

На правах рукописи



Лебедев Сергей Юрьевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ПРОЧНОСТНОЙ  
НАДЕЖНОСТИ ПОВЕРХНОСТНО-УПРОЧНЕННЫХ КОЛЕС  
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПЕРЕДАЧ**

Специальность 2.5.2 – «Машиноведение»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Челябинск

2023

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

**Научный руководитель – Сызранцев Владимир Николаевич**, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, заведующий кафедрой «Машины и оборудование нефтяной и газовой промышленности» ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет» (ТИУ), г. Тюмень.

**Официальные  
оппоненты:**

**Нахатакян Филарет Гургенович**, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник ФГБУН Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН), г. Москва.

**Курасов Дмитрий Алексеевич**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Фундаментальная математика и механика» ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет», г. Тюмень.

**Ведущая организация – ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова»**, г. Ижевск.

Защита состоится «27» сентября 2023 г., в 13:00 часов, на заседании диссертационного совета 24.2.437.09 при ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)» по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ауд. 1001. Тел/факс (351) 267-91-23, e-mail: D212.298.09.@mail.ru

С авторефератом и диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Южно-Уральского государственного университета и на его официальном сайте: <https://www.susu.ru/ru/dissertation/d-21229809/lebedev-sergey-yurevich>

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, на имя ученого секретаря диссертационного совета 24.2.437.09. e-mail: D212.298.09@mail.ru

Автореферат разослан «\_\_» «\_\_\_\_\_» 202\_\_ г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 24.2.437.09  
доктор технических наук, доцент



Абызов А. А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Зубчатые цилиндрические передачи являются неотъемлемой частью современных технических систем: главная передача электромобиля, верхний привод буровой установки, привод механизма судоподъемника и т.д. Отказ зубчатой передачи может повлечь выход из строя всей технической системы или снизить ее ресурс, привести к отказу других элементов системы, создать аварийную ситуацию. Вероятностная оценка надежности зубчатых передач с учетом фактических условий их нагруженности в процессе эксплуатации является важной научной и практической задачей. В настоящее время вероятность безотказной работы зубчатой передачи оценивается по различным типам отказов. Так для поверхностно-упрочненных передач возможными отказами в процессе эксплуатации будут являться не только потеря контактной или изгибной прочности, но и отслаивание закаленного поверхностного слоя, вызванного потерей глубинной контактной прочности (единичный случай глубинного контактного выкрашивания может снизить ресурс передачи до 70 %).

**Степень разработанности.** Исследованиям прочностной надежности деталей машин посвящены работы В.В. Болотина, В.П. Когаева, Н.А. Махутова, Е.К. Почтенного, Д.Н. Решетова, С.В. Серенсена, Г.А. Снесарева, В.Н. Сызранцева, К.В. Сызранцевой, С.А. Тимашева, И.С. Цитовича, О.Ф. Чернявского, А.О. Чернявского, J. Collins, E.V. Naugen, K.C. Kapur, L.R. Lamberson. Анализ научно-технической литературы показал, что применение на практике вероятностных методов расчета прочностной надежности поверхностно-упрочненных колес сводится к расчету вероятности безотказной работы по критериям контактной и изгибной выносливости, при этом функции плотности распределения действующих и допускаемых напряжений представлены нормальным распределением или распределением Вейбулла. Авторы разработанных методик сами отмечают условность такого подхода, но в рамках используемого в методиках аппарата параметрической статистики учесть особенности функции

плотности распределения действующих и допускаемых напряжений не представляется возможным. Однако, применение в исследованиях А.В. Белобородова, С.Л. Голофаста, Д.Г. Нероденко, В.Н. Пермякова, В.Н. Сызранцева, К.В. Сызранцевой методов непараметрической статистики при оценке надежности деталей машин и элементов трубопроводов позволило устранить недостатки, присущие методам параметрической статистики. Кроме того, в известных методиках не учитываются важные факторы, влияющие на работоспособность передач: случайный характер угла перекося валов передачи, статистическое различие в характеристиках материалов, изменение параметров упрочнения шестерни и колеса.

Исследования по оценке работоспособности передач по критерию глубинной контактной прочности представлены в работах О. Lang, М. MaskAldener, Р. Р. Гальпера, Е. И. Тескера, В. И. Короткина и его учеников, С. П. Руденко и др. При этом большинство методик направлены на расчет ресурса передачи по данному критерию. Методики расчета вероятности безотказной работы по критерию глубинной контактной выносливости зубьев в процессе анализа научно-технической литературы не обнаружены.

**Цель работы** заключается в совершенствовании вероятностных методов расчета прочностной надежности цилиндрических передач с поверхностно-упрочненными зубьями колес, что позволит на этапе проектирования передач выявить возможные причины их отказа в заданных условиях эксплуатации.

**Задачи исследования:**

1. Совершенствование методики расчета вероятности безотказной работы зубчатых колес по критерию контактной выносливости, с учетом случайного закона внешней нагрузки независимо от его сложности, а также случайного характера угла перекося в зацеплении, вызванного деформацией элементов передачи при эксплуатации.

2. Совершенствование методики расчета вероятности безотказной работы зубчатых колес по критерию изгибной выносливости зубьев, с

учетом случайного характера внешней нагрузки и параметров упрочненных слоев зубьев колес.

3. Разработка методики расчета вероятности безотказной работы зубчатых колес по критерию глубинной контактной выносливости поверхности зуба шестерни и поверхности зуба колеса.

4. Верификация усовершенствованного подхода к расчету вероятности безотказной работы цилиндрических передач с поверхностно-упрочненными зубьями на основе известных данных отказов передач.

**Объект исследования** – надежность цилиндрических передач с поверхностно-упрочненными зубьями колеса и шестерни.

**Предмет исследования** – методы оценки вероятности безотказной работы цилиндрических передач с поверхностно-упрочненными зубьями в условиях, когда действующие и допускаемые напряжения известными законами случайных величин не описываются.

**Научная новизна:**

1. Предложено оценивать надежность поверхностно-упрочненной цилиндрической зубчатой передачи не только по критериям, определяющим вероятность отказа передачи вследствие поломки зуба шестерни и зуба колеса и потери контактной прочности поверхности зуба шестерни и зуба колеса, но и по критериям, определяющим вероятность отказа передачи вследствие потери глубинной контактной прочности поверхности зуба шестерни и зуба колеса. Учет шести критериев позволяет при проектировании передачи определить наиболее вероятную причину отказа.

2. При расчете функции плотности распределения действующих контактных и изгибных напряжений, помимо распределения крутящего момента по законам случайных величин, учтен случайный характер коэффициентов концентрации контактных и изгибных напряжений, связанных с перекосом зубьев в зацеплении, являющимся композицией двух случайных величин: технологического угла перекоса и угла перекоса, вызванного деформацией элементов передачи (силового перекоса).

3. Впервые предложена методика расчета вероятности безотказной работы поверхностно-упрочненных колес цилиндрических передач по критерию глубинной контактной выносливости, позволяющая выполнять расчет независимо от сложности закона распределения действующих в зацеплении зубьев контактных напряжений и учитывающая функции плотности распределения по глубине упрочненного слоя действующих и допускаемых глубинных контактных напряжений.

#### **Практическая значимость работы.**

1. Возможность вероятностного определения причины выхода передачи из строя по шести критериям (питтинг шестерни, питтинг колеса, поломка зуба шестерни, поломка зуба колеса, отслаивание упрочненного слоя зуба шестерни, отслаивание упрочненного слоя зуба колеса) позволяет корректировать конструкцию, технологию изготовления, требования к эксплуатации с целью обеспечения требуемой работоспособности передачи при её проектировании.

2. Вероятностная оценка надежности поверхностно-упрочненной передачи по критерию глубинной контактной выносливости позволяет для выбранной химико-термической обработки на этапе проектирования передачи определить параметры упрочненного слоя, обеспечивающие равнопрочность поверхности зуба колеса и шестерни по этому критерию работоспособности передачи.

3. Созданные методики реализованы в едином программном комплексе «Проверочный расчет цилиндрических передач» (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, № 2022660757), используемом в учебном процессе кафедры «Машины и оборудование нефтяной и газовой промышленности» Тюменского индустриального университета. Методики расчета вероятности отказа передач по различным критериям использованы при оценке прочностной надежности передач приводов машин на предприятии.

**Методология и методы исследования.** Методологическими и теоретическими основами исследования являются общенаучные методы

(анализ, синтез, сравнение), концептуальные положения теории вероятности, теория параметрической и непараметрической математической статистики, кинетическая теория усталости металлов, теория зубчатых зацеплений.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Подход к расчету вероятности безотказной работы цилиндрических передач с поверхностно-упрочненными зубьями шестерни и колеса.

2. Методическое и программное обеспечение расчета вероятности безотказной работы по критерию глубинной контактной выносливости поверхности зуба шестерни и поверхности зуба колеса.

3. Верификация усовершенствованного подхода к расчету вероятности безотказной работы поверхностно-упрочненных колес зубчатых передач.

**Достоверность научных результатов** исследования подтверждена применением фундаментальных положений теоретической механики, сопротивления материалов, теории зубчатых зацеплений, а также сопоставлением результатов расчетов с доступными экспериментальными данными и данными по эксплуатации поверхностно-упрочненных зубчатых цилиндрических передач.

**Апробация.** Основные положения диссертации доложены и обсуждены на конференциях: 7 декабря 2021 г. – Всероссийская (национальная) научно-практ. конф. «Проблемы функционирования систем транспорта», ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, Россия; 18 мая 2022 г. – Межд. научно-практ. конф. «Новые технологии - нефтегазовому региону» «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, Россия; 16-20 мая 2022 г. – XVI Межд. конф. «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций» памяти академика Э. С. Горкунова, ФГБУН Институт машиноведения им. Э. С. Горкунова Уральского отделения РАН, Екатеринбург, Россия; 17-18 ноября 2022 г. – Межд. научно-практ. конф. «Научная территория: технологии и инновации» Тюменский индустриальный университет», Тюмень, Россия; 28-29 апреля 2023 г. – Всероссийская научно-техн. конф. «Автомобилестроение: проектирование,

конструирование, расчет и технологии ремонта и производства», Ижевск, Россия.

Разработанные методики применены в рамках обратного инжиниринга для проектирования и конструкторско-технологической отработки колес экспериментальных цилиндрических передач различных образцов техники на предприятии ООО Фирма «СТЭК», использованы в учебном процессе подготовки студентов направления «Нефтегазовое дело» в Тюменском индустриальном университете.

**Публикации.** Материалы исследования опубликованы в 8 печатных работах (3 – в журнале из перечня рецензируемых научных изданий ВАК РФ, из них 1 без соавторов; 1 – в изданиях, индексируемых в базе цитирования Scopus). Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Проверочный расчет цилиндрических передач» № 2022660757.

**Объем и структура диссертации.** Диссертация изложена на 157 страницах машинописного текста, состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы и 6-и приложений (А–Е). Основная часть диссертации содержит 49 рисунков, 15 таблиц. Список литературы состоит из 111 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Введение** содержит обоснование актуальности диссертационного исследования, цель и задачи исследования, научную новизну и практическую значимость, обоснование достоверности научных результатов исследования, апробацию и структуру диссертации.

**В первой главе** рассмотрены критерии работоспособности, по которым в настоящее время оценивается надежность зубчатых передач. Для поверхностно-упрочненных зубчатых цилиндрических передач обоснована вероятностная оценка надежности по следующим прочностным критериям: питтинг зуба шестерни или колеса, усталостная поломка зуба шестерни или колеса, отслаивание упрочненного слоя зуба шестерни или колеса.

Отмечается, что при вероятностной оценке прочностной надежности закон распределения случайных величин действующих и допускаемых напряжений может иметь различную форму. Например, для ветрогенератора гистограмма крутящего момента соответствует бимодальной функции плотности распределения (Рисунок 1).

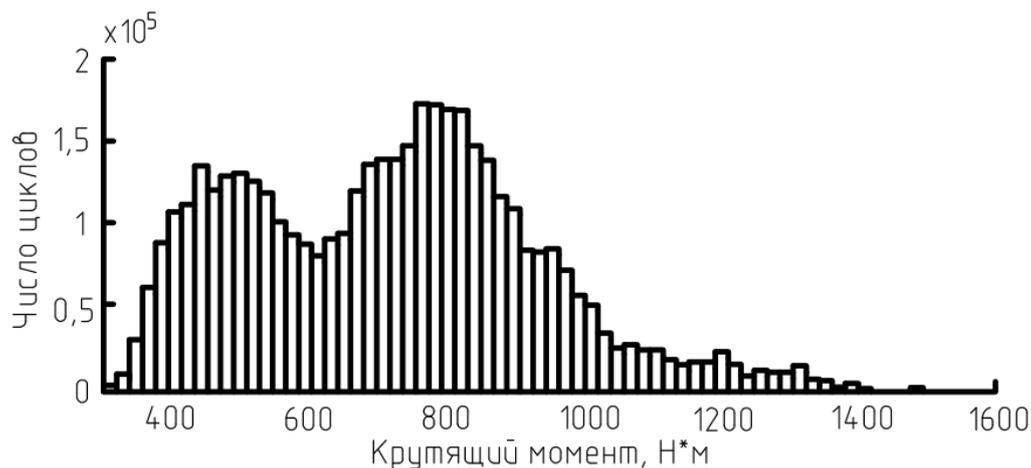


Рисунок 1 – Гистограмма крутящего момента на входном валу привода ветрогенератора

Для решения проблемы определения функции плотности распределения случайных величин в диссертационном исследовании решено применить методы непараметрической статистики (метод Парзена-Розенблатта).

**Вторая глава** направлена на совершенствование методики расчета вероятности безотказной работы поверхностно-упрочненных цилиндрических передач по критерию контактной выносливости (питтинг зуба). Для выполнения этой задачи проанализированы расчетные формулы существующих стандартизированных методик расчета (ГОСТ 21354, ISO 6336, ANSI/AGMA 2101-D04) действующих и допускаемых контактных напряжений в зубчатом зацеплении цилиндрических эвольвентных передач. Отмечается, что главным отличием методик является определение коэффициента концентрации нагрузки, который является произведением нескольких коэффициентов, учитывающих особенности контакта зубьев передачи в зацеплении.

Кроме того, при расчете коэффициента, учитывающего неравномерность распределения нагрузки по длине контактных линий (методики ГОСТ

21354-87 и ISO 6336-1), отклонение положения контактных линий вследствие упругой деформации валов и корпуса передачи и зазора в подшипниках (силовой перекося) задается константой, что не совсем соответствует действительности, т.к. упругая деформация элементов передачи зависит от величины передаваемой нагрузки, которая имеет переменный характер.

В результате была усовершенствована методика расчета вероятности безотказной работы поверхностно-упрочненных зубчатых колес по критерию контактной выносливости. Отличительными особенностями методики являются:

- расчет вероятности безотказной работы выполняется отдельно для шестерни и колеса;
- методика позволяет рассчитать вероятности безотказной работы независимо от сложности функции плотности распределения действующих и допускаемых контактных напряжений;
- силовой перекося в зацеплении является выборкой значений, имеющей функциональную связь с выборкой крутящего момента.

**Третья глава** направлена на совершенствование методики расчета вероятности безотказной работы поверхностно-упрочненных цилиндрических передач по критерию изгибной выносливости (поломка зуба). Для выполнения этой задачи проанализированы расчетные формулы существующих стандартизированных методик расчета (ГОСТ 21354-87, ISO 6336, ANSI/AGMA 2101-D04, P.007-2004) действующих и допускаемых изгибных напряжений в зубчатом зацеплении цилиндрических прямозубых и косозубых эвольвентных передач.

Отмечается, что параметры упрочненного слоя будут влиять на предел изгибной выносливости зуба, т.к. от этих параметров зависит упругопластические характеристики зуба. В стандартизированных методиках расчета даются рекомендации по выбору толщины упрочненного слоя, для которых и получены пределы изгибной выносливости зубьев. Но если параметры упрочнения не соответствуют стандарту, значения

пределов изгибной выносливости представляются не корректными. Поэтому при совершенствовании методики расчета вероятности безотказной работы по критерию изгибной выносливости поверхностно-упрочненных колес использованы расчетные формулы для определения изгибной выносливости зуба, учитывающие параметры поверхностного упрочнения.

Кроме того, выявлено, что стандартизированные методики дают противоречивые результаты. Поэтому для проверки корректности расчетных формул выполнено сравнение результатов расчетов с доступными экспериментальными данными по стандартизированным методикам с применением формул определения изгибной выносливости зуба, учитывающих параметры поверхностного упрочнения (Рисунок 2). Наиболее точные результаты расчетов продемонстрировали методики ГОСТ 21354-87 и ANSI/AGMA 2101-D04.

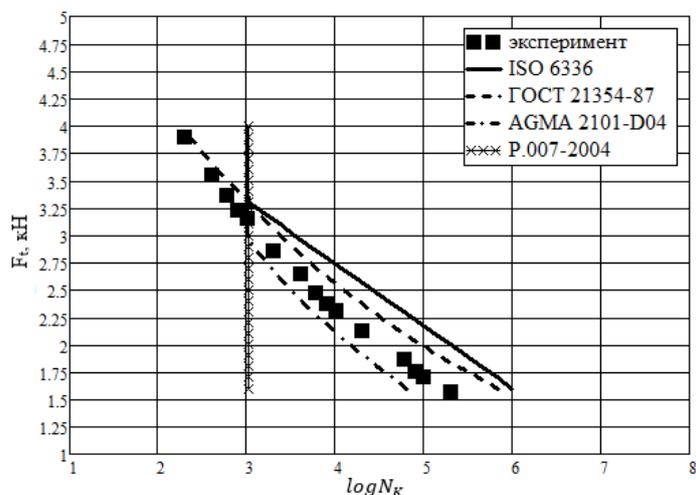


Рисунок 2 – Расчетные и экспериментальные числа циклов до поломки зуба передачи

В результате, была усовершенствована методика расчета вероятности безотказной работы поверхностно-упрочненных зубчатых колес цилиндрических передач по критерию изгибной выносливости. Отличительные особенности усовершенствованной методики:

- предел изгибной выносливости зубьев рассчитывается с учетом параметров упрочненного слоя;

- расчет действующих и допускаемых изгибных напряжений ведется по шестерне и колесу;
- силовой перекося в зацеплении является выборкой значений, имеющей функциональную связь с выборкой крутящего момента;
- методика позволяет рассчитать вероятности безотказной работы на основе функций плотности распределения действующих и допускаемых изгибных напряжений, восстановленных методами непараметрической статистики.

В четвертой главе осуществлена разработка методики расчета вероятности безотказной работы поверхностно-упрочненных зубчатых цилиндрических передач по критерию глубинной контактной выносливости (отслаивание упрочненного слоя). Для решения этой задачи выполнен анализ существующих методик оценки прочности зубчатых передач по глубинным контактным разрушениям. В результате были определены основные теоретические направления: теория Геста-Мора, критерий ДангВана, критерий Лебедева-Писаренко, методика ISO 6336-4.

Выявлено, что методики применяют различные уравнения изменения твердости по глубине упрочненного слоя при различной химико-термической обработке. Для выбора уравнений в разработанной методике была выполнена оценка точности функций твердости (Рисунок 3 и 4).

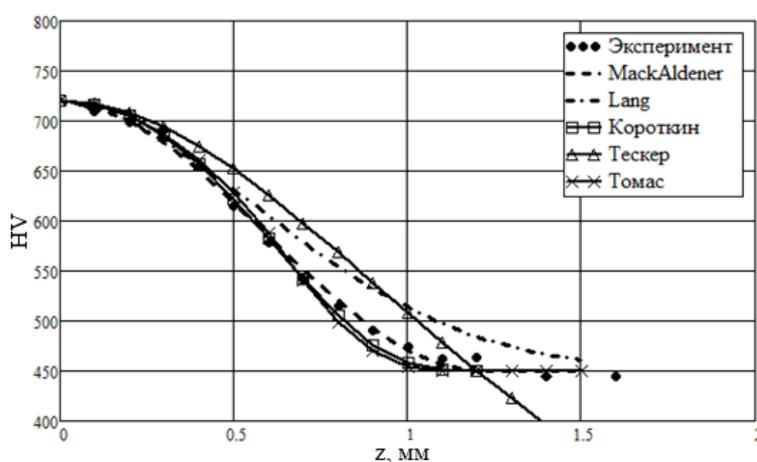


Рисунок 3 – Аппроксимация функциями твердости экспериментальных данных твердости цементованного слоя

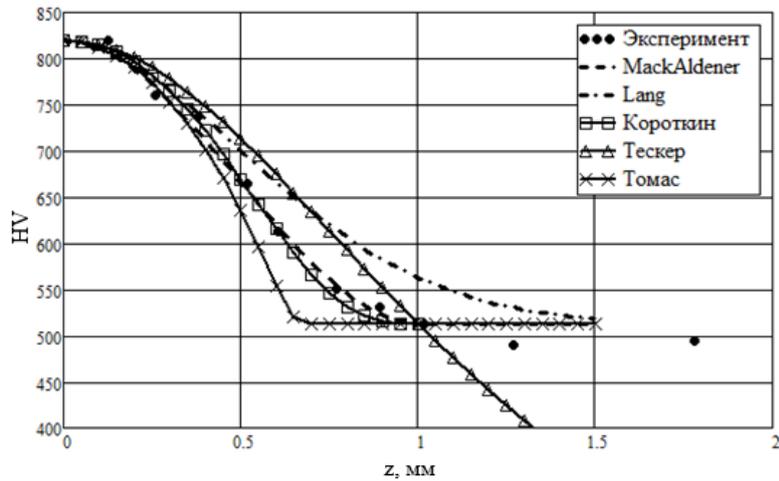


Рисунок 4 – Аппроксимация функциями твердости экспериментальных данных твердости нитроцементованного слоя

В разработанной методике приняты уравнения твердости: для цементованных зубьев – уравнение М. МакАлденера (погрешность не более 1,1%), для нитроцементованных зубьев – уравнение В. И. Короткина (погрешность не более 2,3%).

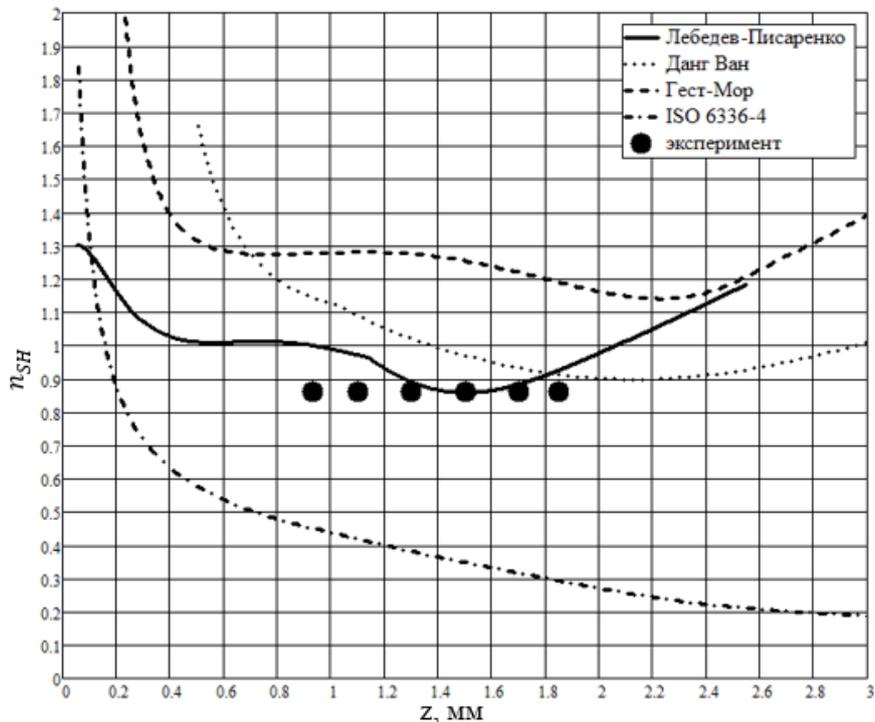


Рисунок 5 – Расчет коэффициента запаса прочности по глубинным контактным напряжениям для цементованного ролика

В виду того, что методики расчета прочности зубчатых передач по глубинным контактным разрушениям имеют значительные различия, была

выполнена верификация методик расчета запаса прочности по глубинным контактным напряжениям по доступным экспериментальным данным (Рисунок 5).

Наиболее корректные результаты демонстрируют методики, основанные на критерии ДангВана и критерии Лебедева-Писаренко. Для разработанной методики расчета вероятности безотказной работы использованы расчетные формулы, основанные на критерии Лебедева-Писаренко, разработанные В.И. Короткиным и его учениками.

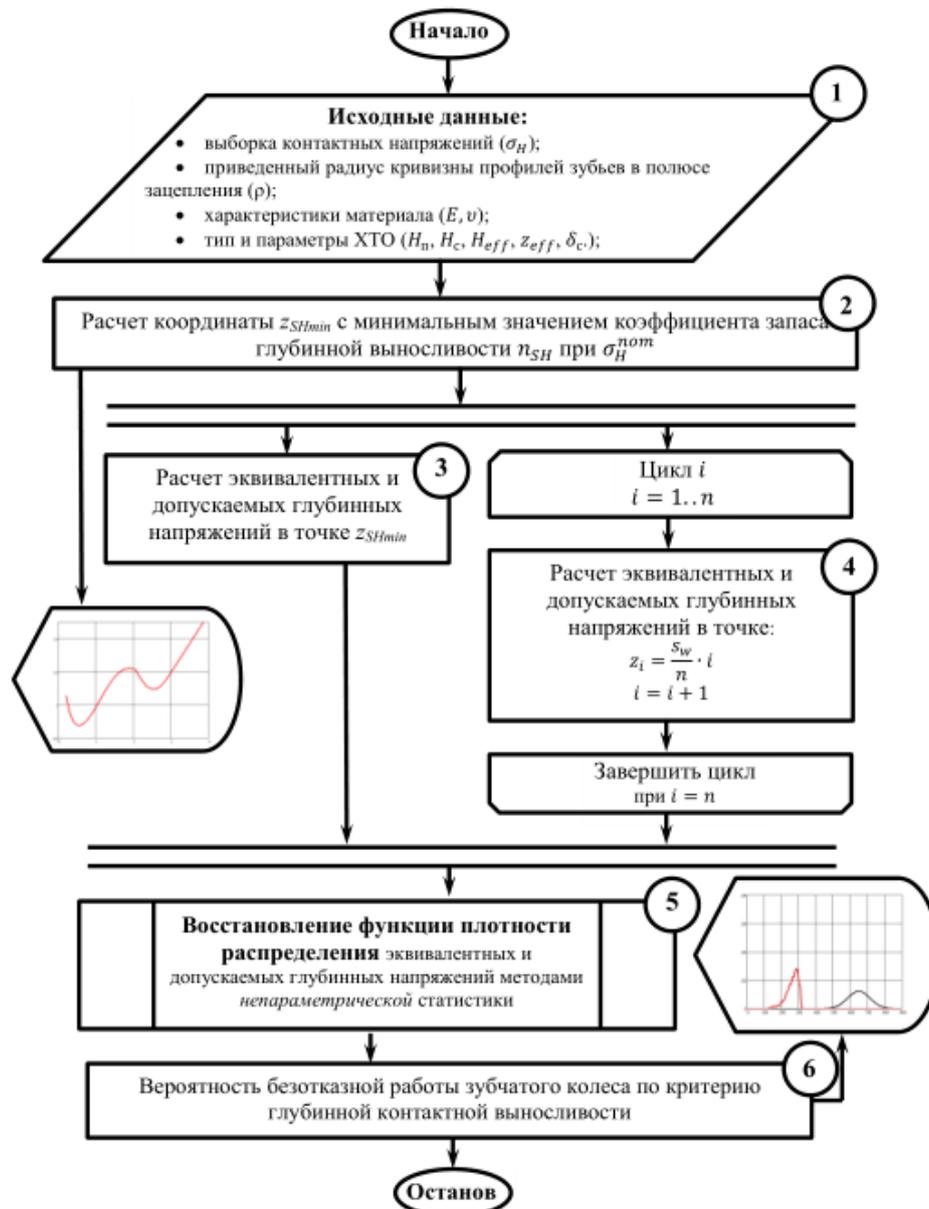


Рисунок 6 – Методика расчета для определения вероятности безотказной работы по критерию глубинной контактной выносливости

В результате была разработана методика расчета вероятности безотказной работы поверхностно-упрочненных зубчатых цилиндрических передач по критерию глубинной контактной выносливости (Рисунок 6).

Методика предусматривает расчет вероятности безотказной работы (методами непараметрической статистики) для координаты  $z_{SHmin}$  с минимальным запасом прочности при номинальном контактном напряжении, и для дискретных значений  $z_i$  по глубине зуба. За вероятность безотказной работы принимается минимальное значение вероятности безотказной работы среди рассчитанных по глубине зуба. Расчет выполняется по шестерни и колесу.

Выполненные тестовые расчеты по разработанной методике позволили выявить тот факт, что глубинная контактная выносливость может являться лимитирующим фактором работоспособности зубчатой передачи.

**В пятой главе** осуществлена верификация усовершенствованного подхода к расчету вероятности безотказной работы поверхностно-упрочненных колес зубчатых передач. Верификация основана на следующем предположении: результаты расчетов покажут наиболее вероятным тот отказ передачи, который наблюдается на практике. Чтобы верификация подхода была всесторонней, расчет выполнен для трех поверхностно-упрочненных передач, у каждой из которых наблюдается один из отказов: усталостная поломка зуба, питтинг и отслаивание упрочненного слоя.

В диссертационном исследовании А. А. Лобачева «Исследование нагруженности элементов редуктора системы верхнего привода» выявлено, что поломка нитроцементованного зуба (в 18 из 20 исследуемых редукторов отказ по усталостной поломке зуба, остальные два отказ из-за среза зуба) – причина отказа редуктора ПВГ-2000Р системы верхнего привода буровой установки. Также в исследовании было установлено, что редуктор эксплуатируется при тяжелом режиме нагружения.

Результаты расчетов зубчатой передачи редуктора ПВГ-2000Р по усовершенствованному подходу показывают (Рисунок 7), что наиболее

вероятным отказом является усталостная поломка зуба колеса (85,013%), что соответствует опытным данным.

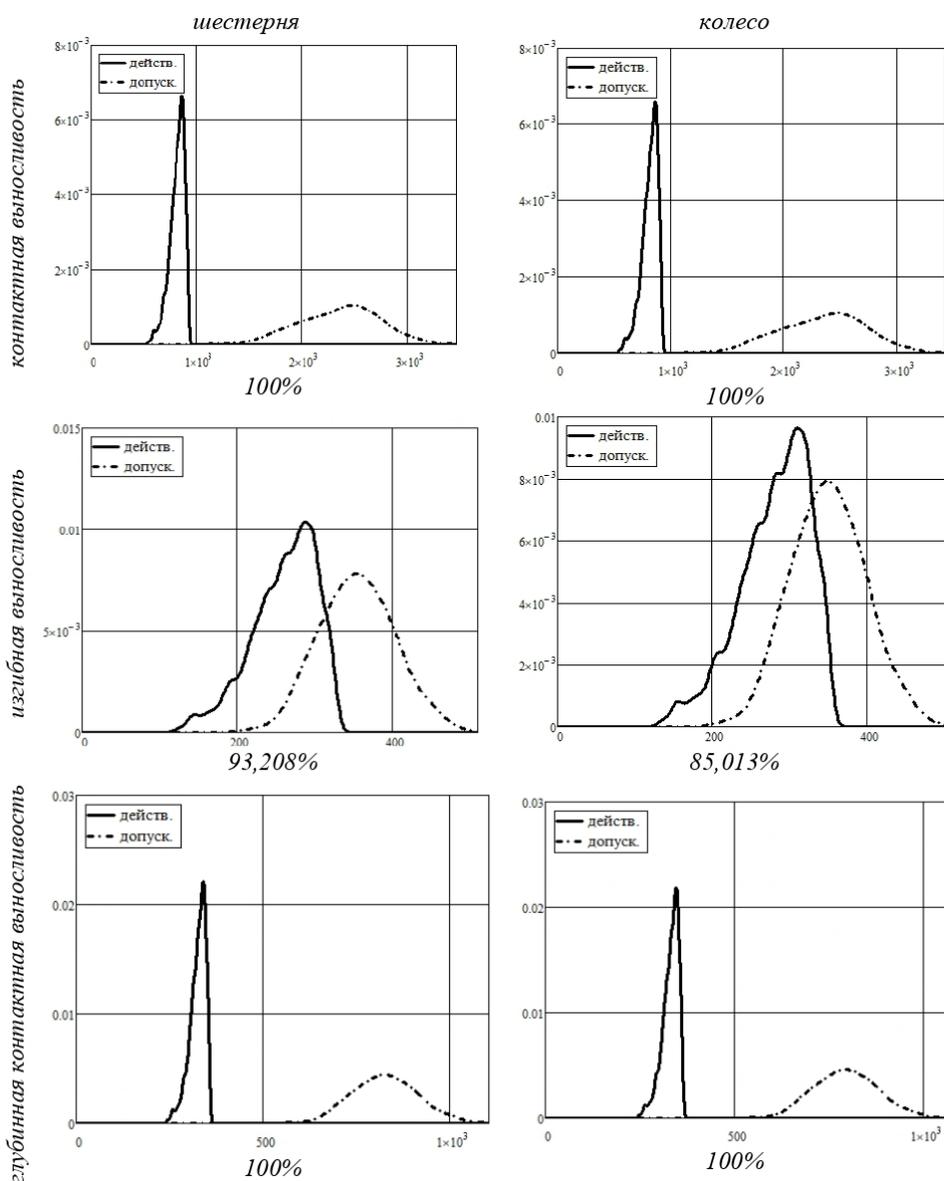


Рисунок 7 – Результаты расчетов передачи редуктора ПВГ-2000Р

На рисунке 8 представлен расчет вероятности безотказной работы по критерию изгибной выносливости для этой же передачи, но по классическому подходу (функции плотности распределения представлены нормальным распределением) при различных вариантах силового перекоса в зацеплении.

Если не учитывать силовой перекос (Рисунок 8а), вероятность безотказной работы колеса составляет 97,0%. При постоянном значении силового перекоса в 10 мкм (Рисунок 8б) передача становится не пригодной

для эксплуатации в заданных условиях. Переменное значение силового перекоса (Рисунок 8в), функционально связанное с передаваемым крутящим моментом, повышает вероятность безотказной работы колес более чем на 25%. Полученные результаты подтверждают необходимость корректного учета силового перекоса в зацеплении.

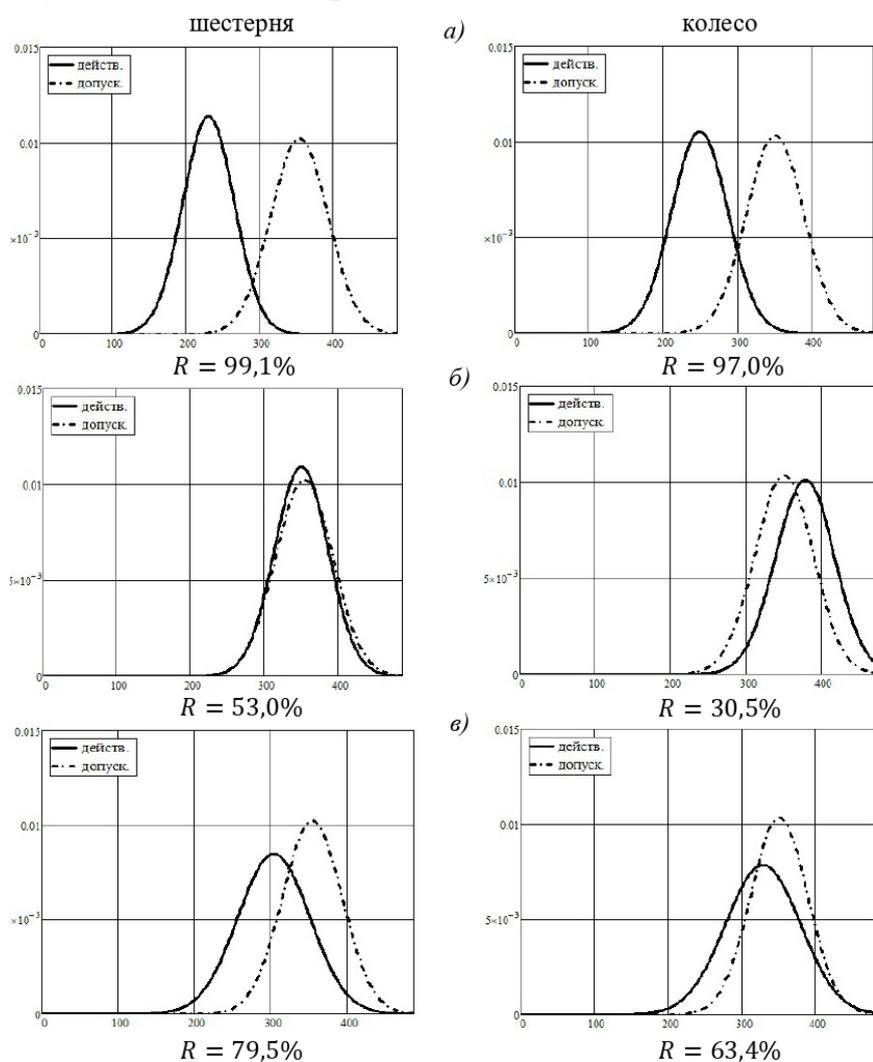


Рисунок 8 – Расчет вероятности безотказной работы зубчатой цилиндрической передачи по критерию изгибной выносливости (классический подход):

а) силовой перекос 0 мкм; б) силовой перекос 10 мкм; в) силовой перекос – выборка значений

В диссертационном исследовании М. Ю. Большаковой «Исследование влияния состава и структуры упрочненного поверхностного слоя на долговечность тяжело нагруженных зубчатых колес» указано, что у

цементованных зубчатых передач редуктора механизма хода ЭКГ-5А наблюдается обширный питтинг уже через три месяца эксплуатации.

Результаты расчетов (закон нагружения был принят как для карьерных машин) передачи редуктора механизма хода экскаватора ЭКГ-5А по усовершенствованному подходу показывают (Рисунок 9), что наиболее вероятным отказом является питтинг шестерни (85,525%), что соответствует опытным данным.

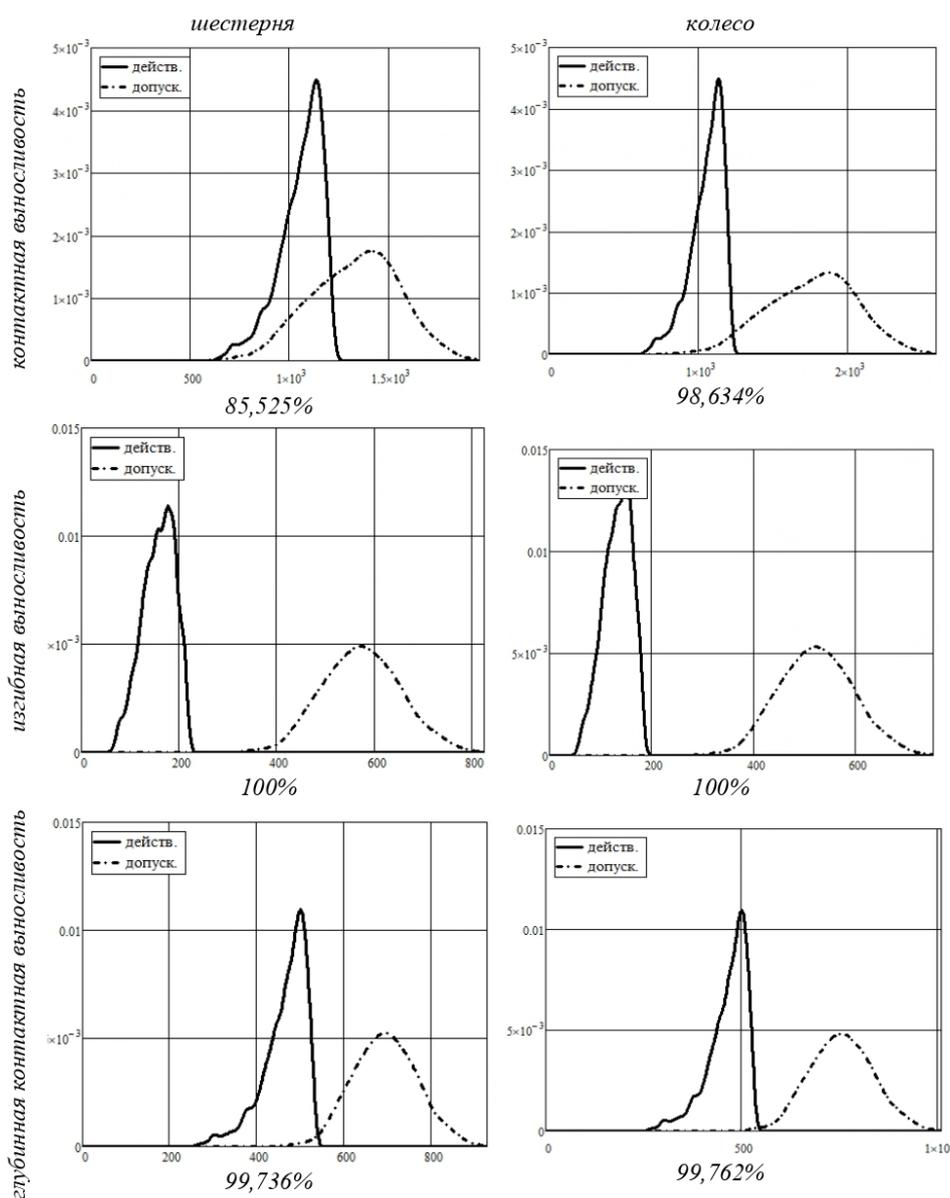


Рисунок 9 – Результаты расчетов 2-й ступени редуктора механизма хода ЭКГ-5А

На рисунке 10 представлен расчет вероятности безотказной работы по критерию контактной выносливости для этой же передачи, но по классическому подходу (функция плотности допускаемых контактных напряжений задается при среднем значении твердости рабочих поверхностей шестерни и колеса). Как видно из результатов (Рисунок 10), при расчете передачи по классическому подходу вероятность отказа по критерию контактной выносливости практически отсутствует, что также подтверждает необходимость совершенствования существующей методики.

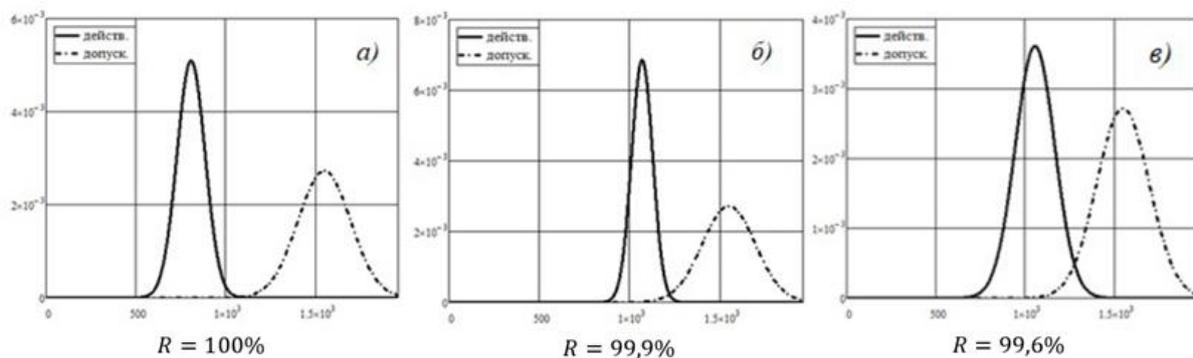


Рисунок 10 – Расчет вероятности безотказной работы зубчатой цилиндрической передачи по критерию контактной выносливости (классический подход):

а) силовой перекоп 0 мкм; б) силовой перекоп 38 мкм; в) о силовой перекоп – выборка значений

В статье Н. И. Зубарева и М. П. Игдалова «Оптимизация качественных параметров зацепления зубчатой передачи» обсуждается проблема отслаивания нитроцементованного слоя зуба зубчатой пары, передающей крутящий момент от грузового к раздаточному валу в коробке передач трактора К-700. Отслаивание упрочненного слоя возникало при ускоренных стендовых испытаниях (равновероятный режим нагружения) коробки передач с замкнутым электрическим контуром в среднем после 192 часов.

Результаты расчетов передачи коробки передач трактора К-700 (Рисунок 11) показывают, что наиболее вероятным является отказ вследствие глубинного усталостного разрушения шестерни (72,500%) и колеса (81,660%), что соответствует стендовым испытаниям.

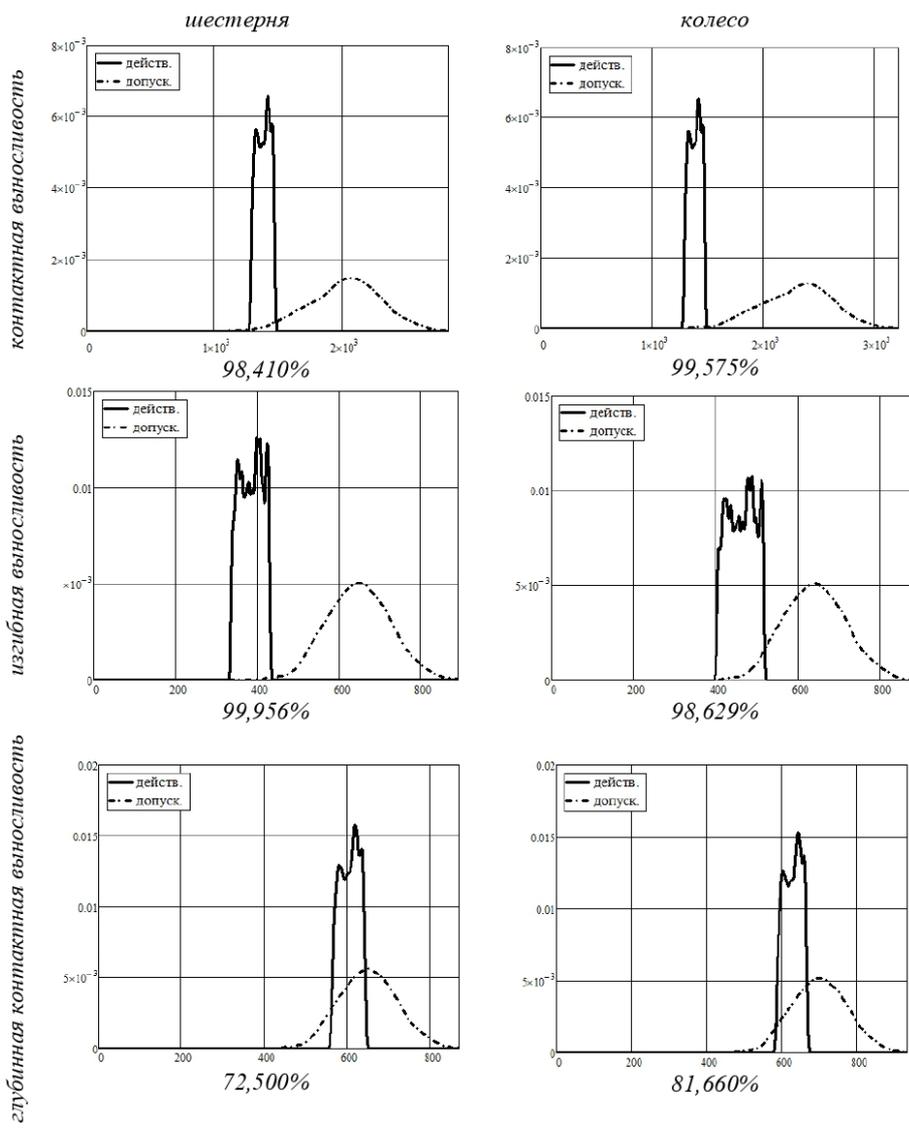


Рисунок 11 – Результаты расчетов зубчатой пары коробки передач трактора К-700

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В процессе выполненного диссертационного исследования сформулированы следующие выводы:

1. В результате анализа критериев работоспособности поверхностно-упрочненных цилиндрических передач впервые было предложено выполнять вероятностную оценку надежности по шести критериям: поломка зубьев шестерни и колеса, потеря контактной прочности поверхности зубьев шестерни и колеса, потеря глубинной контактной прочности поверхности зубьев шестерни и колеса.

2. Улучшена методика расчета вероятности безотказной работы зубчатых цилиндрических передач по критерию контактной выносливости, которая в отличие от существующих методик, учитывает случайный характер силового перекоса в зацеплении при эксплуатации передачи, что позволяет более корректно оценить надежность зубчатых цилиндрических передач.

3. Улучшена методика расчета вероятности безотказной работы зубчатых цилиндрических передач по критерию изгибной выносливости, которая отличается от существующих методик тем, что: позволяет рассчитывать предел изгибной выносливости по параметрам упрочненного слоя; учитывает случайный характер силового перекоса в зацеплении при эксплуатации передачи. Отличия повышают точность расчета надежности поверхностно-упрочненных зубчатых цилиндрических передач и делают методику пригодной для расчета передач с любыми параметрами упрочненного слоя.

4. Выявлено, что на результаты расчетов вероятности безотказной работы по критерию контактной и изгибной выносливости влияет не только закон распределения передаваемого крутящего момента, но и закон распределения коэффициента концентрации контактных и изгибных напряжения, функционально связанный с передаваемой нагрузкой и углом перекоса в зацеплении, являющейся суммой двух случайных величин: технологического угла перекоса, и угла перекоса, вызванного деформацией элементов передачи (силового перекоса).

5. Разработана методика расчета вероятности безотказной работы поверхностно-упрочненных зубчатых колес по критерию глубинной контактной выносливости. В результате впервые была оценена вероятность безотказной работы зубчатой цилиндрической передачи по критерию глубинной контактной выносливости. Отличительные особенности разработанной методики: учитываются различие характеристик разброса твердости по глубине упрочненного зуба слоя; применение аппарата непараметрической статистики позволяет оценивать надежность зубчатой

передачи не зависимо от закона распределения контактных напряжений в зацеплении при эксплуатации передачи.

6. Разработан единый программный комплекс «Проверочный расчет цилиндрических передач» (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, № 2022660757) по созданным методикам расчета вероятности безотказной работы по различным критериям, который используется в учебном процессе кафедры «Машины и оборудование нефтяной и газовой промышленности» Тюменского индустриального университета. Кроме того, созданные методики применены при оценке прочностной надежности передач приводов машин на предприятии.

7. Выполненная верификация программного комплекса «Проверочный расчет цилиндрических передач» по опытным данным отказов поверхностно-упрочненных цилиндрических передач, подтвердила достоверность результатов расчетов по разработанным методикам.

**Дальнейшее развитие работы** может быть направлено на совершенствование методик расчета прочностной надежности цилиндрических передач с арочными зубьями (в том числе с разнесенными зонами контакта), конических, гипоидных, спироидных и червячных передач.

#### **Список работ, опубликованных автором по теме диссертации**

##### Работы, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Лебедев, С. Ю. Анализ методик расчета глубинной контактной выносливости / С. Ю. Лебедев // Омский научный вестник. – 2022. – № 2(182). – С. 43-47. – DOI 10.25206/1813-8225-2022-182-43-47.

2. Лебедев, С. Ю. Вероятность безотказной работы зубчатых цилиндрических передач: глубинная контактная выносливость / С. Ю. Лебедев, В. Н. Сызранцев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. – 2022. – Т. 22. – № 2. – С. 20-32.

3. Лебедев, С. Ю. Оценка точности функций твердости упрочненного слоя рабочих поверхностей зубчатых передач / С. Ю. Лебедев, В. Н.

Сызранцев, М. Н. Михайлова // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. – 2022. – Т. 25. – № 2. – С. 14-22. – DOI 10.22213/2413-1172-2022-2-14-22.

Работы, опубликованные в журнал, индексируемых в международных системах цитирования (Scopus и Web of Science):

4. Babichev, D. T. Calculation of tooth profile radiuses of curvature into line of contact parameters / D. T. Babichev, D. A. Babichev, S. Y. Lebedev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, KOD 2018. Vol. 393. – Novi Sad: Institute of Physics Publishing, 2018.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022660757 Российская Федерация. Проверочный расчет цилиндрических передач : № 2022619410 : заявл. 24.05.2022 : опубл. 08.06.2022 / В. Н. Сызранцев, С. Ю. Лебедев, К. В. Сызранцева ; заявитель ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет».

Работы, опубликованные в других изданиях:

6. Лебедев, С. Ю. Анализ методик расчета зубчатых цилиндрических передач на глубинную контактную прочность / С. Ю. Лебедев // Архитектура, строительство, транспорт. – 2021. – № 3. – С. 90-97.

7. Сызранцев, В. Н. Совершенствование методики расчета безотказной работы зубчатых цилиндрических передач по сопротивлению глубинным контактными напряжениям / В. Н. Сызранцев, С. Ю. Лебедев // Автомобилестроение: проектирование, конструирование, расчет и технологии ремонта и производства : Материалы V Всерос. научно-практ. конф. – Ижевск: ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2021. – С. 404-409.

8. Лебедев, С. Ю. К расчету вероятности безотказной работы зубчатых цилиндрических передач / С. Ю. Лебедев, В. Н. Сызранцев // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. – 2022. – № 3. – С. 13-24.

9. Лебедев, С. Ю. Развитие методики проверочного расчета зубчатых цилиндрических передач / С. Ю. Лебедев, В. Н. Сызранцев // Научная территория: технологии и инновации : материалы Межд. научно-практ. конф. Том II. – Тюмень: ТИУ, 2022. – С. 90-95.

Лебедев Сергей Юрьевич

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ПРОЧНОСТНОЙ  
НАДЕЖНОСТИ ПОВЕРХНОСТНО-УПРОЧНЕННЫХ КОЛЕС  
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПЕРЕДАЧ

Специальность 2.5.2 – «Машиноведение»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано в печать 06.07.2023. Формат 60x90 1/16. Усл. печ. л. 1,5.  
Тираж 100 экз. Заказ № 2677.

Библиотечно-издательский комплекс  
федерального государственного бюджетного образовательного  
учреждения высшего образования  
«Тюменский индустриальный университет».  
625000, Тюмень, ул. Володарского, 38.

Типография библиотечно-издательского комплекса.  
625039, Тюмень, ул. Киевская, 52.