

На правах рукописи



СЫЗРАНЦЕВА КСЕНИЯ ВЛАДИМИРОВНА

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОЛОГИИ ОЦЕНКИ
НАГРУЖЕННОСТИ И НАДЕЖНОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН
НА ОСНОВЕ УЧЕТА ОСОБЕННОСТЕЙ ИХ
ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ**

Специальность 05.02.02 – Машиноведение, системы приводов
и детали машин

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
доктора технических наук

Челябинск – 2018

Работа выполнена на кафедре «Машины и оборудование нефтяной и газовой промышленности» в ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет».

Официальные оппоненты: Ефим Иосифович Тескер,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Транспортные машины
и двигатели» ФГБОУ ВО «Волгоградский
государственный технический университет»

Федор Иванович Плеханов,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Промышленное и
гражданское строительство» ФГБОУ ВО
«Ижевский государственный технический
университет имени М.Т. Калашникова»

Александр Олегович Чернявский,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Техническая механика» ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет»

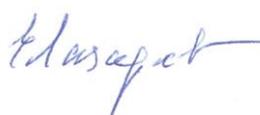
Защита состоится « 27 » июня 2018 г. в 13⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.298.09 при ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)» по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, ауд. 1001 гл. корп.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)» и на сайте <https://susu.ru/>

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по указанному адресу на имя учёного секретаря диссертационного совета

Автореферат разослан « _____ » _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, профессор



Е.А. Лазарев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Современные изделия машиностроения представляют собой сложные технические системы, включают различные детали и механизмы. Формирование нормативной базы, определяющей работоспособность технических систем, следуя представленным в работах Н.А.Махутова, В.Н.Пермякова, М.М.Гаденина, А.О.Чернявского, С.А.Тимашева, В.В.Москвичева, А.М. Freudenthal, E. J. Gumbel и других авторов подходам, включает как традиционные методы решения проблемы безопасной эксплуатации изделий с позиций прочности, ресурса и надежности, так и новые методы, критериями которых являются живучесть, риск (в вероятностно-экономической постановке) и безопасность.

В процессе эксплуатации машин и технических изделий их детали, в подавляющем большинстве случаев, подвергаются воздействию случайных нагрузок. Для оценки прочностной надежности деталей на основе математического аппарата параметрической статистики, начиная с 80-х годов XX века, в работах отечественных ученых В.П. Когаева, С.В. Серенсена, Р.М. Шнейдеровича, Н.А. Махутова, А.П. Гусенкова, В.В. Болотина, С.А. Тимашева, Г.А. Снесарева, Д.Н. Решетова, А.С. Иванова, а также зарубежных ученых К. С. Kapur, L.R. Lamberson, E.V. Naugen, E. Haibach, D. Schütz предложены вероятностные методы расчета различных деталей машин, позволяющие учесть случайные вариации характеристик предельных (допускаемых) и действующих напряжений и установить вероятность безотказной работы или отказа, при этом постулируется, что как предельные, так и действующие напряжения подчиняются нормальному закону распределения. Условность такого подхода отмечают сами авторы (Д.Н. Решетов, А.С. Иванов, В.З. Фадеев). Это следствие использования, по сути, аналитических методов расчета вероятности и ограниченности их возможностей при работе со сложными математическими зависимостями, содержащими случайные величины с различными законами распределения. Проблемой оценки риска возникновения отказов потенциально опасных изделий, как показано в работах Н.А.Махутова, В.Н.Пермякова, М.М.Гаденина, О.Ф.Чернявского, является значительная зависимость вероятности безотказной работы от законов распределения характеристик механических свойств материала и нагрузок, для которых также традиционно принимается нормальный (логнормальный) закон распределения.

В рамках приоритетных направлений прикладной статистики (А.И.Орлов) в последние годы интенсивно используются методы непараметрической статистики (В.Н.Сызранцев, С.Л.Голофаст, С.В.Поршнеv, А. Mukherjee, S.Chakraborti, D.-X. Zhou), потенциальные возможности которых, совместно с методами компьютерного моделирования фактических законов изменения действующих и допускаемых напряжений, позволяют существенно снизить условности расчета прочностной надежности потенциально опасных изделий. Известен опыт применения аппарата непараметрической статистики в задачах распознавания образов (цели), медицине, криптографии,

макроэкономике, там, где принятие ошибочного решения приводит к тяжелым последствиям. Учет фактических законов распределения нагрузок может принципиально изменять результаты расчета вероятности отказа изделий. Так, например, оценка прочностной надежности газопровода Уренгой-Сургут-Челябинск по данным 15 компрессорных станций показала (В.Н.Сызранцев, В.В.Новоселов, П.М.Созонов, С.Л.Голофаст), что ни на одном из участков возникающие в трубе напряжения (выборки длиной 365 значений за год эксплуатации) нормальному закону не подчиняются, при этом вероятность отказа (при идентичных геометрических параметрах труб, неизменных характеристиках механических свойств их материала и отсутствии дефектов) изменяется на несколько порядков.

Важнейшей задачей при проектировании и эксплуатации машин является выявление на входящих в них узлах и деталях мест опасной концентрации напряжений и оценка прочностной надежности этих деталей и узлов. При исследовании напряженно-деформированного состояния (НДС) деталей, для которых отсутствуют аналитические методы расчета, в настоящее время успешно используются численные методы. В то же время, решение различных инженерных задач с помощью современных программных продуктов, реализующих метод конечных элементов (МКЭ), свидетельствует, что их использование не позволяет при случайном характере нескольких внешних нагрузок установить места концентрации напряжений в детали и функции их распределения, необходимые для расчета надежности детали.

При расчете долговечности деталей с допустимой вероятностью отказа (1%...10%) необходимо знание функций плотности распределения (ФПР) чисел циклов до разрушения. Эти функции, как показывают результаты обработки данных усталостных испытаний, законами, разработанными в рамках параметрической статистики, не описываются. Для прогнозирования долговечности деталей общепромышленного использования в условиях случайного режима их нагружения традиционно применяется гипотеза (корректированная) линейного суммирования повреждений, при этом принимаемая равной единице предельная величина повреждения по экспериментальным данным изменяется от 0,01 до 10.

Достоверность расчетных данных о распределении деформаций в деталях определяется их согласованием с результатами экспериментальных исследований. Для статических расчетов контроль результатов расчета возможен на основе данных регистрации деформаций путем электротензометрирования. Если же деталь работает в условиях случайного воздействия внешних нагрузок, то по ряду причин установить соответствие результатов даже корректно выполненного конечно-элементного анализа экспериментальным данным, полученным с помощью электротензометров, весьма проблематично. В то же время распределение циклических напряжений на поверхности деталей, полученное именно в процессе их натуральных испытаний, не только дает объективную информацию о нагруженности деталей, но и является основой для совершенствования как методов расчета их на прочность и надежность, так и разработки уточненных методов прогнозирования ресурса. Од-

ним из эффективных путей решения проблемы является использование специальных средств диагностики усталостных повреждений (датчиков деформаций интегрального типа - ДДИТ), разработка которых и методик их использования при исследовании нагруженности и долговечности различных деталей и металлоконструкций машин в условиях стендовых и эксплуатационных испытаний выполнена в работах В.Н. Сызранцева, С.Л. Голофаства, С.В. Панина, М.В. Буркова, О.В. Богомолова, Е.Н. Слесарева, А.И. Маленкова, П.В. Москвина и других отечественных ученых. Распространение методик использования ДДИТ в практике экспериментальных исследований сварных соединений, зубчатых колес, металлоконструкций машин, прогнозирования остаточного ресурса требует разработки специальных методов тарирования датчиков и создания математического обеспечения обработки их реакции.

Цель работы: совершенствование методов оценки нагруженности, надежности и долговечности деталей общепромышленного применения (зубчатых передач, валов, подшипников качения, корпусных деталей), учитывающих реальные законы распределения случайных величин внешних эксплуатационных нагрузок, действующих и допускаемых напряжений, чисел циклов до разрушения независимо от сложности законов.

Генеральной идеей разрабатываемого подхода является использование данных прочностного расчета деталей численными методами теории упругости и результатов оценки распределения по поверхности детали деформаций, зафиксированных с помощью ДДИТ в процессе работы исследуемых деталей в эксплуатационных условиях. Восстанавливаемая в процессе компьютерного моделирования случайных внешних воздействий или с использованием информации с ДДИТ фактическая нагруженность деталей является исходной для прогнозирования их долговечности и оценки прочностной надежности, решаемых на основе развития кинетической теории усталости Е.К.Почтенного и методов непараметрической статистики.

Предметом исследования являются зависимости прочностной надежности деталей машин и оборудования от характера распределений действующих и предельных напряжений, не поддающихся аналитическому описанию в рамках параметрической статистики.

Объект исследования: детали машин общепромышленного применения, такие как зубчатые передачи; валы, подшипники качения; литые и сварные корпусные детали, металлоконструкции машин.

Основные задачи исследования

1. Для деталей общепромышленного применения разработать методики, позволяющие оценивать прочностную надежность деталей независимо от сложности функций плотности распределения действующих и предельных напряжений.

2. Предложить методики и алгоритмы определения параметров моделей кинетической теории многоциклового усталости, позволяющие при расчете долговечности учесть реальные законы распределения чисел циклов нагру-

жения образцов до поломки и накопление усталостных повреждений в образцах при нерегулярном нагружении.

3. Разработать методы экспериментального определения эквивалентных напряжений и эквивалентных чисел циклов деформирования по повреждающему воздействию на основе использования датчиков деформаций переменной чувствительности (ДДПЧ).

4. Разработать расчетно-экспериментальные методы прогнозирования долговечности работы детали или металлоконструкции, подвергающихся в условиях эксплуатации сложному спектру нагружения.

Методология проведения исследований. Методологическими и теоретическими основами исследования являются концептуальные положения теории вероятности, параметрической и непараметрической математической статистики, планирования эксперимента, кинетической теории усталости металлов и теории упругости, методов конечных и граничных элементов, теории зубчатых зацеплений, прикладные исследования по проектированию, изготовлению, испытаниям и эксплуатации деталей и элементов механизмов и машин.

Научная новизна

- На основе аппарата непараметрической статистики и методов компьютерного моделирования разработан новый подход к оценке вероятности безотказной работы деталей общепромышленного применения, позволяющий при расчете действующих и предельных напряжений учитывать реальные их ФПР, отражающие фактические законы внешних нагрузок и законы вариации механических характеристик материала.

- В рамках кинетической теории усталости впервые построены математические модели определения имеющихся в материале начальных повреждений и расчета эквивалентных по повреждающему воздействию напряжений.

- Предложен способ статистической обработки цифровых снимков реакции ДДИТ, позволяющий в три раза повысить точность ее оценки. Установлено, что граница реакции на датчике в виде первых "темных пятен" соответствует линии уровня суммарной амплитуды деформаций сжатия детали. Для ДДПЧ впервые разработаны математические модели, обеспечивающие решение задач калибровки датчиков, определения по показаниям ДДПЧ эквивалентных напряжений и эквивалентных чисел циклов деформирования.

- Разработан расчетно-экспериментальный метод прогнозирования долговечности деталей в условиях эксплуатации при случайном нагружении, включающий: определение эквивалентного по повреждающему действию числа циклов с помощью обработки реакции ДДПЧ, восстановление непараметрическими методами статистики ФПР напряжений и прогнозирование долговечности на основе математических моделей, построенных в соответствии с кинетической теорией усталости.

Практическая ценность и реализация результатов работы.

1. Разработанные программы для оценки прочностной надежности деталей общепромышленного применения позволяют рассчитать вероятность их безотказной работы в зависимости от режима нагружения, а также рекомендовать предельные величины внешних нагрузок при переходе к другому режиму эксплуатационного нагружения.
2. Программная реализация метода оценки надежности изделий сложной геометрической формы, подвергающихся в условиях эксплуатации воздействию нескольких случайных нагрузок, позволит предприятиям-изготовителям осуществлять оптимизацию геометрической формы деталей с учетом условий их будущей эксплуатации еще на этапе проектирования.
3. Реализация разработанных методик решения задач восстановления ФПР предела выносливости, расчета границ доверительных интервалов позволяет при использовании кинетической теории усталости учесть фактические законы распределения чисел циклов нагружения до разрушения образцов, оценить и исключить систематические ошибки статистической обработки данных испытаний образцов методом линейного регрессионного анализа.
4. Для исследования характера распределения напряжений в сварных соединениях предложен оригинальный способ тарирования ДДИТ с использованием образцов, специальная геометрическая форма которых получена с учетом анализа НДС образцов. Разработанные методики применения ДДПЧ впервые позволяют при экспериментальных исследованиях деталей исключить инкубационный период до появления на датчиках реакции, фиксировать реакцию в любой момент прерывания испытаний изделия при существенном упрощении процедуры ее оценки, в условиях эксплуатационного нагружения деталей определять величину эквивалентных напряжений или эквивалентных чисел циклов нагружения.
5. Предложенный метод оценки долговечности деталей позволяет определить во временном диапазоне остаточный срок службы детали при эксплуатации с вероятностью 1%...10%.

Достоверность разработанных методик оценки вероятности безотказной работы деталей обусловлена применением методов непараметрической статистики, апробированных ранее в других отраслях знаний, и подтверждается согласованием результатов расчета со статистикой отказов деталей. Результаты конечно-элементного моделирования согласуются с данными стендовых испытаний оборудования. Построенные математические модели определения эквивалентных напряжений и эквивалентных чисел циклов нагружения, зависимости методического обеспечения методик применения датчиков деформаций переменной чувствительности основаны на использовании успешно применявшейся для оценки долговечности деталей кинетической теории механической усталости. Достоверность разработанного расчетно-экспериментального метода прогнозирования долговечности деталей основана на установленной взаимосвязи реакции ДДИТ с накоплением повреждений в материале детали.

Выполненные расчеты НДС корпусных и других деталей трубопроводной арматуры (ОАО "Курганский завод трубопроводной арматуры "ИКАР", ЗАО "НПП "Сибтехноцентр") позволили на этапе их проектирования осуществить конструкторскую доработку корпусных деталей по критерию прочности и герметичности. Предложенная методика определения нагруженности деталей с многопарным контактным взаимодействием использована для расчета подшипников качения при нетрадиционной схеме их нагружения в составе привода импульсной передачи (Институт машиноведения УрО РАН) и для исследования характера распределения нагрузки между ротором и статором винтового забойного двигателя. Разработанные методы оценки прочностной надежности передач, валов, подшипников использованы при проектировании приводов в Институте механики ГОУ ВПО ИжГТУ, УНПЦ "Механик", ООО «НПП Авионика и Мехатроника».

Работа является составной частью ряда проектов, выполненных в рамках научно-технических программ, двух госбюджетных НИР ТИУ: "Исследование работоспособности и повышение долговечности и надежности деталей машин и элементов сооружений" и "Расчетно-экспериментальные методы оценки прочностной надежности и диагностики технического состояния нефтегазового оборудования", гранта Министерства общего и профессионального образования РФ "Развитие методов диагностики с помощью датчиков деформаций интегрального типа (ДДИТ) усталостных повреждений и ресурса деталей (металлоконструкций) транспортных средств", гранта РФФИ 01-01-96448 "Теоретическое и экспериментальное исследование механических бесступенчатых импульсных передач с упругими звеньями в трансмиссиях самоходных машин", а также проекта «Разработка технологии формирования сочленения (стыка) основного и бокового стволов в многоствольных скважинах, обеспечивающего доступ в оба ствола в процессе эксплуатации скважины» (идентификатор проекта RFMEFI57714X0060) в рамках реализации федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы».

Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе при чтении курсов лекций для студентов технических специальностей ТИУ: "Детали машин и основы конструирования", "Расчет и конструирование нефтегазопромыслового оборудования", "Основы надежности нефтегазопромыслового и бурового оборудования", "Современные методы диагностики нагруженности и долговечности оборудования", а также при чтении лекций дисциплин магистерских и аспирантских программ. Программный комплекс XenSys по расчету НДС деталей МКЭ и МГЭ используется в учебном процессе ТИУ и Златоустовском филиале ЮУрГУ при выполнении практических и лабораторных работ.

Апробация работы. Результаты работы докладывались в 1997...2017 гг. на международных и всероссийских симпозиумах и конференциях: Нац. конф. с межд. участием "Engineering Mechanics", – Чехия, 1997, 1998, 2003 гг.; Межд. симпозиуме "Mechanics in Desigh MID-98", – Англия, 1998г.; 4-м Все-

мирном конгрессе "Gearing and Power Transmission", – Франция, 1999 г.; 5-й Межд. конф. "Akademika dubnica-99", – Польша, 1999 г.; Межд. конф. "Mechanical Transmissions", – Китай, 2001; XXII Российской школе по проблемам науки и технологий. УрО РАН – Екатеринбург, 2002; V межд. конф. "Научно-технические проблемы прогнозирования надежности и долговечности конструкций и методы их решения", – Санкт-Петербург, 2003; Межд. конф. "Trans&motoauto'04", – Болгария, 2004; Межд. конф. "MACHINE DESIGN", – Новый Сад, Сербия, 2008, 2009; Межд. науч. техн. конф. "Трубопроводная арматура XXI века", – Курган, 2008; II и III и VI Всеросс. конф. "Безопасность критичных инфраструктур и территорий", – Екатеринбург, УрО РАН, 2008, 2009, 2014, 2016; Науч. техн. конф. с межд. участием "Теория и практика зубчатых передач и редукторостроения", – Ижевск, 2008; VI межотр. науч.-техн. конф. "Автоматизация и прогрессивные технологии в атомной отрасли", – Новоуральск, 2009; Всеросс. науч.-практ. конф. "Новые технологии – нефтегазовому региону", Тюмень, 2010; Всеросс. науч.-техн. конф. "Инновационное нефтегазовое оборудование: проблемы и решения", Уфа, 2010; XI Межд. симп. "Symposium on industrial engineering – SIE 2015", Белград, Сербия, 2015; XVI Межд. науч. конф. «Geoconference SGEM-2016», Болгария; Межд. науч.-техн. конф. «Пром-Инжиниринг», Челябинск, 2016, 2017.

Диссертация обсуждена на расширенном заседании кафедры машин и оборудования нефтяной и газовой промышленности Тюменского индустриального университета, на объединенном семинаре кафедр Южно-Уральского государственного университета.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 57 печатных работ, в том числе шесть монографий.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, основных выводов, и библиографического списка из 345 наименования. Общий объем работы составляет 281 страницу, в том числе 110 рисунков, 15 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель и основные задачи исследования.

В первой главе проведён анализ известных методов численного исследования НДС деталей и реализующих эти методы программных продуктов. Сформулированы основные этапы разработки адекватной расчетной схемы для оценки НДС деталей. Вскрыты проблемы статистической обработки результатов усталостных испытаний на основе использования методов линейного регрессионного анализа и определены три направления развития методов обработки экспериментальных данных: совершенствование полуэмпирических моделей кривой усталости с целью учета процессов накопления повреждений в образцах при их циклическом деформировании; разработка методов и алгоритмов расчета нижних границ доверительных интервалов кривой усталости, учитывающих фактические законы распределения числа циклов нагружения образцов до разрушения; разработка методик расчета напряжений, эквивалентных по повреждающему воздействию. Проанализированы

используемые в настоящее время методики расчета прочностной надежности зубчатых передач, валов, подшипников и корпусных деталей машин и оборудования. Вскрыты недостатки методик и определены направления их совершенствования на основе использования аппарата непараметрической статистики и современных методов компьютерного моделирования.

Во второй главе работы рассмотрены особенности расчета напряженно-деформированного состояния деталей сложной геометрической формы численными методами. На основе проведенного анализа возможностей и ограничений существующих промышленных пакетов компьютерного анализа конструкций, таких как Pro/Mechanica, NASTRAN, ABAQUS, ANSYS, COSMOS автором сделан выбор в пользу широко применяющегося в расчетной практике конечно-элементного пакета ANSYS. Одним из преимуществ ANSYS является возможность создания в нем пользовательских модулей и макросов, что позволяет исследователю формировать собственные алгоритмы для обработки экспериментальных данных с целью состыковки расчетных и экспериментальных моделей. В то же время, широкие возможности ANSYS создают определенные сложности для его изучения и корректного применения для анализа конструкций. Исследователю необходимо обосновать свой выбор как типа элемента (одного из более двухсот), так и расчетной схемы, адекватной реальной физической задаче. Возникает противоречие: наложение дополнительных граничных условий, с одной стороны, уменьшает время решения задачи и улучшает сходимость результата, с другой стороны – необоснованные граничные условия могут привести к аномальным результатам решения. С целью получения адекватной расчетной схемы предложен алгоритм конечно-элементного анализа деталей и узлов.

Разработанный алгоритм конечно-элементного анализа деталей сложной геометрической формы в главе проиллюстрирован на ряде примеров. Часть из полученных результатов представлена ниже.

В процессе компьютерного моделирования гидравлических испытаний корпусных деталей на примере корпуса превентора ППГ-230х35, изготовленного ЗАО "НПП "Сибтехноцентр", при его нагружении пробным давлением в 70МПа получены поля распределения эквивалентных напряжений в моделях корпуса и приспособления испытательного (Рисунок 1, элементы, в которых зафиксированы пластические деформации, выделены белым цветом) и поля распределения суммарных перемещений в корпусе.

В ходе проектирования саморегулируемой механической импульсной бесступенчатой передачи нового типа для трансмиссии высоконагруженных транспортных средств выполнены расчеты и осуществлен выбор подшипника, наружное кольцо которого катится по поверхности эксцентрика, воспринимая при этом достаточно большую радиальную нагрузку. Поставленная задача по прочностной оценке предполагает совместный расчет контактных напряжений в местах контактов тел качения, а также деформаций колец подшипника под действием статической нагрузки.

Результат одного из вариантов расчета распределения суммарных перемещений деталей подшипника 306 показан на Рисунке 2 (перемещения для

наглядности увеличены в 20 раз). В правой части рисунка изображено распределение нагрузки по телам качения для другого расчетного случая.

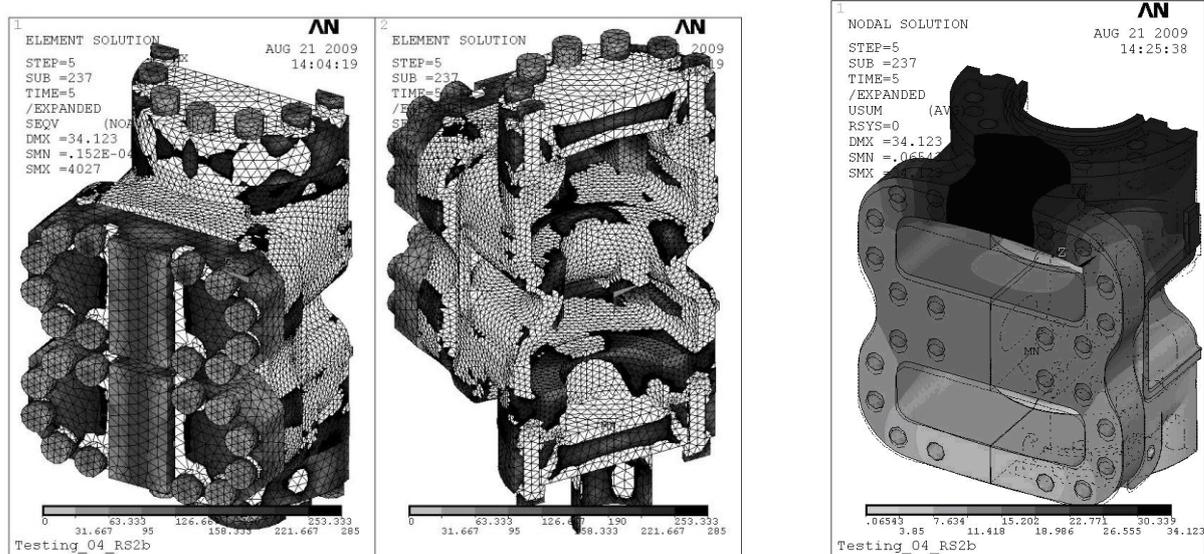


Рисунок 1 – Эквивалентные напряжения и суммарные перемещения в корпусе преувентора.

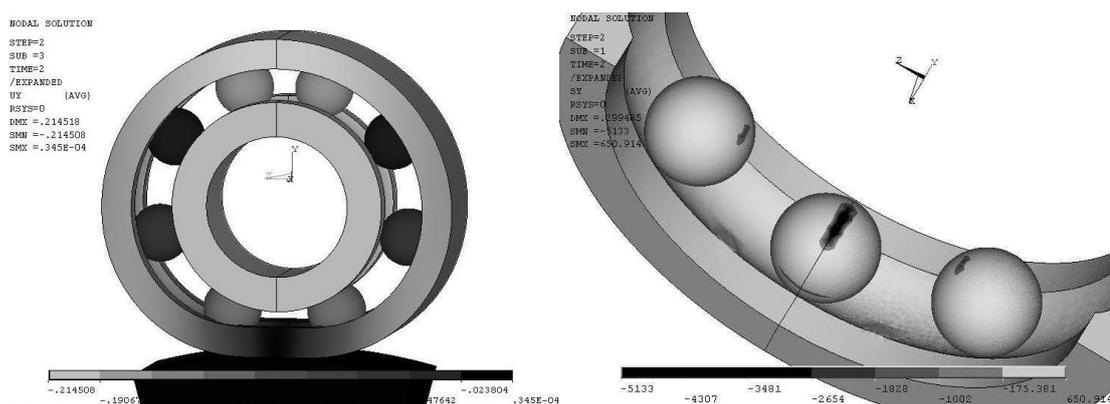


Рисунок 2 – Перемещения деталей подшипника 306 и контактные напряжения в наиболее нагруженных зонах.

В третий главе работы представлена методология расчета прочностной надежности деталей сложной геометрической формы при случайном характере внешних нагрузок и ее практическая реализация.

Методики оценки НДС деталей и узлов в пакетах конечно-элементного анализа (глава 2) позволяют корректно смоделировать лишь статический режим нагружения конструкции постоянной величиной приложенной силы, момента, давления или тепловой нагрузки. В то же время в реальных условиях эксплуатации детали подвергаются воздействию высоких внешних как силовых, так и температурных нагрузок, являющихся случайными величинами, ФПР которых законами, предложенными и исследованными в рамках теории параметрической статистики, с требуемой ошибкой первого рода по критериям согласия приняты могут быть лишь в редких случаях. Еще более неопределенными являются законы, по которым изменяются действующие напряже-

ния, поскольку они, как правило, связаны с внешними нагрузками нелинейными зависимостями.

Предлагаемый в данной работе подход к обработке случайных величин основан на методах непараметрической статистики, которые обеспечивают описание ФПР независимо от ее сложности, что позволяет исключить погрешности, вызываемые заменой реальных распределений случайной величины близкими к ним "удобными", имеющими аналитическое описание известными распределениями. Сложностью применения методов непараметрической статистики является их программная реализация, требующая создания соответствующих алгоритмов, включающих как численные методы решения уравнений, в том числе трансцендентных, так и методы оптимизации функций. С развитием средств вычислительной техники программная реализация методов непараметрической статистики перестала быть препятствием их эффективного использования.

Разработанная методология оценки прочностной надежности изделий в процессе эксплуатации использует методы компьютерного моделирования и аппарат непараметрической статистики, позволяющий восстанавливать не только фактические функции распределения случайных величин внешних нагрузок, но и функции плотности распределения критериев прочности, что обеспечивает оценку долговечности изделий в условиях реальных спектров воздействия внешних нагрузок и естественных законов изменения предельного состояния материала. Основными этапами методологии являются (Рисунок 3):

1. Восстановление методами непараметрической статистики ФПР внешних случайных нагрузок и настройку на их основе непараметрических датчиков случайных величин.
2. Планирование многофакторного эксперимента по расчету напряженно-деформированного состояния деталей.
3. Проведение компьютерного эксперимента по расчету численным методом теории упругости конечного числа вариантов НДС деталей.
4. Определение функций, аппроксимирующих изменение напряжений в опасных точках исследуемой детали, в зависимости от величин внешних нагрузок.
5. Получение с помощью датчиков случайных величин и аппроксимирующих функций представительных выборок напряжений, действующих в опасных точках детали.
6. Восстановление методами непараметрической статистики по этим выборкам ФПР действующих в опасных точках детали напряжений.
7. Расчет на основе ФПР предельных напряжений и ФПР действующих напряжений вероятности безотказной работы для каждой опасной точки.
8. Определение точки детали, имеющей наименьшую вероятность безотказной работы, характеризующей прочностную надежность исследуемой детали в целом.

В качестве примера на Рисунке 3 выделены основные этапы реализации задачи оценки вероятности безотказной работы корпуса запорной арматуры.

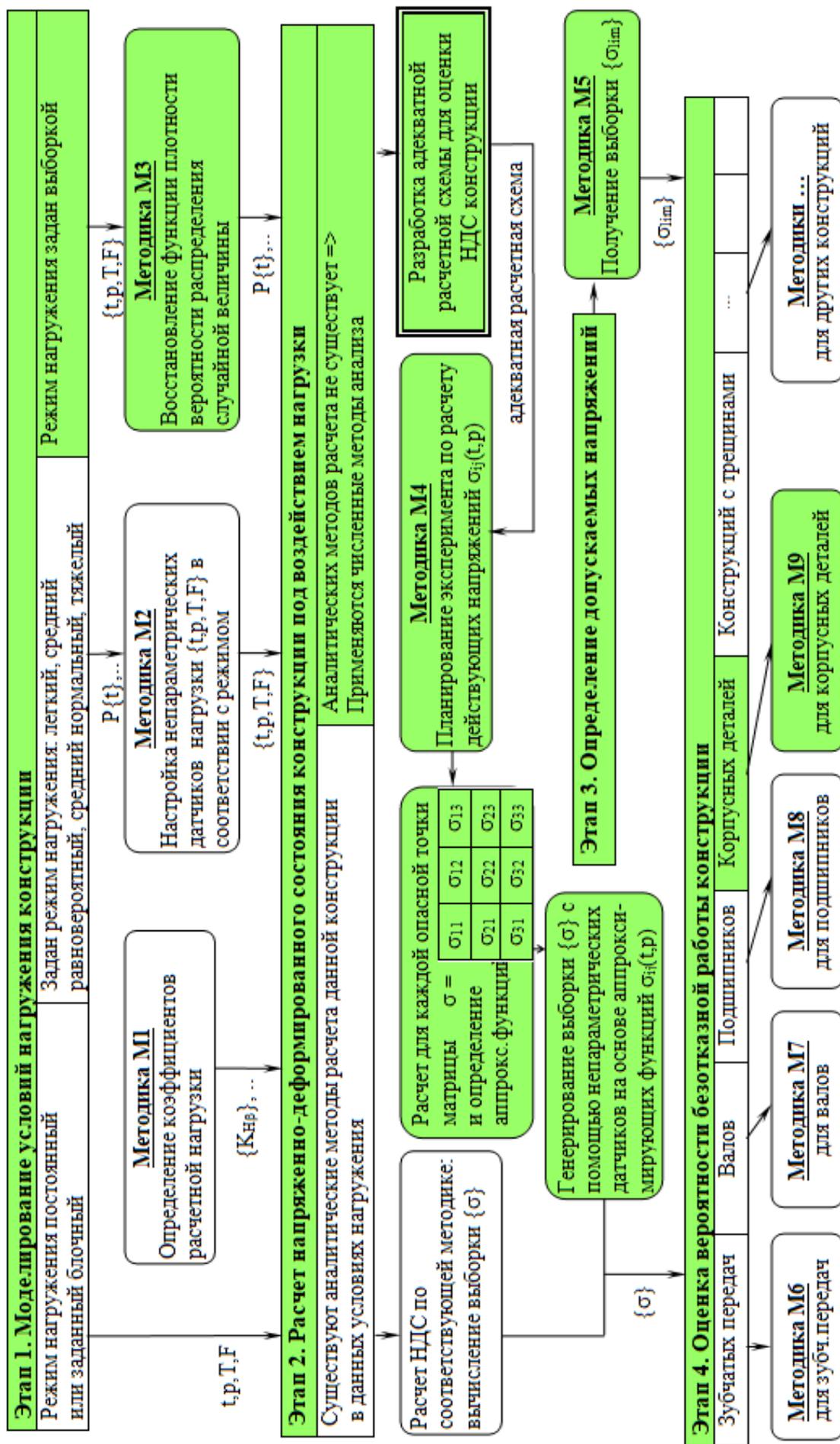


Рис.3 Методология оценки надежности деталей машин

Реализация методов оценки прочностной надежности деталей и узлов машин на основе математического аппарата непараметрической статистики связана с решением двух вспомогательных задач:

- компьютерное моделирование случайных величин с законами, известными с точностью до параметров и с законами, восстановленными методами непараметрической статистики;
- восстановление по заданной выборке случайной величины ее ФПР.

Для решения первой задачи, разработки датчиков, сгенерируем в пределах отрезка $[0, 1]$ выборку случайных чисел $V_i, i = \overline{1, n}$, значения V_i которых в этом интервале равновероятно. Если случайная величина V имеет равномерный закон распределения, а требуется получить случайную величину x , функция распределения которой $\Phi(x)$, известна с точностью до параметров, достаточно воспользоваться уравнением:

$$\Phi(x) = V \quad (1)$$

решая его относительно x . Для некоторых известных законов распределения это уравнение решается аналитически, в то же время в общем случае, для реальных законов, восстановленных с помощью непараметрических методов, уравнение (1) является трансцендентным, и для получения выборки $x_i, i = \overline{1, n}$ необходимо для каждого значения V_i численным методом решать трансцендентное уравнение:

$$\Phi(x_i) = V_i. \quad (2)$$

Изложенный алгоритм генерирования случайных величин, независимо от сложности функции $\Phi(x)$, реализован в программах, написанных в среде MathCad.

Для решения второй вспомогательной задачи использовано два принципиально различных подхода восстановления неизвестной ФПР распределения случайной величины, представленной конечной выборкой значений: на основе оценок Парзена – Розенблатта с набором различных ядерных функций и в виде разложения (ряда) по системе тригонометрических функций, коэффициенты которого определяются в результате минимизации функции методом эмпирического риска (В.Н.Вапник).

Следуя оценкам Парзена-Розенблатта, неизвестная ФПР $P_N(y)$ случайной величины y , заданной в виде выборки x_i длиной n , описывается выражением:

$$P_n(y) = \frac{1}{n \cdot h_n} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{y - x_i}{h_n}\right), \quad (3)$$

где: $K(t)$ - ядерная функция, h_n – параметр размытости (ширина окна), значение которого устанавливается в результате максимизации информационного функционала:

$$\max_{h_n} \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln \left[\frac{1}{(n-1)h_n} \sum_{j \neq i}^{n-1} K \left(\frac{x_i - x_j}{h_n} \right) \right] \right\}. \quad (4)$$

В работе оба подхода реализованы в виде комплекса программ, при этом, на основе ФПР построены (путем решения уравнения (2)) непараметрические датчики случайных величин.

Если ФПР предельных напряжений ($s_k, k = \overline{1, m}$) и действующих напряжений ($\sigma_i, i = \overline{1, n}$) восстановлены в виде (3), то вероятность безотказной работы (R) определяется путем расчета численными методами следующего интеграла:

$$R = \int_0^{\infty} \left(\int_0^{\infty} \left[\frac{1}{m \cdot h_m} \sum_{k=1}^m K \left(\frac{s + \sigma - s_k}{h_m} \right) \right] \cdot \left[\frac{1}{n \cdot h_n} \sum_{i=1}^n K \left(\frac{\sigma - \sigma_i}{h_n} \right) \right] d\sigma \right) ds \quad (5)$$

Реализация разработанной методологии расчета прочностной надежности в диссертации представлена на примере исследования корпуса клиновой задвижки, подвергаемого в условиях эксплуатации внешнему воздействию давления и температуры, ФПР которых восстановлены методами непараметрической статистики на основе выборок их значений.

На Рисунке 4 показан один из вариантов расчета НДС задвижки, а на Рисунке 5 – ФПР напряжений в наиболее опасной точке задвижки в процессе ее эксплуатации. Аналогичный подход совместно с Д.Г. Нероденко был использован для разработки методики оценки прочностной надежности технологических трубопроводов.

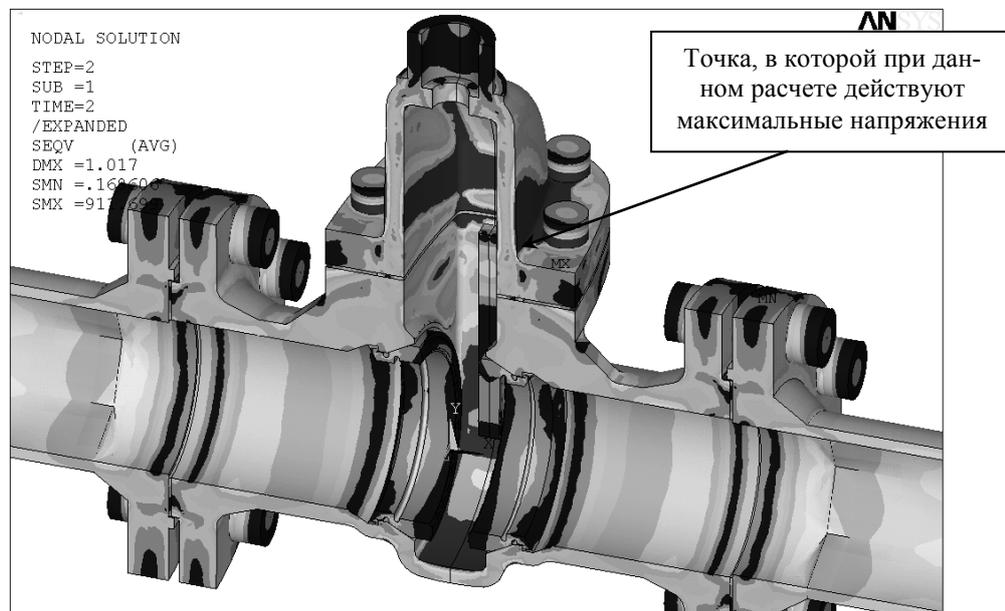


Рисунок 4 – Поле распределения эквивалентных напряжений фон Мизеса в деталях клиновой задвижки КЗ13010-100

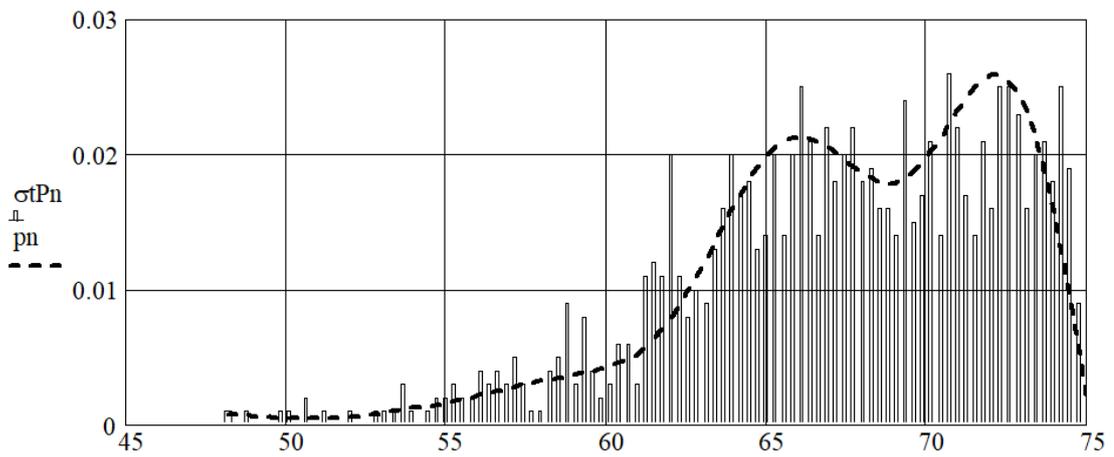


Рисунок 5 – Функция плотности распределения напряжений в точке "m" исследуемого корпуса

Четвертая глава посвящена разработке методик оценки прочностной надежности деталей общепромышленного применения: зубчатых передач, валов, подшипников качения, прочностные расчеты которых выполняются по известным, широко апробированным, аналитическим зависимостям. Используемые здесь подходы проиллюстрируем на примере построения методики определения вероятности безотказной работы цилиндрических передач по критерию контактной прочности.

В работах Г.А. Снесарева, Д.Н. Решетова, А.С. Иванова и других исследователей возникающее при эксплуатации передачи в зацеплении зубьев контактное напряжение (σ_H) и предельное (допускаемое) контактное напряжение (σ_{Hp}), определяемое материалами колес зубчатой передачи и принятой их термообработкой, рассматриваются как величины случайные, а расчет вероятности отказа (\overline{R}_H) зубчатых передач выполняется путем решения уравнения:

$$\overline{R}_H = 1 - \text{Вер}(\sigma_H \leq \sigma_{Hp}). \quad (6)$$

Для расчета σ_H используется известная функциональная зависимость:

$$\sigma_H = \sigma_H(Z_H, a_w, b_w, u, T_{1H}^*, K_{H\Sigma}), \quad (7)$$

включающая параметры: Z_H - коэффициент, учитывающий форму сопряженных поверхностей; a_w - межосевое расстояние цилиндрической передачи; b_w - рабочая ширина зубчатого венца; u - передаточное отношение; T_{1H}^* - крутящий момент на шестерне при работе в номинальном режиме; $K_{H\Sigma}$ - коэффициент нагрузки.

При расчете по зависимости (7) напряжение σ_H рассматривается как функция детерминированных параметров (Z_H, b_w, u) и случайной величины $K_{H\Sigma}$, представляющей собой произведение четырех коэффициентов:

$$K_{H\Sigma} = K_A \cdot K_{H\beta} \cdot K_{HV} \cdot K_{H\alpha} \quad (8)$$

где: K_A - коэффициент внешней нагрузки; $K_{H\beta}$ - коэффициент, учитывающий распределение нагрузки по ширине зубчатого венца; K_{HV} - коэффициент, учи-

тывающий динамическую нагрузку, возникающую в зацеплении при работе передачи; $K_{H\alpha}$ - коэффициент, учитывающий распределение нагрузки между зубьями.

Из анализа выражений для расчета коэффициентов $K_A, K_{H\beta}, K_{H\nu}, K_{H\alpha}$, следует, что эти коэффициенты являются коррелированными (зависимыми от T_{1H}^*) случайными величинами. В известных методиках расчета $\overline{R_H}$ коррелированность частных коэффициентов нагрузки не учитывается и для определения характеристик случайной величины (σ_H), необходимых для решения задачи (6), описание всех случайных величин ($K_A, K_{H\beta}, K_{H\nu}, K_{H\alpha}$), в том числе и T_{1H}^* , независимо от их ФПР, выполнено с использованием лишь их средних значений и соответствующих коэффициентов вариации. Только при таких допущениях удастся определить среднее значение коэффициента нагрузки $\overline{K_{H\Sigma}}$ и рассчитать коэффициент его вариации $\nu_{H\Sigma}$, а затем воспользоваться приближенной формулой для определения коэффициента вариации $\nu_{\sigma H}$ действующего в зацеплении контактного напряжения.

При решении задачи (6) допускаемое контактное напряжение $\sigma_{Hр}$, рассматривается как величина случайная, характеризуемая средним значением $\overline{\sigma_{Hр}}$ и коэффициентом вариации $\nu_{\sigma Hр}$. Искомая вероятность отказа передачи ($\overline{R_H}$) определяется в предположении, что случайные величины σ_H и $\sigma_{Hр}$ подчиняются нормальному закону распределения.

Заложенные в решение задачи (6) условия независимости величин коэффициентов (8), предположения о нормальном распределении случайных величин, без учета фактических ФПР (особенно это важно при задании внешней нагрузки – T_{1H}), определяют высокую условность результатов расчета. Устранить отмеченные причины приближенности расчета надежности передач в рамках классической теории вероятности и параметрической статистики возможным не представляется. В настоящей работе решение задачи получено на основе использования методов компьютерного моделирования, математического аппарата и алгоритмов непараметрической статистики.

Первым этапом в разработанном подходе решения задачи (6) является формирование выборки, длиной n , случайных значений крутящего момента T_{1Hi} , $i = \overline{1, n}$. В зависимости от внешних условий эксплуатации передачи рассматривают различные законы распределения случайной величины T_{1H} : для тяжелого режима используют β -распределение, для описания среднего режима работы применяют нормальное или равновероятное распределение, а для легкого режима - γ -распределение. Для перечисленных законов разработаны эффективные генераторы случайных чисел и поэтому получение выборки T_{1Hi} проблем не вызывает. В то же время, когда имеется совокупность значений T_{1Hi} , $i = \overline{1, n}$ с неизвестным законом распределения, методами непараметрической статистики (глава 3) восстанавливается неизвестная ФПР $P_{T_H}(T_{1H})$, с ис-

пользованием которой строится непараметрический датчик случайных чисел, позволяющий получить выборку требуемой длины T_{1Hi} , $i = \overline{1, n}$.

На втором этапе, используя T_{1Hi} , $i = \overline{1, n}$, по зависимостям (7) и (8) получают выборку $\{\sigma_{Hi}\}$ длиной n действующих в зацеплении цилиндрической передачи контактных напряжений и по разработанным в главе 3 алгоритмам восстанавливают ФПР $P_{\sigma_H}(\sigma_H)$. В практике расчета надежности в большинстве случаев принимается, что допускаемые напряжения подчиняются нормальному закону. В этом случае, считая известными среднее значение ($\overline{\sigma_{Hp}}$) и среднеквадратическое отклонение (S_{Hp}) случайной величины σ_{Hp} , ФПР $P_{\sigma_{Hp}}(\sigma_{Hp})$ описывается аналитическим выражением.

Имея ФПР действующих σ_H и предельных напряжений σ_{Hp} , соответственно $P_{\sigma_H}(\sigma_H)$ и $P_{\sigma_{Hp}}(\sigma_{Hp})$, реализуется третий, заключительный этап решения задачи (6), на котором рассчитывается $\overline{R_H}$ исследуемой зубчатой передачи путем взятия численными методами интеграла:

$$\overline{R_H} = 1 - \int_0^{\sigma_{mH}} \left[\int_0^{\sigma_{mH}} P_{\sigma_H}(\sigma_H + \sigma_{Hp}) \cdot P_{\sigma_{Hp}}(\sigma_{Hp}) d\sigma_{Hp} \right] d\sigma_H, \text{ где } \sigma_{mH} = \max(\sigma_{Hp}). \quad (9)$$

Разработанная методика оценки прочностной надежности зубчатых передач является универсальной, она никоим образом не привязана к законам распределения как действующих, так и допускаемых напряжений. Это позволяет осуществлять расчет вероятности отказа передач при условиях нагружения без каких-либо ограничений на закон распределения крутящего момента.

На Рисунке 6 показаны функция $P_{\sigma_{Hp}}(\sigma_{Hp})$ и функции $P_{\sigma_H}(\sigma_H)$ при условиях, когда $P_{T_H}(T_{1H})$ соответствует легкому, среднему нормальному, среднему равновероятному, тяжелому режимам работы передачи, а также когда функция плотности распределения крутящего момента $P_{T_H}(T_{1H})$ является бимодальной. Рассчитанные по (9) соответствующие вероятности отказа передачи $\overline{R_H}$ получены следующими: 0,197%, 0,519%, 1,194%, 2,215%, 0,888%.

В данной главе диссертации аналогичный подход использован при построении методики оценки вероятности отказа зубчатых передач по критерию усталостной изгибной прочности зубьев колес, методик оценки прочностной надежности валов и подшипников качения. Методики иллюстрируются на ряде конкретных примерах расчета. Так, для расчета коэффициента запаса по динамической грузоподъемности подшипника качения 2207 вероятность отказа при переходе от легкого к тяжелому режиму нагружения изменилась от 3,874% до 14,017%. В таблице 1 представлены данные расчета вероятности отказа вала редуктора при различных режимах нагружения по предлагаемой методике в сравнении с традиционными методами.

Для верификации предлагаемого подхода проведены расчеты вероятности отказа рамы локомотива по различным методикам (Рисунок 7) при внешней нагрузке, подчиняющейся нормальному закону. Предлагаемый ме-

тод дает наилучшее согласование со статистикой отказов ЦНИИ МПС России: $9,44\% \approx 10\%$. В нижней части Рисунка 7 отражены данные о вероятности отказа рамы при изменении режима нагружения, рассчитать которые известными методиками возможным не представляется.

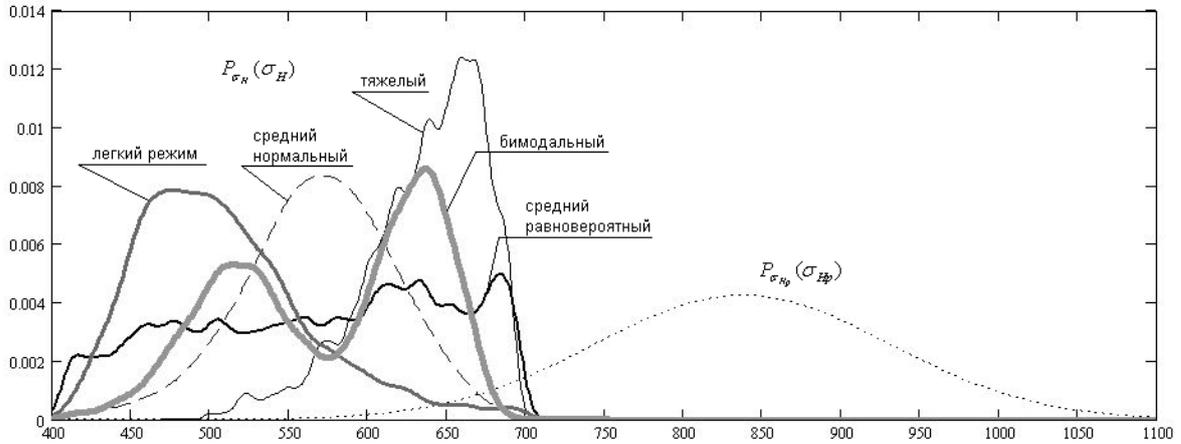


Рисунок 6 – Функции $P_{\sigma_H}(\sigma_H)$ и $P_{\sigma_{Hр}}(\sigma_{Hр})$.

Таблица 1- Результаты расчета вероятности отказа вала.

Режим нагружения	Классические методы			Предлагаемый метод			
	Решетов-Снесарев зная закон	Среднее классич. методом	Решетов в предполож. норм. закона	Среднее выборки	Медиана	Вероятность отказа	Козф. коррекции нагрузки
Легкий	0,31%	2,01	0,00004%	4,0064	3,305	0,702%	1,092
Средний нормальн.	1,284%	1,8	1,284%	2,033	1,793	1,278%	1
Средний равновер.	4,2%	1,818	1,145%	2,942	1,787	8,526%	0,893
Тяжелый	21,54%	1,205	26,599%	1,2505	1,165	13,936%	0,903
Бимодальный		1,7	2,357%	2,0519	1,615	1,007%	1,008

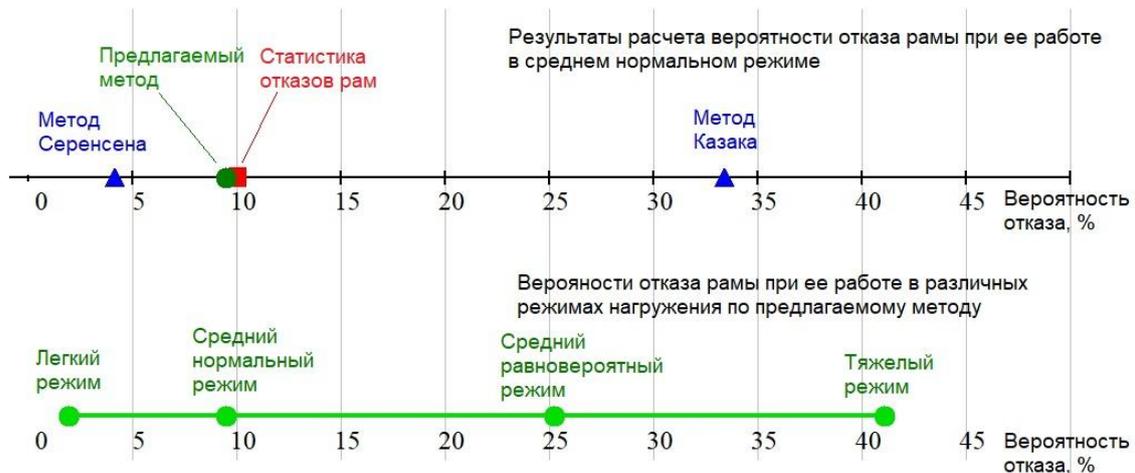


Рисунок 7 – Результаты расчета вероятности отказа рамы

Пятая глава посвящена определению предельных напряжений и характеристик усталости материала на основе данных испытаний образцов на долговечность.

При расчете вероятности безотказной работы деталей в условиях ограниченной (заданной) долговечности необходимо иметь ФПР распределения предельных напряжений, а при прогнозировании ресурса изделия с заданной вероятностью неразрушения – нижние границы доверительных интервалов кривой усталости. В работе решение этих задач получено на основе развития кинетической теории усталости (КТУ), разработанной Е.К. Почтенным.

Особенность КТУ заключается в возможности построения кривых усталости, соответствующих различной величине поврежденности материала (D): от $D = D_0 \geq 0$, характеризующей начальное повреждение материала детали, имеющее место еще до начала ее циклического деформирования, вплоть до $D = D_K \leq 1$, соответствующей разрушению детали (образца) вследствие усталости. Кривая усталости относительно числа циклов деформирования N до разрушения описывается зависимостью:

$$N = \frac{Q}{\sigma_a} \ln \left\{ 1 + \left[\exp \left(\frac{\sigma_a - \sigma_R}{\sigma_R - \sigma_{RT}} \right) - 1 \right]^{-1} \right\}, \quad (10)$$

где: σ_a - максимальное напряжение цикла; σ_R – предел выносливости детали при коэффициенте асимметрии цикла R ; σ_{RT} – циклический предел текучести (ниже его уровня отсутствуют следы пластической деформации даже после нескольких миллионов циклов нагружения); Q – коэффициент выносливости, выражение для которого получено Е.К.Почтенным в виде нелинейной функции:

$$Q = -Q_T \ln \left[1 - \exp \left(- \frac{D_0}{1 - D_0} \cdot \frac{\sigma_a}{\sigma_R - \sigma_{RT}} \cdot \frac{\sigma_B}{\sigma_B - \sigma_R} \right) \right], \quad (11)$$

где: Q_T - коэффициент, характеризующий сопротивление детали росту усталостных трещин; σ_B - аналог предела прочности материала.

Для определения параметров σ_R , Q и σ_{RT} модели (10) на базе полученных в процессе усталостных испытаний образцов данных $\sigma_{ai}, N_i, i = \overline{1, n}$, разработана методика, основанная на минимизации функционала предложенного вида. Ее реализация позволяет не только установить величины Q , σ_{RT} , но и получить выборку значений $\sigma_{Ri}, i = \overline{1, n}$, на основе которой методами непараметрической статистики восстановить неизвестную функцию плотности $f_\sigma(\sigma_R)$ случайной величины σ_R и рассчитать ее любые квантильные значения путем решения уравнения:

$$\int_0^{\sigma_R^\alpha} f_\sigma(\sigma_R) d\sigma_R = \alpha, \quad (12)$$

где α - уровень значимости, σ_R^α - значение σ_R , соответствующее α .

На Рисунке 8 показана медианная кривая усталости (жирная линия), построенная на основе обработки данных многоцикловых испытаний 183 образцов из стали 50 на шести уровнях напряжений, на Рисунке 9 - функция $f_{\sigma}(\sigma_R)$ для этого примера.

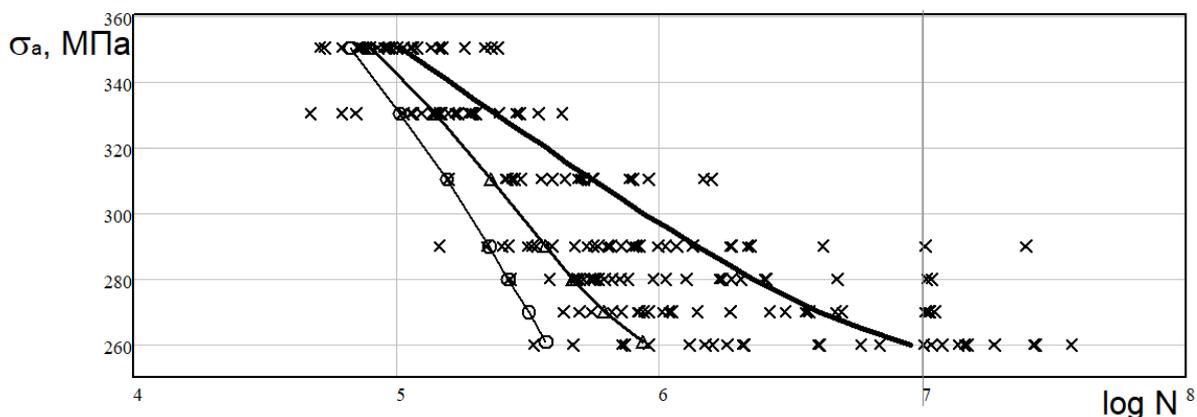


Рисунок 8 – Границы доверительных интервалов кривой усталости стали 50

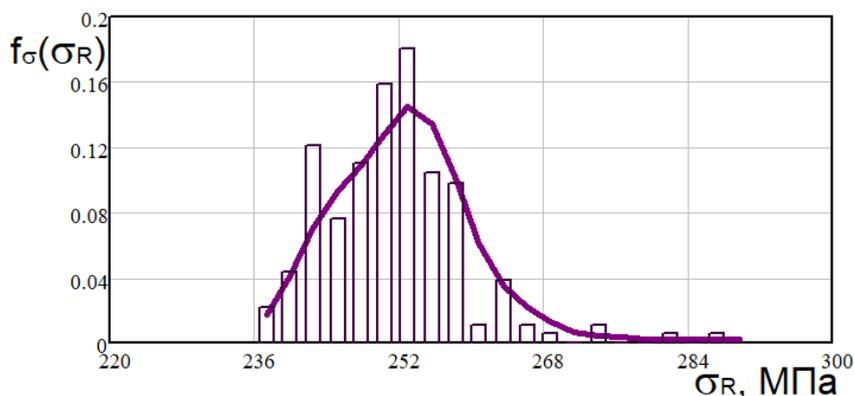


Рисунок 9 – Гистограмма распределения σ_{Ri} и функция $f_{\sigma}(\sigma_R)$

В продолжение методики разработан алгоритм расчета границ доверительного интервала кривой усталости, учитывающий, в отличие от применяющихся в настоящее время методик, функции распределения $f_N(N)$, а не $f_N(\lg N)$, которая традиционно принимается соответствующей нормальному закону распределения. На Рисунке 8 границы доверительных интервалов, соответствующие вероятности разрушения 1% и 5% показаны тонкими линиями.

Показано, что учет реальных законов распределения числа циклов до поломки образцов при допустимой вероятности их разрушения 1% в рассмотренном примере уменьшает число циклов в исследуемом диапазоне изменения напряжений 260...350МПа на 25%...175%. При допустимой вероятности поломки образцов 5%, до величины напряжения 285 МПа расчет долговечности образцов на основе линейной модели дает заниженное число циклов (в запас по усталостной прочности), в то же время, для напряжений более 285 МПа, реальное число циклов деформирования при расчете по линейной модели оказывается на 0...30% завышенным.

При известной величине Q зависимости (10), впервые предложен алгоритм определения исходной поврежденности материала образцов $D = D_0$ и коэффициента Q_T , сведенный к решению относительно $D = D_0$ и Q_T системы двух трансцендентных уравнений. Результатом реализации алгоритма является модель кривой усталости, позволяющая при известном числе циклов деформирования образцов при заданном уровне напряжений определить накопленное в материале усталостное повреждение и рассчитать новую кривую усталости, учитывающую это повреждение.

В заключительной части главы рассмотрено определение напряжений, эквивалентных по повреждающему воздействию заданному блоку нагружения. Идея предложенного алгоритма решения предусматривает два этапа. На первом этапе осуществляется обработка данных усталостных испытаний и определение всех параметров модели (10) и зависимости (11). На втором этапе при заданных параметрах σ_{ai} , N_i ступеней блока нагружения, общее число которых m , на основе выражений (10), (11) рассчитываются повреждения D_i на каждой i -ой ступени и определяется суммарная величина повреждения $D_\Sigma = \sum_{i=1}^m D_i$ за весь блок нагружения. Повреждение D_Σ деталь получает за $N_\Sigma = \sum_{i=1}^m N_i$ число циклов деформирования. Входя с найденными величинами D_Σ и N_Σ в уравнение (10), имеем относительно σ_a трансцендентное уравнение, решение которого определяет искомую величину напряжения $\sigma_\sigma = \sigma_a$, эквивалентного по повреждающему воздействию заданному блоку нагружения. Знание σ_σ позволяет прогнозировать долговечность изделия с заданной вероятностью неразрушения.

Шестая глава посвящена развитию методов экспериментального исследования с помощью датчиков деформаций интегрального типа нагруженности деталей в условиях циклического деформирования и разработке расчетно-экспериментального метода прогнозирования долговечности деталей.

В процессе циклического деформирования датчика вместе с исследуемой деталью на его поверхности возникает реакция в виде "темных пятен", момент появления которых и относительная плотность коррелируют с амплитудой напряжения и числом циклов деформирования. Корректное использование ДДИТ при экспериментальных исследованиях неразрывно связано с разработкой специализированных методик регистрации реакции ДДИТ, сводящих к минимуму роль субъективного фактора, и методов обработки получаемой с датчиков информации. Среди известных способов регистрации показаний ДДИТ эффективным является способ, основанный на использовании цифровой фотометрии. Для получения на базе снимков количественной оценки реакции ДДИТ в работе создано специализированное программное обеспечение, реализующее методы обработки цифровых изображений.

На Рисунке 10 показана серия цифровых снимков с ДДИТ, сделанных при последовательно возрастающих числах циклов нагружения (N) при постоянной величине амплитуды напряжения (σ), действующего в месте наклейки датчика.

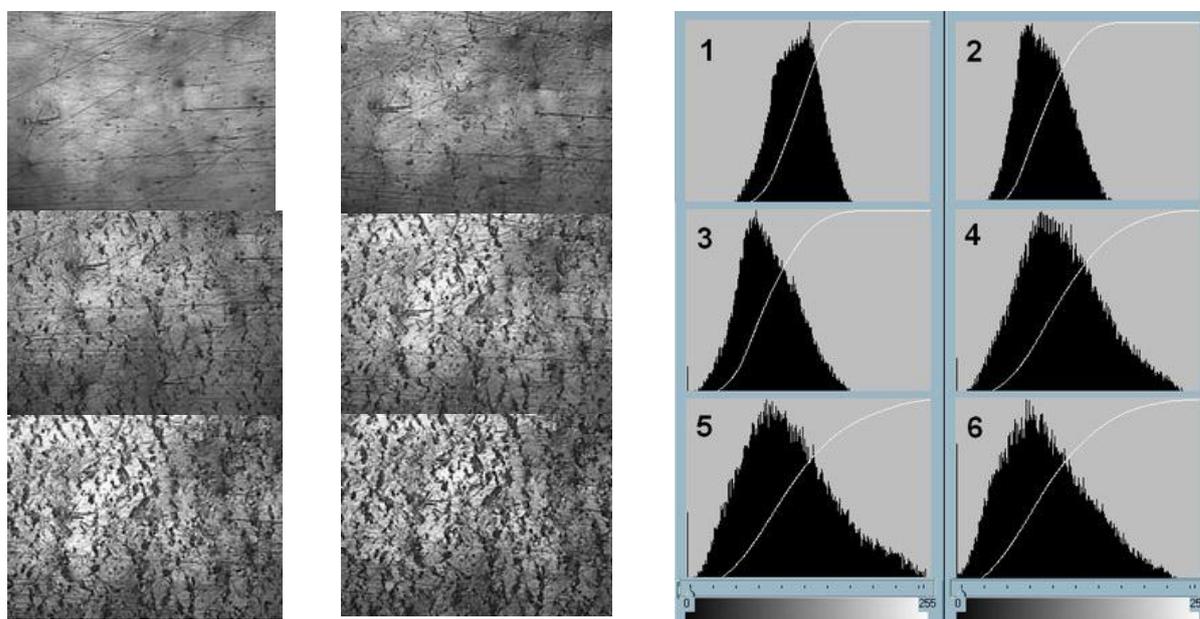


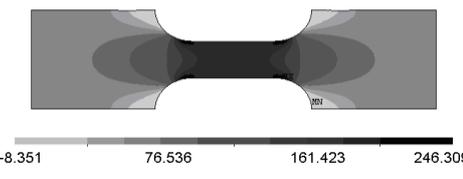
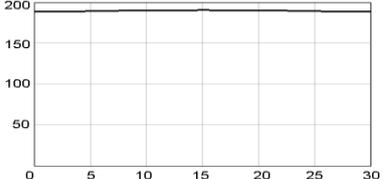
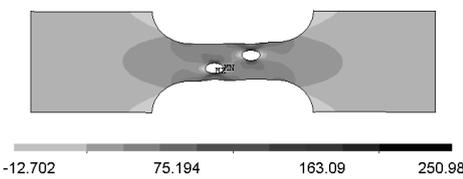
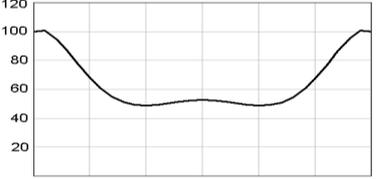
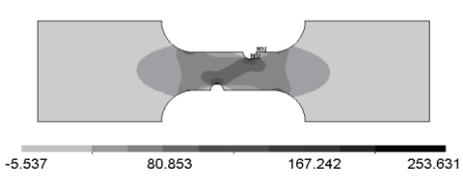
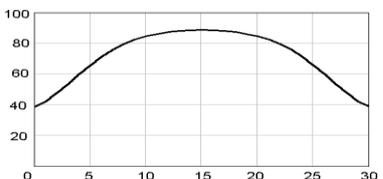
Рисунок 10 – Снимки реакции ДДИТ. Амплитуда напряжения $\sigma = 280$ МПа. $N=0; 10; 20; 30; 40; 50$.циклов (слева направо, сверху вниз) и гистограммы

Каждое изображение представлено целочисленной матрицей размером $M \cdot P$, где элемент $a_{ij} \in [0, 255]$, а для количественной оценки реакции ДДИТ применен одномерный гистограммный метод. Гистограммы изображения представляют собой частоты яркости, изменяющиеся в интервале $[0, 255]$, и характеризует эмпирические ФПР, показанные в правой части Рисунка 10. Исследовано изменение различных статистических характеристик, получаемых на основе выборки яркости изображения. Установлено, что в отличие от ранее используемого критерия оценки реакции ДДИТ по относительной площади "темных пятен", максимальное изменение которого для снимков Рисунка 10 составляет 26%, дисперсия яркости и ее вариация для этих же снимков практически по линейной зависимости возрастает в 3,5...4 раза, что принципиально снижает погрешность определения расчетных величин, характеризующих реакцию ДДИТ.

Исследование с помощью ДДИТ характера распределений напряжений в сварных соединениях связано с необходимостью их калибровки на плоских образцах с поперечным сварным швом, используемых при испытаниях в условиях циклического растяжения-сжатия. Однако в этом случае в результате испытаний одного образца определяется лишь одна экспериментальная точка калибровочной зависимости, а для получения всей совокупности ее точек циклическому деформированию должен быть подвергнут ряд образцов при вариации уровня нагрузки.

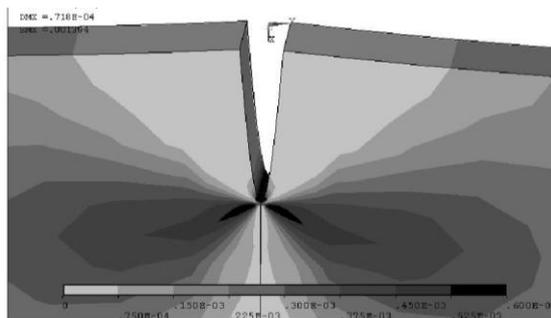
В работе предложено процесс калибровки осуществлять на сварных образцах, имеющих концентраторы напряжений (таблица 2), обеспечивающие изменение напряжений по длине сварного шва. Рациональная геометрическая форма образцов определена с помощью МКЭ. В диссертации представлены фотографии реакции датчика в различных зонах сварного образца (границе сплавления, основном металле, сварном шве) и результаты определения действующих в этих зонах напряжений.

Таблица 2 - Влияние концентраторов на распределение напряжений

№	Распределение эквивалентных напряжений в образцах	Эпюра напряжений σ_x вдоль оси образца, МПа	Усилие растяжения, кН
1			90
2			30
3			39

Ряд металлоконструкций без потери работоспособности эксплуатируются при наличии усталостных трещин. Для оценки скорости роста усталостных трещин необходимо определить параметры механики разрушения, которые могут быть вычислены с достаточной степенью точности путем компьютерного моделирования с помощью программного комплекса ANSYS. В то же время для корректного использования результатов моделирования необходимо иметь данные их согласования с реальным характером распределения напряжений в вершине трещины. Такие данные позволяют получить ДДИТ при помещении (наклейки) их на поверхность детали, имеющую трещину. В работе задача решена в процессе исследования сварного образца, имеющего усталостную трещину, развивающуюся по мере его циклического деформирования на МУП-50.

В результате проведенного в лаборатории Курганского государственного университета совместно с Д.А. Троценко эксперимента, были получены фотографии реакции датчиков (Рисунок 11 а), которые после проведения конечно-элементного анализа были расшифрованы с помощью соответствующих картин распределения деформаций сжатия (Рисунок 11 б).

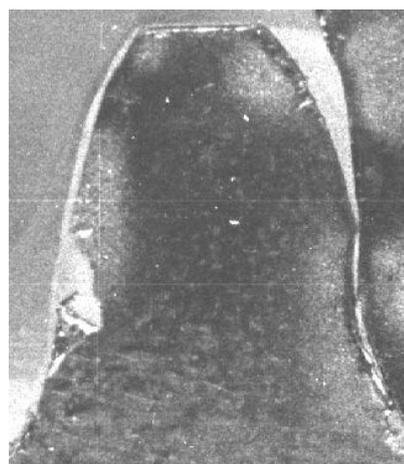
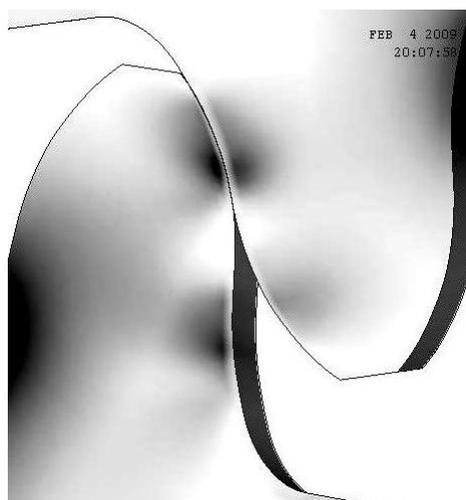


а) реакция на ДДИТ

б) распределение деформаций сжатия

Рисунок 11 – Сопоставление экспериментальных и расчетных данных

Использование численных методов расчета НДС деталей с учетом установленного в процессе выполнения работы фактом, что форма границ реакции ДДИТ в виде первых "темных пятен" аналогична картине распределения деформаций сжатия, позволяет исследовать контактное взаимодействие деталей. В качестве примера такого исследования в работе рассмотрена задача распределения нагрузки в зацеплении колес передачи Новикова с двумя линиями контакта в программном комплексе ANSYS, имитируя обкатку зубчатых колес. Моделирование зацепления двух зубьев выполнено в трехмерной постановке, с непосредственным решением двух контактных задач для каждой линии зацепления, а затем аккумулярованием деформаций сжатия вычислительным путем. Результаты расчетов и экспериментальных исследований (реакция ДДИТ, помещенных на торцы зубьев контактирующих колес), представлены на Рисунке 12.



а) распределение деформаций сжатия в торцевом сечении зуба

б) фотография реакции ДДИТ

Рисунок 12 – Сопоставление расчетных и экспериментальных данных для оценки нагруженности зубьев колес Новикова

Реализация разработанных методик применения ДДИТ в процессе эксплуатации изделий выявила ряд проблем связанных как с мониторингом ре-

акции датчиков (первых «темных пятен»), так и неопределенностью продолжительности испытаний, вследствие наличия у датчиков инкубационного периода до появления на них реакции. Решение этих проблем позволяют датчики деформаций, имеющие переменную чувствительность (ДДПЧ), идея получения которых предложена в патенте № 2209412. Способ изготовления ДДПЧ заключается в предварительной наработке ДДИТ (при известной амплитуде напряжений и числе циклов до появления на датчике реакции) на тарировочном образце, НДС которого в месте наклейки ДДИТ, изготовленного в виде полоски фольги, плавно изменяется. В результате на датчике получают две зоны: с реакцией и без (рабочая часть ДДПЧ), разделенные границей первых «темных пятен». Величина накопленных усталостных повреждений по длине рабочей части ДДПЧ является переменной, - при удалении от границы она уменьшается. По сравнению с ДДИТ, ДДПЧ имеют принципиально важные преимущества: инкубационный период у ДДПЧ отсутствует; значительно упрощается процедура фиксации реакции ДДПЧ, заключающаяся в регистрации линейного перемещения границы первых «темных пятен» по длине рабочей части ДДПЧ; реакция на ДДПЧ может быть зафиксирована в любой момент процесса испытаний исследуемой детали или металлоконструкции.

Для рабочей части ДДПЧ ($0 < x_g \leq L$, L -длина), на которой реакция на нем отсутствует, на основе кинетической теории механической усталости определена зависимость величины накопленных повреждений $D_x(x_g)$ материала образца в любом его сечении $x_g = const$, полученных в процессе наработки датчика.

На основе применения ДДПЧ и кривой усталости, описанной в соответствии с кинетической теорией, в диссертации разработаны методики расчета медианного числа циклов до разрушения детали при ее работе в условиях блочного режима:

- если известны параметры ступеней блока нагружения: σ_{ai} , N_i , $i = \overline{1, n}$;
- если известны величины напряжений каждой ступени блока нагружения: σ_{ai} , $i = \overline{1, n}$, а их длительность выражена относительными единицами: t_i , $i = \overline{1, n}$ и известно лишь время (T_Σ) работы детали.

Для решения данных задач в работе разработаны алгоритмы определения эквивалентного по повреждающему воздействию напряжения и эквивалентного по повреждающему воздействию чисел циклов деформирования.

В заключительном разделе главы рассмотрена расчетно-экспериментальная методика прогнозирования ресурса детали, подвергаемой в условиях эксплуатации воздействию случайного спектра внешней нагрузки, деформация от которой зафиксирована, например, с помощью электротензометрирования, то есть на момент решения задачи имеется выборка напряжений σ_i , $i = \overline{1, n}$. В тех случаях, когда непосредственное измерение деформаций затруднено (например, на трубопроводе), выборка σ_i определяется на

основе измерения косвенных параметров (давлений, температуры) и затем расчета действующих напряжений по аналитическим зависимостям.

Условия, при которых реализуется методика.

- Для материала детали построена кривая усталости (10), параметры и границы доверительных интервалов которой рассчитаны путем обработки результатов испытаний образцов до поломки в соответствии с построенными в главе 5 алгоритмами.
- Изготовлены ДДПЧ, для которых определена зависимость величины накопленных повреждений $D_x(x_g)$ в пределах рабочей части датчика.
- Нагружение детали в течение всего времени эксплуатации соответствует аддитивному случайному процессу
- Известно время (T_n) работы детали до наклейки ДДПЧ в места ее вероятного разрушения вследствие накопления усталостных повреждений.
- Известно время (T_g) эксплуатации детали с ДДПЧ, по окончании которой на датчике зафиксирована величина (x_g) смещения границы первых «темных пятен».

Конечным результатом расчетно-экспериментальной методики является прогнозирование остаточного ресурса (часов) детали с заданной вероятностью разрушения вследствие усталости.

Основные этапы разработанной расчетно-экспериментальной методики представлены на Рисунке 13.

Этап 1. По выборке $\sigma_{ai}, i = \overline{1, n}$ методами непараметрической статистики восстанавливают необходимую для дальнейших расчетов функцию плотности распределения напряжений $f_n(\sigma_a)$. Знание $f_n(\sigma_a)$ позволяет представить режим нагружения в виде конечного числа (m) ступеней блока, сумма относительной продолжительности ступеней которых $\sum_{i=1}^m t_j = 1$.

Этап 2. При зафиксированной после работы детали с ДДПЧ величине x_g на основе тарировочной зависимости для датчиков вычисляется поврежденность D_{x_g} , полученная им в процессе эксплуатации. Поскольку величины напряжений $\sigma_{aj}, j = \overline{1, m}$ ступеней блока и их относительные длительности $t_j, j = \overline{1, m}$ (Рисунок 13) известны, определяется эквивалентное число циклов (N_g) полученное деталью в процессе эксплуатации с ДДПЧ, которое позволяет рассчитать число циклов каждой ступени блока нагружения: $N_{gj} = N_g \cdot t_j, j = \overline{1, m}$.

Этап 3. При известной величине x_g и восстановленных параметрах блока нагружения (Рисунок 13), определяют напряжения σ_j , эквивалентные блоку нагружения.

Этап 4. Знание T_g и установленное значение N_g позволяют вычислить коэффициент $K_s = N_g / T_g$, имеющий размерность цикл/час, обеспечивающий приведение случайного режима нагружения детали к эквивалентному блочному, параметры которого идентифицированы до конкретных значений.

Этап 5. Имея σ_s и математическое описание кривой усталости, рассчитывают медианное значение числа циклов до поломки N_m и число циклов с заданной вероятностью не разрушения N_m^α .

Этап 6. Остаточный ресурс T_o детали (в часах) рассчитывается по зависимости: $T_o = N_m^\alpha / K_s - T_n - T_g$.

Особенность разработанной методики заключается в том, что на основе результатов испытаний образцов на долговечность при регулярном режиме нагружения (кривая усталости в виде функции $N = N(\sigma)$) определяется время эксплуатации (остаточный ресурс) с заданной вероятностью неразрушения изделия для условий его работы при случайном режиме нагружения, параметры которого восстанавливаются с использованием непараметрических методов статистики, а эквивалентные этому режиму по повреждающему воздействию числа циклов деформирования и напряжения определяются на основе обработки реакции ДДПЧ, при этом прогнозируемый остаточный ресурс изделия рассчитывается с учетом восстановленного методами непараметрической статистики фактического закона распределения чисел циклов до поломки образцов.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Предложена и доведена до алгоритмов и программной реализации методология оценки прочностной надежности деталей машин общепромышленного применения для условий их нерегулярного нагружения в эксплуатации. Методология основана на применении методов непараметрической статистики, поэтому позволяет учитывать любые законы нагружения детали, фактические функции распределения действующих и предельных напряжений. Для оценки вероятности отказа деталей сложной геометрической формы в рамках методологии разработан блок, основанный на применении конечно-элементного анализа в сочетании с планированием и реализацией численного эксперимента. На тестовых примерах расчета зубчатых передач показано, что при изменении режима их работы от легкого к тяжелому вероятность отказа по контактной прочности изменяется более чем на порядок (от 0,197% до 2,215%). Вероятность отказа подшипника качения 2207 по динамической грузоподъемности при переходе от легкого к тяжелому режиму нагружения с учетом фактического закона распределения коэффициента запаса изменяется от 3,874% до 14,017%, в то же время в необоснованном предположении нормального закона вероятность отказа изменяется от 0,812% до 44,953%. При учете фактических законов распределения коэффициента запаса прочности вала при переходе от легкого к тяжелому режиму работы вероятность отказа вала изменяется от 0,702% до 13,936%, а вероятность отказа в необоснованном предпо-

ложении нормального закона от 0,0% до 26,599%. В процессе верификации разработанной методологии на основе известных данных повреждения рамы тележки локомотива при среднем нормальном режиме нагружения, статистика отказов которых составила 10% , показано, что рассчитанная вероятность отказа рамы предложенным методом равна 9,44%, в то время как по двум ранее разработанным методам в результате расчетов получены значения 4,15% и 33%.

2. На основе построенных математических моделей и алгоритмов осуществлено развитие кинетической теории многоциклового усталости в части расчета параметров полуэмпирических моделей кривых усталости, определения путем компьютерного моделирования и применения методов непараметрической статистики функции плотности распределения предела выносливости. Предложен основанный на компьютерном моделировании алгоритм и его программная реализация, впервые позволивший реализовать процедуру расчета границ доверительных интервалов кривой усталости с учетом фактических законов распределения чисел циклов до разрушения образцов и оценить величину систематических ошибок, вносимых традиционно применяемым при расчете границ методом линейного регрессионного анализа. На примере обработки образцов из стали 50 показано, что использование традиционных методик обработки данных усталостных испытаний при расчете границ доверительного интервала приводит к систематическим ошибкам до 30% прогнозирования долговечности образцов с вероятностью разрушения 5%. Впервые на основе обработки результатов испытаний образцов на долговечность разработана математическая модель определения в рамках кинетической теории механической усталости исходной поврежденности материала образцов. Предложены математические модели и алгоритмы, обеспечивающие при известных параметрах блока изменения нагрузки при эксплуатации детали расчет накопленных усталостных повреждений в ее материале, определение эквивалентных по повреждающему воздействию напряжений, необходимых для прогнозирования долговечности детали на основе кривой усталости.

3. В развитие экспериментальных методов оценки нагруженности и долговечности деталей по показаниям ДДИТ:

- предложен новый способ количественной оценки реакции датчиков, исключая роль субъективного фактора и обеспечивающий более чем в три раза повышение точности измерений деформаций;
- предложена и обоснована оригинальная форма образцов, позволяющая для исследования сварных соединений по показаниям ДДИТ существенно упростить процедуру построения для них калибровочной зависимости;
- на основе данных конечно-элементного анализа напряженно-деформированного состояния деталей осуществлена верификация внешней реакции на ДДИТ, в результате которой установлено, что границы первых «темных пятен» на датчике соответствует картине распределений деформаций сжатия.

С помощью разработанных методов использования ДДИТ впервые получены данные о распределении напряжений и деформаций в основном материале, зоне термического влияния и на границе сплавления сварного образца, в вершине усталостной трещины; вскрыты особенности нагруженности зубьев колес передачи Новикова с двумя линиями зацепления.

Для датчиков деформаций с переменной чувствительностью (ДДПЧ), не имеющих инкубационного периода, позволяющих регистрировать реакцию в любой момент прерывания испытаний при существенно более простой процедуре ее фиксации, впервые разработано методическое и программное обеспечение включающее:

- математические модели, описывающие закон изменения поврежденности материала датчика по длине его рабочей части;
- аналитические зависимости и алгоритмы расчета по показаниям ДДПЧ величины накопленного повреждения детали при ее циклическом деформировании заданным блоком нагружения;
- математические модели и процедуры решения задач определения по реакции ДДПЧ эквивалентных чисел циклов нагружения и эквивалентного по повреждающему воздействию напряжения.

4. Применительно к условиям эксплуатационного нагружения деталей на основе применения аппарата непараметрической статистики, кинетической теории многоциклового усталости и ДДПЧ разработан расчетно-экспериментальный метод прогнозирования долговечности с заданной вероятностью неразрушения (90%...99%), позволяющий оценить остаточный ресурс детали во временном диапазоне, когда ее нагружение является аддитивным случайным процессом.

Основные работы, опубликованные по теме диссертации

Монографии:

1. Сызранцев, В.Н. Диагностика нагруженности и ресурса деталей трансмиссий и несущих систем машин по показаниям датчиков деформаций интегрального типа : Монография / В.Н. Сызранцев, С.Л. Голофаст, **К.В. Сызранцева**. – Новосибирск : Наука, 2004. – 188 с.
2. **Сызранцева, К.В.** Методика оценки надежности деталей сложной геометрической формы, подвергаемых в условиях эксплуатации воздействию случайных силовых и температурных деформаций. / К.В. Сызранцева, В.Н. Сызранцев, Я.П. Невелев, С.Л. Голофаст // Расчет прочностной надежности изделий на основе методов непараметрической статистики : Монография. – Новосибирск : Наука, 2008. – Гл. 4.5. – С. 174-188.
3. **Сызранцева, К.В.** Компьютерный анализ нагруженности и деформативности элементов нефтегазового оборудования : Монография / К.В. Сызранцева. – Тюмень : ТюмГНГУ, 2009. – 124 с.
4. **Сызранцева, К.В.** Расчет прочностной надежности деталей машин при случайном характере внешних нагрузок : Монография / К.В. Сызранцева. – Тюмень : ТюмГНГУ, 2011. – 92 с.
5. **Сызранцева, К.В.** Экспериментально-расчетный метод прогнозирования усталостной прочности трубопровода с коррозионными дефектами / К.В.

Сызранцева, В.Н. Сызранцев, В.В. Новоселов, П.М. Созонов, С.Л. Голофаст // Оценка безопасности и прочностной надежности магистральных трубопроводов методами непараметрической статистики : Монография. – Новосибирск : Наука, 2013. – Гл.7. – С. 146-167.

6. Сызранцев, В.Н. Обработка данных многоциклового испытания на основе кинетической теории усталости и методов непараметрической статистики : Монография / В.Н. Сызранцев, **К.В. Сызранцева**. – Тюмень : ТюмГНГУ, 2015. - 135 с.

Работы, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

7. Кузнецов, В.Г. Оценка напряженного состояния крепи арктических скважин при их промерзании / В.Г. Кузнецов, **К.В. Сызранцева**, А.В. Белобородов // Бурение и нефть. – 2004. – №1. – С 16-17.

8. Сызранцев, В.Н. Использование метода конечных элементов для расчета напряженно-деформированного состояния корпусных деталей клиновых задвижек / В.Н. Сызранцев, А.В. Белобородов, **К.В. Сызранцева** // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2007. – №4. – С. 38-43.

9. Сызранцев, В.Н. Определение предела выносливости трубной стали 17ГС по косвенным характеристикам / В.Н. Сызранцев, С.Л. Голофаст, Я.П. Невелев, **К.В. Сызранцева** // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2008. – №3. – С. 17-22.

10. **Сызранцева, К.В.** Непараметрический подход оценки прочностной надежности деталей сложной геометрической формы/ К.В. Сызранцева// Вестник Ижевского государственного технического университета.- 2008.- №4.- С. 26-29.

11. **Сызранцева, К.В.** Восстановление нагруженности деталей и металлоконструкций с применением датчиков деформаций интегрального типа / К.В. Сызранцева// Вестник Тюменского государственного университета.- 2008.- №6.- С. 4-9.

12. **Сызранцева, К.В.** Экспериментально-расчетный метод прогнозирования долговечности изделий в условиях эксплуатации / К.В. Сызранцева // Омский научный вестник. – 2009. – №2(80). – С. 97-101.

13. **Сызранцева, К.В.** Оценка надежности зубчатых передач по сопротивлению контактной усталости при случайном режиме нагружения / К.В. Сызранцева // Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2009. – №4. – С. 23-25.

14. **Сызранцева, К.В.** Анализ напряженно-деформированного состояния двигательной секции винтового забойного двигателя в программном комплексе ANSYS / К.В. Сызранцева, В.А. Аришин // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 315. – № 5. – С. 57-61.

15. **Сызранцева, К.В.** Компьютерное моделирование процесса гидравлических испытаний корпуса превентора / К.В. Сызранцева, Ю.И. Князев, Е.В. Сеньков // Вестник Тюменского государственного университета. – 2009. – №6. – С. 27-34.

16. Белобородов, А.В. Расчет вероятности отказов технологических трубопроводов по критерию прочности / А.В. Белобородов, **К.В. Сызранцева**, Д.Г. Нероденко // Нефтепромысловое дело. – 2009. – №7. – С. 52-56.

17. Голофаст, С.Л. Математическая модель кривой усталости для оценки долговечности элементов станка-качалки / С.Л. Голофаст, **К.В. Сызранцева**, Ю.С. Иванова// Известия высших учебных заведений. Нефть и газ.- 2010.- №6.- С. 92-94.

18. **Сызранцева, К.В.** Оценка вероятности безотказной работы гибкого вала винтового забойного двигателя методами непараметрической статистики / К.В. Сызранцева, В.А. Аришин // Вестник ЦКР Роснедра.-2011.- №2.- С.60-63.
19. **Сызранцева, К.В.** Оценка долговечности подшипников качения при случайном режиме их нагружения / К.В. Сызранцева, Л.А. Черная // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2011. – №12. – С.8-11.
20. Сызранцев, В.Н. Методика обработки данных малоцикловых испытаний гибких труб / В.Н. Сызранцев, **К.В. Сызранцева**, В.Н. Ильиных // Научно-технический вестник Поволжья. – 2013. – №2. – С. 228-232.
21. **Сызранцева, К.В.** Расчет, оптимизация и оценка надежности демпфирующего устройства осевых колебаний бурильной колонны / К.В. Сызранцева, В.А. Аришин // Научно-технический вестник Поволжья.- 2013.- №2.- С. 69-72.
22. **Сызранцева, К.В.** Оценка надежности валов по критерию усталостной прочности при случайном режиме нагружения / К.В. Сызранцева, Л.А. Черная // Известия высших учебных заведений. Машиностроение.- 2013. - №5. - С. 34-38.
23. Сызранцев, В.Н. Расчет эквивалентных по повреждающему воздействию напряжений / В.Н. Сызранцев, **К.В. Сызранцева**, Л.А. Черная // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2013. – №10. – С. 30-35.
24. Сызранцев, В.Н. Алгоритм расчета доверительных интервалов кривой малоциклового усталости / В.Н. Сызранцев, **К.В. Сызранцева**, В.Н. Ильиных // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 2 (часть 15). – С. 3289-3293.
25. **Сызранцева, К.В.** Расчет эквивалентных по повреждающему воздействию напряжений на основе кинетической теории многоциклового усталости / К.В. Сызранцева // Интеллектуальные системы в производстве.- 2016.- №4(31).- С.35-39.

Работы, опубликованные в журналах, включенных в международные системы цитирования (SCOPUS и Web of Sciences):

26. Syzrantsev, V. Contact load and endurance of cylindrical gearing with arch-shaped teeth / V. Syzrantsev, **К. Syzrantseva**, M. Varshavsky // ICMT'2001: proceedings of the International Conference on Mechanical Transmissions. – Chongqing, China, 2001. – Pp. 425-431.
27. **Syzrantseva, K.V.** Development of a method to calculate the strength reliability of tooth gears based on the fatigue resistance when the teeth bend / K.V. Syzrantseva // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2009. – Vol.38. – Iss.6 (200912). – Pp. 552-556. DOI: 10.3103/S1052618809060065.10.
28. **Syzrantseva, K.V.** Predicting the failure of gear transmissions by nonparametric statistics / K.V. Syzrantseva // Russian Engineering Research. – 2009. – Vol.29. – Iss.2. – Pp. 1206-1208. DOI: 10.3103/S1068798X09120028.
29. Нероденко, Д.Г. Расчет прочностной надежности элементов технологических трубопроводов методами непараметрической статистики / Д.Г. Нероденко, **К.В. Сызранцева** // Нефтяное хозяйство. – 2012. – №6. – С. 94-96.
30. Syzrantsev, V. N. Confidence limits for the few-cycle fatigue curve / V. N. Syzrantsev, **К. V. Syzrantseva**, V. N. Il'inykh, L. A. Chernaya // Russian Engineering Research. – 2016. – Vol. 36. – No. 1. – Pp. 20–24.
31. **Syzrantseva, K.V.** The stress-strain condition estimation of preventer body by finite element analysis / K.V.Syzrantseva // 16 th International Multidisciplinary

- Scientific Geoconference SGEM : conference proceedings. – Bulgaria, 2016. – Book 1. – Vol.3. – Pp.1003-1010. DOI: 10.5593/SGEM2016/B13/S06.127.
32. **Syzrantseva, K.** Load on multipair contact zones of operating parts of screw pumps and motors: A computer analysis / K. Syzrantseva, V. Syzrantsev // Procedia Engineering. – Vol. 150 (2016). – Pp. 768–774.
33. Syzrantsev, V. The stress-strain condition estimation of detail in crack tip by integral strain gauges / V. N. Syzrantsev, **K. V. Syzrantseva** // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 127. – 012051.
34. **Syzrantseva, K.** Reliability estimation of machine parts with complicated geometry on a base of methods of nonparametric statistics /K. Syzrantseva, V. Syzrantsev // Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2016. – Vol.11. – Iss.2. – Pp. 204-209. DOI: 0.3923/jeasci.2016.204.209.
35. **Syzrantseva, K.** Computer analysis of durability and leakproofness of multi-lateral junction of wells / K. Syzrantseva, M. Dvoynikov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 142. – 012118.
36. **Syzrantseva, K.** Optimization of the damping element of axial vibrations of the drilling string by computer simulation / K. Syzrantseva, V. Arishin, M. Dvoynikov // Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2016. – Vol. 11. – Iss. 10. – Pp: 2312-2315. DOI: 10.3923/jeasci.2016.2312.2315.
37. **Syzrantseva, K.** The application of finite element analysis during development of the Integral Strain Gauges calibration method for the study of the welded construction / K. Syzrantseva, V. Syzrantsev, M. Dvoynikov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 177. – 012133.
38. **Syzrantseva, K.** Determination of parameters of endurance limit distribution law of material by the methods of nonparametric statistics and kinetic theory of high-cycle fatigue / K. Syzrantseva, V. Syzrantsev // Key Engineering Materials. – 2017. – Vol. 736. – Pp. 52-57. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.736.52.
39. Сызранцев, В.Н. Определение напряжений и остаточного ресурса по показаниям датчика деформаций интегрального типа переменной чувствительности / В.Н. Сызранцев, **К.В. Сызранцева** // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – С.82-93.
40. Syzrantsev, V. Integral strain gauges application for gearing reliability estimation / V. Syzrantsev, **K. Syzrantseva** // Materials Science Forum. – 2017. – Vol. 906. – Pp. 44-49. DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.906.44
41. Syzrantsev, V. Determination of stresses in tooth roots of gears by Integral Strain Gauges /V. Syzrantsev, **K. Syzrantseva** //Advances in Engineering Research.- 2017.-Vol.133.- Pp. 841-846. DOI: 10.2991/aime-17.2017.136
42. **Syzrantseva, K.** Estimation of Novikov gearing loading capacity on a base of Integral Strain Gauges application / Ksenia Syzrantseva, Vladimir Syzrantsev // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 206. – Pp. 1081–1086.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

43. Расчет методами непараметрической статистики вероятности безотказной работы валов в условиях случайного процесса их нагружения : Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ / **Сызранцева К.В.** ; правообладатель ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет». – № 2018610392; заявл. 14.11.2017 ; опубл. 10.01.2018, Бюл. №1. – 1 с.

44. Расчет методами непараметрической статистики вероятности безотказной работы подшипников качения в условиях случайного процесса их нагружения : Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ / **Сызранцева К.В.** ; правообладатель ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет». – № 2018610395; заявл. 14.11.2017 ; опубл. 10.01.2018, Бюл. №1. – 1 с.

Работы, опубликованные в других изданиях:

45. Syzrantsev, V.N. Application of integral strain gauges for estimation of Novikoff's gearings serviceability / V.N. Syzrantsev, S.L. Golofast, **K.V. Syzrantseva** // Engineering Mechanics-1997: proceedings of national conference with international participation.- Svratka, Czech Republic, 1997.- Vol.1.- Pp.191-192.

46. Syzrantsev, V. The new means and methods of experimental research of cylindrical gearings / V.Syzrantsev, S. Golofast, **K. Syzrantseva** // Mechanics in Design MID-98: proceedings of International Conference. – Nottingham, UK: Nottingham Trent University, 1998. – Pp. 553-562.

47. Syzrantsev, V. Gearing serviceability diagnostic with the help of integral strain gauges / V.N. Syzrantsev, S.L. Golofast, **K.V. Syzrantseva** // 4-th World Congress on Gearing and Power Transmission: proceedings. – Paris, France, 1999. – Vol.2. – Pp. 1845-1850.

48. Syzrantsev, V. Contact load in cylindrical gearings / V. Syzrantsev, **K. Syzrantseva**, M. Varshavsky // Akademika dubnica-99 : proceedings of 5th International Conference. – Dubnica nad Vahom, Slovakia, 1999. – Pp. 167-171.

49. Благонравов, А.А. К расчету подшипников, работающих без корпуса / А.А. Благонравов, **К.В. Сызранцева** // Наука и технологии. Труды XXII Российской школы. – Москва: Российская академия наук, 2002. – С. 126-131.

50. Syzrantsev, V.N. Using Finite Element Analyzing for calculation of stress-strain conditions of wedge gate valves bodies / V.N. Syzrantsev, **K.V. Syzrantseva**, A.V. Beloborodov // Engineering Mechanics 2003: book of extended abstracts of National conference with international participation. – Prague, Czech Republic, 2003. – Pp. 324-325.

51. Сызранцев, В.Н. Гистограммный метод обработки цифровой информации с датчиков деформаций интегрального типа / В.Н. Сызранцев, **К.В. Сызранцева**, А.А. Гаврилов // Trans&motoauto'04: proceedings of the International Conference. – Bulgaria, Plovdiv, 2004. – Pp.67-70.

52. **Сызранцева, К.В.** Расчет подшипников качения, работающих без корпуса / К.В. Сызранцева // Инженерно-технический журнал "Ansys Solutions. Русская редакция". – 2006. – №2. – С. 10-13.

53. Syzrantsev, V. Nonparametric approach to the durability estimation task of details with complicated geometry / V. Syzrantsev, **K. Syzrantseva** // Monograph "MACHINE DESIGN 2008".-Novy Sad, Republic of Serbia, 2008. - Pp. 139-144.

54.**Сызранцева, К.В.** Применение комплекса ANSYS для расшифровки показаний датчиков деформаций интегрального типа / К.В. Сызранцева // Теория и практика зубчатых передач и редукторостроения: сб. докл. науч.-техн.конф. с межд. участием. – Ижевск, 2008. – С. 364-368.

55. Сызранцев, В.Н. Определение эквивалентного числа циклов нагружения трубопровода в условиях эксплуатации / В.Н. Сызранцев, **К.В. Сызранцева**, С.Л. Голофаст, П.А. Обакшин // Безопасность критических инфраструктур и

территорий: Сборник трудов I и II Всероссийской конференции и XI и XII Школ молодых ученых. – Екатеринбург: УрО РАН, 2009. – С. 223-229.

56. **Сызранцева, К.В.** Оценка параметров разрушения стальной пластины с боковой наклонной трещиной / К.В. Сызранцева, С.А. Сигитов // Современные технологии для ТЭК Западной Сибири: сб.науч.тр. - Тюмень: Типография "Печатник", 2011. – С. 225-229.

57. Syzrantsev, V.N. Calculation of the strength reliability of parts under random loading / V. N. Syzrantsev , **K.V. Syzrantseva**, L. A. Chernaya // Global Journal of Researches in Engineering: G Industrial Engineering. USA. – 2014. – Vol. 14. – Iss. 5. – Pp. 11-17.