

# Расчет и моделирование рационального момента затяжки при сборке бурильных труб

Песин М.В., Макаров В.Ф., Халтурин О.А.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия  
m.pesin@mail.ru

## Аннотация

Обзор современных методов математического моделирования напряженно-деформированного состояния резьбовых соединений показал невозможность использования аналитических методов 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.

Представлена комплексная модель напряженно-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 и составлена геометрическая модель резьбовой поверхности с учетом этих причин в виде системы параметрических уравнений, описывающих координаты точек резьбовой поверхности в трехмерном пространстве в зависимости от параметров наладки резьботочения.

Для дополнительной проверки адекватности результатов моделирования НДС в ЗРС с учетом приложения эксплуатационной нагрузки было разработано приспособление для испытательной машины. Приспособление предназначено для обеспечения возможности закрепления плоского образца, вырезанного из ЗРС. Специальные нагрузочные устройства позволяют имитировать приложение момента затяжки на соединение.

## Материалы и методы

В статье использованы общенаучные методы, включая синтез, анализ, моделирование. Теоретические исследования проводились на основе теории формообразования поверхностей, теории упруго-пластического деформирования, матричных преобразований 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.

## Ключевые слова

нефтяные и газовые скважины, промышленная безопасность, бурильная труба, момент свинчивания, надежность

## Для цитирования

Песин М.В., Макаров В.Ф., Халтурин О.А. Расчет и моделирование рационального момента затяжки при сборке бурильных труб // Экспозиция Нефть Газ. 2022. № 7. С. 50–54. DOI: 10.24412/2076-6785-2022-7-50-54

Поступила в редакцию: 14.11.2022

DRILLING

UDC 622.276.53.054 | Original Paper

## Calculation and modeling of rational tightening torque when assembling drill pipes

Pesin M.V., Makarov V.F., Khalturin O.A.

Perm national research polytechnic university, Perm, Russia  
m.pesin@mail.ru

## Abstract

A review of modern methods of mathematical modeling of the stress-strain state of threaded connections showed the impossibility of using analytical methods due to the complex configuration of products and the advantage of the finite element method. Existing methods for modeling screwed connections consider only individual stages of the life cycle of threaded connections and do not take into account their mutual influence. A complex model of the stress-strain state of the ADMS and a method for estimating its fatigue resistance, including the stages of manufacturing elements, assembling the joint, and operating, are presented.

Based on the theory of surface shaping, the reasons for the errors in the profile of a conical thread are considered and a geometric model of the threaded surface is compiled, taking into account these reasons, in the form of a system of parametric equations that describe the coordinates of the points of the threaded surface in 3-dimensional space, depending on the parameters threading settings.

For additional verification of the adequacy of the results of modeling the SSS in the ADMS, taking into account the application of the operational load, a fixture for the testing machine was developed. The fixture is designed to provide the possibility of fixing a flat sample cut from the AAMS. Special load devices allow you to simulate the application of torque to the connection.

## Materials and methods

The article uses general scientific methods, including synthesis, analysis, modeling. Theoretical studies were carried out on the basis of the theory of surface shaping, the theory of elastic-plastic deformation, matrix transformations of coordinate systems, mathematical modeling using numerical-analytical methods.

The research was carried out on a personal computer using the Compass-3D CAD system, the Mathcad computer algebra system, and the ANSYS Mechanical finite element analysis system.

## Keywords

oil and gas wells, industrial safety, drill pipe, make-up torque, reliability

## For citation

Pesin M.V., Makarov V.F., Khalturin O.A. Calculation and modeling of rational tightening torque when assembling drill pipes. Exposition Oil Gas, 2022, issue 7, P. 50–54. (In Russ). DOI: 10.24412/2076-6785-2022-7-50-54

Received: 14.11.2022

Анализ результатов исследования характера разрушения бурильных труб в ходе эксплуатации показывает, что циклическая долговечность и прочность замковых соединений составляют более половины причин отказов.

Ужесточающиеся эксплуатационные требования заставляют производителей бурильных труб искать способы повышения сопротивления усталости их резьбовых соединений. Одним из основных методов является обоснованный выбор момента свинчивания резьбового соединения, при котором обеспечивается максимальный эффект. Рациональный момент свинчивания зависит от факторов, формирующих напряженно-деформированное состояние в соединении, включая технологические параметры изготовления элементов резьбового соединения. Однако в настоящий момент в недостаточной степени имеются научные исследования влияния технологических параметров обработки резьб бурильных труб и переводников на изменение параметров их сборки (свинчивания с рациональным моментом) [1–3].

Исследование взаимного влияния параметров изготовления, сборки и эксплуатации на сопротивление усталости резьбовых соединений является актуальной научной задачей, а разработка методики определения рационального момента свинчивания резьбовых соединений в зависимости от параметров изготовления резьбовых элементов имеет важную практическую значимость для предприятий нефтегазовой отрасли Российской Федерации.

Повышению сопротивления усталости замковых резьбовых соединений (ЗРС) посвящены работы Л.Е. Тришмана, Т. Альтмана, М.В. Песина, М.К. Ковалёва, И.В. Кудрявцева, В.И. Семина, Н.Д. Щербюка, Ю.И. Газанчана, М.З. Хостикоева, В.М. Тимонина, Л.А. Лачиняна, А.Е. Сарояна, Е.Д. Мокроносова, А.И. Якушева, М.Ж. Кахадзе, и др. Авторами предложены различные способы как увеличения сопротивления усталости резьбового соединения,

так и выравнивания напряженно-деформированного состояния по сечению резьбы. Многие результаты исследований закреплены в стандартах или в рекомендациях для производителей [4, 5].

Как известно, значительное влияние на сопротивление усталости замковых резьбовых соединений имеет величина момента свинчивания. А его несоблюдение в процессе сборки является одной из причин аварий на буровой с потерями на несколько десятков миллионов рублей.

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 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.

Представлена комплексная модель напряженно-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 и составлена геометрическая модель резьбовой поверхности с учетом этих причин в виде системы параметрических уравнений, описывающих координаты точек резьбовой поверхности в трехмерном пространстве в зависимости от параметров наладки резьботочения.

Модель образующей резьбовой поверхности основана на представлении резьбового реза в виде модульной функции (1)

с совмещением локальной системы координат с вершиной реза (рис. 1).

$$f(t) = \left[ \begin{array}{c} t \\ t \left| \operatorname{atg} \left( \frac{\pi - \alpha}{2} \right) - r \left( \frac{1}{\sin \frac{\alpha}{2}} - 1 \right) \right. \\ 0 \end{array} \right], (1)$$

где  $t$  — независимая параметрическая переменная;  $\alpha$  — угол профиля резьбы;  $r$  — радиус скругления канавки резьбы.

Полная модель резьбового профиля представлена в системе уравнений. С помощью матричных преобразований, учитывающих смещение реза от линии центров ( $h$ ) и изменения углов наклона реза относительно плоскости резания ( $\lambda$ ,  $\gamma$ ) и отклонения угла в плане ( $\Delta\varphi$ ), получается пространственное расположение резьбовой кромки, которое затем проецируется обратно в осевую плоскость изделия с получением описания образующей  $O(t, d)$ . Уравнения направляющих нипеля  $NH(u)$  и муфты  $NM(u)$  учитывают начальную точку траектории ( $XH, ZH$ ) в системе координат основной плоскости нипеля, шаг резьбы ( $P$ ) и конусность ( $K$ ). Получение поверхности резьбового профиля  $PR(t, u)$  резьбы нипеля или муфты производится добавлением к параметрическому уравнению соответствующей направляющей  $N$  осевой  $OO$  и радиальной  $O1$  компонент параметрического уравнения соответствующей образующей с помощью орт  $h$  и  $ko$ . В дальнейшем по осевому сечению полученной модели, имитируя измерение резьбы, можно определить параметры смоделированного профиля. Также возможно «свинтить» модели нипеля и муфты и определить образуемый натяг в соединении до приложения момента.

Моделирование напряженно-деформированного состояния основано на представлении геометрической модели осевого сечения в виде осесимметричной сетки конечных

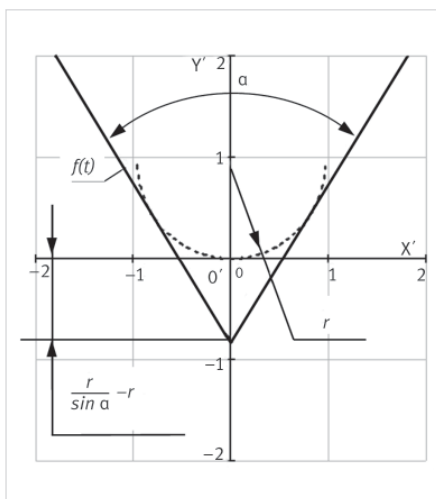


Рис. 1. Проекция функции (1), описывающей режущую кромку реза с углом профиля  $\alpha = 60^\circ$  и радиусом вершины  $r = 0,965$  мм на плоскость  $X'O'Y'$  (в системе координат реза)

Fig. 1. Projection of function (1) describing the cutting edge of a cutter with a profile angle  $\alpha = 60^\circ$  and a tip radius  $r = 0,965$  mm on the  $X'O'Y'$  plane (in the cutter coordinate system)

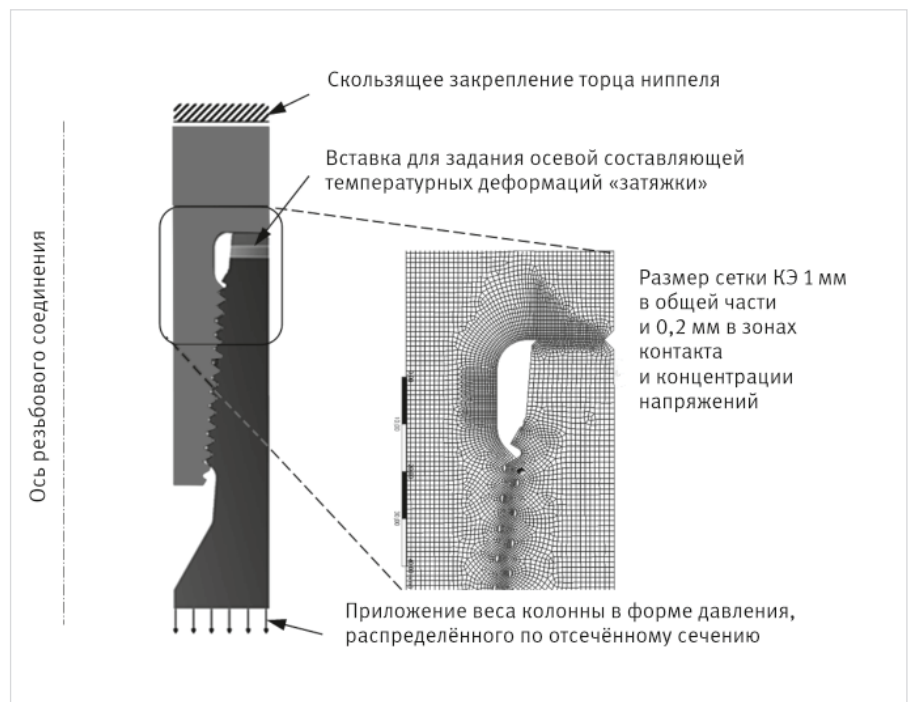


Рис. 2. Конечно-элементная модель свинченного замкового резьбового соединения  
Fig. 2. Finite element model of a screwed tool joint

элементов. Таким образом, резьбовые детали имеют профиль с кольцевыми канавками.

Ввиду осесимметричной постановки профили обкатных роликов 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. Контакт каждого кольца с соответствующей впадиной включается последовательно, таким образом имитируется последовательное прохождение роликов по резьбовым канавкам ниппеля и муфты в соответствии с технологией обработки и формируются остаточные напряжения. Упругопластическое поведение обеспечивается применением билинейной модели материала трубы.

При моделировании процесса свинчивания учитывается контактное взаимодействие деталей (рис. 2).

Момент затяжки заменяется углом свинчивания, который в свою очередь имитируется температурными деформациями материала трубы. Деформации материала, в свою очередь, вызывают относительные смещения профилей резьб ниппеля и муфты. Отличительной особенностью модели является использование не только осевых, но и радиальных деформаций, приводящих к взаимному смещению профилей резьбы вдоль образующей конуса. Кроме того, в методике расчета не принимается прямо пропорциональное соответствие термического расширения моменту затяжки. Напротив, момент затяжки рассчитывается исходя из получаемых контактных давлений между элементами моделей ниппеля и муфты — и, таким образом, из входного параметра моделирования становится выходным.

Граничные условия также представлены в виде замены отсеченной части ниппельного конца скользящим закреплением, а отсеченной части муфтового конца давлением, соответствующим весу отсеченной части колонны.

Оценка сопротивления усталости основана на сравнении двух напряженно-деформированных состояний соединения (цикл): нагруженного весом колонны и разгруженного. Из сравнения этих состояний вычисляются средние напряжения цикла  $\sigma_m$  и амплитудные напряжения  $\sigma_a$  в узлах сетки КЭ. Приведение к напряжениям, эквивалентным амплитудным напряжениям симметричного цикла нагружения  $\sigma_a^{экр}$ , производится по зависимости Гудмана (2) через предел прочности материала  $\sigma_B$ .

$$\sigma_a^{экр} = \frac{\sigma_a}{1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_B}} \quad (2)$$

Таким образом, можно изучать изменение сопротивления усталости при различных моментах затяжки ЗРС с учетом варьирования параметров резьбовых профилей и степени его упрочнения методом поверхностной пластической деформации (например, обкатыванием роликом).

В результате проведенной работы представлены исследования влияния технологии изготовления на НДС в резьбовом соединении и взаимосвязь момента свинчивания и сопротивления усталости по разработанной методике.

Исследование влияния отклонений параметров профиля на взаимосвязь угла

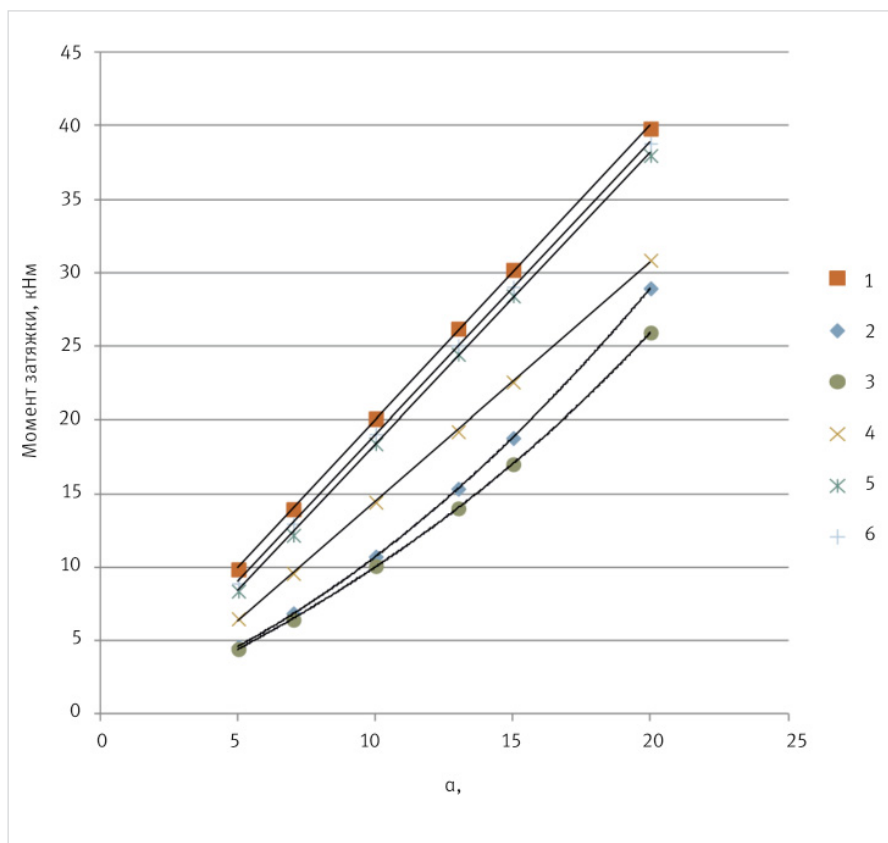


Рис. 3. Зависимости момента затяжки угла поворота для различных сочетаний отклонений: 1 — номинальные значения конусности и номинальный шаг; 2 — середина поля допуска по конусности и максимальный шаг муфты и минимальный ниппеля; 3 — номинальные значения конусности и максимальный шаг муфты и минимальный ниппеля; 4 — середина поля допуска по конусности и минимальный шаг муфты и максимальный ниппеля; 5 — середина поля допуска по конусности и номинальный шаг; 6 — конусность ниппеля минимальна, а муфты максимальна и номинальный шаг

свинчивания и момента затяжки (рис. 3) показало нарушение прямолинейности при наличии отклонений.

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.

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 API позволяет повысить крутящий момент на 10 % (рис. 4).

Исследования влияния отклонения шага показали, что симметричные поля допуска на него также являются не оптимальными. Превышение шага ниппеля над шагом муфты на 0,005 мм приводит к ослаблению напряжений в опасном сечении.

Исследование влияния наличия остаточных напряжений после обкатки показало значительное повышение сопротивления

усталости, что соответствует экспериментальным данным. Варьирование моментов свинчивания резьбы в больших пределах не приводило к значительному росту приведенных напряжений в отличие от неупрочненной резьбы и достижения предела выносливости (график 1, рис. 5). Однако при этом наблюдалось развитие существенных пластических деформаций. В качестве критерия расчета оптимального момента установили достижение в опасном сечении растягивающих напряжений в размере 60 % от предела текучести материала (для исследуемого материала — 40XНМА  $\sigma_T$  составляет 758 МПа).

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

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 машины. Приспособление предназначено для обеспечения возможности закрепления плоского образца, вырезанного из ЗРС. Специальные нагрузочные устройства позволяют имитировать приложение момента затяжки на соединение. Учет отличий напряжений в круглом образце и в вырезанном происходит при обработке результатов испытаний. Использование тонкого плоского образца (4 мм) позволяет существенно снизить требуемое усилие растяжения. Сбор данных производится при помощи оптической системы анализа деформаций Vis-3D.

Зажимное устройство для испытания резьбового соединения на плоских образцах представляет оснастку для испытания образцов резьбовых соединений труб на усталостную выносливость. Данное зажимное устройство, используемое на стендах для испытания натуральных образцов с резьбовыми соединениями и обеспечивает высокую достоверность результатов испытаний при низкой прикладываемой нагрузке за счет замера деформации и расчета величины напряжения по осевому сечению резьбового соединения.

Размещение плоского образца между плоскими корпусом и крышкой устройства и использование клино-упорной системы позволяют создавать напряжение затяжки резьбового соединения, эквивалентное свинчиванию. Выполнение в крышке окна для оптического бесконтактного измерения деформаций дает возможность оценивать деформацию как непосредственно на поверхности концентратора напряжений, так и в глубине изделия, обеспечивая достоверность оценки.

Готовое к испытанию устройство с образцом закрепляют в разрывную машину через захваты, затем осуществляют загрузку устройства осевой силой и разгрузку, аналогичные весу буровой колонны. В результате в образце резьбового соединения возникают переменные напряжения, величины которых в зоне окна снимают с помощью оптической бесконтактной системы в момент нагрузки и разгрузки. По характеру изменения напряжений и его сравнению со свойствами материала образцов делают заключение о сопротивлении усталости резьбового соединения при данном сочетании нагрузок. По многократным испытаниям с разными моментами свинчивания определяют рациональный момент свинчивания для испытываемого соединения.

Преимущества зажимного устройства по сравнению с известными устройствами следующие:

- возможность проводить несколько испытаний на одном образце при низких нагрузках;
- необходимость однократного растяжения образца, при котором осуществляется замер напряжений по всему осевому сечению резьбового соединения;
- непосредственная оценка статической прочности соединения, оценка герметичности стыка;
- косвенная оценка усталостной выносливости.

### Итоги

Установлено, что применение обкатки снижает амплитуду напряжений от циклической нагрузки даже при значительном повышении момента свинчивания.

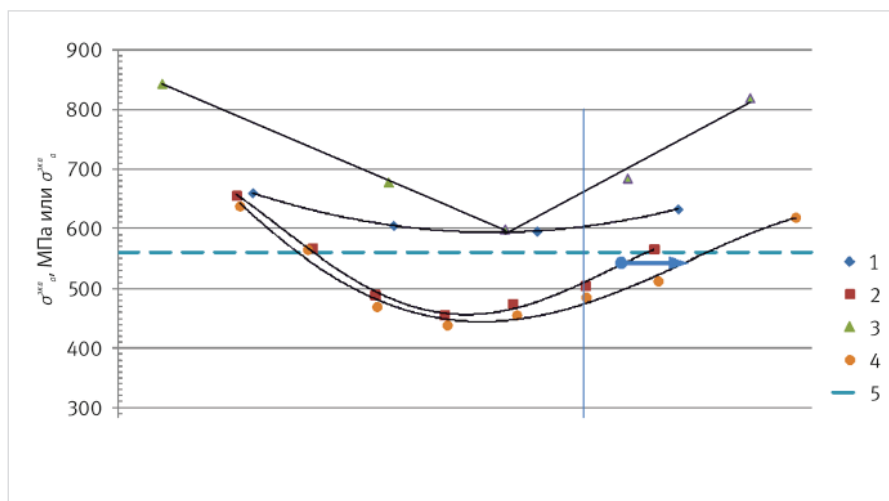


Рис. 4. Зависимость эквивалентных амплитуд напряжений от момента затяжки при отклонениях конусности (вертикальная линия — рекомендуемый производителем момент затяжки): 1 — конусность ниппеля минимальна, а муфты максимальна; 2 — середина поля допуска по конусности по ГОСТ Р 50864–96; 3 — конусность ниппеля максимальна, а муфты минимальна; 4 — середина поля допуска по конусности по ГОСТ 28487–2018 и API 7; 5 — расчетный предел выносливости материала 40ХНМА  $\sigma_{-1} = 560$  МПа

Fig. 4. Dependence of the equivalent stress amplitudes on the tightening torque for taper deviations (the vertical line is the tightening torque recommended by the manufacturer): 1 — the taper of the nipple is minimal, and the coupling is maximum; 2 — the middle of the tolerance field for taper according to GOST R 50864–96; 3 — the taper of the nipple is maximum, and the coupling is minimum; 4 — the middle of the taper tolerance field according to GOST 28487–2018 and API 7; 5 — calculated endurance limit of the material 40HNMA  $\sigma_{-1} = 560$  MPa

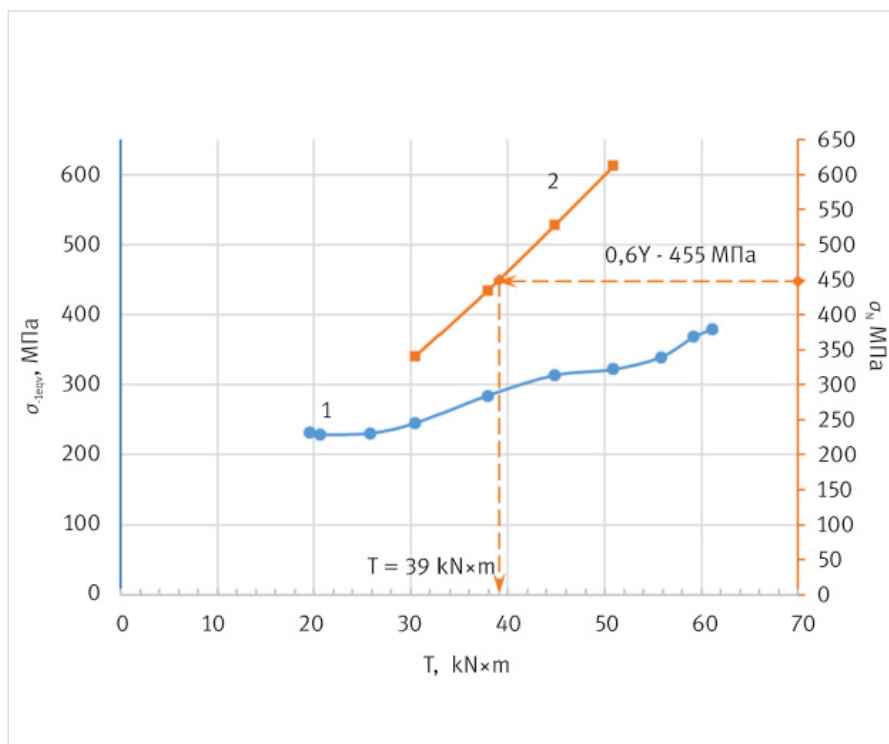


Рис. 5. Диаграммы напряжений в зависимости от момента свинчивания: 1 — эквивалентные симметричному циклу; 2 — осевые в опасном сечении

Fig. 5. Stress diagrams depending on the make-up torque: 1 — equivalent to a symmetrical cycle; 2 — axial in a dangerous section

Таким образом, полученные результаты натуральных исследований напряженно-деформированного состояния в свинченном резьбовом соединении подтверждают результаты

теоретических исследований. Разработанная методика позволяет исследовать сопротивление усталости резьбовых соединений буровых труб.

## Выводы

- На основе метода конечных элементов разработана методология комплексного математического моделирования напряженно-деформированного состояния свинченного резьбового соединения под воздействием эксплуатационных нагрузок, отличающаяся учетом условий изготовления, сборки резьбового соединения и спускоподъемных операций и позволяющая определять взаимосвязь момента свинчивания и сопротивления усталости резьбового соединения.
- Путем вычислительных экспериментов и расчетов по разработанным моделям определено влияние условий изготовления, сборки и эксплуатации на взаимосвязь момента свинчивания и сопротивления усталости резьбовых соединений.
- В результате расчетов установлено, что изготовление по середине поля допуска на конусность по ГОСТ 28487–2018 позволяет повысить момент свинчивания на 10 % по сравнению с изделиями, изготавливаемыми по ГОСТ Р 50864–96.
- Установлена возможность повышения момента свинчивания до 30 % при наличии упрочнения резьбы без потери ресурса.
- Разработана методика определения на натурных образцах влияния параметров изготовления (параметров профиля и степени упрочнения) и сборки буровых труб (момента свинчивания) на прочность и сопротивление усталости

резьбовых соединений с применением современных приборов, инструмента и необходимой аппаратуры.

- Полученные результаты экспериментальных исследований подтверждают результаты теоретических исследований (отклонение составляет 5–7 %).
- Разработана методика оперативной оценки рационального момента свинчивания резьбовых соединений на основе численного моделирования сопротивления усталости резьбовых соединений.

## Литература

1. Песин М.В., Макаров В.Ф., Халтурин О.А., Павлович А.А., Мельников С.А., Макаренко Е.С. Повышение надежности нефтепромыслового и бурового оборудования путем комплексного конструкторско-технологического обеспечения изготовления и сборки резьбовых соединений // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2021. Т. 23. № 3. С. 91–100.
2. Песин М.В., Халтурин О.А., Макаренко Е.С., Макаров В.Ф., Сахмутдинов Т.И. Повышение эффективности бурения и минимизация рисков возникновения аварий при бурении нефтегазовых скважин путем применения циркуляционных переводников //

Экспозиция Нефть Газ. 2021. № 6. С. 72–74.

3. Халтурин О.А., Акилова А.В. Выбор параметров процесса обкатывания конической замковой резьбы // Master's Journal. 2013. № 1. С. 15–20.
4. Песин М.В., Макаров В.Ф., Мельников С.А., Павлович А.А., Халтурин О.А. Совершенствование упрочняющих технологий высоконагруженных поверхностей деталей нефтегазодобывающего оборудования // Инновационное и цифровое машиностроение: материалы Всероссийской научно-технической конференции «Станкостроение и цифровое машиностроение», Всероссийской научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития сварочного производства России». Уфа: УГАТУ, 2021. URL: [https://www.ugatu.su/media/uploads/MainSite/Ob%20universitete/Izdateli/EL\\_izd/innov-i-tsifr-mashinostr.pdf](https://www.ugatu.su/media/uploads/MainSite/Ob%20universitete/Izdateli/EL_izd/innov-i-tsifr-mashinostr.pdf) (дата обращения: 13.07.2021).
5. Песин М.В., Халтурин О.А., Макаров В.Ф. Определение оптимальных параметров технологического процесса сборки буровых труб и элементов компоновки нижней части буровой колонны // Инновационные технологии в материаловедении и машиностроении (ИТММ-2021). Пермь: ПНИПУ, 2021. С. 280–284.

## ENGLISH

## References

1. Pesin M.V., Makarov V.F., Khalturin O.A., Pavlovich A.A., Melnikov S.A. Improving the reliability of oilfield and drilling equipment through integrated design and technological support for the manufacture and assembly of threaded connections. Bulletin of the Perm national research polytechnic university, Mechanical engineering, materials science. 2021. Vol. 23, issue 3, P 91–100. (In Russ).
2. Pesin M.V., Khalturin O.A., Makarenkov E.S., Makarov V.F., Sakhautdinov T.I. Increasing the efficiency of drilling and minimizing the risk of accidents during drilling of oil and gas wells by using circulation sub. Exposition Oil Gas, 2021, issue 6, P. 72–74. (In Russ).
3. Khalturin O.A., Akilova A.V. Choice of parameters for the rolling process of a conical lock thread // Master's Journal, 2013, issue 1, P. 15–20. (In Russ).
4. Pesin M.V., Makarov V.F., Melnikov S.A., Pavlovich A.A., Khalturin O.A. Improvement of hardening technologies for high-load surfaces of parts of oil and gas production equipment. Innovative and digital machine building: materials of All-Russian scientific-technical conference “Machine-tool building and digital machine building”, All-Russian scientific-technical conference “State and prospects of development of welding production in Russia”. Ufa State Aviation Technical University. Ufa: UGATU, 2021. 4 p. URL: [https://ugatu.su/media/uploads/MainSite/Ob%20universitete/Izdateli/EL\\_izd/innov-i-tsifr-mashinostr.pdf](https://ugatu.su/media/uploads/MainSite/Ob%20universitete/Izdateli/EL_izd/innov-i-tsifr-mashinostr.pdf) (date of access: 07/13/2021). (In Russ).
5. Pesin M.V., Khalturin O.A., Makarov V.F. Determination of the optimal parameters of the technological process of assembling drill pipes and elements of the layout of the lower part of the drill string. Innovative technologies in materials science and mechanical engineering (ITMM-2021): materials 5th scientific-practical. conf. with international participation (Perm, September 27 – October 1, 2021. Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Ministry of Education and Science of the Perm Territory, Perm National Research Polytechnic University). Perm: Publishing House of PNIPIU, 2021, P. 280–284. (In Russ).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Песин Михаил Владимирович**, д.т.н., профессор, декан механико-технологического факультета, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия  
Для контактов: [m.pesin@mail.ru](mailto:m.pesin@mail.ru)

**Макаров Владимир Федорович**, д.т.н., профессор кафедры инновационные технологии машиностроения, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

**Халтурин Олег Александрович**, аспирант кафедры инновационные технологии машиностроения, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

**Pesin Mihail Vladimirovich**, doctor of technical sciences, professor, Dean of mechanical technological faculty, Perm national research polytechnic university, Perm, Russia  
Corresponding author: [m.pesin@mail.ru](mailto:m.pesin@mail.ru)

**Makarov Vladimir Fedorovich**, doctor of technical sciences, professor of the department of innovative engineering technologies, Perm national research polytechnic university, Perm, Russia

**Khalturin Oleg Alexandrovich**, postgraduate student of the department of innovative technologies of mechanical engineering, Perm national research polytechnic university, Perm, Russia