

На правах рукописи



Дубинова Ольга Богдановна

**ФРЕТТИНГ-ИЗНАШИВАНИЕ ВИБРОНАГРУЖЕННЫХ ФЛАНЦЕВЫХ
СОЕДИНЕНИЙ**

Специальность 2.5.3. Трение и износ в машинах

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва, 2024

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина» (ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина»)

Научный руководитель: **Елагина Оксана Юрьевна**
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой трибологии и технологии ремонта нефтегазового оборудования ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина»

Официальные оппоненты: **Куксенова Лидия Ивановна**
доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник отдела конструкционного материаловедения ИМАШ РАН

Измеров Михаил Александрович
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры трубопроводных транспортных систем ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Ведущая организация: **Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет»**

Защита диссертации состоится «17» июня 2024 года в 14.00 на заседании диссертационного совета 44.2.005.01 на базе ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения» по адресу: 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д.2 (главный корпус, конференц-зал А 230).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО РГУПС по адресу: 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д.2 и на сайте [www. https://www.rgup.ru](https://www.rgup.ru).

Автореферат разослан « ___ » _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 44.2.005.01
доктор технических наук, профессор



П.Н. Щербак

Актуальность темы исследований. Значительная часть оборудования и конструкций газотранспортной отрасли эксплуатируется с применением фланцевых соединений. Фланцевые соединения широко используются в установках комплексной подготовки газа, в системе магистрального транспорта, на компрессорных (КС) и газораспределительных станциях (ГРС). Увеличение объемов и скорости транспортировки газа в последнее десятилетие приводит к возрастанию количества отказов по причине разгерметизации фланцевых соединений. Согласно данным статистики, основной причиной нарушения герметичности в 40% случаев, является высокий уровень вибрации низкой частоты, возникающий при транспортировке газового потока.

Во фланцевых соединениях вибрации приводят к самопроизвольному развинчиванию резьбовых соединений и разрушению уплотнений в результате фреттинга – механического изнашивания соприкасающихся тел в условиях колебательных относительных микросмещений. Для предотвращения самопроизвольного развинчивания болтовых и шпилечных соединений в практике проектирования разработано много конструктивных решений, позволяющих устранить данную проблему. Вопросу разгерметизации в результате фреттинг-изнашивания уплотнения уделялось значительно меньше внимания.

Повышение надежности и безопасной эксплуатации фланцевых соединений на объектах газового комплекса требует расширения спектра расчетных методик, позволяющих учесть негативное влияние вибрации на их отдельные элементы и соединение в целом. Таким образом, исследования, направленные на увеличение наработки фланцевых соединений трубопроводных обвязок (ТПО) и оборудования газотранспортных систем, подверженных фреттинг-изнашиванию в условиях вибрации, являются актуальными и перспективными.

Степень разработанности темы. Изучению развития фреттинг-изнашивания и его влияния на качественные характеристики поверхностного слоя материала посвящено много работ как отечественных – И.Л. Голего, А.Я. Алябьев, В.В. Шевеля, М.С. Островский, А.Н. Петухов, И.И. Артемов, А.В. Дрязгин, В.В. Ковалевский и Т.Э. Сергутина, Ю.И. Шалапко и Т.В. Тарасова, И.Р. Асланян, С.Г. Докшанин, Д.С. Горлов, Г.Г. Заверюха, так и зарубежных авторов – Г. Томлинсон, К.Г. Райт, Г.Г. Улиг и Р.У. Реви, Р.Б. Уотерхауз, Р.Б. Хейвуд. Однако в этих работах рассматривается фреттинг, возникающий при контакте металлических поверхностей. Развитие фреттинга в зоне контакта фланец–уплотнение исследуется впервые.

Целью исследований является повышение наработки вибронегруженных фланцевых соединений, подверженных фреттинг-изнашиванию. Для достижения поставленной цели сформулированы следующие **задачи исследований**:

1. Разработать математическую модель формирования напряженно-деформированного состояния в материале уплотнения при контакте со стальной поверхностью фланца разной шероховатости в условиях трения покоя и трения скольжения.

2. Провести экспериментальные исследования по определению триботехнических характеристик пар трения сталь–уплотнительный материал в условиях трения покоя и трения скольжения при фреттинге.

3. Разработать расчетную методику оценки герметичности фланцевых соединений, подверженных фреттинг-изнашиванию при вибрации.

4. Разработать техническое решение для повышения наработки вибронегруженных фланцевых соединений.

Объектом исследований являются фланцевые соединения технологических трубопроводов и оборудования газотранспортной отрасли, работающие в условиях вибрационных воздействий разной интенсивности.

Предмет исследований – изучение условий развития фреттинг-изнашивания в зоне контакта фланец–уплотнение и его влияния на разгерметизацию фланцевых соединений.

Научная новизна включает в себя следующие наиболее значимые результаты:

1. Показано, что регулирование параметров шероховатости стальной поверхности фланца способствует изменению коэффициента трения покоя в зоне контакта фланец–уплотнение. Комплексным параметром шероховатости, уменьшение которого приводит к росту коэффициента трения покоя, является угол при вершине выступов профиля.

2. Определено, что значения молекулярных констант трения покоя (τ_0 и β) зависят от твердости материала уплотнения и величины параметра шероховатости R_a уплотнительной поверхности фланца. Максимальную чувствительность к R_a по обеим константам показал полиуретан. Для паронита, фторопласта и терморасширенного графита (ТРГ) существенное влияние R_a наблюдается только на константу τ_0 . Константа β у этих материалов меняется в зависимости от R_a в узком диапазоне.

3. Установлено, что коэффициент трения скольжения при перемещении поверхности фланца по уплотнению из паронита, фторопласта и ТРГ достигает максимума при значениях параметра шероховатости R_a стальной поверхности в диапазоне от 3,41 мкм до 5,23 мкм. При этом влияние контактного давления на коэффициент трения скольжения в зоне контакта фланец–уплотнение менее выражено, чем влияние шероховатости.

4. Выявлено, что толщина пластически деформированного слоя материала уплотнения при микросмещениях в процессе фреттинга с ростом параметра шероховатости R_a поверхности фланца увеличивается. Применение материалов с низкими значениями отношения коэффициента трения скольжения к критическому контактному давлению ($f_{ск}/p_{кр}$) способствует уменьшению толщины слоя уплотнения, испытывающего пластическую деформацию.

Теоретическая значимость диссертационной работы:

1. Исследовано влияние шероховатости поверхности фланца и твердости материала уплотнения на развитие фреттинга во фланцевом соединении. Установлено влияние размера угла при вершине выступов шероховатости профиля стальной поверхности на коэффициент трения покоя в зоне контакта фланец–уплотнение.

2. Получены зависимости для определения молекулярных констант трения покоя, учитывающие параметр шероховатости R_a уплотнительной поверхности фланца.

3. Предложено оценивать изменение интенсивности изнашивания уплотнительного материала во фланцевом соединении при фреттинге с использованием комплексного показателя фреттинга, учитывающего величину контактного давления и виброскорость.

4. Получен комплекс расчетных зависимостей, позволяющих оценить изменение герметичности вибронагруженных фланцевых соединений в зависимости от контактного давления в процессе накопления износа уплотнительного материала, виброскорости и рабочего давления в трубопроводе.

Практическая значимость диссертационной работы:

1. Разработана методика оценки герметичности вибронагруженных фланцевых соединений, подверженных фреттинг-изнашиванию. Данная методика позволяет осуществлять контроль за изменением давления обжатия уплотнения и момента затяжки резьбовых соединений, на основании которых формируется план мероприятий по своевременному предотвращению разгерметизации фланцевых соединений, работающих в условиях вибрации.

2. Предложено техническое решение для повышения наработки вибронагруженных фланцевых соединений. Получены граничные условия для определения профиля уплотнительной поверхности фланца, предупреждающего развитие фреттинга.

3. Результаты диссертационной работы использованы при разработке Р Газпром «Газораспределительные станции. Методика определения предельно допустимых режимов эксплуатации трубопроводов и оборудования ГРС» по договору № 7053-308-19-9 от 22.11.2019 с ПАО «Газпром», принятого к внедрению в 2023 г.

Методы исследований. В диссертации использовалась современная инструментальная база, включающая как стандартизированное оборудование, так и стендовое оборудование, разработанное в рамках исследования. В качестве стандартных методик проведения исследований и испытаний использованы: профилометрия с применением профилограф-профилометра XR20 (Mahr GmbH), твердометрия по Шору (твердомер Шор Тип D «ВОСТОК-7»), определение механических свойств уплотнительных материалов при растяжении и сжатии на универсальной испытательной машине Shimadzu AGS-X 100 kN. Трибологические испытания проведены с применением методики определения статического и динамического коэффициентов трения по ISO 8295–2004 на установке МТ-085 с модернизированным тензодатчиком, настроенным на возможность задания усилия прижатия до 5000 ± 10 г. Расширенная методика испытаний на фреттинг-изнашивание выполнена на экспериментальной установке по ГОСТ 23.211–80. Стендовые испытания проведены на экспериментальном стенде, имитирующем условия работы ТПО в условиях вибрации от движения высокоскоростного потока газа, в котором для замеров параметров вибрации использовался виброметр ВК-5М.

В работе использован системный подход, включающий моделирование напряженно-деформированного состояния зоны контакта фланец–уплотнение на стадии трения покоя, трения скольжения и многоцикловых деформаций, экспериментальное определение триботехнических характеристик, получение на их основе комплекса расчетных зависимостей методами абстрагирования, идеализации и обобщения, и последующая проверка их адекватности путем проведения стендовых испытаний натуральных элементов ТПО.

Положения, выносимые на защиту

1. Результаты триботехнических характеристик пар трения сталь–уплотнительный материал, полученные в условиях фреттинга и влияющие на его зарождение и развитие.

2. Расчетно-экспериментальная методика оценки герметичности вибронагруженных фланцевых соединений, подверженных фреттинг-изнашиванию.

3. Техническое решение для повышения наработки вибронагруженных фланцевых соединений в условиях фреттинга.

Степень достоверности. Достоверность выдвинутых выводов и расчетных зависимостей подтверждается сходимостью теоретических и экспериментальных результатов с погрешностью в пределах 3,99 – 9,63 %. Достоверность полученных в диссертации результатов обеспечивается корректным проведением экспериментальных исследований, повторяемостью значений, полученных на 3-5 параллельно выполненных испытаниях с применением стандартизированных средств измерений (прошедших государственную поверку).

Соответствие научной специальности. Диссертационная работа соответствует следующим пунктам паспорта научной специальности 2.5.3. Трение и износ в машинах:

– **пункт 2.** Механика контактного взаимодействия при трении скольжения, трении качения и качения с проскальзыванием с учетом качества поверхностного слоя;

– **пункт 3.** Закономерности различных видов изнашивания и поверхностного разрушения;

– **пункт 10.** Физическое и математическое моделирование трения и изнашивания.

Личный вклад автора в диссертационную работу заключается в самостоятельном проведении экспериментальных исследований по измерению триботехнических характеристик выбранных пар трения; получении на основании экспериментальных данных расчетных зависимостей, описывающих влияние шероховатости и твердости материала уплотнения на условия зарождения и развития фреттинга; разработке новой методики оценки герметичности фланцевых соединений, подверженных фреттинг-изнашиванию, позволяющей учесть влияние вибрационных и нагрузочных параметров, а также характеристики уплотнительного материала. Автор принимал участие в подготовке и написании статей и докладов по результатам исследований.

Апробация работы. Основные результаты проведенных исследований докладывались и обсуждались на международных и всероссийских научно-

технических конференциях, в том числе: XVI, XVII Международная учебно-научно-практическая конференция «Трубопроводный транспорт» (г. Уфа, УГНТУ, 2021 г., 2022 г.); IV, V, VI Региональная научно-техническая конференция «Губкинский университет в решении вопросов нефтегазовой отрасли России (г. Москва, РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2020 г., 2021 г., 2022 г.); XIV Международная научно-техническая конференция, посвященная 100-летию со дня рождения А.П. Семёнова «ТРИБОЛОГИЯ – МАШИНОСТРОЕНИЮ» (г. Москва, ИМАШ РАН, 2022 г.); XIV Всероссийская конференция молодых ученых, специалистов и студентов «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ: ГАЗ, НЕФТЬ, ЭНЕРГЕТИКА» (г. Москва, РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2022 г.); 76-я Международная молодежная научная конференция «Нефть и газ-2022» (г. Москва, РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2022 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 печатных работ, из них в рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ – 3, в изданиях, включенных в международную базу данных Scopus и Web of Science – 1.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, библиографического списка из 119 наименований и 5 приложений. Общий объем работы составляет 158 страниц, включая 47 иллюстраций и 36 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследований, поставлены цель и задачи, представлена научная новизна, теоретическая и практическая значимость.

В первой главе проведен анализ статистики отказов фланцевых соединений в газовой промышленности, изучены вибрационные воздействия, возникающие при движении потока газа с разной скоростью, а также исследованы и проанализированы существующие механизмы развития фреттинга, что позволило сформулировать цель и задачи исследований.

Во второй главе представлены методики, оборудование, режимы проведения испытаний и материалы, выбранные для исследований. В качестве уплотнения выбраны неметаллические материалы: паронит, фторопласт, ТРГ, полиуретан. В качестве материала фланца выбрана наиболее широко применяемая сталь 20.

Для определения механических свойств уплотнительных материалов выполнены замеры твердости по шкале Шора (D) в соответствии с ГОСТ 24621-2015, испытания при одноосном растяжении по ГОСТ 11262-2017 и испытания при сжатии с определением характеристики восстановления уплотнительного материала по ГОСТ 33784-2016.

Для проведения экспериментальных исследований по измерению триботехнических характеристик выбранных пар трения сталь–уплотнительный материал поверхность образца из стали 20 подвергалась разным видам механической обработки, в результате которой формировался микрорельеф с разной шероховатостью (таблица 1).

Таблица 1 – Основные параметры шероховатости стального образца в зависимости от вида механической обработки

Вид механической обработки	R_z , мкм	R_a , мкм	S_m , мкм
Шлифование	1,9	0,394	351,500
Пескоструйная обработка корундом в течение 1 мин	19,9	3,410	267,410
Пескоструйная обработка корундом в течение 3 мин	35,3	5,230	220,568
Грубая обработка напильником	53,9	6,621	611,002

Исследование влияния контактного давления и микрогеометрии поверхности на формирование условий возникновения и развития фреттинга проводилось с применением методики определения статического и динамического коэффициентов трения по ISO 8295-2004 на установке МТ-085 с модернизированным тензодатчиком для создания усилия прижатия до 5000 ± 10 г. Испытания на фреттинг-изнашивание выполнены в соответствии с расширенной методикой по ГОСТ 23.211-80. Для верификации результатов лабораторных испытаний выполнен цикл натурных испытаний фланцевых соединений на стенде, имитирующем работу ТПО в условиях вибрации от движения высокоскоростного потока газа (рисунок 1).

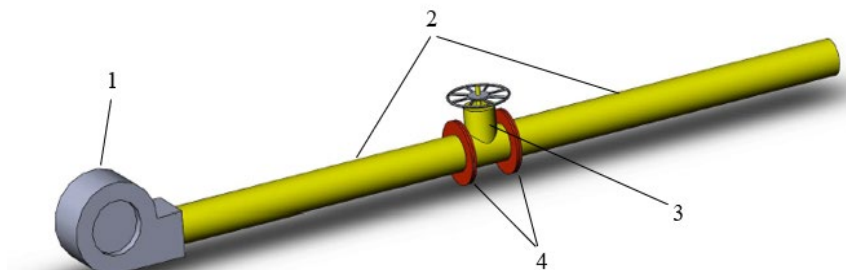


Рисунок 1 – Схема стенда:
1 – вентилятор, 2 – участки трубопровода
3 – задвижка, 4 – фланцевые соединения

На основе результатов стендовых испытаний определялась скорость снижения момента затяжки Δv резьбового соединения по формуле:

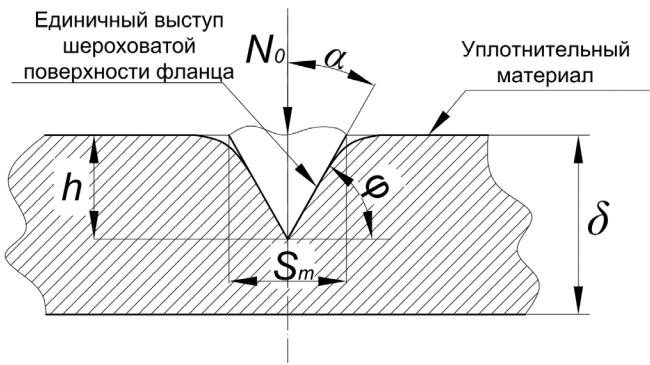
$$\Delta v = \frac{M_{нач} - M_i}{N_{цикл}} \quad (1)$$

где $M_{нач}$ – начальный момент затяжки, $H м$; M_i – измеренный момент затяжки на каждом цикле испытаний в серии, $H м$; $N_{цикл}$ – количество циклов вибрации.

В третьей главе проведено расчетно-экспериментальное моделирование процесса зарождения и развития фреттинга на уплотнительных поверхностях фланцев по трем этапам: предсмещение, микросдвиг и возвратно-поступательное перемещение.

В качестве первого этапа развития фреттинга рассмотрены условия трения покоя. Для моделирования данных условий взята принципиальная схема внедрения единичного выступа шероховатости в упругое полупространство (рисунок 2). В качестве базовых характеристик выступов шероховатости использовались среднеарифметическое отклонение профиля шероховатости R_a и средний шаг неровностей профиля S_m , формирующие фактическую площадь контакта.

Рисунок 2 – Схема внедрения единичного выступа шероховатости стальной поверхности фланца в упругое полупространство уплотнительного материала: N_0 – усилие прижатия, действующее на единичный выступ; h – глубина неполного внедрения выступа; S_m – средний шаг неровностей профиля; δ – толщина уплотнительного материала; α – половина угла при вершине выступа; φ – угол наклона выступа



При внедрении единичного выступа образуется поверхность контакта, площадь S_ϕ которой зависит от глубины внедрения и угла при вершине выступа, определяемого средним шагом неровностей профиля и параметром шероховатости R_a :

$$\alpha = \arctg\left(\frac{S_m}{4 \cdot R_a}\right) \quad (2)$$

– неполное внедрение выступа на глубину $h < 2 \cdot R_a$:

$$S_{\phi \text{ неполн}} = \pi \cdot h \cdot \tg \alpha \cdot \frac{h}{\cos \alpha} = \pi \cdot \frac{h^2 \cdot \tg \alpha}{\cos \alpha} \quad (3)$$

– полное внедрение на глубину $h = 2 \cdot R_a$:

$$S_{\phi \text{ полн}} = \pi \cdot \frac{S_m}{2} \cdot \frac{2 \cdot R_a}{\cos \alpha} = \pi \cdot \frac{S_m \cdot R_a}{\cos \alpha} \quad (4)$$

Определить усилие, необходимое для полного внедрения выступов шероховатости в уплотнительный материал, можно используя данные по его твердости, определяемые методом Шора (D), согласно которому конусный индентор внедряется в материал на фиксированную величину 2,5 мм. Отношение этой величины к глубине полного внедрения выступа шероховатости $2 \cdot R_a$ позволяет определить усилие прижатия N_0 , действующее на единичный выступ:

$$\frac{F_{HD}/S_{HD}}{N_0/S_\phi} = \frac{2,5}{2 \cdot R_a} \quad (5)$$

где F_{HD} – усилие, прилагаемое для внедрения дюрометра типа D, H; S_{HD} – площадь поверхности отпечатка, образованная при внедрении индентора, мм^2 ;

Связь между усилием прижатия, действующим на единичный выступ шероховатости N_0 , и усилием, действующим на всю шероховатую поверхность N , зависит от количества выступов шероховатости n :

$$N_0 = \frac{N}{n} = \frac{N \cdot S_m^2}{S} \quad (6)$$

где S – площадь шероховатой стальной поверхности, мм^2 .

На основании вышеизложенного, получена формула для расчета минимального контактного давления $p_{\text{вн}}$, обеспечивающего полное внедрение выступа шероховатости высотой $2 \cdot R_a$:

$$p_{\text{вн}} = 0,236 \cdot \frac{H_D \cdot R_a^2}{S_m \cdot \cos \alpha} \quad (7)$$

При контактном давлении, величина которого меньше $p_{вн}$, глубина неполного внедрения определяется как:

$$h = \sqrt[3]{8,479 \cdot \frac{p \cdot S_m^2 \cdot \cos \alpha}{H_D \cdot \operatorname{tg} \alpha}} \quad (8)$$

где p – контактное давление (давление обжатия), МПа.

На основании формул (3), (4), (6) получены выражения для определения нормальных сжимающих напряжений $\sigma_{сж}$, формирующихся в материале уплотнения при неполном и полном внедрении выступов шероховатости стальной поверхности:

$$\sigma_{сж \text{ неполн}} = \frac{N \cdot S_m^2}{S_{обр}} \cdot \frac{\cos \alpha}{\pi \cdot h^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha} = p \cdot \frac{S_m^2 \cdot \cos \alpha}{\pi \cdot h^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha} \quad (9)$$

$$\sigma_{сж \text{ полн}} = \frac{N \cdot S_m^2}{S} \cdot \frac{\cos \alpha}{\pi \cdot S_m \cdot R_a} = p \cdot \frac{4 \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \cos \alpha}{\pi} = p \cdot \frac{4 \cdot \sin \alpha}{\pi} \quad (10)$$

Тангенциальные напряжения τ , возникающие при контакте выступа шероховатости стальной поверхности с материалом уплотнения, характеризуют адгезионную составляющую силы трения покоя. Согласно работам И.В. Крагельского, Б.В. Дерягина, Н.М. Михина зависимость адгезионной составляющей удельной силы трения описывается в виде двучленного закона:

$$\tau = \tau_0 + \beta \cdot \frac{N}{S} \quad (11)$$

где τ_0 и β – молекулярные константы трения, определяемые физико-химическим состоянием поверхностей контактирующих тел.

На основании уравнений (9), (10), (11) и, учитывая зависимость тангенциальных и нормальных напряжений, получены выражения для определения коэффициента трения покоя f_n , возникающего при неполном и полном внедрении:

$$f_{п \text{ неполн}} = \frac{(\tau_0 + \beta \cdot p)}{p} \cdot \frac{\pi \cdot h^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha}{S_m^2 \cdot \cos \alpha} = \frac{(\tau_0 + \beta \cdot p)}{p} \cdot \frac{S_\phi}{S_m^2} \quad (12)$$

$$f_{п \text{ полн}} = \frac{(\tau_0 + \beta \cdot p)}{p} \cdot \frac{\pi}{4 \cdot \sin \alpha} \quad (13)$$

Таким образом, при полном внедрении комплексным параметром шероховатости, уменьшение которого приводит к росту коэффициента трения покоя, является угол при вершине выступов профиля.

С использованием экспериментальных значений коэффициента трения покоя по выражениям (7) – (13), получены графические (рисунок 3) и расчетные (таблица 2) зависимости для определения молекулярных констант трения. Анализ полученных уравнений показал, что максимальную чувствительность к увеличению R_a по обеим константам показал полиуретан. Для типовых уплотнительных материалов существенное влияние R_a отмечается только на константу τ_0 , константа β в зависимости от R_a меняется в узком диапазоне.

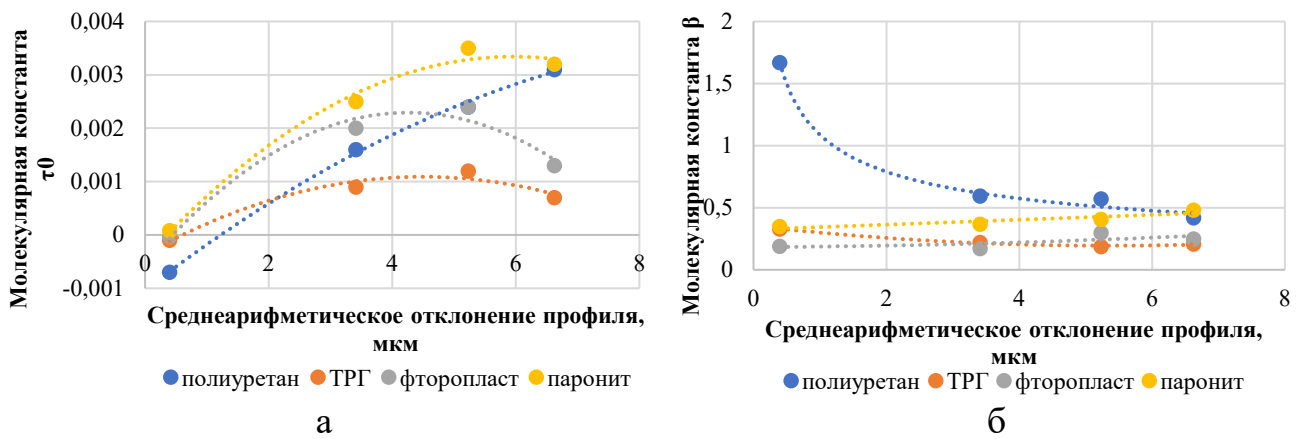


Рисунок 3 –Изменение молекулярных констант трения τ_0 (а) и β (б) в зависимости от параметра шероховатости R_a стальной поверхности

Таблица 2 – Молекулярные константы трения

Пара трения	Уравнение для молекулярных констант τ_0, β	Коэффициент достоверности аппроксимации
Полиуретан-сталь 20	$\tau_0 = -0,00004 \cdot R_a^2 + 0,0009 \cdot R_a - 0,001;$ $\beta = 1,0877 \cdot R_a^{-0,461}$	0,9979 0,9939
ТРГ-сталь 20	$\tau_0 = -0,00007 \cdot R_a^2 + 0,0006 \cdot R_a - 0,0004;$ $\beta = 0,2754 \cdot R_a^{-0,188}$	0,9592 0,9651
Фторопласт-сталь 20	$\tau_0 = -0,0002 \cdot R_a^2 + 0,0013 \cdot R_a - 0,0006;$ $\beta = 0,0016 \cdot R_a^2 + 0,0031 \cdot R_a + 0,1821;$	0,9674 0,7668
Паронит-сталь 20	$\tau_0 = -0,0001 \cdot R_a^2 + 0,0013 \cdot R_a - 0,0004;$ $\beta = 0,0198 \cdot R_a + 0,3239$	0,9891 0,8083

На основании данных таблицы 2 получены выражения для расчета коэффициента трения покоя:

$$f_{\Pi} = \frac{(-0,00004 \cdot R_a^2 + 0,0009 \cdot R_a - 0,001 + 1,0877 \cdot R_a^{-0,461} \cdot p)}{p} \cdot \frac{\pi}{4 \cdot \sin \alpha} \quad (14)$$

$$f_{\Pi} = \frac{(-0,00007 \cdot R_a^2 + 0,0006 \cdot R_a - 0,0004 + 0,2754 \cdot R_a^{-0,188} \cdot p)}{p} \cdot \frac{\pi}{4 \cdot \sin \alpha} \quad (15)$$

$$f_{\Pi} = \frac{(-0,0002 \cdot R_a^2 + 0,0013 \cdot R_a - 0,0006 + (0,0016 \cdot R_a^2 + 0,0031 \cdot R_a + 0,1821) \cdot p)}{p} \cdot \frac{\pi}{4 \cdot \sin \alpha} \quad (16)$$

$$f_{\Pi} = \frac{(-0,0001 \cdot R_a^2 + 0,0013 \cdot R_a - 0,0004 + (0,0198 \cdot R_a + 0,3239) \cdot p)}{p} \cdot \frac{\pi}{4 \cdot \sin \alpha} \quad (17)$$

В качестве второго этапа развития фреттинга рассмотрены условия, возникающие при трении скольжения. Для моделирования данных условий использована схема скольжения шероховатой поверхности фланца по уплотнению, вызывающая первичную упругопластическую деформацию его поверхностных слоев (рисунок 4).

Стальной образец размерами $a \times b$, прижатый с нормально направленной к поверхности уплотнения силой N , формирует в зоне контакта давление p :

$$p = \frac{N}{a \cdot b} \quad (18)$$

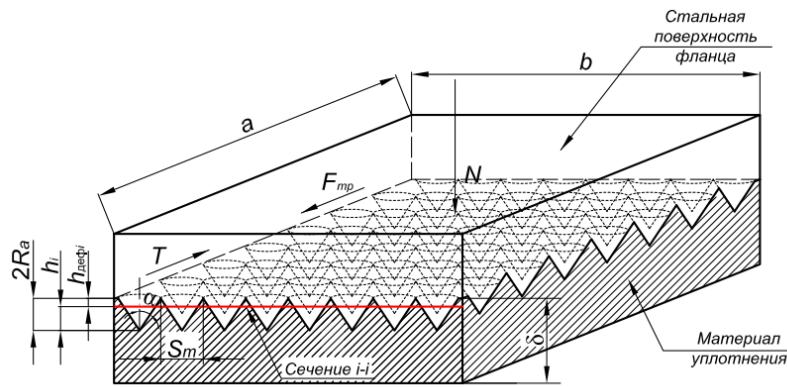


Рисунок 4 – Схема внедрения выступов шероховатости стальной поверхности фланца в поверхность уплотнения: a , b – длина и ширина шероховатой стальной поверхности; N – усилие прижатия; T – тангенциальная сила; $F_{тр}$ – сила трения скольжения; S_m – средний шаг неровностей профиля; δ – толщина уплотнения; $2 \cdot R_a$ – полная глубина внедрения выступов шероховатости стальной поверхности; h_i – расстояние i -той плоскости от вершины выступов шероховатости; $h_{деф}$ – глубина деформированного слоя уплотнения

В результате перемещения стального образца относительно уплотнения со скоростью v за единицу времени t , формируется единичная площадь сдвига S_0 :

$$S_0 = b \cdot v \cdot t \quad (19)$$

При взаимодействии стального образца и уплотнительного материала за единицу времени образуется n_0 зон деформации в результате внедрения выступов шероховатости стальной поверхности. Представляя их в виде конусов с диаметрами оснований равными параметру шероховатости S_m , число зон деформации n_0 составит:

$$n_0 = \frac{4 \cdot S_0}{\pi \cdot S_m^2} = \frac{4 \cdot b \cdot v \cdot t}{\pi \cdot S_m^2} \quad (20)$$

Так как материал уплотнения полностью заполняет углубления микрорельефа стального образца, принимаем глубину внедрения выступов равной удвоенному параметру шероховатости R_a стальной поверхности.

Перемещение стального образца по уплотнению определяет коэффициент трения скольжения $f_{ск}$. Данное перемещение сопровождается упругой и пластической деформациями локальных объемов уплотнительного материала в результате действия сдвигающих сил и формирования напряжений среза. При постоянной скорости скольжения на площадь единичного поперечного сечения i - i уплотнительного материала действует удельная тангенциальная сила $t_{уд}$:

$$t_{уд} = \frac{f_{ск} \cdot N \cdot b \cdot h_{деф i}'}{b \cdot \delta} \quad (21)$$

где: $h_{деф i}'$ – производная от толщины единичного деформированного слоя уплотнения в i - i сечении, мм.

Под действием удельной тангенциальной силы в i - i сечении уплотнительного материала формируются напряжения среза $\tau_{уд i}$, зависящие от площади среза S_i , занимаемой уплотнительным материалом в данном сечении в единицу времени при перемещении с постоянной скоростью:

$$\tau_{уд i} = \frac{f_{ск} \cdot N}{\delta \cdot S_i} \quad (22)$$

Удельные критические касательные напряжения среза τ_i^* с учетом толщины уплотнения определяются как:

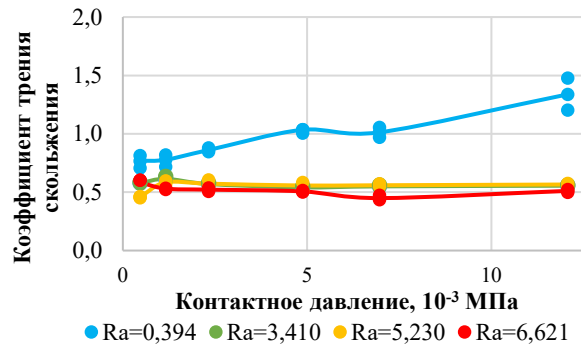
$$\tau_i^* = \frac{0,5 \cdot \cos(\pi - 2 \cdot \alpha) \cdot p_{кр}}{\delta} \quad (23)$$

На основании выражений (18) – (23) получена толщина единичного деформированного слоя уплотнения $h_{деф\ i}$:

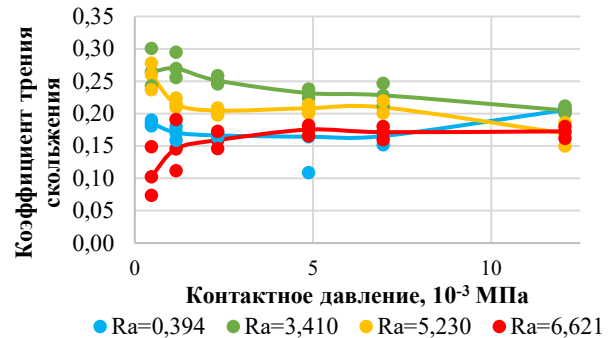
$$h_{деф\ i} = 2 \cdot R_a \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot f_{ск} \cdot p}{p_{кр}}}\right) \quad (24)$$

По полученной зависимости видно, что толщина единичного слоя уплотнения, подвергаясь пластической деформации, с ростом параметра шероховатости R_a стальной поверхности увеличивается, а при уменьшении отношения коэффициента трения к критическому контактному давлению $f_{ск}/p_{кр}$ – уменьшается.

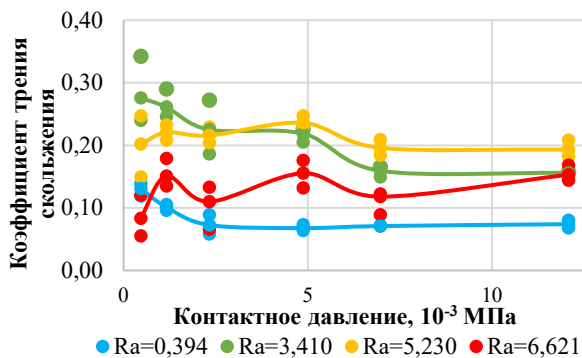
На основании экспериментальных значений коэффициента трения скольжения (рисунок 5) выполнен расчет изменения толщины единичного деформированного слоя для исследуемых пар трения в диапазоне заданных контактных давлений (рисунок 6).



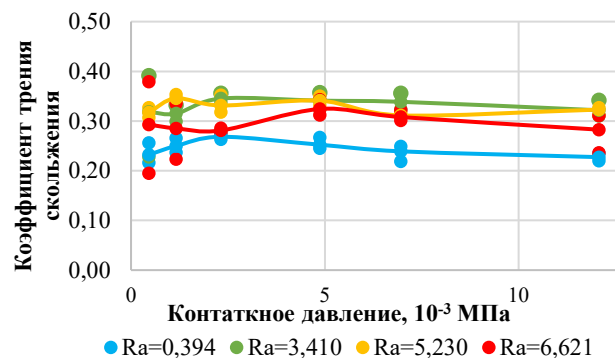
а



б



в



г

Рисунок 5 – Изменение коэффициента трения скольжения в зависимости от контактного давления и шероховатости стальной поверхности для сопряжений:

- а – полиуретан-сталь 20 (25 H_D); б – ТРГ-сталь 20 (27 H_D);
- в – фторопласт-сталь 20 (60 H_D); г – паронит-сталь 20 (65 H_D)

Анализ результатов испытаний показал, что влияние параметра шероховатости R_a поверхности стального образца на коэффициент трения скольжения носит нелинейный характер, достигая максимума, для сопряжений с ТРГ, фторопластом и паронитом, при R_a в диапазоне от 3,41 мкм до 5,23 мкм, и, снижаясь до минимальных значений при R_a равном 0,394 мкм и 6,621 мкм.

Влияние контактного давления, на коэффициент трения скольжения в этих сопряжениях менее выражено, чем влияние шероховатости и с ростом этого показателя имеется тенденция к стабилизации значений примерно на одном уровне.

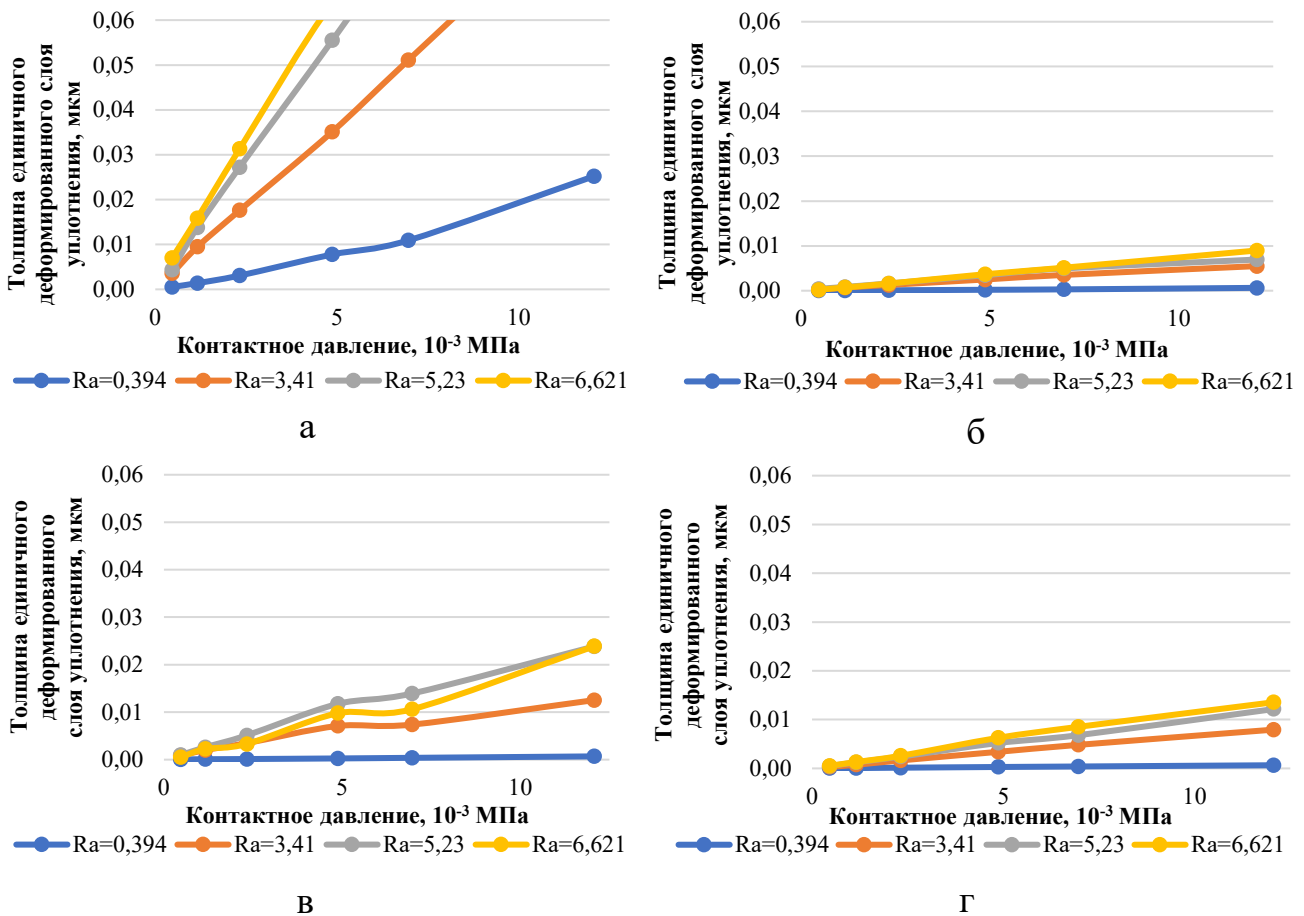


Рисунок 6 – Изменение толщины единичного деформированного слоя уплотнения в зависимости от контактного давления и шероховатости стальной поверхности для сопряжений: а – полиуретан-сталь 20 (25 H_D); б – ТРГ-сталь 20 (27 H_D); в – фторопласт-сталь 20 (60 H_D); г – паронит-сталь 20 (65 H_D)

Согласно полученным графикам, исследуемые уплотнительные материалы демонстрируют следующую последовательность снижения толщины единичного деформированного слоя: полиуретан→фторопласт→паронит→ТРГ.

В рамках исследования третьего этапа развития фреттинга проведены испытания по ГОСТ 23.211-80 в условиях многоциклового нагружения, при которых поверхность уплотнения подвергалась многократному передеформированию. Для обработки и анализа полученных экспериментальных данных, в работе введен комплексный показатель фреттинга k_ϕ , характеризующий кинетическую энергию вибрации, отнесенную к единице площади контактной поверхности образцов:

$$k_\phi = \frac{p \cdot V_{скз}^2}{2 \cdot g} \quad (25)$$

где: $V_{скз}$ – среднеквадратическое значение виброскорости, м/с; g – ускорение свободного падения, м/с²; S – контурная площадь контакта образцов, м²; p – контактное давление (давление обжатия), МПа.

Увеличение комплексного показателя фреттинга приводит к изменению интенсивности изнашивания при фреттинге (рисунок 7).

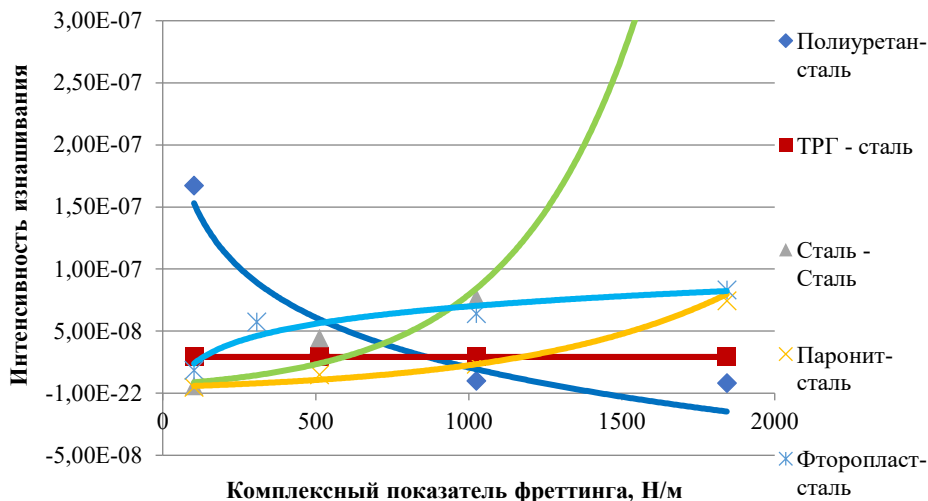


Рисунок 7 – Изменение интенсивности изнашивания при фреттинге для исследуемых пар трения в зависимости от k_f

Для контактирующих поверхностей сталь 20–сталь 20 наблюдается возрастающий характер изменения интенсивности изнашивания, для пары трения полиуретан–сталь 20 интенсивность изнашивания снижается по мере роста k_f , а при использовании уплотнений из ТРГ интенсивность изнашивания не зависит от k_f . Испытания пары трения паронит–сталь 20 показали экспоненциальный характер роста интенсивности изнашивания по мере увеличения k_f , а пары трения фторопласт–сталь 20 – степенной характер изнашивания с тенденцией к небольшому росту значений. По полученным данным выведены уравнения для расчета интенсивности изнашивания уплотнений при разной величине контактного давления на уплотнение (таблица 3).

Таблица 3 – Аналитические зависимости интенсивности изнашивания от k_f

Пара трения	Уравнение
Полиуретан–сталь 20	$I_{Me-упл} = -6 \cdot 10^{-8} \cdot \ln(k_f) + 4 \cdot 10^{-7}$
ТРГ–сталь 20	$I_{Me-упл} = 2 \cdot 10^{-7}$
Фторопласт–сталь 20	$I_{Me-упл} = 2 \cdot 10^{-9} \cdot k_f^{0,5243}$
Паронит–сталь 20	$I_{Me-упл} = 5 \cdot 10^{-9} \cdot e^{0,0015 \cdot k_f}$
Сталь 20–сталь 20	$I_{Me-Me} = 7 \cdot 10^{-9} \cdot e^{0,0025 \cdot k_f}$

Для оценки стойкости исследуемых материалов к циклическим нагрузкам величина линейного износа, полученная на последнем цикле испытаний, сопоставлена с толщиной слоя, в котором формировались критические касательные напряжения, что позволило определить количество этапов разрушения поверхности уплотнения, а также число циклов деформации поверхностного слоя до разрушения.

Анализ зависимостей показал, что при минимальном уровне контактного давления исследованные уплотнительные материалы демонстрируют значительную разницу в количестве этапов разрушения поверхностного слоя (рисунок 8 а). Так у полиуретана число этапов разрушения составляет 138 этапов, в то время как у паронита этот показатель составляет только 8 этапов. С ростом контактного давления наблюдается тенденция к стабилизации значений практически на одном уровне 6-8 этапов. Число циклов деформации

уплотнительного материала (рисунок 8 б) на каждом этапе разрушения по мере роста контактного давления увеличивается у всех материалов за исключением паронита, у которого наблюдается параболическая зависимость с максимумом при давлении 0,25 МПа. При максимальном контактном давлении паронит и полиуретан выходят примерно на один уровень, составляющий 66-67 тыс. циклов деформации за один этап, фторопласт показал меньшее значение, а ТРГ, наоборот, оказался самым стойким к износу, по сравнению с остальными материалами.

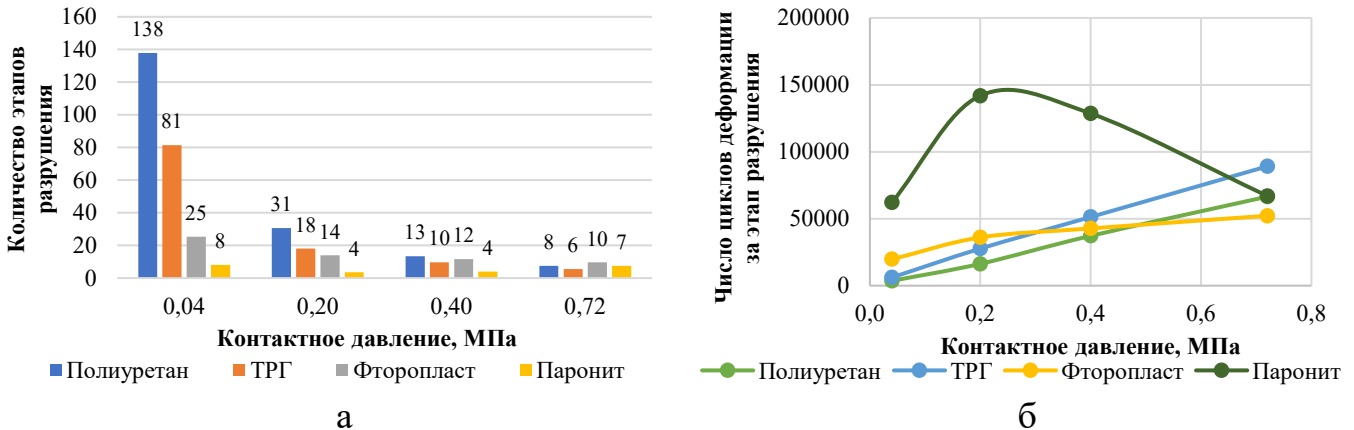


Рисунок 8 – Изменение количества этапов разрушения поверхности уплотнительных материалов (а) и числа циклов деформации за каждый этап разрушения (б) в зависимости от контактного давления

По результатам всех исследований сформирована обобщенная схема, отражающая влияние различных характеристик пар трения сталь–уплотнительный материал на развитие фреттинга (рисунок 9).

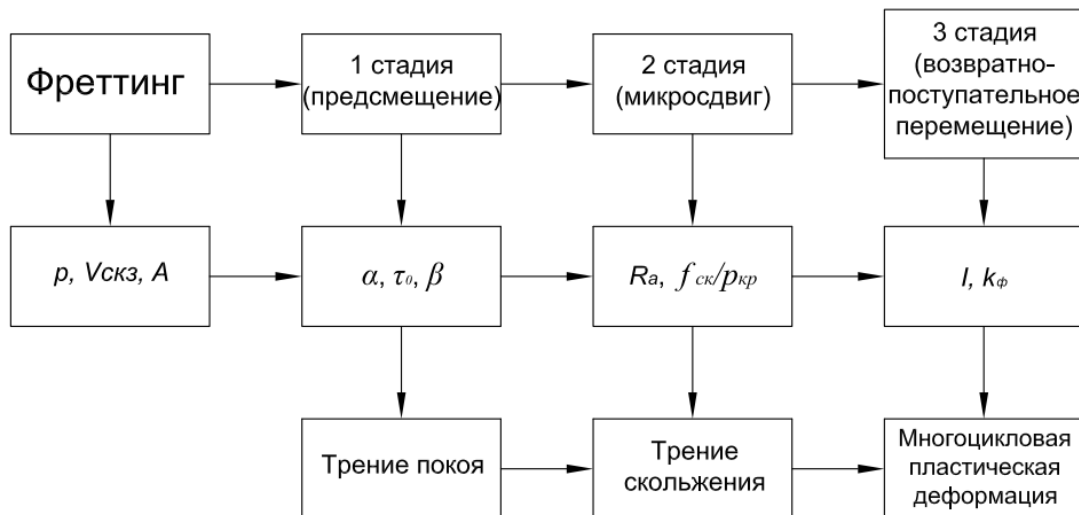


Рисунок 9 – Обобщенная схема развития фреттинга во фланцевых соединениях

На первой стадии фреттинга при наличии неподвижного контакта двух поверхностей основными влияющими параметрами являются угол при вершине выступов профиля шероховатости стальной поверхности α и молекулярные константы трения τ_0 и β . На второй стадии фреттинга при появлении первичного возвратно-поступательного микроперемещения – параметр шероховатости R_a стальной поверхности и отношения коэффициента трения скольжения к критическому контактному давлению ($f_{ск}/p_{кр}$). На третьей стадии фреттинга,

характеризуемой многократной пластической передеформацией поверхностного слоя уплотнения – интенсивность изнашивания I и комплексный показатель фреттинга k_f .

На основании выполненных исследований построены графики изменения интенсивности изнашивания уплотнительных материалов в зависимости от виброскорости при нормативных усилиях затяжки (рисунок 10).

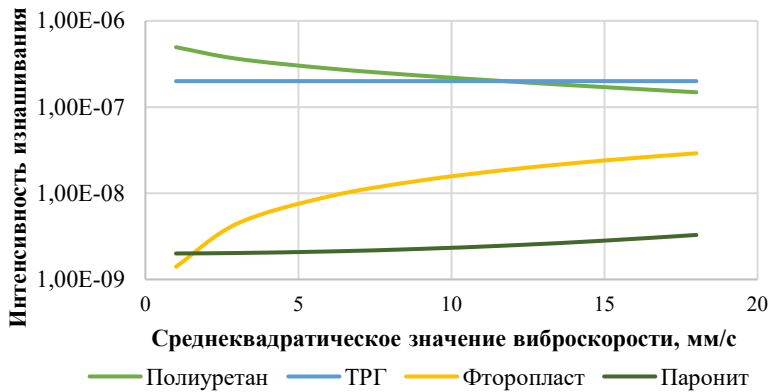


Рисунок 10 – Изменение интенсивности изнашивания уплотнительных материалов в зависимости от виброскорости

Из приведенного графика следует, что интенсивность изнашивания паронита с твердостью $65 H_D$ при повышении уровня виброскорости изменяется незначительно. В тоже время фторопласт с аналогичным уровнем твердости демонстрирует прирост интенсивности изнашивания с увеличением виброскорости по логарифмической зависимости. Для ТРГ характерно постоянное значение интенсивности изнашивания $2 \cdot 10^{-7}$ независимо от величины вибрации. Интенсивность изнашивания полиуретана при увеличении виброскорости уменьшается и при величине выше 12 мм/с полиуретан имеет более высокую износостойкость, чем ТРГ.

В четвертой главе описаны стендовые испытания по исследованию изменения параметров затяжки фланцевых соединений трубопровода в процессе вибрации и их влияния на интенсивность снижения герметичности фланцевых соединений. На основании проведенных измерений рассчитаны значения скорости снижения момента затяжки шпилек и болтов $v_{ш}$ (v_b) в зависимости от накопленного количества циклов вибрации $N_{цикл}$ между замерами:

- для шпилек при виброскорости до 18 мм/с:

$$v_{ш} = 10^{-6} \cdot \ln(N_{цикл}) - 3 \cdot 10^{-8} \quad (26)$$

- для болтов при виброскорости до 18 мм/с:

$$v_b = 7 \cdot 10^{-8} \cdot \ln(N_{цикл}) - 8 \cdot 10^{-9} \quad (27)$$

После проведения испытаний с виброскоростью 18 мм/с в течении 50 млн. циклов произведена разборка фланцевого соединения. На уплотнительных поверхностях фланцев и уплотнении из паронита обнаружены следы фреттинга в виде продуктов износа уплотнительного материала. На наружной поверхности фланцев в местах соприкасания с головками болтов и гаек выявлены концентрические следы износа поверхностей фланцев. Глубина износа зон контакта фланец–головка болта (шайба) и фланец–уплотнение, зафиксированная при испытаниях, сопоставлена с результатами математического расчета по выведенным зависимостям (таблица 4). Погрешность между результатами испытаний и результатами расчета составила менее 10%, что является

допустимым и подтвердило возможность использования полученных в ходе исследования зависимостей для разработки методики повышения наработки фланцевых соединений, работающих в условиях вибраций.

Таблица 4 – Сравнение глубины износа элементов фланцевого соединения

Изношенная поверхность	Глубина износа		Погрешность
	расчет	эксперимент	
Зона контакта фланец-головка болта (гайка): $I = 0,22 \cdot 7 \cdot 10^{-9} \cdot e^{0,0025 \cdot k_{\phi}} \cdot \frac{V_{скз}}{f} \cdot N_{исп}$	96 мкм	105 мкм	8,6%
Уплотнение (прокладка): $I = 0,22 \cdot 5 \cdot 10^{-9} \cdot e^{0,0015 \cdot k_{\phi}} \cdot \frac{V_{скз}}{f} \cdot N_{исп}$	49,3 мкм	46,5 мкм	6,0%

Для подтверждения достоверности зависимостей по расчету коэффициентов трения проведены модельные испытания при контактном давлении 1 МПа, сопоставимым с диапазоном рабочих контактных давлений. При сравнении расчетных и экспериментальных значений также получена погрешность в пределах 10% (таблица 5).

Таблица 5 – Сравнение расчетных и экспериментальных значений коэффициентов трения

Уплотнительный материал	Характеристики зоны контакта стальных пластин с уплотнительным материалом						Погрешность $f_{п} / f_{ск}$
	$F_{тр п}, Н$	$F_{тр ск}, Н$	Расчет		Эксперимент		
			$f_{п}$	$f_{ск}$	$f_{п}$	$f_{ск}$	
Полиуретан	187	127	0,487	0,287	0,468	0,318	3,99% / 9,63%
ТРГ	75	63	0,173	0,146	0,188	0,158	8,67% / 7,20%
Фторопласт	72	46	0,167	0,106	0,180	0,115	7,62% / 7,45%
Паронит	130	106	0,310	0,243	0,325	0,265	4,87% / 7,86%

На основании результатов проведенных исследований разработана методика оценки герметичности фланцевых соединений, эксплуатируемых в условия вибрации, которая включает в себя следующие этапы:

1. Определить диапазон частоты вынужденных колебаний f_p и виброперемещение s в зависимости от скорости потока газа, диаметра трубопровода, зафиксированных виброскорости и частоты вибрации.

2. Сравнить значение виброперемещения с величиной зазора (Δ) в отверстиях фланцев при сборке резьбовых соединений (болтовых или шпилечных). Если $\Delta \geq s$, то амплитуда вибрации – $s/2$, иначе $\Delta/2$.

3. Рассчитать величину суммарного износа I_{ϕ} контактных поверхностей фланцевого соединения, используя приведенные в пунктах 1, 2 параметры и экспериментальные зависимости по интенсивности изнашивания (таблица 3):

$$I_{\phi} = 86400 \cdot 2 \cdot (I_{Me-Me} + I_{Me-упл}) \cdot A \cdot f_p \cdot T \quad (28)$$

4. Определить фактическое давления обжатия уплотнения (прокладки):

$$q_{обж i}^{факт} = 2 \cdot E_{п} \cdot \frac{(1 - k_{обж i-1}^{факт}) \cdot (h_{п} - 2 \cdot U_{\phi})}{h_{п} \cdot k_{обж i-1}^{факт}}, \quad (i=1, 2, \dots, n), \quad \text{при } b_{п} \leq 15 \text{ мм}, \quad (29)$$

$$q_{обж i}^{факт} = 2 \cdot E_{п} \cdot \frac{(1 - k_{обж i-1}^{факт}) \cdot (h_{п} - 2 \cdot U_{\phi})}{h_{п} \cdot k_{обж i-1}^{факт}} \cdot \frac{b_{п}}{b_0}, \quad (i=1, 2, \dots, n), \quad (30)$$

$$\text{при } b_{п} > 15 \text{ мм}, \quad b_0 = 3,8 \cdot \sqrt{b_{п}}$$

где i – межремонтный период ($i=0$ соответствует начальным условиям обжатия прокладки при регламентированном давлении обжатия); E_{Π} – условный модуль сжатия, МПа; h_{Π} – исходная толщина прокладки, мм; b_{Π} – ширина прокладки, мм; b_0 – эффективная ширина прокладки, мм; $k_{обж\ i}^{факт}$ – фактический коэффициент обжатия в определенный межремонтный период:

$$k_{обж\ i}^{факт} = \frac{2 \cdot E_{\Pi}}{q_{обж\ i}^{факт} + 2 \cdot E_{\Pi}}, \quad (i=0, 1, 2, \dots n), \quad \text{при } b_{\Pi} \leq 15 \text{ мм} \quad (31)$$

$$k_{обж\ i}^{факт} = \frac{2 \cdot E_{\Pi} \cdot b_{\Pi}}{q_{обж\ i}^{факт} \cdot b_0 + 2 \cdot E_{\Pi} \cdot b_{\Pi}}, \quad (i=0, 1, 2, \dots n), \quad \text{при } b_{\Pi} > 15 \text{ мм}, \quad b_0 = 3,8 \cdot \sqrt{b_{\Pi}} \quad (32)$$

где $q_{обж\ 0}^{факт}$ соответствует требуемому давлению обжатия прокладки $q_{обж}$, регламентированному ГОСТ Р 34233.4 – 2017 (Приложение И), а $k_{обж\ 0}^{факт}$ представляет собой исходный коэффициент обжатия, сформированный при $q_{обж}$.

5. Сравнить фактическое давления обжатия после заданной продолжительности эксплуатации с его предельно допустимым значением.

Эксплуатация может быть продолжена, если фактическое давление обжатия будет выше величины $q_{обж}^{min}$, необходимой для обеспечения герметичности фланцевого соединения:

$$q_{обж}^{min} = m \cdot P \quad (33)$$

где m – прокладочный коэффициент; P – рабочее давление в трубопроводе, МПа.

6. Для предотвращения самопроизвольного развинчивания резьбовых соединений фланцев применить стопорные пружинные шайбы, стопорные шайбы с внутренними зубцами, самоконтрящиеся гайки с нейлоновым кольцом, контргайки или шплинтование.

7. При отсутствии или невозможности применения перечисленных в пункте 6 технических решений оценку момента затяжки провести следующим образом:

7.1. Рассчитать фактическое снижение момента затяжки после определенной продолжительности эксплуатации при критическом значении виброскорости:

$$\Delta M = 86400 \cdot v_{ш(б)} \cdot f \cdot T. \quad (34)$$

7.2. Определить по нормативным документам на резьбовые соединения величину требуемого и минимально допустимого момента затяжки ($M_{норм}$ и M_{min}).

7.3. Сравнить фактический момент затяжки с минимально допустимым. Эксплуатация может быть продолжена, если выполняется условие:

$$M_{min} < (M_{норм} - \Delta M) \quad (35)$$

При невыполнении основных условий методики, необходимо остановить транспортировку газа и провести техническое обслуживание.

Для примера применения зависимостей методики выполнен расчет фактического давления обжатия, формирующегося во фланцевом соединении с прокладкой из паронита и фторопласта толщиной 3,0 мм при эксплуатации в течении 1 года в условиях вибрации разной интенсивности (рисунок 11 а, б). Горизонтальными линиями показаны значения минимально допустимого давления, обеспечивающего герметичность газопровода с рабочим давлением в трубопроводе 5 МПа, 4 МПа, 3 МПа, 2 МПа и 1 МПа.

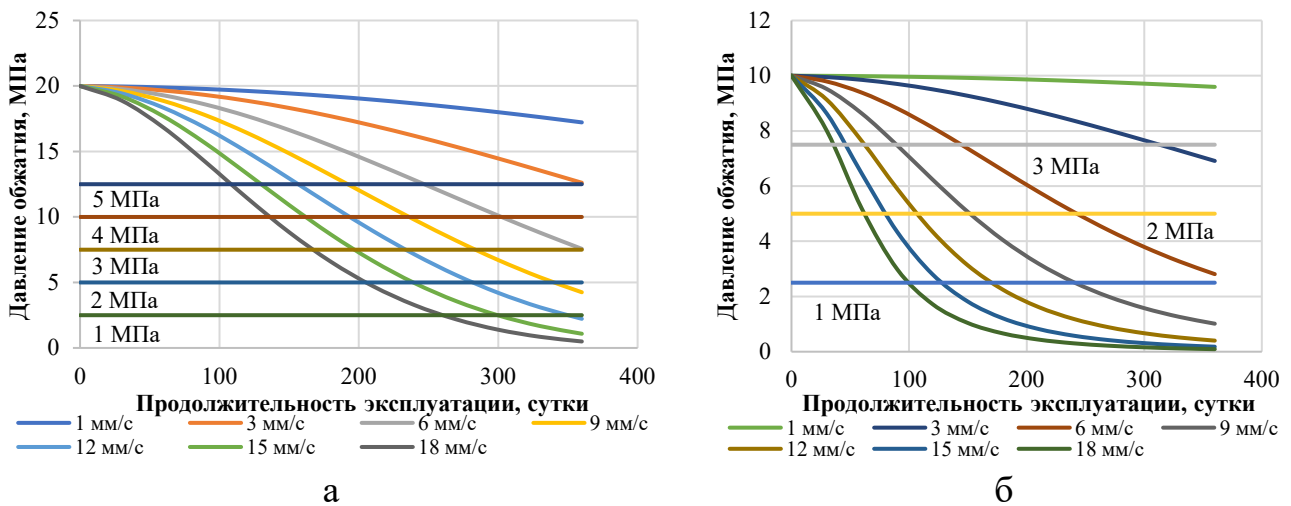


Рисунок 11 – Изменение давления обжатия в течение 1 года эксплуатации при разных скоростях вибрации для пар трения:
а – паронит–сталь 20; *б* – фторопласт–сталь 20

Для повышения наработки фланцевого соединения при наличии вибрации разработано техническое решение, основой которого является изменение макрогеометрии уплотнительной поверхности фланца для снижения уровня касательных напряжений сдвига, возникающих в материале уплотнения при вибрации (рисунок 12 *а, б*).

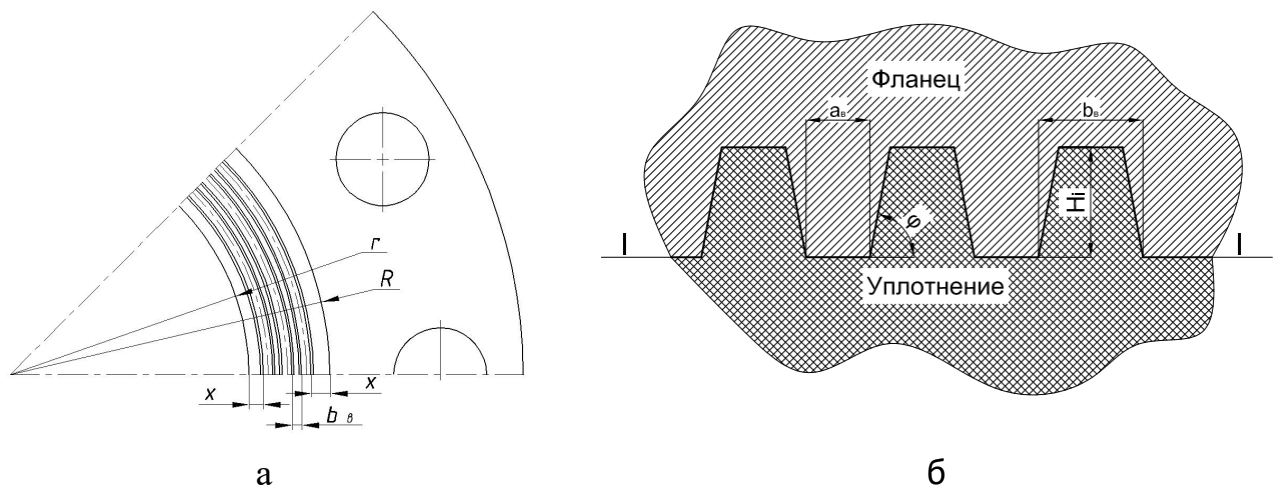


Рисунок 12 – Схема профилированной поверхности фланца (*а*) и ее внедрения в материал уплотнения (*б*): a_v – ширина выступа у основания в сечении *I-I*; b_v – шаг между выступами, соответствующий ширине основания ответной впадины в сечении *I-I*; H_v – высота выступа; φ – угол наклона выступов; r и R – внутренний и внешний радиус уплотнительной поверхности фланца; x – размер отступа первого и последнего выступа от внутреннего и внешнего края уплотнительной поверхности фланца

При внедрении макро рельефа фланца в поверхность уплотнения (прокладки) в его сечениях при вибрации в зависимости от заданной нагрузки и площади контакта формируются касательные напряжения сдвига. При превышении критического уровня напряжений возникают условия для среза части уплотнения, попадающего во впадины профилированной поверхности фланцев. Данные факты определяют граничные условия для максимальной

площади, занимаемой выступами поверхности фланца в плоскости контакта с прокладкой $I-I$:

$$S_B^{max} = S_{\phi л} - \frac{f_{ск} \cdot p \cdot S_{\phi л}}{0,5 \cdot \cos(\pi - 2 \cdot \varphi) \cdot p_{кр}} \quad (36)$$

где: $S_{\phi л}$ – площадь поверхности фланца, $мм^2$.

Расчет размеров выступов должен проводиться с учетом размеров уплотнительной поверхности фланца по следующей методике:

1. Выбрать типоразмер фланцев и определить внешний (R) и внутренний (r) радиус, площадь ($S_{\phi л}$) его уплотнительной поверхности.

2. Задать размеры и размещение выступов: ширина выступа у основания в сечении $I-I$ – $a_в$, $мм$; высота выступа – $H_в$, $мм$; шаг между выступами, соответствующий ширине основания в сечении $I-I$ ответной впадины – $b_в$, $мм$; размер отступа первого и последнего выступа от края уплотнительной поверхности фланца – x , $мм$; расположение – концентрическое; угол наклона выступов – φ , $^\circ$.

3. Определить максимальную площадь выступов для заданного размера фланца S_B^{max} .

4. Рассчитать шаг между выступами:

$$b_в = a_в + 2 \cdot H_в \cdot ctg \varphi \quad (37)$$

5. Рассчитать количество выступов (m), размещающихся на уплотнительной поверхности фланца:

$$S_B^{факт} = S_B^1 + S_B^2 + S_B^3 + S_B^4 + \dots + S_B^m \quad (38)$$

$$S_B^1 = \pi \cdot ((r + x + a)^2 - (r + x)^2)$$

$$S_B^m = \pi \cdot ((r + x + m \cdot a + (m - 1) \cdot b)^2 - (r + x + (m - 1) \cdot a + (m - 1) \cdot b)^2) \quad (39)$$

6. Расчет считается верным, если выполняется условие:

$$S_B^{факт} < S_B^{max} \quad (40)$$

7. Определить фактические касательные напряжения и сравнить их с критическим значением.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Вибрации фланцевых соединений способствуют появлению и развитию процесса фреттинга на уплотнительных поверхностях, вызывая износ уплотнения и снижение усилия затяжки резьбовых соединений. Нормативно оцениваемый диапазон относится к низкочастотной вибрации и изменяется от 1 до 60 Гц. При этом недопустимый уровень вибраций характеризуется значениями виброскорости, выше 18 мм/с.

2. Испытания механических свойств неметаллических уплотнительных материалов для фланцевых соединений показали, что паронит и фторопласт значительно отличаются по твердости от ТРГ и полиуретана, при этом высокие прочностные свойства и сверхвысокие значения относительного удлинения имеет только фторопласт. При низкой сжимаемости высокими значениями восстанавливаемости характеризуется паронит и фторопласт, ТРГ показывает обратную тенденцию, а полиуретан имеет высокие показатели обеих характеристик.

3. Для исследования триботехнических характеристик процесса фреттинга при вибрации выделено три основных стадии: неподвижное состояние, характеризующееся трением покоя, микросдвиг, связанный с первичным проскальзыванием, циклическое возвратно-поступательное перемещение под действием вибрационных нагрузок.

4. Показано, что с точки зрения триботехники для условий эксплуатации основными показателями, характеризующими триботехнические параметры зоны контакта фланец–уплотнение при фреттинге, на первой стадии являются угол при вершине выступов шероховатости уплотнительной поверхности фланца α , определяемый параметрами R_a и S_m , и молекулярные константы трения τ_0 и β .

5. Определено, что уменьшение угла при вершине выступов шероховатости и рост молекулярных констант трения способствуют увеличению коэффициента трения покоя и снижают вероятность развития фреттинга. При низкой твердости 25-27 HD, которая характерна для полиуретана и ТРГ, наибольший коэффициент трения покоя формируется при $R_a=0,394$ мкм, что соответствует максимально гладкой отполированной поверхности. При более высокой твердости 60-65 HD, характерной для фторопласта и паронита, наибольший коэффициент трения покоя наблюдается при максимальном значении параметра R_a , равном 6,621 мкм.

6. На второй стадии развития фреттинга основными показателями, препятствующими увеличению толщины деформированного слоя, являются параметр шероховатости R_a уплотнительной поверхности фланца и отношение коэффициента трения скольжения к предельно допустимому контактному давлению уплотнительного материала ($f_{ск}/p_{кр}$).

7. Определено, что для формирования минимального коэффициента трения скольжения для всех исследуемых уплотнительных материалов, кроме полиуретана, целесообразно использовать значения $R_a = 0,394$ мкм или $R_a = 6,621$ мкм, а для полиуретана предпочтительно использовать шероховатость с R_a в диапазоне от 3,41 мкм до 6,621 мкм.

8. На третьей стадии разрушение поверхности уплотнительного материала характеризуется интенсивностью изнашивания I , зависящей от комплексного показателя фреттинга k_f , определяемого контактным давлением и виброскоростью.

9. Выявлено, что при регламентированном давлении обжатия интенсивность изнашивания паронита с твердостью 65 HD при повышении уровня виброскорости изменяется незначительно. Фторопласт с аналогичным уровнем твердости демонстрирует прирост интенсивности изнашивания с увеличением виброскорости по логарифмической зависимости. Для ТРГ характерно постоянное значение интенсивности изнашивания $2 \cdot 10^{-7}$ независимо от величины вибрации. Интенсивность изнашивания полиуретана при увеличении виброскорости уменьшается и при виброскорости выше 12 мм/с полиуретан имеет более высокую износостойкость, чем ТРГ.

10. Установлено, что с увеличением контактного давления количество этапов, за которое происходит разрушение поверхностного слоя, уменьшается, при этом число циклов деформации на каждом этапе увеличивается для всех уплотнительных материалов кроме паронита. Для паронита максимальное число этапов разрушения, но меньшее количество циклов деформации на каждом этапе наблюдается при давлении 0,04 МПа и 0,72 МПа.

11. При сопоставлении результатов лабораторных и стендовых испытаний определена погрешность значений менее 10%, что подтверждает достоверность выведенных расчетных зависимостей.

12. Разработана методика повышения наработки фланцевого соединения в зависимости от величины параметров вибрации, учитывающая: для зоны контакта фланец–уплотнение – контроль величины давления обжатия согласно условию $q_{обж}^{min} \leq q_{обж}^{факт}$; для зоны контакта фланец–резьбовое соединение – контроль снижения момента затяжки и соответствие условию $M_{min} < (M_{норм} - \Delta M)$.

13. Предложено техническое решение по снижению величины износа уплотнения, основанное на уменьшении напряжений, формирующихся в его деформируемом слое за счет профилирования уплотнительной поверхности фланца и увеличении объема уплотнительного материала, подвергающегося деформации. Для проектирования профилированной уплотнительной поверхности фланцев при заданных условиях эксплуатации разработана методика расчета количества выступов.

Публикации по теме диссертации

Публикации в научных журналах, включенных в перечень ВАК РФ

1. Елагина, О.Ю. Развитие фреттинга при эксплуатации газотранспортных объектов / О.Ю. Елагина, А.Г. Буклаков, **О.Б. Дубинова**, Ф. Новотни-Фаркас // Трение и износ. – 2021. – Т. 42. - № 5. – С. 562-571.

2. **Дубинова, О.Б.** Исследование влияния фреттинга на опасность разгерметизации фланцевых соединений на объектах ГРС в условиях повышенных вибраций / О.Б. Дубинова, О.Ю. Елагина, Ю.С. Дубинов // Труды Российского государственного университета нефти и газа имени И.М. Губкина. – 2022. - №2(307). – С. 158-171.

3. Елагина О.Ю. Моделирование процесса изнашивания уплотнительной прокладки во фланцевом соединении при фреттинге / О.Ю. Елагина, **О.Б. Дубинова** // Вестник машиностроения. – 2024. – Т. 103. – №3. – С. 217-221.

Публикации в научных изданиях, включенных в международную базу данных Scopus и Web of Science:

4. Elagina O.Y. Development of Fretting During the Operation of Gas Transportation Facilities / O.Y. Elagina, A.G. Buklakov, **O.B. Dubinova**, F. Novotny-Farkas // Journal of Friction and Wear, 2021, Vol. 42, No. 5, pp. 367–373. DOI: 10.3103/S1068366621050056.

Публикации в других изданиях

5. **Дубинова О.Б.** Моделирование процесса работы уплотнительного кольца во фланцевых соединениях / О.Б. Дубинова, Ю.С. Дубинов // Сборник трудов IV Региональной научно-технической конференции «Губкинский университет в решении вопросов нефтегазовой отрасли России», посвященной 150-летию со дня рождения академика И.М. Губкина, Москва, 22-23 октября 2020 года. – М.: Издательский центр РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2020. – С. 117.

6. **Дубинова О.Б.** Уменьшение влияния изнашивающих воздействий в узлах ГРС от фреттинг-процесса / О.Б. Дубинова, А.К. Прыгаев, Ю.С. Дубинов // Тезисы докладов XVI

Международной учебно-научно-практической конференции «Трубопроводный транспорт – 2021», Уфа, 17–18 ноября 2021 года. – Уфа: Издательство УГНТУ, 2021. – С. 373-375.

7. **Дубинова О.Б.** Исследование фреттинг-процесса во фланцевых соединениях / О.Б. Дубинова, Ю.С. Дубинов // Сборник трудов V Региональной научно-технической конференции «Губкинский университет в решении вопросов нефтегазовой отрасли России», посвященной 150-летию со дня рождения академика И.М. Губкина, Москва, 10 декабря 2021 года. – М.: Издательский центр РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2021. – С. 122.

8. **Дубинова О.Б.** Влияние фреттинга на герметичность фланцевых соединений, работающих под воздействием повышенных вибраций / О.Б. Дубинова, О.Ю. Елагина // Тезисы докладов VI Региональной научно-практической конференции, посвященной 100-летию М.М. Ивановой. 19-21 апреля 2022 г. – М.: РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2022. – С. 421-422.

9. **Дубинова О.Б.** Особенности развития фреттинга во фланцевых соединениях на объектах ГРС, работающих в условиях повышенных вибраций / О.Б. Дубинова, Ю.С. Дубинов // Тезисы докладов 76-й Международной молодежной научной конференции «Нефть и газ-2022». 25-29 апреля 2022 г. – М.: РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2022. – С. 456-457.

10. **Дубинова О.Б.** Особенности фреттинг-процесса во фланцевых соединениях на газораспределительных станциях / О.Б. Дубинова, О.Ю. Елагина // Сборник трудов XIV Международной научно-технической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения А.П. Семёнова «Трибологию – машиностроению». 12-14 октября 2022 г. – М.: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, 2022. – С. 128-131.

11. Дубинов Ю.С. Методы борьбы с вибрацией и ее негативными последствиями на трубопроводах и оборудовании / Ю.С. Дубинов, **О.Б. Дубинова**, О.Ю. Елагина // Тезисы докладов XIV Всероссийской конференции молодых ученых, специалистов и студентов «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ: ГАЗ, НЕФТЬ, ЭНЕРГЕТИКА». 14-18 ноября 2022 г. – М.: РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2022. – С. 323-324.

12. **Дубинова О.Б.** Специфика формирования изнашивающих воздействий в узлах газораспределительных станций при эксплуатации в условиях повышенных скоростей движения потока газа / О.Б. Дубинова, О.Ю. Елагина, Ю.С. Дубинов, А.К. Прыгаев // Тезисы докладов XVII Международной научно-практической конференции «Трубопроводный транспорт - 2022». 17-18 ноября 2022 г. – Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2022. – С. 85-86.

Дубинова Ольга Богдановна
ФРЕТТИНГ-ИЗНАШИВАНИЕ ВИБРОНАГРУЖЕННЫХ ФЛАНЦЕВЫХ
СОЕДИНЕНИЙ

Автореферат диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Формат 60×84/16.

Усл. печ. л. 1,5. Тираж 100 экз. Заказ.

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский
университет) имени И.М. Губкина»

(ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина»)

Адрес университета: 119991, г. Москва, проспект Ленинский, дом 65, корпус 1, www.gubkin.ru