

ХАЛТУРИН ОЛЕГ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ РЕЗЬБОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ
БУРИЛЬНЫХ ТРУБ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ
И ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНОГО МОМЕНТА ЗАТЯЖКИ ПРИ СБОРКЕ**

2.5.6 -Технология машиностроения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пермь – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

**Научный
руководитель:**

Песин Михаил Владимирович
доктор технических наук, доцент

**Официальные
оппоненты:**

Тамаркин Михаил Аркадьевич, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», заведующий кафедрой «Технология машиностроения»

Афонин Андрей Николаевич, доктор технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет» (НИУ «БелГУ») профессор кафедры «Информационные и робототехнические системы»

Ведущая организация:

ФГАОУ ВО «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина»

Защита состоится «22» декабря 2023 года в 12.00 на заседании диссертационного совета Пермского национального исследовательского политехнического университета Д ПНИПУ.05.18 по адресу 614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29, ауд. 345.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (сайт <http://pstu.ru>)

Автореферат разослан « ____ » _____ 20 ____ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д ПНИПУ.05.18,
профессор, доктор техн. наук

М.Ш. Нихамкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Потребление нефти и газа постоянно увеличивается, несмотря на стремление мировых потребителей отказаться от углеводородного сырья и снижение его доли в производстве энергии. Для его добычи необходимо бурить ежегодно десятки тысяч новых скважин по всему миру. В связи с истощением легкоизвлекаемых запасов нефти и газа повышаются глубины бурения (более 3000 метров), что приводит к росту веса буровой колонны, которую должны удерживать замковые резьбовые соединения бурильных труб (сотни тонн). Кроме того, активно развивается наклонно-направленное бурение, что также увеличивает эксплуатационные нагрузки. Анализ результатов исследования характера разрушения бурильных труб в ходе их работы показывает, что недостаточные циклическая долговечность и прочность замковых резьбовых соединений (ЗРС) составляют более половины причин отказов.

Ужесточающиеся требования к качеству бурильных труб заставляют их производителей искать способы повышения сопротивления усталости нарезаемых на трубах резьбовых соединений. При этом максимальный эффект может быть достигнут только при обоснованном выборе момента затяжки при сборке резьбового соединения. Среди факторов, влияющих на величину оптимального момента затяжки, важное место занимают технологические параметры процесса изготовления элементов резьбового профиля. Однако в настоящий момент отсутствуют научные исследования влияния параметров технологического процесса механической обработки на изменение величины оптимального момента затяжки.

Таким образом, исследование взаимного влияния параметров изготовления, сборки и эксплуатации на сопротивление усталости резьбовых соединений является актуальной научной задачей, а внедрение методики определения рационального момента затяжки резьбовых соединений в зависимости от параметров изготовления резьбовых элементов имеет важную практическую значимость для народного хозяйства Российской Федерации.

Степень разработанности темы. Повышению сопротивления усталости ЗРС посвящены работы Л.Е. Тришмана, Т. Альтмана, Ван-дер-Висселя, М.К. Ковалева, И.В. Кудрявцева, Н.Д. Щербюка, Ю. И. Газанчана, В.И. Семина, М.З. Хостикоева, В.М. Тимонина, Л.А. Лачиняна, А.Е. Сарояна, Е.Д. Мокроносова, А.И. Якушева, М.Ж. Кахадзе, М.В. Песина, М.З. Хостикоева. Авторами предложены различные способы как увеличения сопротивления усталости

резьбового соединения, так и выравнивания напряженно-деформированного состояния. Отдельные из них закреплены в стандартах или в рекомендациях для производителей.

Показано существенное влияние величины момента затяжки на сопротивление усталости ЗРС. Несоблюдение рекомендуемого момента в процессе сборки является одной из причин аварий на буровой с потерями на несколько десятков миллионов рублей.

При этом имеющиеся рекомендации по назначению момента затяжки не учитывают различия в параметрах изготовления резьбовых деталей, не разработан вопрос влияния упрочнения элементов резьбы на взаимосвязь момента затяжки и сопротивления усталости.

Исследование напряженно-деформированного состояния в собранном и подвергнутом эксплуатационному нагружению резьбовом соединении сильно затруднено, что привело к развитию использования математических методов моделирования резьбовых соединений.

Обзор современных методов математического моделирования напряженно-деформированного состояния резьбовых соединений показал невозможность использования аналитических методов расчета ввиду сложной конфигурации изделий и преимущество метода конечных элементов. Существующие методики моделирования свинченных соединений рассматривают лишь отдельные этапы жизненного цикла резьбовых соединений и не учитывают их взаимное влияние.

Таким образом, проведенный анализ научно-технической литературы показал, что исследование влияния момента затяжки на сопротивление усталости резьбовых соединений с учетом параметров изготовления, а также разработка практических рекомендаций процесса сборки являются весьма актуальной научной и производственной задачей

Объект исследования: резьбовые соединения бурильных труб.

Предмет исследования: параметры сборки замковых резьбовых соединений, повышающие срок службы и возможный крутящий момент.

Цель работы – повышение сопротивления усталости резьбовых соединений бурильных труб на основе моделирования напряженно-деформированного состояния и выбора рационального момента затяжки при сборке.

Для достижения цели были поставлены и решены следующие **задачи:**

1. Провести анализ опыта по решению проблемы усталостного разрушения резьбовых соединений, обосновать пути повышения сопротивления усталости резьбовых соединений бурильных труб.
2. Провести моделирование напряженно-деформированного состояния ЗРС с учетом влияния условий изготовления, сборки и эксплуатации.
3. На основе выполненных расчетов по разработанным математическим моделям определить влияние условий изготовления, сборки и эксплуатации на взаимосвязь момента затяжки и сопротивления усталости резьбовых соединений.
4. Разработать методику и провести экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния при сборке резьбовых соединений.
5. Разработать технологические рекомендации по сборке резьбовых соединений.

Научная новизна работы:

- Разработана математическая модель влияния момента затяжки на напряженно-деформированное состояние в собранном замковом резьбовом соединении под действием переменной эксплуатационной нагрузки, отличающаяся учетом варьирования параметров изготовления резьбовых деталей (профиля резьбы и упрочнения) и позволяющая назначать рациональный момент затяжки (п.3);
- Впервые установлено, что на взаимосвязь угла затяжки замкового резьбового соединения и момента затяжки существенное влияние оказывают отклонения параметров резьбы (шаг, угол профиля, конусность). Таким образом некорректно использовать величину угла затяжки для оценки величины момента затяжки (п.7);
- Установлено, что изготовление профиля резьбы по середине поля допуска на конусность позволяет повысить рациональный момент затяжки на 10% и долговечность на 27 %. (п.7)
- Доказано, что повышение момента затяжки для упрочненных резьб на 15% повышает долговечность на 39% (п.7).

Практическая и теоретическая значимость.

- Разработаны рекомендации по назначению рационального момента затяжки бурильных труб нескольких типоразмеров. Переданы для внедрения на предприятие ООО «ПКНМ-Урал», что обеспечивает повышение сопротивления усталости их резьбовых соединений на 20%.

- Разработан алгоритм назначения рациональных параметров сборки бурильных труб с резьбовыми соединениями, обеспечивающий более высокое сопротивление усталости при эксплуатации.

Методы и методология исследований. В диссертации использованы общенаучные методы, включая синтез, анализ, моделирование. Теоретические исследования проводились на основе теории формообразования поверхностей, теории деформации, матричных преобразованиях систем координат, математического моделирования с использованием численно-аналитических методов. Исследования проводились на персональном компьютере с использованием САПР Компас-3D, системы компьютерной алгебры *Mathcad*, системы конечно-элементного анализа *ANSYS Mechanical*. При исследовании натуральных образцов использовалась оптическая система анализа деформаций.

Положения, выносимые на защиту.

1. Разработанная модель влияния момента затяжки на напряженно-деформированное состояние в свинченном ЗРС, учитывающая варьирование параметров технологии изготовления резьбовых деталей (параметры профиля резьбы и наличие упрочнения).
2. Разработанная методика оценки влияния параметров технологии изготовления резьбы на рациональный момент затяжки ЗРС.
3. Результаты исследования влияния отклонений параметров профиля резьбы на взаимосвязь угла затяжки ЗРС и возникающего при этом момента затяжки.
4. Результаты оценки влияния фактических параметров резьбы на сопротивление усталости ЗРС и рациональный момент затяжки.
5. Результаты оценки влияния упрочнения резьбы на сопротивление усталости ЗРС и рациональный момент затяжки.

Степень достоверности результатов. Достоверность предложенных моделей и методик и полученных результатов исследований основана на использовании апробированных методов, опыта предыдущих исследователей и обоснованности внесенных дополнений. Достоверность новых результатов подтверждается корректным поведением моделей на ранее изученной области данных и проверкой на натуральных испытаниях.

Личный вклад. Все исследования, изложенные в диссертационной работе, проведены лично соискателем под руководством научного руководителя в процессе научной деятельности. Заимствованный материал в обзоре литературы обозначен в работе ссылками.

Апробация работы. Основные положения результатов работы доложены на всероссийских и международных научно-технических конференциях: «Современные инновации в науке и технике» (Курск, 2014), «Инновационные технологии в машиностроении» (Пермь, 2015), «Фундаментальные и прикладные исследования в области материаловедения и машиностроения 2015» (Пермь, 2015), «Современные научные исследования: теория и практика» (София, 2017), IX МНПК ADVANCED SCIENCE (Пенза, 2019), «Химия. Экология. Урбанистика» (Пермь, 2021), «Машиностроительные технологические системы» (Ростов-на-Дону, 2021), 5 НПК «Инновационные технологии в материаловедении и машиностроении – ИТММ-2021» (Пермь, 2021), 6 НПК «Инновационные технологии в материаловедении и машиностроении – ИТММ-2022». (Пермь, 2022).

Публикации. По материалам диссертационного исследования опубликовано 12 печатных работ, включая 7 статей в изданиях включенных ВАК в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций, 1 патент РФ на полезную модель.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка сокращений списка литературы, включающего 112 наименований и двух приложений. Работа изложена на 134 страницах машинописного текста, содержит 72 рисунка, 9 таблиц и 68 формул.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы. Определена цель работы, формулируется научная и практическая значимость.

В первой главе приводятся сведения об объекте исследования – замковом резьбовом соединении, его конструкции, технологии изготовления и условиях эксплуатации. Проанализированы требования к производству резьбовых элементов бурильных колонн, контролю их качества, а также к сборке труб.

Проанализированы причины разрушения резьбовых соединений бурильных труб и методы повышения их эксплуатационной надежности в различных отраслях машиностроения.

В заключении первой главы на основании анализа состояния проблемы и выбранного пути ее решения сформулирована цель и поставлены задачи работы.

Во второй главе представлена комплексная модель напряжено-деформированного состояния ЗРС и методика оценки его сопротивления

усталости, включающая стадии изготовления элементов, сборки соединения, эксплуатации.

На основе теории формообразования поверхностей рассмотрены причины погрешностей профиля конической резьбы. С учетом этих причин составлена геометрическая модель резьбовой поверхности в виде системы параметрических уравнений, описывающих координаты точек резьбовой поверхности в 3-хмерном пространстве в зависимости от параметров наладки станка при резбotoчении.

Модель образующей основана на представлении профиля резьбового резца в виде модульной функции (1) с совмещением локальной системы координат с вершиной резца (рис. 1)

$$f(t) = \begin{bmatrix} t \\ |t| \operatorname{atg}\left(\frac{\pi - \alpha}{2}\right) - r \left(\frac{1}{\sin \frac{\alpha}{2}} - 1 \right) \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где t – независимая параметрическая переменная;

α – угол профиля резьбы;

r – радиус скругления канавки резьбы.

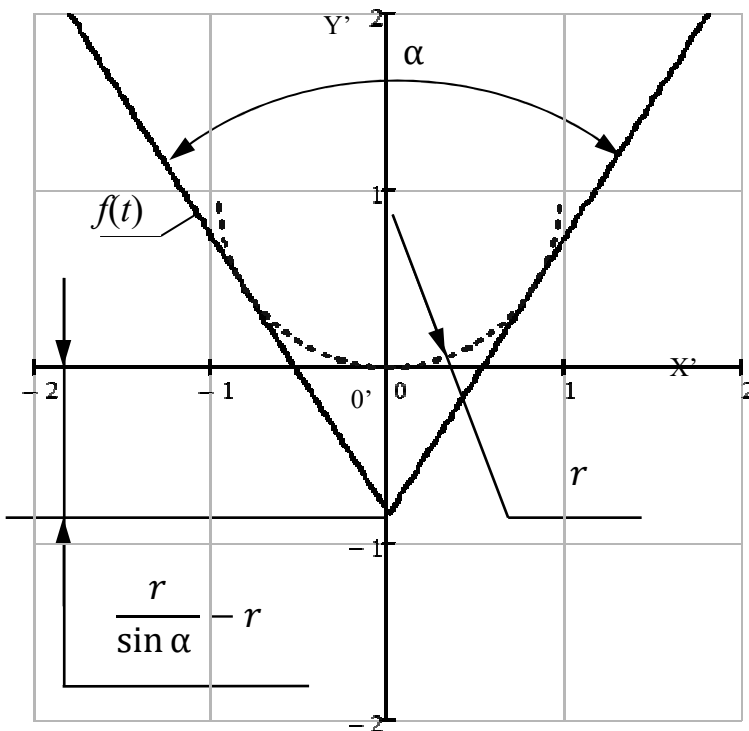


Рисунок 1 – Проекция модульной функции $f(t)$ (1), описывающей режущую кромку резца с углом профиля $\alpha = 60^\circ$ и радиусом вершины $r = 0.965$ мм на плоскость $X'OY'$ (в системе координат резца)

Полная модель резьбового профиля представлена в системе уравнений (2). С помощью матричных преобразований, учитывающих смещение резца от линии центров (h) и изменения углов наклона резца относительно плоскости резания (λ ,

γ) и отклонения угла в плане ($\Delta\phi$), получается пространственное расположение резбовой кромки $f'(t)$, которое затем проецируется в осевую плоскость изделия с получением описания образующей $O(t,d)$.

$$\left\{ \begin{array}{l}
 A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\gamma) & -\sin(\gamma) \\ 0 & \sin(\gamma) & \cos(\gamma) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\Delta\phi) & -\sin(\Delta\phi) & 0 \\ \sin(\Delta\phi) & \cos(\Delta\phi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\lambda) & 0 & -\sin(\lambda) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\lambda) & 0 & \cos(\lambda) \end{bmatrix} \\
 f'(t) = A \cdot \begin{bmatrix} t \\ |t| \operatorname{atg}\left(\frac{\pi - \alpha}{2}\right) - r \left(\frac{1}{\sin \frac{\alpha}{2}} - 1 \right) \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ h \end{bmatrix} \\
 f'(t)_0 \\
 O(t,d) = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{d^2}{4} + \sum_{i=1}^2 f'(t)_i^2 - d \sqrt{\sum_{i=1}^2 f'(t)_i^2} \cdot \cos\left(\pi - \arccos\left(\frac{f'(t)}{\sqrt{\sum_{i=1}^2 f'(t)_i^2}}\right)\right)} \\ 0 \end{bmatrix} - \frac{d}{2} \quad (2) \\
 h(u) = \begin{bmatrix} \cos(u) \\ \sin(u) \\ 0 \end{bmatrix}, \quad ko = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \\
 N_H(u) = \frac{1}{2} (X_H + (2Z_H - u)K) \cdot h\left(\frac{2\pi \cdot u}{P}\right) + u \cdot ko \\
 N_M(u) = \frac{1}{2} (X_H + (2Z_H - u)K) \cdot h\left(\frac{2\pi \cdot u}{P} - \pi\right) + u \cdot ko \\
 PR(t,u) = N(u) + O\left(t, \sqrt{\sum_{i=0}^1 N(u)_i^2}\right)_0 \cdot ko + O\left(t, \sqrt{\sum_{i=0}^1 N(u)_i^2}\right)_1 \cdot h\left(\frac{2\pi \cdot u}{S}\right)
 \end{array} \right.$$

Уравнения направляющих ниппеля $N_H(u)$ и муфты $N_M(u)$ учитывают начальную точку траектории (X_H, Z_H) в системе координат основной плоскости ниппеля, шаг резьбы (P) и конусность (K). Получение поверхности резбового профиля $PR(t,u)$ резьбы ниппеля или муфты производится добавлением к параметрическому уравнению направляющей N (ниппеля или муфты) осевой O_0 и

радиальной O_1 компонент параметрического уравнения образующей (ниппеля или муфты) с помощью орт $h(u)$ и ko . В дальнейшем по осевому сечению полученной модели, имитируя измерение резьбы, можно определить параметры смоделированного профиля. Также возможно «свинтить» модели ниппеля и муфты и определить образуемый натяг в соединении до приложения момента затяжки (свинчивание «от руки»).

Моделирование НДС собранного соединения основано на представлении геометрической модели осевого сечения в виде осесимметричной сетки конечных элементов (рисунок 2).

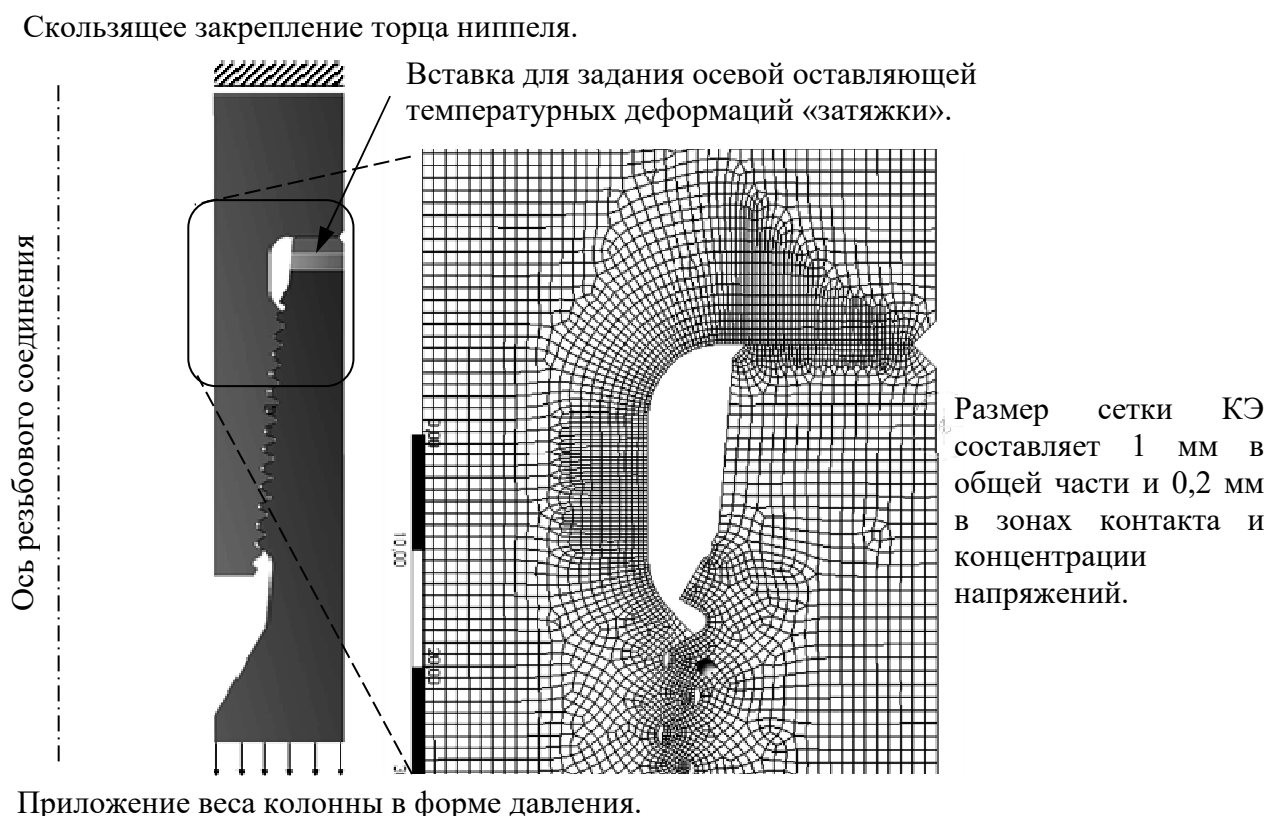


Рисунок 2. Конечно-элементная модель (тела и сетка) свинченного ЗРС.

В осесимметричной модели резьбовые детали имеют профиль с кольцевыми канавками. Профили обкатных роликов также формируют отдельные кольца для каждой впадины резьбы. Модель формируется с предварительным геометрическим натягом (перехлестом контактируемых профилей) в зоне контакта профилей роликов и обкатываемых участков резьбы, который можно регулировать. Контакт каждого кольца с соответствующей впадиной включается и выключается последовательно, таким образом симулируется последовательное прохождение роликов по резьбовым канавкам ниппеля и муфты в соответствии с технологией обработки и формируются остаточные напряжения.

Упругопластическое поведение и накопление остаточных деформаций обеспечивается применением кинематической билинейной модели материала.

Приложение момента затяжки должно приводить к повороту одной из деталей на угол затяжки. Смещение профилей резьбы, которое должно при этом возникать, достигается температурными деформациями материала трубы. Отличительной особенностью модели является использование не только осевых, но и радиальных деформаций, приводящих к взаимному смещению профилей резьбы вдоль образующей конуса резьбы. Кроме того, в методике расчета не принимается прямо пропорциональное соответствие термического расширения желаемому моменту затяжки. Наоборот, момент затяжки рассчитывается исходя из получаемых контактных давлений между элементами моделей ниппеля и муфты и, таким образом, из входного параметра моделирования становится выходным. Обоснованность такой модернизации модели по сравнению с предыдущими авторами показана в третьей главе.

Другими граничными условиями являются замена отсеченной части ниппельного конца скользящим закреплением, а отсеченной части муфтового конца давлением, распределенным по площади торца, соответствующим весу отброшенной части буровой колонны.

Оценка сопротивления усталости основана на сравнении двух НДС соединения: нагружение весом колонны и разгружение (цикл). Из сравнения этих НДС вычисляются средние напряжения цикла σ_m и амплитудные напряжения σ_a в узлах сетки КЭ. Приведение к напряжениям эквивалентным симметричному циклу нагружения $\sigma_a^{\text{экв}}$ производится по отношению Гудмана (3) через предел прочности материала σ_B

$$\sigma_a^{\text{экв}} = \frac{\sigma_a}{1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_B}}. \quad (3)$$

Таким образом, можно изучать изменение сопротивления усталости ЗРС при приложении различных моментов затяжки с учетом варьирования параметров резьбовых профилей и степени упрочнения поверхностно-пластическими деформациями.

В третьей главе представлены результаты исследования влияния технологии изготовления резьбового профиля на НДС в соединении ниппеля с муфтой и взаимосвязь момента затяжки и сопротивления усталости по разработанной методике.

Исследование влияния отклонений параметров профиля (шаг, угол профиля, конусность) на взаимосвязь угла затяжки ψ и момента затяжки M_3 (рисунок 3) показало существенное влияние отклонений параметров резьбы и нарушение прямолинейности при наличии таких отклонений.

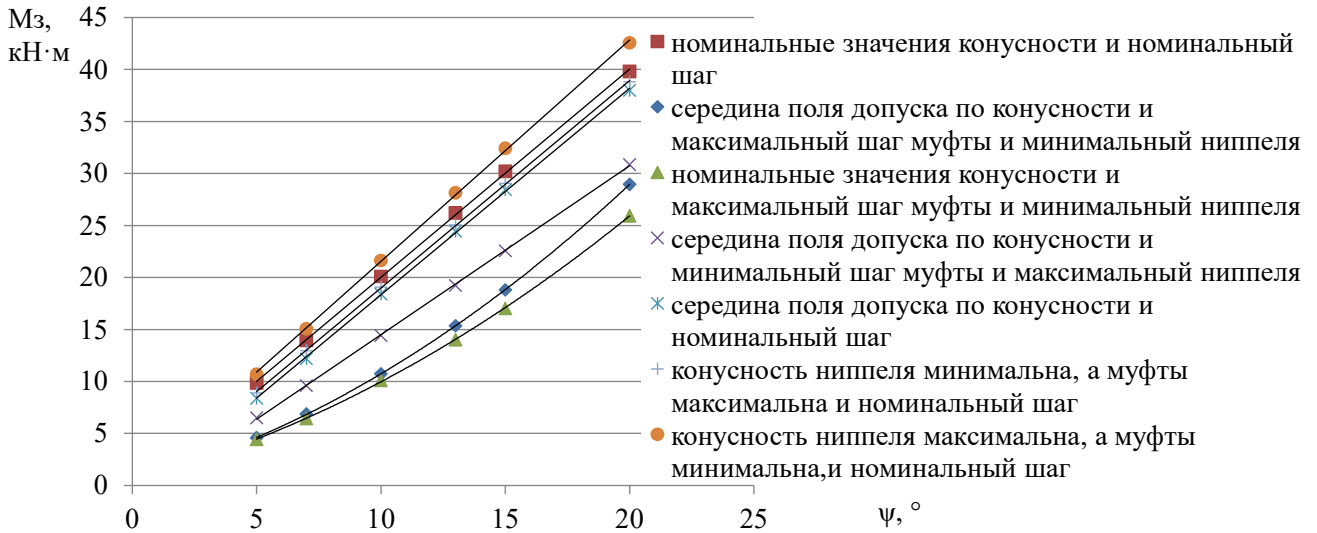


Рисунок 3. Зависимости момента затяжки M_3 от угла затяжки ψ для различных сочетаний отклонений параметров профиля.

После этого проводился анализ влияния отклонений параметров резьбы (угла профиля, шага и конусности) в пределах поля допуска. Наибольшее влияние на НДС оказывают отклонения по шагу и конусности, что объясняется тем, что эти погрешности накапливаются по всей длине резьбового соединения.

Были исследованы крайние сочетания полей допусков конусности сопрягаемых деталей, а также выполнение деталей по середине поля допуска по ГОСТ Р 50864-96, а также по середине поля допуска по ГОСТ 28487-2018.

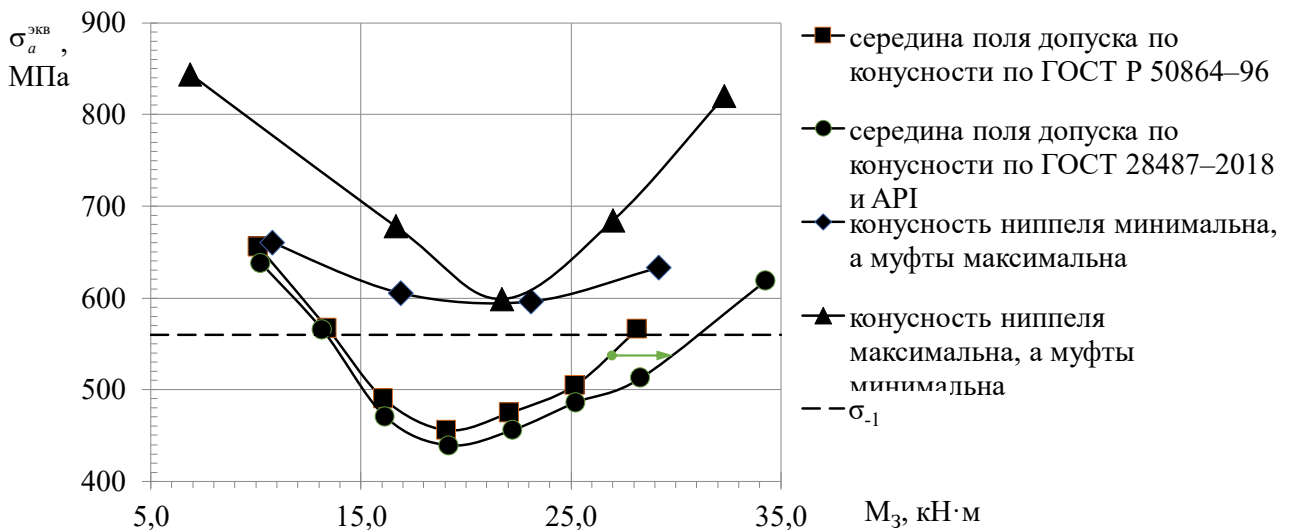


Рисунок 4. Зависимость эквивалентных амплитуд напряжений от момента затяжки при отклонениях конусности.

Анализ зависимости эквивалентных амплитуд напряжений от момента затяжки при отклонениях конусности показал преимущество полей допусков на конусность по *API spec 7* и ГОСТ 28487-2018 перед установленными в ГОСТ Р 50864–96. Выполнение изделий по середине поля допуска в соответствии с ГОСТ 28487-2018 позволяет повысить циклическую долговечность такого резьбового соединения на 28%.

Проводился подобный эксперимент и по сочетаниям отклонений шага резьбы: номинальные шаги резьб ($dP0$), максимальный шаг муфты и минимальный ниппеля ($dP+$), минимальный шаг муфты и максимальный ниппеля ($dP-$). Получена схожая картина влияния отклонений на сопротивление усталости и положение рационального момента затяжки. На рисунке 5 приведены значения рациональных моментов для каждого из случаев. Анализ графика показывает, что симметричные поля допуска на шаг резьбы не являются оптимальными. Превышение шага ниппеля над шагом муфты на 0,005 мм приводит к уменьшению напряжений в опасном сечении.

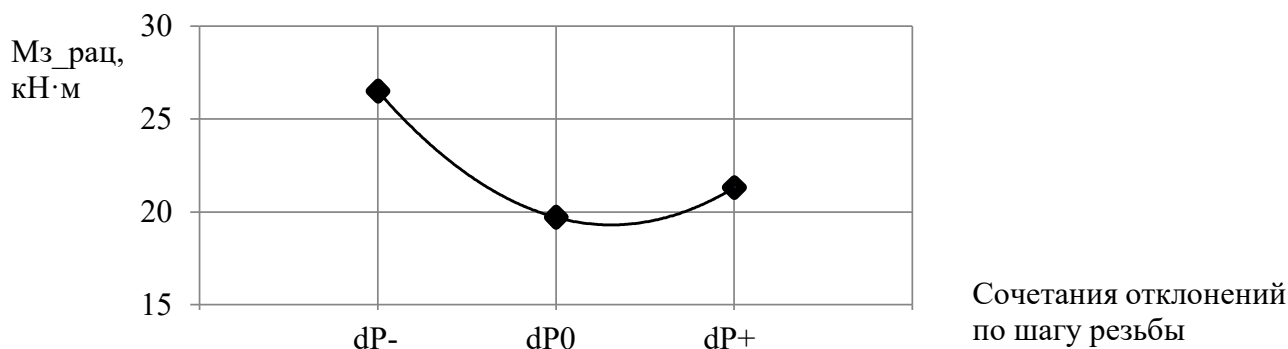


Рисунок 5. График зависимости рационального момента затяжки от отклонений шага резьбы.

Исследование влияния остаточных напряжений после обкатывания впадин резьбы роликом показало значительное повышение сопротивления усталости, что соответствует экспериментальным данным. Варьирование моментов затяжки резьбы в больших пределах не приводило к значительному росту приведенных напряжений в отличие от неупрочненной резьбы и достижения предела выносливости (график 1 на рисунке 5). Однако при этом наблюдалось развитие существенных пластических деформаций. В качестве критерия расчета рационального момента принято достижение в опасном сечении растягивающих напряжений (график 2 на рисунке 5) в размере 60% от предела текучести материала (для исследуемого материала – 40ХНМА σ_T составляет 758 МПа).

При использовании режимов обкатывания, установленных в работе Песина М.В. для аналогичных условий, достижение предела в 60% происходит при моменте затяжки в 39 кН·м, что на 40% превышает момент затяжки, рекомендуемый для необкатанной резьбы (27 кН·м).

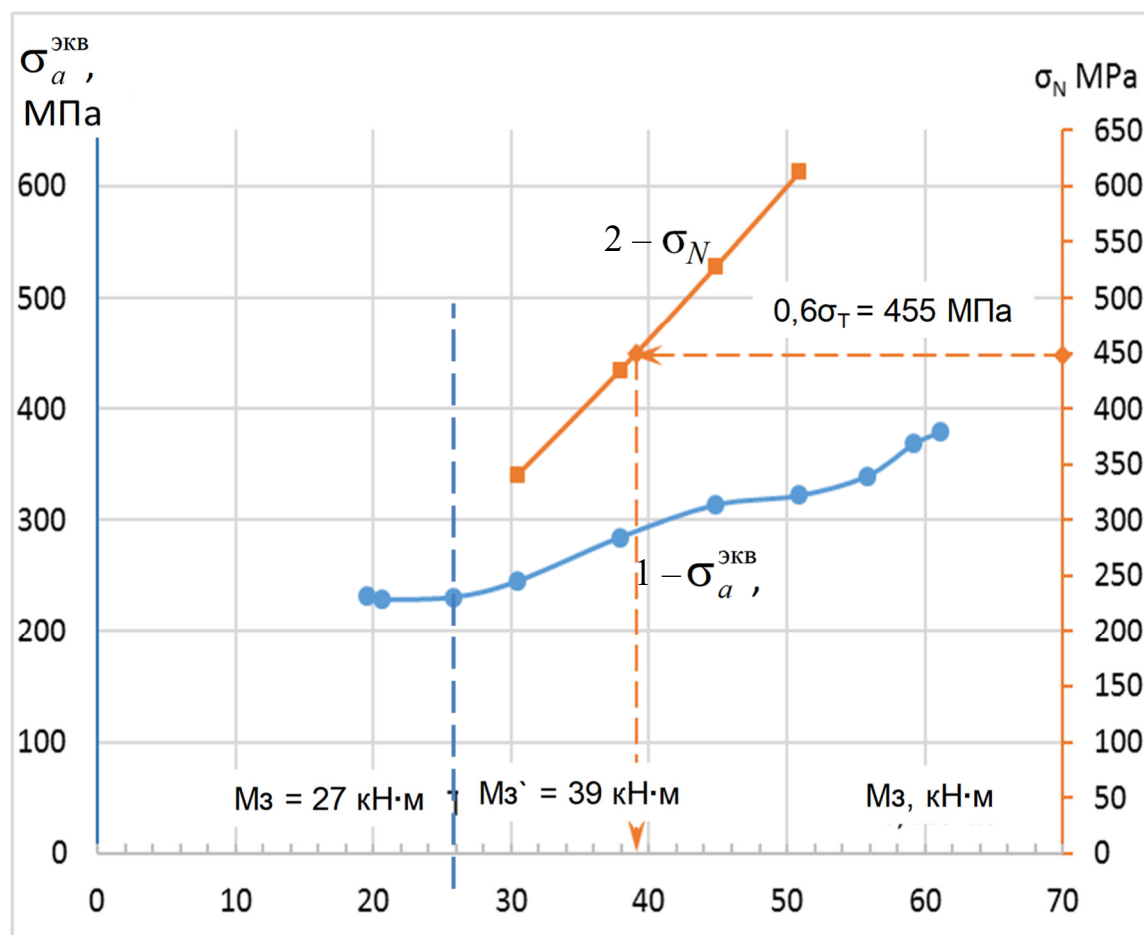


Рисунок 6. Диаграммы напряжений в зависимости от момента затяжки.

Кроме того, был проведен эксперимент по влиянию режимов обкатки (величине внедрения ролика) на напряженно-деформированное состояние в работающем ЗРС и момент затяжки. Установлено, что более предпочтительным с точки зрения назначения максимального рекомендуемого момента затяжки является степень внедрения ролика в профиль образца 0,08 мм.

В четвертой главе представлены методика и результаты экспериментальной проверки результатов моделирования НДС в свинченном соединении ЗРС.

Для дополнительной проверки адекватности результатов моделирования НДС в ЗРС с учетом приложения эксплуатационной нагрузки было разработано приспособление для испытательной разрывной машины. Приспособление предназначено для обеспечения возможности закрепления плоского образца,

вырезанного из ЗРС. Специальное нагрузочное устройство позволяет сымитировать приложение момента затяжки к резьбовому соединению. Учет отличий напряжений в круглом образце и в плоском образце происходит при обработке результатов испытаний. Использование тонкого плоского образца (4 мм) позволяет на порядок снизить усилие растяжения. Сбор данных о возникающих деформациях производился с помощью оптической системы анализа деформаций Vic-3D.

По разработанной для испытуемого образца численной модели определялись деформации в точках контроля и сравнивались с данными натуральных испытаний. Данные собирались в 3 этапа: приложение момента затяжки, нагружение образца соединения растяжением, снятие приложенной растягивающей нагрузки. Было выбрано несколько уровней момента затяжки.

Проведены сравнительные исследования изменений напряжений в резьбе под воздействием переменной нагрузки для соединений со стандартной резьбой и с упрочненной резьбой.

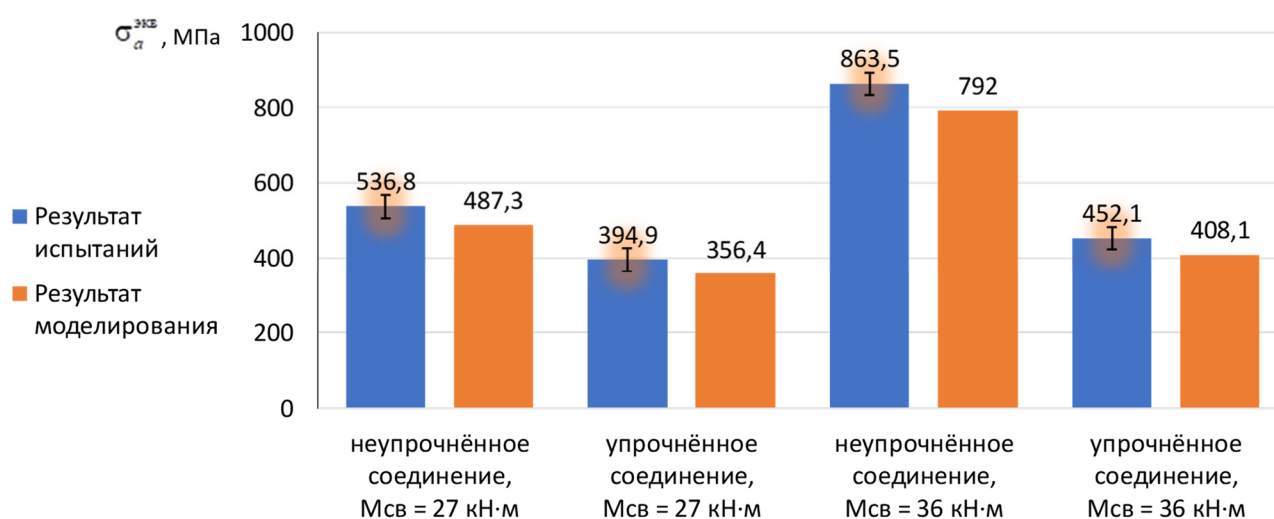


Рисунок 7. Результаты сравнительных исследований.

Установлено, что применение технологии обката впадины резьбы роликом снижает амплитуду напряжений от циклической нагрузки даже при значительном повышении момента затяжки.

Таким образом, полученные результаты натуральных исследований НДС в свинченном резьбовом соединении подтверждают результаты теоретических исследований. А разработанная методика позволяет исследовать сопротивления усталости резьбовых соединений бурильных труб.

В пятой главе представлены методика расчета рациональных моментов затяжки с учетом параметров изготовления и эксплуатации изготавливаемых резьбовых соединений бурильных труб и технологические рекомендации к ним.

На основе разработанных моделей разработан алгоритм оценки сопротивления усталости. Разработанная инженерная методика включает: методику численного моделирования НДС в резьбовом соединении; методику оценки рационального момента затяжки.

Проведены исследования для нескольких типоразмеров бурильных труб с резьбами 3-86, 3-102, 3-122. Разработанные рекомендации по обработке и сборке резьбовых элементов бурильных труб исследованных типоразмеров переданы для внедрения в ООО «ПКНМ-Урал».

Расчитан и передан для внедрения на предприятие рациональный момент затяжки вновь разрабатываемых ООО «ВЭЛБОР ИНТЕГРИТИ СЕРВИС» соединений WIST-57.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Долговечность замковых резьбовых соединений существенно зависит от выбора рационального момента затяжки. При этом назначение момента затяжки с учетом наличия отклонений в параметрах профиля резьбы и наличия упрочняющей обработки изучено не в полной мере.

1. На основе метода конечных элементов разработана методика математического моделирования напряженно-деформированного состояния свинченного резьбового соединения под воздействием эксплуатационных нагрузок, отличающаяся учетом условий изготовления и сборки резьбового соединения. Математическая модель позволяет определять влияние момента затяжки резьбового соединения на его сопротивление усталости.
2. В результате анализа по математической модели установлено что:
 - ✓ при изготовлении неупрочненного резьбового соединения типоразмера 3-122 по середине поля допуска на конусность по ГОСТ 28487–2018 рекомендуется повысить момент затяжки на 10% по сравнению с изделиями, изготавливаемыми по ГОСТ Р 50864–96, при этом циклическая долговечность такого резьбового соединения увеличивается на 28%.
 - ✓ в случае упрочнения резьбы типоразмера 3-122 рекомендуется повышать момент затяжки на 15% по сравнению с рекомендациями для

неупрочненной резьбы, при этом циклическая долговечность резьбового соединения увеличивается на 39%.

3. Разработана методика определения влияния параметров изготовления и сборки бурильных труб на прочность и сопротивление усталости резьбовых соединений на натуральных образцах. Полученные результаты экспериментальных исследований отличаются от теоретических на 7%.
4. Разработана методика, оценки рационального момента затяжки резьбовых соединений вновь разрабатываемых элементов бурильной колонны, на основе численного моделирования сопротивления усталости резьбовых соединений. Результаты исследований внедрены на предприятиях ООО «ПКНМ-Урал» (г. Пермь), и ООО «ВЭЛБОР ИНТЕГРИТИ СЕРВИС» (г. Москва). По разработанной методике назначены новые рекомендуемые моменты затяжки для нескольких изделий с упрочненной резьбой.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых изданиях, включенных в перечень ВАК:

1. Моделирование напряженно-деформированного состояния в резьбовой поверхности в процессе сборки деталей бурового оборудования / В.Ф. Макаров, М. В. Песин, О. А. Халтурин // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2022. – № 8. – С. 366-369.
2. Расчет и моделирование рационального момента затяжки при сборке бурильных труб / М. В. Песин, Макаров В.Ф., Халтурин О.А. // Экспозиция Нефть Газ. – 2022. – № 7. – С. 50-54.
3. Повышение надежности нефтепромыслового и бурового оборудования путем комплексного конструкторско-технологического обеспечения изготовления и сборки резьбовых соединений / М. В. Песин, В. Ф. Макаров, О. А. Халтурин, А. А. Павлович, С. А. Мельников, Е. С. Макаренко // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2021. – Т. 23, № 3. – С. 91-100.
4. К определению оптимального момента затяжки замковых соединений / О. А. Халтурин, В. А. Иванов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2017. – Т. 19, № 4. – С. 111-121.

5. Теоретическое исследование влияния фактических размеров резьбы на зависимость момента затяжки от угла поворота / В. А. Иванов, О. А. Халтурин // Современные проблемы науки и образования [Электронный ресурс]. – 2015. – № 2(58). – 8 с. – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/122-20401>.
6. Метод контроля конических резьб для элементов бурильных колонн на координатно-измерительной машине / В. А. Иванов, О. А. Халтурин, Т. Р. Абляз // Автоматизация и современные технологии. – 2014. – № 10. – С. 6-10.
7. Анализ влияния отклонений геометрии на напряжения в замковом резьбовом соединении / О. А. Халтурин // Современные проблемы науки и образования [Электронный ресурс]. – 2014. – № 2. – 7 с. – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/pdf/2014/2/418.pdf>.

Патент:

8. Зажимное устройство для испытания резьбового соединения на плоских образцах: пат. 211575 Рос. Федерация: МПК G01N 3/04, G01N 3/068 N / Халтурин О.А., Песин М.В., Макаров В.Ф.; № 2022105691/09; заявл. 03.03.2022; опубл. 14.06.2022 Бюл. № 17

Статьи, опубликованные в других изданиях:

9. Совершенствование технологического процесса сборки бурильных труб / М. В. Песин, О. А. Халтурин // Химия. Экология. Урбанистика. – 2021. – Т. 1. – С. 359-362.).
10. Моделирование формообразования поверхности замковой резьбы / О. А. Халтурин, В. А. Иванов, М. М. Базуев // Advanced Science : сб. ст. VIII Междунар. науч.-практ. конф., 23 мая 2019 г., г. Пенза . ч. 1 / Междунар. центр науч. сотрудничества "Наука и Просвещение". – Пенза : МЦНС "Наука и просвещение", 2019. – С. 93-96.
11. Выбор параметров процесса обкатывания конической замковой резьбы / О. А. Халтурин, А. В. Акилова // Master's Journal = Журнал магистров. – 2013. – № 1. – С. 15-20.
12. Моделирование процесса свинчивания конического резьбового соединения. Халтурин О.А., Лурье А.И. Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2010. Т. 12. № 3. С. 54-63