3,807	-2,03
N7	1,5	1,5	0,983	2,483	1,5	0,903	2,403	13,5		13,5
N8	1	1	0	1	1	0	1	3		3

## ПРИЛОЖЕНИЕ К

Ферма L=18м d=3м h=2м

Усилие	Y1	Y2		ΣY2	Y3		ΣY3	w		Σw
		1	2		1	2		+	-	
Ya	1	1	0,875	1,875	1	0,875	1,875	9		9
Yb	1	1	0,875	1,875	1	0,875	1,875	9		9
N1	-1,995	-1,995	-1,4835	-3,4785	-1,995	-1,404	-3,399	0	-18	-18
N2	1,4145	1,4145	1,0485	2,463	1,4145	0,9915	2,406	10,1805	-0,636	9,5445
N3	1,245	1,245	0,9915	2,2365	1,245	0,951	2,196	11,25	0	11,25
N4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N5	-1,995	-1,995	-1,4835	-3,4785	-1,995	-1,404	-3,399	0	-18	-18
N6	-1,0605	-1,0605	-0,6945	-1,755	-1,0605	-0,639	-1,6995	2,6655	-5,7105	-3,045
N7	2,25	2,25	1,4745	3,7245	2,25	1,3545	3,6045	20,25	0	20,25
N8	1	1	0	1	1	0	1	3		3

Ферма L=18м d=3м h=1м

Усилие	Y1	Y2		ΣY2	Y3		ΣY3	w		Σw
		1	2		1	2		+	-	
Ya	1	1	0,875	1,875	1	0,875	1,875	9		9
Yb	1	1	0,875	1,875	1	0,875	1,875	9		9
N1	-3,99	-3,99	-2,967	-6,957	-3,99	-2,808	-6,798	0	-36	-36
N2	2,829	2,829	2,097	4,926	2,829	1,983	4,812	20,361	-1,272	19,089
N3	2,49	2,49	1,983	4,473	2,49	1,902	4,392	22,5	0	22,5
N4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N5	-3,99	-3,99	-2,967	-6,957	-3,99	-2,808	-6,798	0	-36	-36
N6	-2,121	-2,121	-1,389	-3,51	-2,121	-1,278	-3,399	5,331	-11,421	-6,09
N7	4,5	4,5	2,949	7,449	4,5	2,709	7,209	40,5	0	40,5
N8	1	1	0	1	1	0	1	3		3