**Песин Михаил Владимирович. Технологическое обеспечение и повышение долговечности бурильных труб на основе моделирования и управления параметрами упрочняющей обработки резьбы: автореферат дис. ... доктора Технических наук: 05.02.08 / Песин Михаил Владимирович;[Место защиты: ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет»], 2018**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Пермский национальный исследовательский политехнический**

**университет»**

**(ФГБОУ ВО ПНИПУ)**

**На правах рукописи**

**Песин Михаил Владимирович**

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И ПОВЫШЕНИЕ  
ДОЛГОВЕЧНОСТИ БУРИЛЬНЫХ ТРУБ НА ОСНОВЕ  
МОДЕЛИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ  
УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ РЕЗЬБЫ**

1. **- Технология машиностроения Диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук**

**Научный консультант: д-р техн. наук, профессор Макаров Владимир Федорович**

**Пермь - 2018**

[ВВЕДЕНИЕ 8](#bookmark0)

[Глава 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ 17](#bookmark3)

1. Конструктивно-технологические особенности изготовления и эксплуатации

резьбовых соединений бурильных труб 19

1. Проблемы усталостного разрушения и обрывов резьбовых соединений

[бурильных труб 25](#bookmark58)

1. Анализ научных исследований и производственного опыта предприятий по

повышению долговечности резьбовых соединений 34

1. Анализ методов исследования остаточных напряжений и математического моделирования напряженно-деформированного состояния профильных поверхностей с применением поверхностной пластической деформации ... 39
2. Анализ исследований влияния параметров качества поверхностного слоя - остаточных напряжений, шероховатости, наклепа на сопротивление

усталостному разрушению 61

1. Выводы, цель и задачи работы 79

Глава 2. ИССЛЕДОВАНИЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СЛОЖНОПРОФИЛЬНОГО КОНИЧЕСКОГО СОЕДИНЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ ОБКАТЫВАНИЯ РЕЗЬБЫ РОЛИКАМИ 83

1. Постановка задачи выбора метода математического моделирования

напряженно-деформированного состояния контакта ролика и резьбовой поверхностью бурильной трубы для определения остаточных напряжений во впадине 83

1. Разработка и исследование контактной задачи взаимодействия ролика и

впадины резьбы в статической постановке для определения влияния технологических режимов упрочнения на формирование остаточных напряжений с помощью математического моделирования 84

1. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния

резьбы в процессе обкатывания роликом в динамической постановке контактной задачи 90

1. Разработка математической модели, алгоритма и программы расчета остаточ­ных напряжений в зависимости от режимов упрочняющей обработки 106
2. Анализ результатов математического моделирования, расчетов и визуализаций распределения остаточных напряжений по характеру и величине при упрочняющей обработке резьбы в зависимости от

технологических режимов обкатывания 135

1. [Выводы 145](#bookmark43)

Глава 3. РАЗРАБОТКА МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ОБКАТЫВАНИЯ НА ПАРАМЕТРЫ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ РЕЗЬБЫ И СОПРОТИВЛЕНИЕ УСТАЛОСТИ 146

1. Технические характеристики промышленной установки, разработанной для

обеспечения процесса и режимов обкатывания роликом наружной и внутренней поверхностей резьб бурильных труб 146

1. Назначение геометрических параметров и свойств упрочняющих роликов.150
2. Вырезка и подготовка образцов из бурильных труб для проведения

сравнительных исследований основных параметров качества поверхностного слоя резьбы до и после упрочнения 151

1. Особенности методики исследований остаточных напряжений в резьбовой

поверхности бурильных труб неразрушающим методом на рентгеновском дифрактометре *XStress* 3000 *G3R* 153

1. Сравнение результатов исследований остаточных напряжений в резьбовой

поверхности с методом Давиденкова Н.Н. (разрушающий метод) 155

1. Исследование дефектов резьбы с применением прибора-анализатора шумов

Баркгаузена *Rollscan* 300 156

1. Разработка методики исследований изменений профиля резьбы в процессе

обкатывания 157

1. [Методика исследования шероховатости резьбовой поверхности 164](#bookmark51)
2. Методика исследований влияния технологических параметров процесса

обкатывания на микротвердость резьбовой поверхности 166

1. Разработка методики проведения сравнительных исследований влияния

параметров обкатывания на сопротивление усталостному разрушению резьбовых соединений бурильных труб до и после упрочнения 172

Глава 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ И РЕЖИМОВ ОБКАТЫВАНИЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ РЕЗЬБЫ, СОПРОТИВЛЕНИЕ УСТАЛОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ БУРИЛЬНЫХ ТРУБ 177

1. Результаты исследования и анализ влияния технологических параметров

[процесса обкатывания на микротвердость резьбовой поверхности 177](#bookmark63)

1. Результаты исследования и анализ влияния упрочнения на изменение

микроструктуры и образование дефектов в резьбовой поверхности 181

1. Результаты исследования и анализ влияния технологических параметров

обкатывания роликами на повышение сопротивления усталости резьб 183

1. Результаты исследования и анализ влияния технологических параметров

обкатывания на величину и характер распределения остаточных напряжений в резьбовой поверхности 185

1. Результаты исследования и анализ влияния упрочнения на образование

дефектов в резьбовой поверхности 204

1. [Выводы 207](#bookmark68)

Глава 5. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ НАДЕЖНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ РЕЗЬБОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ БУРИЛЬНЫХ ТРУБ И УПРАВЛЕНИЮ ПАРАМЕТРАМИ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКОЙ 209

1. Разработка алгоритма и инженерной методики по выбору оптимальных режимов упрочняющей обработки для работы цеховых технологов при технологической подготовке производства бурильных труб высокой долговечности 209
2. Эффективность практической реализации результатов исследований при

внедрении процесса упрочнения обкатыванием бурильных труб на предприятиях машиностроения, нефтегазовом комплексе и горнодобывающей промышленности в стране и за рубежом 235

1. [Выводы 237](#bookmark75)

[ОБЩИЕ ВЫВОДЫ 239](#bookmark76)

РЕКОМЕНДАЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ

РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ 243

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. АКТ №1 внедрения научно-технических работ в

ООО «ПКНМ» 244

ПРИЛОЖЕНИЕ 2. АКТ №2 о внедрении результатов исследований в

ООО «ПКНМ-Урал» 245

ПРИЛОЖЕНИЕ 3. АКТ №3 использования результатов диссертационной работы в учебном процессе кафедры «Инновационные технологии машиностроения»

ПНИПУ 246

ПРИЛОЖЕНИЕ 4. Отзыв от ООО «АРГОС» Филиал ООО «АРГОС» - ЧУРС,

2010г., Пермский край, п. Полазна 247

ПРИЛОЖЕНИЕ 5. Отзыв от ООО «Бузулукская нефтесервисная компания»,

Оренбургская область, г. Бузулук 248

ПРИЛОЖЕНИЕ 6. Отзыв от ООО «Нижневартовское предприятие по ремонту скважин - 1» *(Weatherford Company),* 2009 г., Тюменская область, Ханты-

Мансийский автономный округ-Югра, г. Нижневартовск 249

ПРИЛОЖЕНИЕ 7. Отзыв от ООО «Нижневартовское предприятие по ремонту скважин - 1» *(Weatherford Company),* 2008 г., Тюменская область, Ханты-

Мансийский автономный округ-Югра, г. Нижневартовск 250

ПРИЛОЖЕНИЕ 8. Отзыв от ООО «ПетроАльянс», декабрь 2007г., Тюменская

область, Ханты-Мансийский автономный округ, г. Нижневартовск 251

ПРИЛОЖЕНИЕ 9. Отзыв от Нефтяной компании «РОСНЕФТЬ» ЗАО«Удмуртнефть-Бурение», 2009 г., Удмуртская Республика, г. Ижевск 252

ПРИЛОЖЕНИЕ 10. Отзыв от ООО «Нижневартовское предприятие по ремонту

скважин - 1» *(Weatherford),2011* г., г. Нижневартовск 253

ПРИЛОЖЕНИЕ 11. Отзыв от ООО «Технефтесервис», г. Самара 254

ПРИЛОЖЕНИЕ 12. Отзыв от Нефтяной компании «РОСНЕФТЬ»

ЗАО«Удмуртнефть-Бурение», Удмуртская Республика, г. Ижевск 255

ПРИЛОЖЕНИЕ 13. Отзыв от ООО «Буровая компания «Евразия» 2012г.

Пермский край, п. Полазна 256

ПРИЛОЖЕНИЕ 14. Отзыв от ООО «Буровая компания «Евразия» 2013, Пермский край, п. Полазна 257

ПРИЛОЖЕНИЕ 15. Отзыв от ООО «Черногорнефтесервис» *(Weatherford),* 2011 г., Тюменская область, Ханты-Мансийский автономный округ-Югра, г.

Нижневартовск 258

ПРИЛОЖЕНИЕ 16. Отзыв от ООО «АРГОС» Филиал ООО «АРГОС» - ЧУРС,

2011 г., Пермский край, п. Полазна 259

ПРИЛОЖЕНИЕ 1 7. Отзыв от Нефтяной компании «РОСНЕФТЬ» ООО «РН-

Бурение» Восточно-Сибирский филиал, 2013 г 260

ПРИЛОЖЕНИЕ 18. Отзыв от ООО «Буровые системы», Ижевск 261

ПРИЛОЖЕНИЕ 19. Отзыв от ООО «Интегра-Бурение», г. Тюмень 262

ПРИЛОЖЕНИЕ 17. Отзыв от ООО «Катобьнефть», Тюменская область, Ханты-

Мансийский автономный округ-Югра, г. Нижневартовск 263

ПРИЛОЖЕНИЕ 20. Отзыв от ООО «СГК-Бурение» Когалымский филиал, 2012г.,

Тюменская область, Ханты-Мансийский автономный округ, г. Когалым 264

ПРИЛОЖЕНИЕ 22. Отзыв от ООО «Нижневартовское предприятие по ремонту

скважин - 1» *(Weatherford),* 2013 г., г. Нижневартовск 265

ПРИЛОЖЕНИЕ 23. Отзыв от ООО «Нижневартовское предприятие по ремонту

скважин - 1» *(Weatherford),* 2009 г., г. Нижневартовск 266

ПРИЛОЖЕНИЕ 24. Отзыв от ООО «Интегра-Бурение», 2012, г. Тюмень 267

ПРИЛОЖЕНИЕ 25. Отзыв от ООО «Буровая компания «Евразия» 2011г.

Пермский край, п. Полазна 268

ПРИЛОЖЕНИЕ 26. Отзыв от ООО «Национальная буровая компания»

Республика Башкортостан, 2011, г. Уфа 269

ПРИЛОЖЕНИЕ 27. Отзыв от ООО «Нижневартовское предприятие по ремонту

скважин - 1» *(Weatherford Company),* 2013 г., Тюменская область, Ханты-

Мансийский автономный округ-Югра, г. Нижневартовск 270

ПРИЛОЖЕНИЕ 28. Отзыв от ООО «СГК-Бурение» Когалымский филиал, 2012г.,

Тюменская область, Ханты-Мансийский автономный округ, г. Когалым 271

ПРИЛОЖЕНИЕ 29. Отзыв от ООО «Самотлорнефтепромхим», 2013 г.,

Тюменская область, Ханты-Мансийский автономный округ-Югра, г.

Нижневартовск 272

ПРИЛОЖЕНИЕ 30. Отзыв от Нефтяной компании «РОСНЕФТЬ» ООО «РН-

Бурение», Нефтеюганский филиал 273

ПРИЛОЖЕНИЕ 31. Отзыв от ТОО «Нефтьсервисхолдинг», Юго-восточная

сервисная группа, 2011, Республика Казахстан, г. Актау 274

ПРИЛОЖЕНИЕ 32. Патент № 2486994, Российской Федерации. Способ

изготовления резьбы на детали 275

ПРИЛОЖЕНИЕ 33. Патент № 2482942, Российской Федерации. Способ

изготовления резьбы на детали 276

ПРИЛОЖЕНИЕ 34. Свидетельство о государственной регистрации программы

для ЭВМ PKNM Deep Roll Thread v 1.0 («Обкатка резьбы роликом ПКНМ версия

1.0») №2014610774 277

ПРИЛОЖЕНИЕ 35. ПРОГРАММА ДЛЯ ЭВМ: *PKNM Deep Roll Thread v* 1.0 Фрагменты исходного текста программы 278

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК 304

**ВВЕДЕНИЕ**

Повышение надежности резьбовых соединений является одной из основных проблем в изделиях машиностроения из-за их широкого применения, универсальности, точности изготовления, способности воспринимать большие осевые нагрузки. Бурильные трубы соединяются между собой при помощи бурильных замков со специальной замковой резьбой. Однако, существует проблемы, связанные с использованием резьбы. Одной из основных и самой дорогостоящей по устранению, является проблема обрыва колонны бурильных труб. В большинстве случаев такие аварии происходят при разрушении резьбового соединения, и для предотвращения обрывов необходимо производить упрочнение резьбового соединения труб и переводников нефтегазового назначения. Существует различные методы упрочнения резьбовых поверхностей. Наиболее простым экономически целесообразным технологическим методом, повышающим усталостную прочность резьбовых соединений, является поверхностное пластическое деформирование.

**Актуальность темы исследований.** Несмотря на наблюдаемый в последнее время мировой экономике кризис, разведка новых месторождений и добыча нефти и газа с каждым годом возрастает. В РФ наблюдается постоянный рост объемов бурении нефтяных и газовых скважин, причем глубина бурения скважин достигает 3-5 км. Для осуществления процесса бурения и подачи энергоресурсов на поверхность применяются специальные буровые, обсадные и насосно-компрессорные трубы, соединенные в многокилометровые колонны с помощью резьбовых соединений в виде муфт и ниппелей со специальной конической резьбой. В процессе бурения и подачи энергоносителей на поверхность резьбовые соединения буровых труб испытывают значительные знакопеременные нагрузки от действия растягивающих сил, изгибающих моментов, химического и абразивного воздействий, что приводит к нередким случаям поломки резьбовых соединений и обрыву колонны в скважинах. Сегодня требуются конструкции резьбовых соединений, когда используется технология бурения наклонных скважин с увеличенной их длиной и глубиной, применяются повышенные пластовые давления, - в этом случае, необходимы более прочные и надежные с высокими техническими характеристиками бурильные трубы. Анализ мест разрушения показал, что разрушение резьб носит усталостный характер, и в основном, в зоне впадины резьбы, - где начинается рост усталостных трещин. Проанализировав разрушения бурильных труб, можно сделать вывод о том, что 60 % отказов вызваны недостаточной прочностью и циклической долговечностью резьбовых частей бурильной трубы, а именно, ниппелем и муфтой. В связи с этим, проблема повышения прочности резьбовых соединений при изготовлении на машиностроительных предприятиях бурильных труб является весьма важной народнохозяйственной задачей.

Наиболее эффективным решением проблемы является повышение долговечности резьбовых соединений путем упрочнения поверхности дна впадины резьбы. Существуют различные методы упрочнения поверхностей, среди которых наиболее перспективными является поверхностная пластическая деформация и наиболее рациональным является обкатывание роликом [8-11].

Повышение долговечности и надежности резьбовых соединений возможно путем формирования рациональных сжимающих остаточных напряжений, повышения микротвердости и снижения шероховатости впадины резьбы под действием силы пластического деформирования [12-15]. При этом обеспечивается существенное повышение сопротивления усталостному разрушению резьбовых соединений. Анализ научных исследований и опыта предприятий показал, что метод упрочнения обкатыванием роликами недостаточно изучен, не установлены основные закономерности и взаимосвязи между режимами упрочнения и параметрами качества поверхностного слоя, отсутствует методология математического моделирования и практического применения технологического процесса обкатывания сложнопрофильных конических резьб роликами.

Отсутствуют результаты математического и численного моделирования величины и распределения остаточных напряжений при обкатывания впадины резьбы, позволяющие с научной позиции управлять процессом формирования напряженно-деформированного состояния (НДС) резьб [16]. Отсутствуют методика и научные исследования по установлению влияния режимов обкатывания на усталостную прочность резьбовых соединений [17-20]. Не разработаны практические рекомендации, специальное промышленное оборудование для проведения такой обработки в условиях серийного производства бурильных труб на конкурентоспособной и импортозамещающей основе в Российской Федерации [21-27]. В известных технических требованиях не содержатся научно-обоснованные рекомендации по выбору рациональных параметров процесса обкатывания.

Таким образом, разработка методологических основ технологического процесса упрочняющего обкатывания впадин резьбовых соединений является актуальной научной задачей, а внедрение технологии упрочняющей обработки на современных машиностроительных предприятиях при изготовлении бурильных труб различного назначения имеет важную практическую значимость для народного хозяйства Российской Федерации.

**Степень разработанности проблемы.** В современном машиностроении ведутся разработки в области повышения надежности изделий с резьбой, в частности, для бурильных труб применяются в основном упрочнения лазерное, дробеструйное, азотирование.

**Объект исследования:** резьбовые соединения деталей бурового комплекса (бурильные трубы, ведущие бурильные трубы, утяжеленные бурильные трубы и сбалансированные бурильные трубы), транспортно-подающие трубы и технологические процессы обкатывания роликом резьбы, усталостные испытания.

**Предметом исследований** является установление взаимосвязей между конструктивными и технологическими параметрами процесса обкатывания сложной резьбовой конической поверхности бурильной трубы (геометрией упрочняющего ролика, величиной нагрузки, радиусом впадины), режимом обкатывания, величиной и характером распределения остаточных напряжений в резьбовой поверхности на основе комплекса разработанных математических моделей и серии экспериментальных исследований напряженно­деформированного состояния материала резьбы с проведением усталостных испытаний.

**Цель работы:** установление теоретических и экспериментальных закономерностей для обоснования повышения долговечности бурильных труб на основе моделирования и управления параметрами упрочняющей обработки резьбы.

**Задачи исследований**:

1. Провести анализ литературы и опыта предприятий по решению проблемы разрушения резьбовых соединений, обосновать технологические методы и пути повышения усталостной долговечности резьбовых соединений бурильных труб.
2. С использованием компьютерного конечно-элементного моделирования разработать методологию статического и динамического математического моделирования напряженно-деформированного состояния материала резьбы при поверхностной пластической деформации бурильных труб обкатыванием роликом.
3. На основе разработанных математических моделей и визуализации проведенных расчетов установить взаимосвязь и закономерность влияния контактных нагрузок и геометрии деформирующего ролика на величину и характер распределения остаточных напряжений в поверхностном слое при напряженно-деформированном состоянии материала резьбы с целью повышения сопротивления усталости и долговечности резьбовых соединений.
4. Спроектировать и изготовить специальную промышленную установку (стенд) для исследования и внедрения процесса упрочняющего обкатывания роликом внутренней и наружной резьбы бурильных труб.
5. Разработать комплексную методику и провести экспериментальные исследования влияния технологических параметров упрочняющей обработки резьбы бурильных труб на формирование остаточных напряжений, шероховатости, наклепа, структуры.
6. Разработать методику и провести сравнительные испытания на сопротивление усталости образцов бурильных труб с упрочненной и неупрочненной резьбой в зависимости от режимов упрочняющего обкатывания.
7. Разработать технологические рекомендации по внедрению нового технологического процесса обкатывания с использованием созданной инженерной методики назначения рациональных режимов обкатывания в цеховых условиях, обеспечивающих формирование благоприятных сжимающих напряжений и повышение сопротивления усталости резьбовых соединений.

**Научная новизна:** заключается в разработке научного направления в области повышения усталостной прочности резьбовых соединений бурильных труб путем управляемого формирования обкатыванием рациональных сжимающих напряжений и благоприятно направленной текстуры в контактной зоне впадины резьбы с целью увеличения сопротивления усталости и долговечности бурильных труб. К наиболее значимым научным результатам относятся следующие положения:

Разработана комплексная методология математического моделирования формирования напряженно-деформированного состояния поверхности конической резьбы в процессе обкатывания её роликом, основанная на создании статических и динамических математических моделей деформации впадины резьбы и определяющая взаимосвязь диаметра ролика, радиуса при его вершине, числа проходов, силы прижатия ролика при обкатывании с величиной и характером распределения остаточных напряжений.

1. Впервые доказана возможность решения сложной трехмерной задачи моделирования напряженно-деформированного состояния резьбовой конической поверхности в динамической постановке путем моделирования процесса обкатывания роликом по развернутой прямолинейной поверхности впадины резьбы.
2. В результате расчета и визуализации напряженно-деформированного состояния материала резьбы после упрочнения с использованием компьютерного конечно-элементного моделирования установлена допустимая максимальная величина силы прижатия ролика, равная 8 кН, обеспечивающая критическую величину перемещения профиля резьбы 0,11мм с формированием в поверхностном слое резьбы рациональных сжимающих напряжений, способствующих повышению сопротивления усталости бурильных труб.
3. Разработаны алгоритм и программа для ЭВМ *PKNM Deep Roll Thread v*
4. («Обкатка резьбы роликом ПКНМ версия 1.0») по расчету величины и характера распределения остаточных напряжений в зависимости от режимов обкатывания (радиуса ролика и силы прижатия) с целью управления процессом упрочнения резьбы при технологической подготовке производства бурильных труб (свидетельство о регистрации программы №2014610774).
5. Экспериментально подтверждено, что проведение обкатывания резьбовых конических соединений роликом при допустимой максимальной силе прижатия ролика в 8 кН формирует рациональные сжимающие остаточные напряжения в поверхностном слое, что обеспечивает повышение сопротивления усталости в 3,7 раза.

Новизна технических решений подтверждена 2 патентами Российской Федерации на изобретения №2482942 и 2486994.

**Теоретическая значимость работы.**

На основе теоретико-экспериментальных исследований разработана методика исследований остаточных напряжений в резьбовой поверхности в зоне дна впадины, которая позволяет выполнить оценку влияния поверхностной пластической деформации на долговечности резьбового соединения.

Предложенная методика расчета нестационарной квазистатической задачи сопряжения индентора с деформируемым телом с учетом статической и динамической постановок задач контактирующих материалов позволяет установить закономерности влияния силы прижатия на физико-механические и трибологические характеристики контактирующих поверхностей и величину остаточных напряжений в резьбовой поверхности.

**Практическая значимость работы**:

1. Впервые разработаны и внедрены в серийное производство специальные промышленные установки для обкатывания всей номенклатуры внутренних и наружных резьб бурильных труб.
2. Разработан комплекс инженерных методик и программы расчета остаточных напряжений в зависимости от режимов обкатывания резьбы роликами для использования в цеховых условиях при технологической подготовке производства бурильных труб.
3. Разработаны и переданы для внедрения технологические рекомендации в ООО «ПКНМ», г. Пермь, ООО «ПКНМ-Урал» г. Краснокамск.
4. Применение процесса обкатывания резьбовых поверхностей позволило снизить вероятность разрушения труб, повысить спрос, конкурентоспособность, расширить область применения труб с упрочненной резьбой и заменить импортные бурильные трубы. Экономический эффект от внедрения составил более 287 млн. руб.

**Методология и методы диссертационного исследования.** При решении поставленных задач использованы основные положения теории механики деформирования сплошных сред, технологии машиностроения, основы теории деформации сплошных сред, динамики машин и механизмов, теоретической механики, методики моделирования напряженно-деформированного состояния, теория поверхностно-пластической деформации. Результаты исследований фиксировались с помощью видеосъемки и аттестованных современных приборов и средств измерения. Визуализация и обработка результатов экспериментальных и теоретических исследований выполнена с помощью междисциплинарных инженерных пакетов на высокопроизводительном вычислительном комплексе с использованием программных комплексов *ANSYS, ABAQUS* и разработанной программы «Обкатка резьбы роликом ПКНМ версия 1.0».

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Комплексная методология математического моделирования формирования напряженно-деформированного состояния материала резьбы в процессе упрочнения впадины резьбы обкатыванием роликом, определяющая взаимосвязь режимов упрочняющей обработки и параметров качества поверхностного слоя с целью выбора рациональных по величине и характеру распределению сжимающих остаточных напряжений, обеспечивающих повышение сопротивление усталости резьбовых соединений.
2. Программа «Обкатка резьбы роликом ПКНМ версия 1.0» *(PKNM Deep Roll Thread v* 1.0, патент №2014610774) для расчета величины и характера распределения остаточных напряжений в зависимости от режимов обкатывания (радиуса ролика, силы прижима и скорости) с целью управления этим процессом в технологической подготовке производства бурильных труб.
3. Методика проведения обкатывания конических резьб бурильных труб на рациональных режимах, обеспечивающих необходимую величину сжимающих остаточных напряжений, снижение шероховатости и повышение микротвердости для увеличения сопротивления усталости труб.
4. Методика стендовых усталостных испытаний свинченных образцов бурильных труб после лезвийной обработки и с последующим упрочнением.
5. Доказанное положение, что применение оптимальных режимов обкатывания резьб с условием формирования рациональных сжимающих остаточных напряжений в поверхностном слое, шероховатости и микротвердости повышает усталостную долговечность резьбового соединения в 3,7 раза.

**Степень достоверности.** Достоверность полученных результатов подтверждается корректным использованием известных положений

фундаментальных наук, сходимостью полученных теоретических результатов с данными экспериментов, результатами промышленной эксплуатации созданного технологического оборудования и с результатами исследований других авторов. Достоверность данных, полученных теоретически, подтверждается сходимостью с экспериментальными результатами.

**Апробация результатов.** Основные положения результатов работы доложены на 42 всероссийской и международной научно-технической конференциях: «Новые материалы и технологии - НМТ-2010» (Москва, 2010), «Высокие технологии в машиностроении» (Самара, 2010, 2011), «Повышение технологических возможностей металлообрабатывающего оборудования с ЧПУ» (Уфа, 2010), «Новые материалы и технологии в машиностроении» (Брянск, 2011, 2015), «Наукоемкие технологии в машиностроении» (Ишимбай, 2011), «Современные проблемы машиностроения» (Томск, 2010), «Машиностроение и техносфера XXI века» (Севастополь, 2011), «Молодежь и наука» (Нижний Тагил, 2010), «Применение инструментов из сверхтвердых материалов и упрочнения изделий в инновационных технологиях размерной обработки» (Магнитогорск, 2011, 2012), «Молодые ученые Прикамья» (Пермь, 2011), «Мавлютовские чтения» (Уфа, 2011), «Неделя горняка» (Москва, 2011-2013), «Чтения Кубачека» (Екатеринбург, 2012, 2013), «Фундаментальные и прикладные проблемы в модернизации современного машиностроения и металлургии» (Липецк, 2012), «Машиностроение - основа технологического развития России ТМ-2013» (Курск, 2013), «Естественные науки: достижения нового века» (Шарджа, 2013), «Инженерная практика» (Уфа, 2010, Тюмень, 2011), «Инновационное нефтегазовое оборудование: проблемы и решения» (Уфа, 2010), «Современные тенденции в технологиях металлообработки и конструкциях металлообрабатывающих машин и комплектующих изделий», (Уфа, 2011-2013, 2015), «Ресурсосберегающие технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано- до макроуровня» (СПб., 2010, 2011), «Нефтегазовое и горное дело» (Пермь, 2010), «Вопросы вибрационной технологии» (Ростов-на-Дону, 2011, 2016, 2017), «Инновационные технологии в машиностроении» (Пермь, 2012), «Производительность и надежность технологических систем в машиностроении» (Москва, 2015), «Техносфера» (Ростов-на-Дону, 2015), «Надежность и качество» (Пенза, 2015) , «Лучшие технологические школы России» (Рыбинск, 2017), «Технология машиностроения» (Волгоград, 2017), «Перспективные направления развития отделочно-упрочняющей обработки и виброволновых технологий» (Ростов-на-Дону, 2018).

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

В работе представлены новые научно обоснованные технические и технологические решения, заключающиеся в разработке теории контактного взаимодействия механической системы, включающей коническую резьбу бурильной трубы с деформирующим роликом; новое научное направление в области повышения долговечности резьбовых соединений бурильных труб на основе сформулированных принципов управления обкатыванием с целью формирования рациональных сжимающих напряжений и благоприятно направленной текстуры в контактной зоне впадины резьбы с роликом. По результатам исследований сформулированы следующие выводы:

1. С использованием программного комплекса *ANSYS* и метода конечных элементов разработана комплексная методология математического моделирования формирования напряженно-деформированного состояния конической резьбы в процессе упрочняющей обработки обкатыванием роликом, основанной на создании статических и динамических математических моделей процесса деформирования впадины резьбы, и определяющая взаимосвязь диаметра ролика, радиуса при его вершине, числа проходов и силы прижатия ролика при обкатывания на величину и характер распределения остаточных напряжений в поверхностном слое резьбы.
2. Путем вычислительных экспериментов и расчетов по разработанным моделям установлены закономерности и взаимосвязи технологических параметров обкатывания с величиной и характером распределения остаточных напряжений в поверхностном слое, формируемых при пластической деформации впадины резьбы, позволяющие решать задачи управления процессом с целью повышения ресурса резьбовых соединений бурильных труб.
3. В результате расчетов установлено, что обкатывание роликами впадин резьбы создает благоприятные по величине и характеру распределения сжимающие остаточные напряжения на «дне» впадины для всей номенклатуры исследуемых диаметров резьбы при различных радиусах ролика, причем, с увеличением силы прижатия ролика с 4 до 12 кН величина максимальных осевых сжимающих остаточных напряжений увеличивается, а с увеличением радиуса при вершине ролика с 0,965 мм до 1,067 мм величина сжимающих остаточных напряжений снижается на 10-15 %. При этом происходит пластическая деформация дна впадины (наклеп) на глубину до 1 мм, что приводит к упрочнению этого слоя и препятствует возникновению микротрещин.
4. Впервые доказана возможность решения сложной трехмерной задачи моделирования напряженно-деформированного состояния резьбовой конической поверхности в динамической постановке путем моделирования процесса обкатывания роликом по развернутой прямолинейной поверхности впадины резьбы.
5. Анализ результатов численных экспериментов, расчетов, визуализаций и установленных закономерностей формирования напряженно­деформированного состояния резьбовой конической поверхности, выполненных на основе статических и динамических моделей позволяет прогнозировать и управлять величиной и характером распределения сжимающих остаточных напряжений с целью повышения сопротивления усталости и долговечности.
6. Разработана комплексная методика и выполнены экспериментальные исследования определения влияния технологических параметров обкатывания резьбы бурильных труб на формирование остаточных напряжений, шероховатости, наклепа, микроструктуры и сопротивление усталости резьбы с применением современных приборов, инструмента и необходимой аппаратуры.
7. Установлена допустимая максимальная величина нагрузки на упрочняющий ролик, равная 8 кН, при которой обеспечивается критическая величина смещения профиля резьбы 0,11 мм и формируются рациональные сжимающие остаточные напряжения, обеспечивающие при усталостных испытаниях максимальное число циклов нагружения резьбового соединения до его разрушения.
8. В результате сравнительных экспериментальных исследований качества поверхностного слоя образцов резьбы с упрочением и без упрочнения установлено:

* в процессе обкатывания роликом на критических режимах в поверхностном слое резьбы образуются сжимающие тангенциальные остаточные напряжения величиной до 360-400 МПа;
* при применении обкатывания наблюдается увеличение микротвердости на 10-15%; микротвердость во впадине резьбы выше, чем на боковых поверхностей на 15-20 %;
* обкатывание поверхности впадин при силе прижатия 8 кН устраняет практически все дефекты первоначальной обработки, при этом высота микронеровностей снижается с *Ra* = 3,2 мкм до *Ra* = 0,4 мкм.
* в упрочненном слое образуется более благоприятная микроструктура - повышается плотность дислокаций, измельчается исходная структура материала;

1. Полученные положительные результаты экспериментальных исследований качества поверхностного слоя резьбы после упрочнения подтверждают результаты теоретических исследований и способствуют повышению сопротивления усталости и долговечности резьбовых соединений бурильных труб.
2. Разработана оригинальная методика и проведены сравнительные исследования сопротивления усталости образцов бурильных труб с упрочнением резьбовых соединений и без упрочнения. Установлено, что применение обкатывания резьбы роликом на критических режимах обеспечивает увеличение числа циклов нагружения с 0,7 млн. до 3,4 млн. циклов по сравнению с необкатанной резьбой, т.е. в 3,7 раза.
3. Разработаны технологические рекомендации и инженерная методика, включающих: методику численного моделирования упрочняющей обработки резьбовых соединений; методику оперативной оценки напряжений при обработке резьбовых соединений на базе программного комплекса, защищенного свидетельством о регистрации программы №2014610774.
4. Результаты исследований внедрены на предприятиях ООО «ПКНМ» и ООО «ПКНМ-Урал», что позволило повысить долговечность 12750 бурильных труб и переводников, которые апробированы в нефтегазодобывающих и буровых компаниях Российской Федерации, Белоруссии, Узбекистана: ООО «Газпром Бурение», ООО «РН-Бурение», ООО «РН-Сервис», ООО «Белорусское УПНП и КРС», ООО «Буровая компания Евразия», ООО «Буринтех», ЗАО «Сибирская северная компания», ООО «Таргин-Бурение» и др. на что получены акты и отзывы об использовании продукции с упрочненной резьбой. Повысилась конкурентоспособность производства бурильных труб в России, потребителями стали ОАО «ГАЗПРОМ», НК «Роснефть», НК «ЛУКОЙЛ» и др. и возросла возможность участия в импортозамещении продукции из Украины, Китая и др. Общий экономический эффект от внедрения составляет 287 млн. руб.

РЕКОМЕНДАЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ

1. Результаты научных исследований позволяют значительно расширить возможность применение методов математического моделирования при исследовании напряженно-деформированного состояния детали при упрочняющей технологии, что вносит значительный вклад в развитие теории поверхностного пластического деформирования твердых тел в машиностроении.

Результаты работ могут быть рекомендованы при разработке технологии упрочняющей обработки резьбовых соединений деталей в авиационном, ракетнокосмическом, автомобильном и сельскохозяйственном машиностроении, с целью повышения надежности и долговечности изделий.