

**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»)**

*На правах рукописи*



**Дубинова Ольга Богдановна**

**ФРЕТТИНГ-ИЗНАШИВАНИЕ ВИБРОНАГРУЖЕННЫХ  
ФЛАНЦЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ**

Специальность 2.5.3. Трение и износ в машинах

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук,  
профессор О.Ю. Елагина

Москва  
2024

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ .....	12
1.1 Конструктивные особенности фланцевых соединений и статистика их отказов в газовой промышленности.....	12
1.2 Анализ вибрационных воздействий, возникающих при движении потока газа по технологическим трубопроводам на примере КС и ГРС .....	15
1.3 Существующие представления о механизме фреттинга .....	21
1.4 Выводы по первой главе .....	33
1.5 Цель и задачи исследований.....	34
ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ .....	35
2.1 Выбор материалов для исследований и определение механических свойств.....	36
2.2 Методика и оборудование для определения коэффициента трения покоя и трения скольжения.....	40
2.3 Методика и оборудование для испытаний на фреттинг-изнашивание	42
2.4 Методика и оборудование для стендовых испытаний фланцевых соединений в условиях повышенных вибраций .....	46
2.5 Выводы по второй главе .....	49
ГЛАВА 3. РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ .....	51
3.1 Моделирование условий неподвижного контакта уплотнительного материала со стальной поверхностью фланца .....	51
3.2 Результаты экспериментальных исследований по определению коэффициента трения покоя при разных параметрах контакта .....	58
3.3 Моделирование условий трения скольжения стальной поверхности фланца по материалу уплотнения .....	67
3.4 Результаты экспериментальных исследований по определению коэффициента трения скольжения при разных параметрах контакта.....	71
3.5 Результаты экспериментальных исследований по определению интенсивности изнашивания уплотнения в условиях многоциклового нагружения при фреттинге.....	77
3.6 Сравнительный анализ параметров пар трения сталь–уплотнительный материал, работающих в условиях фреттинга .....	85
3.7 Выводы по третьей главе .....	92

ГЛАВА 4. ПОВЫШЕНИЕ НАРАБОТКИ ВИБРОНАГРУЖЕННЫХ ФЛАНЦЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ .....	95
4.1 Стендовые испытания по оценке момента затяжки фланцевых соединений в условиях вибрации.....	95
4.2 Стендовые испытания для подтверждения достоверности зависимостей по определению коэффициентов трения.....	100
4.3 Методика оценки герметичности фланцевых соединений, подверженных фреттинг-изнашиванию .....	102
4.4 Оптимизация технического решения для повышения наработки фланцевого соединения работающего в условиях вибрации.....	111
4.5 Выводы по четвертой главе.....	120
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	121
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	124
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	130
Приложение 1 .....	144
Приложение 2 .....	146
Приложение 3 .....	148
Приложение 4 .....	154
Приложение 5 .....	157

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследований.** Значительная часть оборудования и конструкций газотранспортной отрасли монтируется и эксплуатируется с применением фланцевых соединений. Фланцевые соединения широко используются в установках комплексной подготовки газа, на компрессорных станциях (КС) в системе магистрального транспорта газа и на газораспределительных станциях (ГРС) в системах газораспределения, в узлах подключения технологических трубопроводов к реакторам, сосудам и аппаратам в газопереработке.

Увеличение объемов и скорости транспортировки газа в последнее десятилетие приводит к росту количества отказов, связанных с разгерметизацией фланцевых соединений. В 40% случаев основной причиной разгерметизации является высокий уровень вибрации низкой частоты, возникающий при транспортировке газового потока.

Причины разгерметизации фланцевых соединений при вибрации заключаются в самопроизвольном развинчивании резьбовых соединений и разрушении уплотнений в результате фреттинга – механического изнашивания соприкасающихся тел в условиях колебательных относительных микросмещений.

Для предотвращения самопроизвольного развинчивания болтовых и шпильчных соединений в практике проектирования разработано много конструктивных решений, позволяющих устранить данную проблему. Вопросу разгерметизации в результате фреттинг-изнашивания уплотнения уделялось значительно меньше внимания. При этом ГОСТ Р 34233.4–2017, регламентирующий расчет фланцевых соединений на прочность и герметичность, не учитывает влияние вибрационных воздействий.

Повышение надежности и безопасности 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 долговечность элементов, входящих в состав различных соединений, посвящено много работ разных авторов. Среди отечественных ученых нужно отметить работы И.Л. Голего, А.Я. Алябьева, В.В. Шевеля, М.С. Островского, А.Н. Петухова, И.И. Артемова, А.В. Дрязгина, В.В. Ковалевского и Т.Э. Сергутиной, Ю.И. Шалапка и Т.В. Тарасовой, И.Р. Асланян, С.Г. Докшанина, Д.С. Горлова, Г.Г. Заверюха, а среди зарубежных – Г. Томлинсона, К.Г. Райта, Г.Г. Улига и Р.У. Ревы, Р.Б. Уотерхауза, Р.Б. Хейвуда.

Однако, большая часть работ по данному направлению рассматривает контакт металлических поверхностей, характерный для таких соединений, как подшипники качения, муфты, зубчатые передачи, шарнирные соединения, вариаторы, шлицевые и шпоночные соединения, болтовые и заклёпочные соединения, замки лопаток турбин, канаты, клапаны и золотники гидросистем. Вопрос развития фреттинга в зоне контакта фланец–уплотнение в научно-технической литературе практически не рассматривался. В связи с этим отсутствуют методики расчета фланцевых соединений на герметичность при работе в условиях вибрационных воздействий.

**Целью исследования** является повышение наработки вибронагруженных 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 ( $\tau_0$  и  $\beta$ ) 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  $\tau_0$ . Константа  $\beta$  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 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 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. (Приложение 1).

### **Методы исследований**

В диссертации использовалась современная инструментальная база, включающая как стандартизированное оборудование, так и специализированное и стендовое оборудование, разработанное в рамках исследования. В качестве стандартных методик проведения исследований и испытаний использованы: профиломертия 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  $5000 \pm 10$  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 автором 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 вибронегруженных фланцевых соединений, подверженных фреттинг-изнашиванию.

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

#### **Степень достоверности**

Достоверность выдвинутых выводов и расчетных зависимостей подтверждается сходимостью теоретических и экспериментальных результатов 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 на: XVI, XVII Международной учебно-научно-практической конференции «Трубопроводный транспорт» (г. Уфа, УГНТУ, 2021 г., 2022 г.); IV, V, VI Региональной научно-технической конференции «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 Международной научно-технической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения А.П. Семёнова «Трибология – машиностроению» (г. Москва, ИМАШ РАН, 2022 г.); XIV Всероссийской конференции 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 Международной молодежной научной конференции «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.

## ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

### 1.1 Конструктивные особенности фланцевых соединений и статистика их отказов в газовой промышленности

Фланцевые соединения широко применяются в газовой промышленности, преимущественно в ТПО технологического оборудования. Их конструкция (рисунок 1.1) регламентирована ГОСТ 33259-2015 [1] и включает в себя два одинаковых фланца с центральными отверстиями, соответствующими диаметрам стыкующихся труб, уплотнение (прокладку), набор болтов или шпилек с гайками и шайбами.

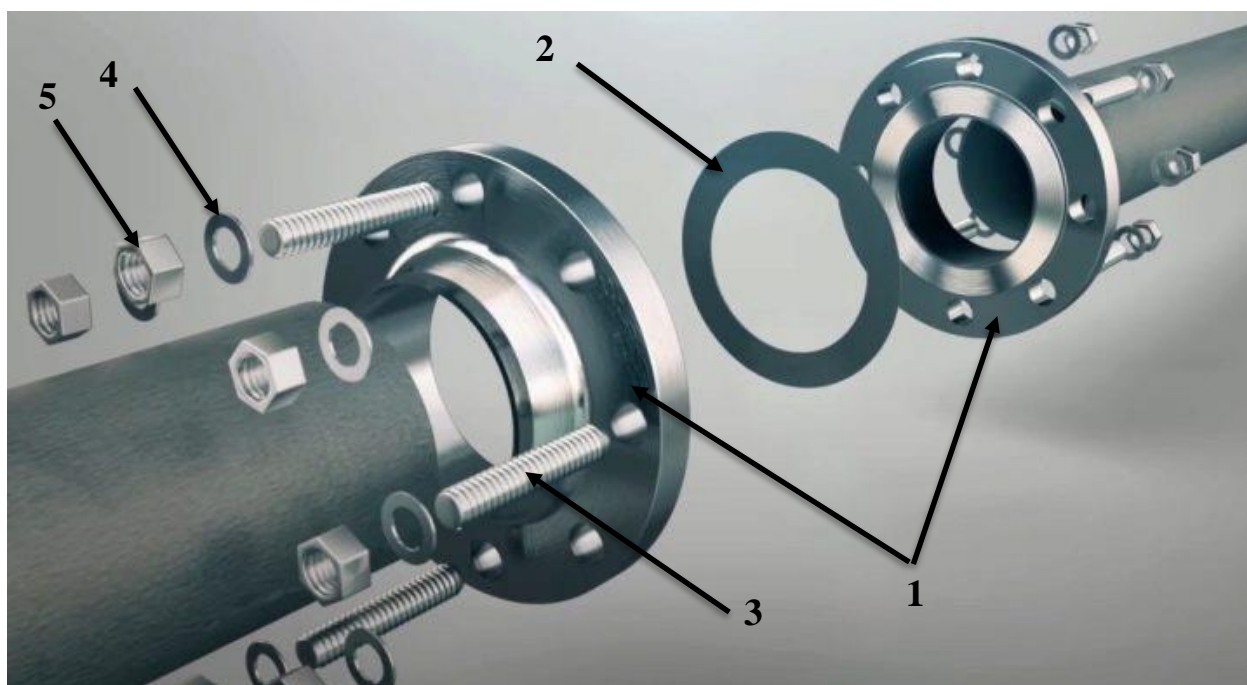


Рисунок 1.1 – Конструкция фланцевого соединения:

1 – фланцы; 2 – уплотнение (прокладка); 3 – шпилька; 4 – шайба; 5 – гайка

Согласно СТО Газпром РД 1.10-098–2004 [2], для технологических трубопроводов, а также для фланцев в основном применяют нелегированные и низколегированные стали марок 10, 20, 09Г2С, 17Г1С.

Типовыми материалами, применяемыми в качестве уплотнений для фланцевых соединений, в соответствии с Приложением И ГОСТ 34233.4–2017 [3], являются резины, паронит, фторопласт, асбестовый картон, ТРГ, алюминий, латунь, сталь. Наряду с перечисленными материалами в последние

годы могут также использоваться уплотнения из полиуретана. В газовой промышленности в большинстве фланцевых соединений применяются уплотнения из паронита, фторопласта и ТРГ.

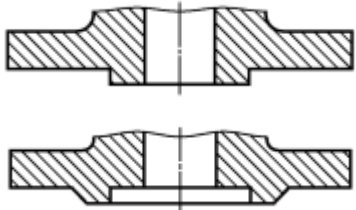
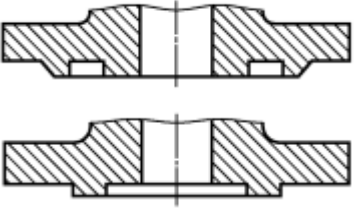
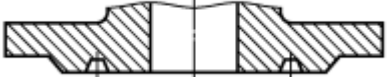
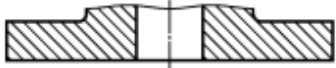
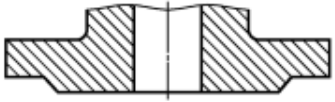

Согласно данным статистики по количеству отказов [4-11], произошедших на объектах трубопроводного транспорта в период с 2000 по 2022 гг разгерметизация фланцевых соединений происходит в 16% случаев, что связано с отсутствием контроля технического состояния участков магистральных газопроводов, неполнотой и необъективностью результатов технических диагностических исследований, неосуществлением производственного контроля.

Основным фактором, вызывающим нарушение герметичности фланцевых соединений на объектах газотранспортной структуры, в 40% случаев является высокий уровень вибрации низкой частоты, способствующий интенсификации изнашивающих процессов и порождающий опасность утечки газа и возгорания [12-14].

Вопросы, связанные с предупреждением разгерметизации фланцевых соединений, в основном рассматриваются с точки зрения изменения конструкции их уплотнительной поверхности. Фланцевая или уплотнительная поверхность – это часть поверхности, по которой идет контакт между фланцем и уплотнением. Обеспечение плотного прилегания уплотнения к поверхности фланца и сохранение его в течение заданного времени эксплуатации во многом определяет показатели надежности этого соединения.

В соответствии с требованиями таких нормативных документов, как ГОСТ 33259–2015 [1] и ASME B16.5–2013 [15], по исполнению уплотнительной поверхности выделяют различные типы фланцев (таблица 1.1). Выбор типа применяемой конструкции фланца и уплотнительного материала определяется эксплуатационной средой, ее давлением и температурой.

Таблица 1.1 – Сопоставление ГОСТ 33259–2015 [1] и ASME B16.5–2013 [15] по видам исполнений уплотнительной поверхности фланцев

Исполнение уплотнительной поверхности фланца		Вид фланца
ГОСТ 33259-2015 [1]	ASME B16.5 [15]	
С выступом и с впадиной (Е и F)	С выступом и с впадиной (Male and Female – M and F)	
С пазом и шипом (D, M и C, L)	С пазом и шипом (Tongue and Groove – T and G)	
Под прокладку овального сечения (J)	С впадиной под прокладку овального сечения (Ring Joint – RTJ)	
Плоскость (А)	Совершенно гладкая (Flat Face – FF)	
С соединительным выступом (В)	С соединительным выступом (Raised Face – RF)	
Под линзовую прокладку (К)	Под линзовую прокладку (Lap Joint - LJ)	

По ГОСТ 33259–2015 [1] минимальная шероховатость уплотнительных поверхностей фланцев для исполнения А, В, С, D, Е, F составляет  $R_a 3,2$  мкм, для исполнений L, М –  $R_a 0,8$  мкм, а максимальная шероховатость в среднем составляет  $R_a 12,5$  мкм.

Согласно ASME B16.5–2013 [15] для обеспечения высокой наработки и сохранения герметичности фланцевого соединения установлены иные требования к уровню шероховатости фланцевой поверхности. Поверхность шероховатостью до  $R_a 1,6$  мкм используется в паре с металлическими

уплотнениями. Поверхность шероховатостью от  $R_a1,6$  мкм до  $R_a3,2$  мкм используется для уплотнительных поверхностей исполнения D, M, C, L, E и F. Поверхность, подвергнутая зубчатой концентрической или зубчатой спиральной обработке и имеющая среднее значение шероховатости от  $R_a3,2$  до  $R_a6,3$  мкм, позволяет создать дополнительное контактное давление за счет внедрения в поверхность уплотнения и обеспечивает хорошую герметичность за счет увеличения коэффициента трения покоя.

Анализ статистики отказов, а также современные тенденции в проектировании фланцевых соединений показывают, что вопрос увеличения наработки и сохранения герметичности фланцевых соединений является актуальной научно-технической задачей. Основные усилия по решению этой задачи сосредоточены на совершенствовании конструктивного исполнения фланцев и их уплотнительных поверхностей. При этом вопросы взаимодействия фланцев с уплотнительным материалом рассматриваются значительно реже.

Обобщая приведенную выше статистику [4-14] и работы [17-20], можно сделать вывод, что герметичность фланцевого соединения, то есть обеспечение в рабочих условиях требуемой нагрузки на уплотнительных поверхностях, определяется не только конструктивным исполнением самих фланцев, но и деформационными характеристиками уплотнения.

## **1.2 Анализ вибрационных воздействий, возникающих при движении потока газа по технологическим трубопроводам на примере КС и ГРС**

Согласно работам [12-14, 21], провоцирующим воздействием для значительной части дефектов на технологических трубопроводах и участках присоединения оборудования КС и ГРС в режиме нормативной эксплуатации является наличие вибрационных нагрузок. В условиях повышенных скоростей движения потока газа этот фактор приобретает более интенсивный характер. Поэтому нормирование и контроль вибрационных параметров является одним из главных пунктов диагностики и последующей оценки технического

состояния трубопроводов, а также требует разработки методики расчета фланцевых соединений, учитывающей воздействующие вибрационные нагрузки.

Основными параметрами вибрации являются амплитуда и частота. Однако с точки зрения вибродиагностики трубопроводных систем и в соответствии с РД 1.10-098–2004 [2] и ГОСТ 32388–2013 [112] вибрацию принято оценивать также по величине виброскорости и виброперемещения.

Главными причинами возникновения повышенных вибраций, в соответствии с СТО Газпром РД 1.10-098–2004 [2], могут быть:

- увеличение потребления газа и связанное с этим увеличение скорости его транспортировки до и после регуляторов давления и пульсации давления, вызванные этим явлением;
- неравномерность регулирования расхода газа задвижками и кранами (характерно для линий дополнительного потребления газа и обводных линий);
- наличие местных геометрических неоднородностей (отводы, регулирующая арматура, тройники, тупики и т.д.);
- отсутствие контакта между газопроводом и опорами, которое приводит к изменению длины пролетов.

Для оценки уровня вибрации проводят измерение среднего квадратического значения (СКЗ) виброскорости и виброперемещений в контрольных точках трубопроводов. Предельные значения норм вибрации для КС и ГРС, согласно СТО Газпром РД 1.10-098–2004 [2], в виде диаграммы представлены на рисунке 1.2 и в таблице 1.2.



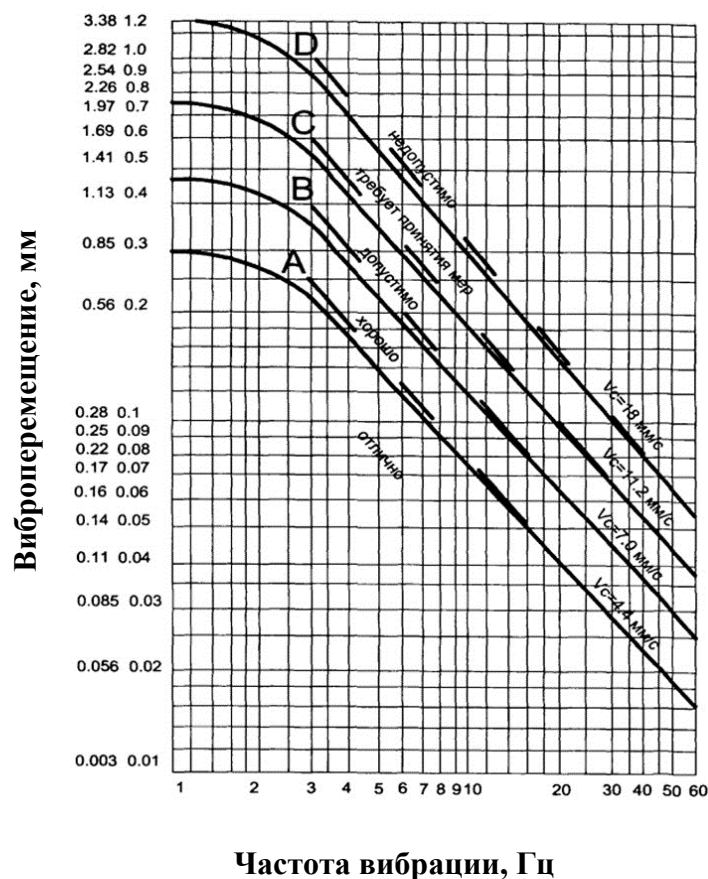


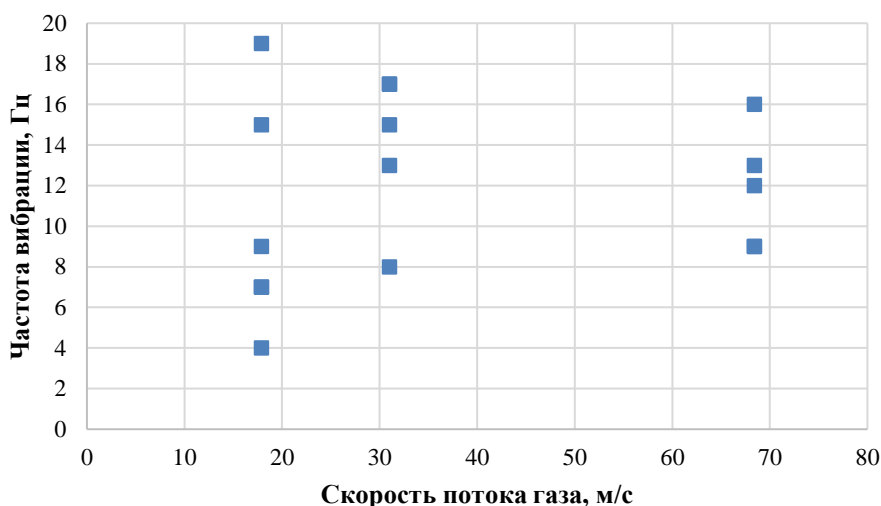
Рисунок 1.2 – Нормы вибрации трубопроводов по СТО Газпром РД 1.10-098–2004 [2]

Таблица 1.2 – Нормы вибрации трубопроводов узлов редуцирования [21]

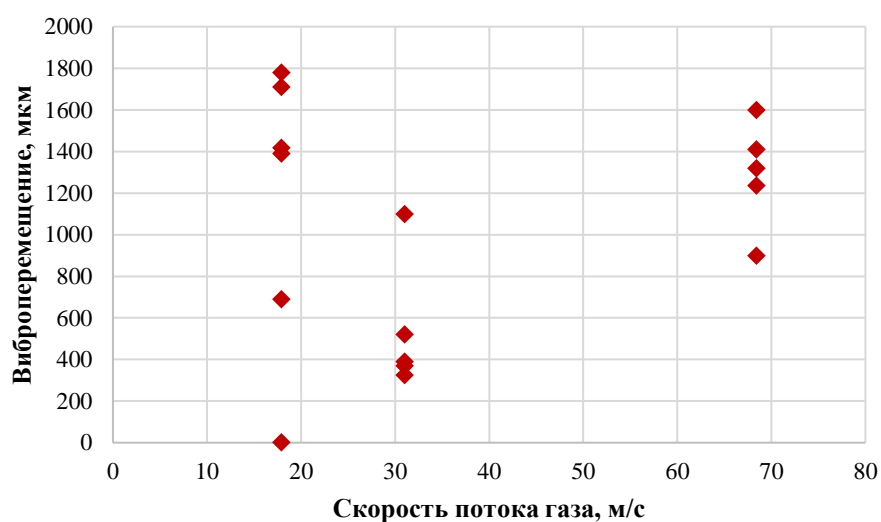
Границы зон вибросостояния	Общий уровень $V_e$ , мм/с
	НЧ- вибрация -диапазон частот 4–200 Гц
А (А) – зона бездефектного вибросостояния трубопровода	4
В (Б) – зона нормально-режимной эксплуатации	7
С (В) - наличие развивающегося дефекта системы «трубопровод–опоры» без ограничения сроков эксплуатации	11
Д (Г) - наличие существенного дефекта, соответствующего необходимости его устранения (трубопроводная система не пригодна для длительной эксплуатации)	18
Выше Д (Г) – зона возможного разрушения системы	выше 18

Как видно из представленного графика, оцениваемый диапазон нормируемой частоты вибрации изменяется от 1 до 60 Гц, а величина виброперемещения в диапазоне допустимых виброскоростей до 18 мм/с может составлять до 3,38 мм. Данный спектр вибраций характерен для изгибных низкочастотных колебаний трубопроводов, находящихся, как правило, в диапазоне до 200 Гц.

В качестве примера фактических параметров вибрации технологических трубопроводов, возникающих в элементах ТПО ГРС, в таблице П1.1 (Приложение 1) и на рисунке 1.3 представлены результаты замеров, выполненные в 2018 г. при техническом обследовании ГРС, работающей на режимах повышенной производительности.



а



б

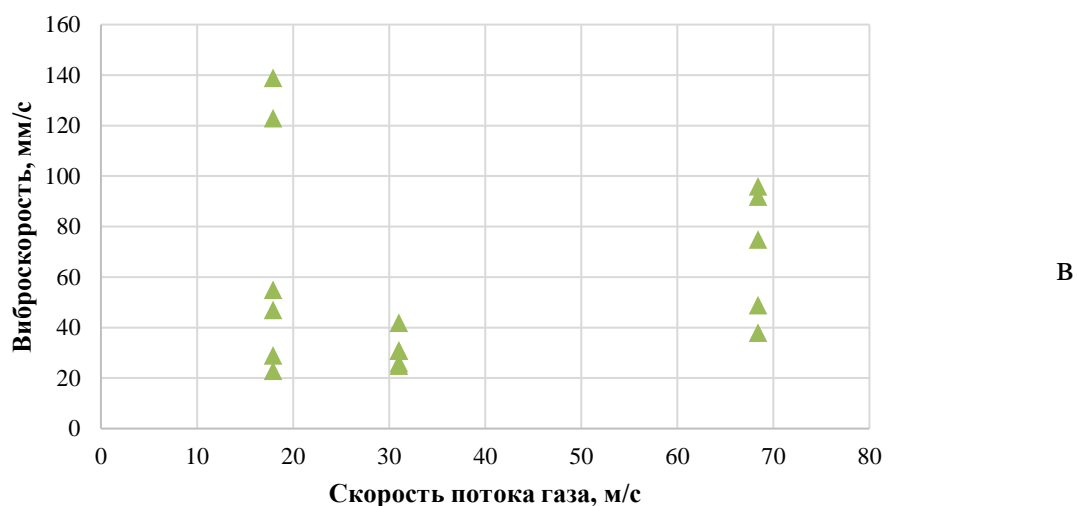


Рисунок 1.3 – Изменение частоты вибрации (*а*), виброперемещения (*б*) и виброскорости (*в*) в зависимости от скорости потока газа

Обработка результатов замеров показала, что основной диапазон частоты вибрации, находится в пределах 4-20 Гц и имеет низкочастотный характер (рисунок 1.3, *а*). Виброперемещение трубопроводов изменяется до 1,8 мм (рисунок 1.3, *б*). Виброскорость изменяется в широком диапазоне значений и, в основном, существенно превышающих регламентированные величины (рисунок 1.3, *в*).

Широкий диапазон изменения параметров вибрации, характерный для повышенных скоростей движения потока газа, вызывает появление потенциально опасных факторов, не учтенных в действующей нормативно-технической документации:

- развитие процесса фреттинг-изнашивания в уплотнительных элементах фланцевых соединений;
- самопроизвольное развинчивание болтовых и шпилечных соединений фланцев.

Схематично процесс разгерметизации фланцевых соединений под действием вибрации от движущегося потока газа можно представить в виде схемы, приведенной на рисунке 1.4.

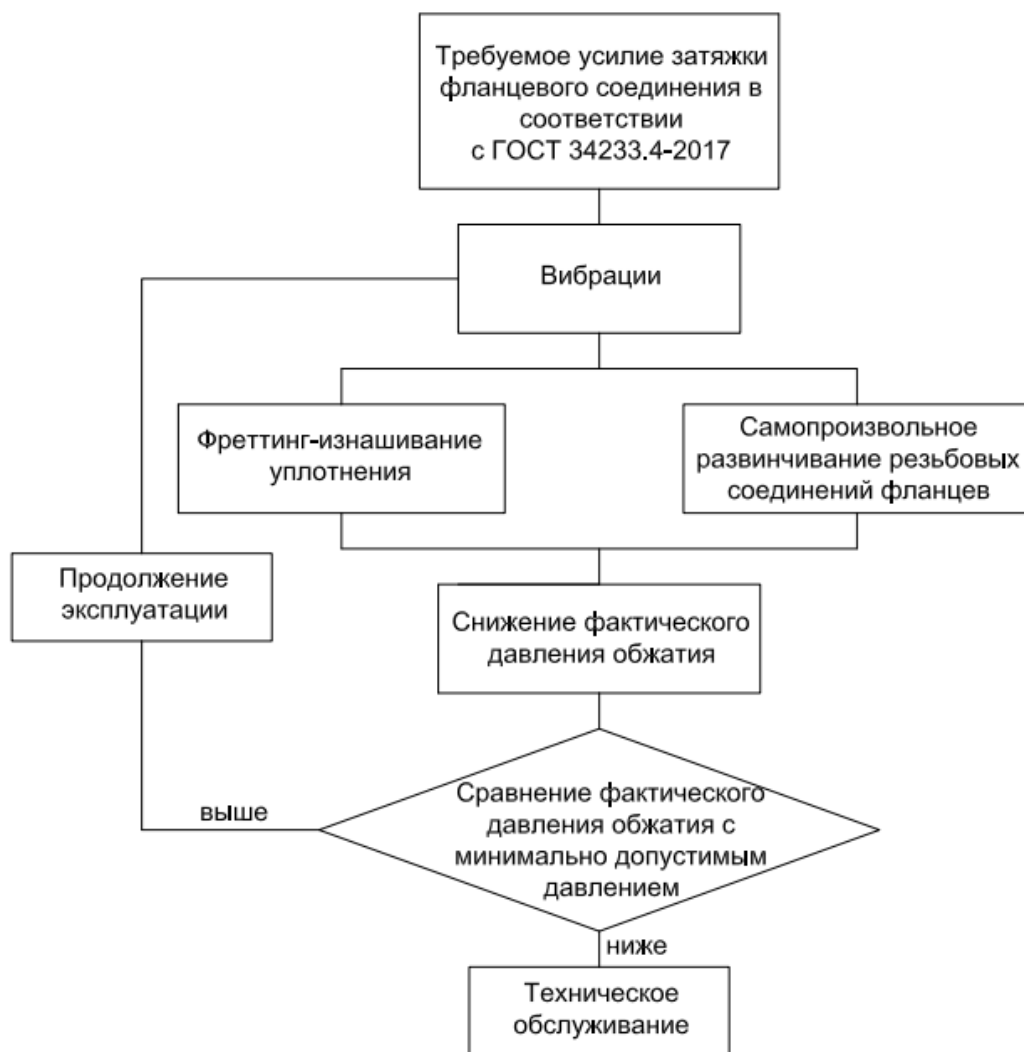


Рисунок 1.4 – Схема процесса разгерметизации фланцевого соединения

Указанные на рисунке 1.4 факторы способствуют разгерметизации фланцевых соединений и требуют проведения прогнозной оценки интенсивности их воздействия за планируемый период эксплуатации ГРС в режиме повышенной производительности.

Для предотвращения самопроизвольного развинчивания болтовых и шпилечных соединений разработано много конструктивных решений [22-34], позволяющих устранить данную проблему. Вопросу разгерметизации в результате фреттинг-изнашивания уплотнения уделялось значительно меньше внимания. При этом ГОСТ Р 34233.4–2017, регламентирующий расчет фланцевых соединений на прочность и герметичность, не учитывает влияние вибрационных воздействий.

### 1.3 Существующие представления о механизме фреттинга

Согласно ГОСТ 27674–88 [35] «изнашивание при фреттинге – это механическое изнашивание соприкасающихся тел при колебательном относительном микроперемещении». Во фланцевом соединении этот процесс развивается при условии наличия малоамплитудных перемещений, вызванных воздействием вибрации.

Изучению развития фреттинга и его влияния на качественные характеристики поверхностного слоя материала и, как следствие, на долговечность элементов, входящих в состав различных соединений, посвящено много работ разных авторов. Среди отечественных авторов это работы И.Л. Голего, А.Я. Алябьева, В.В. Шевеля [36], М.С. Островского [37-39], А.Н. Петухова [40-43], И.И. Артемова [44, 45], А.В. Дрязгина, [46], В.В. Ковалевского и Т.Э. Сергутиной [47-50], Ю.И. Шалапко и Т.В. Тарасовой [51, 52], И.Р. Асланян [53, 54], С.Г. Докшанина [55], Д.С. Горлова [56, 57], Г.Г. Заверюха [58, 59], а среди зарубежных – Г. Томлинсона [60], К.Г. Райт [61], Г.Г. Улиг и Р.У. Реве [62], Р.Б. Уотерхауз [63], Р.Б. Хейвуд [64] и др. [65-71].

Первыми исследователями в области изучения природы фреттинга были Г.А. Томлинсон, П.Л. Торн и Х.Д. Гаф. В своей работе [60] они предложили молекулярную теорию развития этого процесса, ее суть состоит в том, что находящиеся в контакте под действием нормальной нагрузки поверхности, могут сблизиться настолько, что между ними возникнет молекулярное взаимодействие, в результате которого на поверхностях фактического контакта образуются точки соединения тел с атомной связью. При относительном перемещении тел эти связи могут разрушиться, что будет сопровождаться вырыванием атомов из кристаллической решетки и образованием свободных частиц размерами, сопоставимыми с параметрами атомной решетки. Также они определили, что минимальная величина относительных микроперемещений, достаточная для развития фреттинга, составляет несколько нанометров и представили эту величину через единицу измерения атомной решетки –  $10...100 \text{ \AA}$ .

К.Г. Райт выдвинул другую теорию фреттинга, в соответствии с которой начальный этап этого процесса сопровождается адгезией, способствующей образованию «мостиков» сварки. При относительных перемещениях эти «мостики», представляющие собой связи, разрушаются и на поверхностях контакта образуются твердые частицы. При последующем смещении образовавшиеся частицы могут вызывать микрорезание или пластическое оттеснение металла сопряженной поверхности и, как следствие, дополнительное образование продуктов изнашивания, количество которых зависит от твердости материала поверхностей [61]. Кроме этого, К.Г. Райт предположил, что твердые частицы износа могут внедряться в металлическую поверхность, провоцируя образование трещин, развивающихся под воздействием циклических нагрузок и приводящих в итоге к разрушению детали [72].

Практически той же теории, что и К.Г. Райт придерживались Г.Г. Улиг и Р.У Ревин в работе [62], только при этом они выделяли тесную взаимосвязь и одновременное влияние механического и химического факторов на процесс фреттинга.

Адгезионную модель износа выдвинул в своих исследованиях отечественный ученый В.В. Ковалевский. В его работах [47-49] изучаются вопросы влияния адгезии на стадийность малоамплитудного фреттинга, а также уделяется большое внимание выявлению концентраторов напряжений, которые способствуют объемному разрушению при фреттинг-усталости. В.В. Ковалевский отмечал, что чем больше действительная площадь контакта, определяемая пластической деформацией поверхностей контактирующих тел под действием нормального давления, тем выше прочность адгезии. Согласно его теории на ранней стадии фреттинга происходит разрушение окисных пленок и возрастание адгезии (рисунок 1.5 а), вследствие чего образуются так называемые спайки и наблюдается деформация поверхностных слоев металла (рисунок 1.5 б), изменяющая направление действия тангенциальной силы на угол среза  $\theta$  в противоположную сторону. В результате этого угол среза  $\theta$

переходит на противоположную грань и в процесс изнашивания вовлекается новый объем металла, при этом возможен некоторый сдвиг металла по первоначальной плоскости скольжения (рисунок 1.5 в). Таким образом, воздействие постоянных тангенциальных колебаний в зоне контакта приводит к тому, что срезанный металл постепенно скапливается между контактирующими поверхностями и возникает эффект расклинивания, способствующий росту давления в контакте, деформационному упрочнению и последующему уменьшению адгезии и зарождению микротрещин в пограничных областях контакта (рисунок 1.5, з). В своей статье [48] В.В. Ковалевский представил зависимость изменения коэффициента адгезии от числа циклов нагружения при малоамплитудном фреттинге (рисунок 1.6), основываясь на исследованиях зарубежных ученых Г.А. Томлинсона, П.Л. Торна и Х.Д. Гафа [60, 61].

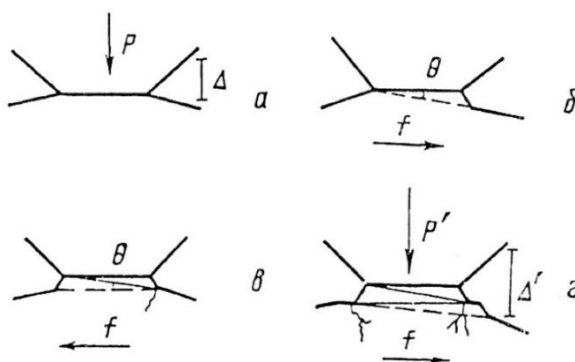


Рисунок 1.5 – Модель изнашивания отслаиванием при малоамплитудном фреттинге [47]

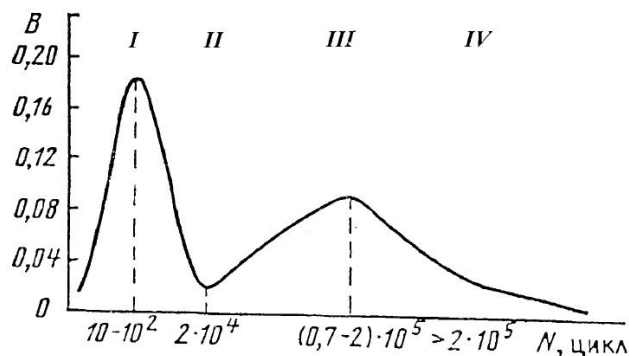


Рисунок 1.6 – Изменение коэффициента адгезии в зоне трения при фреттинг-усталостном нагружении (сталь, содержащая 0,25% С,  $A = 14,8$  мкм,  $p = 40$  МН/м<sup>2</sup>, частота нагружения 22 Гц) [48]

Исходя из рисунка 1.6 и статьи В.В. Ковалевского [48], I стадия малоамплитудного фреттинга характеризуется разрушением окисных пленок, образованных в течение первых циклов нагружения, что приводит контактирующие поверхности к состоянию ювенильных, и, как следствие, повышению адгезии, росту коэффициента трения в контакте и увеличением пластической деформации поверхностных слоев металла. Максимальное значение адгезия достигает к нескольким десяткам циклов нагружения, а затем ее активность снижается к  $2 \cdot 10^4$  циклов. По мере накопления продуктов износа в зоне трения на стадии II, они подвергаются циклическому передеформированию и интенсивному окислению. По мнению автора, в этот период происходит рост вторичных окисных пленок. Затем в диапазоне от  $2 \cdot 10^4$  до  $0,7 \dots 2 \cdot 10^5$  циклов (III стадия) наблюдается повторный рост адгезии, но заметно меньше, чем первый. При дальнейшем увеличении числа циклов (IV стадия) адгезия падает и достигает своего минимального значения. Таким образом, на III – IV стадиях происходит образование в зоне контакта мелкодисперсного, рыхлого слоя и накопление контактирующими поверхностями усталостных повреждений, приводящих впоследствии к объемному разрушению. Такое снижение Г.А. Томлинсон связывал с повышением химической активности деформируемой поверхности контакта [60].

Другие советские ученые И.Л. Голего, А.Я. Алябьев и В.В. Шевеля в свое время выдвинули усталостную модель фреттинга [36], согласно которой, процесс разрушения поверхностей металлов, контактирующих между собой, по ходу развития данного типа изнашивания проходит три стадии: адгезионное взаимодействие, приработку и установившейся износ с преобладанием непосредственного разрушения поверхностного слоя по механизму малоциклового усталости вследствие интенсивной пластической деформации поверхностных микрообъемов. Также в их работе [36] утверждается, что «большинство мнений сходится на том, что фреттинг



характеризуется амплитудами менее 25 мкм, но определенно не более 130 мкм».

М.С. Островский в своей работе [38] рассматривает процесс фреттинга, развивающегося в узлах горных машин, и описывает его как специфический вид поверхностного разрушения, который возникает при циклических микропроскальзываниях контактирующих поверхностей сопряженных деталей, вызванных вибрацией. Источником вибрации, по его мнению, может быть либо сама машина, либо другие близкорасположенные агрегаты, либо процесс транспортировки, либо сейсмическая активность земной поверхности. Автор также говорит о том, что фреттинг в значительной степени снижает качество поверхностей контактирующих деталей, ухудшает параметры шероховатости, а в некоторых случаях приводит к образованию глубоких полостей (каверн), уходящих вглубь поверхностных слоев на 200 мкм и более.

Для изучения специфики развития процесса фреттинга М.С. Островский создал метод трибомониторинга, с помощью которого можно выявить различные стадии данного типа изнашивания путем построения трибограммы, представляющей собой зависимость изменения величины силы трения от времени. В своих исследованиях [37-39] он выделяет четыре этапа развития фреттинга (рисунок 1.7). На первом этапе (*I*) наблюдается некоторое уменьшение силы трения, так как происходит интенсивное пластическое деформирование микровыступов в зоне контакта. Для второго этапа (*II*) характерно диспергирование поверхностей вследствие усталостных процессов, а также накопление продуктов разрушения в зоне контакта. На третьем этапе (*III*) происходит разрушение граничных поверхностных слоев, что сопровождается возникновением в отдельных местах фактической площади контакта адгезионных связей, за счет которых увеличиваются силы трения. А четвертый этап (*IV*) характеризуется стабилизацией высокого значения величины силы трения в связи с образованием прослойки из окисленных продуктов, действующих как абразивный материал.

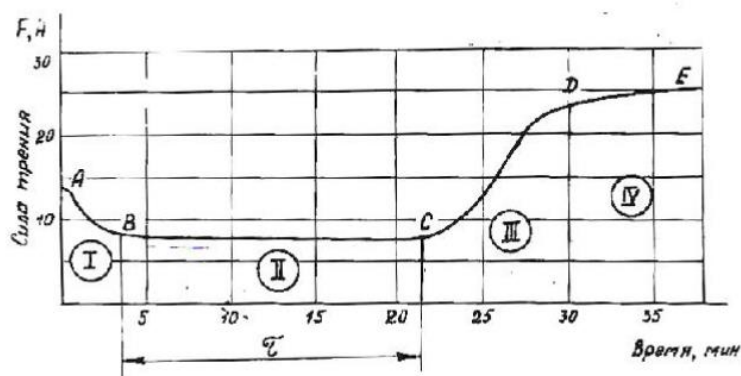


Рисунок 1.7 – Трибограмма фреттинга [38]

Похожую теорию развития фреттинга выдвинул по результатам своих исследований И.И. Артемов в работах [44, 45] и его последователь А.В. Дрязгин [46], в которых они также как и М.С. Островский связывают процесс фреттинга с дислокационной ползучестью в структуре металла, возникающей в условиях вибрационного нагружения, и выделяют ее как одну из возможных причин формирования микротрещин и последующего развития фреттинг-усталости.

Согласно работам А.Н. Петухова [40-43], фреттинг представляет собой процесс, возникающий при циклическом нагружении в зоне контакта деталей, образующих между собой прессовое или малоподвижное соединение, при этом у границ зоны контакта образуются частицы материала поврежденных поверхностей, суб- и микротрещины. Минимальная амплитуда, при которой начинается процесс фреттинг-изнашивания, составляет 200...300 мкм. Степень повреждения поверхностного слоя зависит от величины давления в зоне контакта и от свойств материала контактирующих деталей. Кроме того, А.Н. Петухов в работе [43] отметил циклическое повторение этого процесса и выделил в нем три этапа:

- 1) увеличение количества продуктов повреждения контактирующих поверхностей;
- 2) изменение размеров и мест участков активного контакта и зон влияния, переход прямого контакта сопряженных деталей в

контакт через продукты повреждения, возникновение и развитие вне зон контакта каверн (микроростов);

- 3) постоянное возникновение в зонах циклического контакта условий для образования и развития суб- и микротрещин или абразивного износа, который способствует удалению микротрещин.

Также в работе [42] А.Н. Петухов объясняет процесс фреттинга с точки зрения механики деформируемого тела, считая его одним из видов контактного взаимодействия тел (в своей работе в качестве тел он берет полусферы или полуцилиндры), при котором в зоне контакта возникает сложное напряженное состояние, складывающееся из одновременного действия составляющих от нормальных напряжений сжатия и знакопеременных касательных напряжений, образованных силами трения. Вследствие чего элементарный объем материала, находящийся в зоне контакта, испытывает трехосное напряженное состояние и подвергается циклическому деформированию. При этом по глубине слоя возникает градиент напряжений.

По мнению А.Н. Петухова наиболее напряженными являются: зона крайнего поверхностного слоя, располагающаяся на некоторой глубине и зона, где касательные напряжения достигают максимума (рисунок 1.8 а).

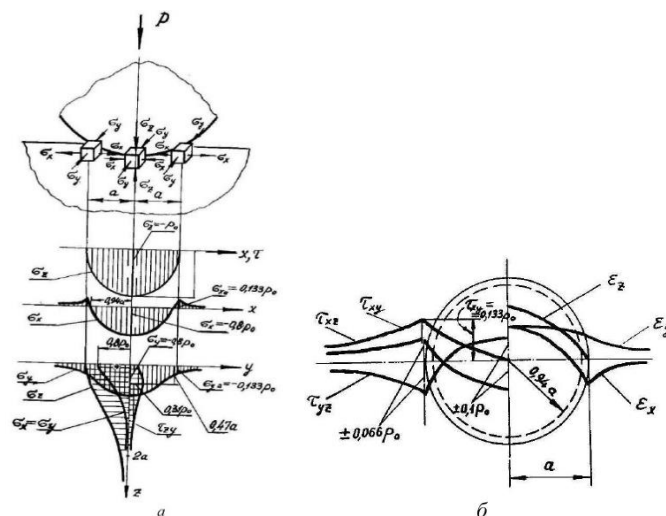


Рисунок 1.8 – Распределение напряжений (а) и деформаций (б) в зоне контакта шара с полуплоскостью [42]

При определенных внешних условиях нагружения эти две зоны смыкаются. В результате циклического изменения сил поверхности происходит возвратное проскальзывание в пределах площади контакта и возникает значительное воздействие сил трения, приводящее к циклическим изменениям напряженного состояния во всех микрообъемах материала по площадкам фактического контакта (рисунок 1.8 б). Проскальзывание вызывает уменьшение местной концентрации напряжений и способствует началу пластической деформации в упругих телах. А преодоление сил трения приводит к диссипации энергии, и проявляется как источник конструктивного демпфирования и фреттинга [42].

Принимая во внимание дискретность контакта реальных деталей, которая определяется шероховатостью поверхности, А.Н. Петухов утверждает, что в зоне контакта всегда найдутся микро-и макрообъемы в виде выступов, где максимальные эквивалентные циклические напряжения превысят либо предел прочности материала, либо величину ограниченного предела выносливости [43]. Таким образом, при определенном числе циклов нагружения на контактирующих поверхностях будут возникать малоцикловые, статические, квазистатические и усталостные разрушения материала.

Ю.И. Шалапко и Т.В. Тарасова, описывая в работе [51, 52] процессы динамики поверхностных слоев при малоамплитудном фреттинге, отмечают, что относительное движение контактирующих поверхностей, являющееся обязательным условием для возникновения фреттинга, имеет очень сложный характер, который определяется шероховатостью поверхности, соразмерной с амплитудами микроперемещений, вспышками адгезионной активности, механизмами самоорганизации, структурной динамикой частичного проскальзывания, микроизнашиванием, пластичностью, актами микропроскальзывания. По их мнению, фреттинг – это движущая сила динамического движения системы, состоящей из двух находящихся в контакте поверхностей при постоянных параметрах внешней нагрузки. Динамический

отклик, порождаемый воздействием вибрации в зоне контакта, характеризуется тремя режимами: сцеплением, частичным проскальзыванием и глобальным скольжением поверхностей, описать эти три режима, в случае контакта без смазки, можно посредством анализа трех параметров: нормальной силы, тангенциальной силы и амплитуды относительного смещения. При этом согласно точке зрения авторов, с течением времени контакт двух поверхностей трансформируется при циклической нагрузке от состояния полного сцепления до проскальзывания с образованием так называемого «третьего тела» - подвижного поверхностного слоя (рисунок 1.9). Разрушение зарождается на периферии контакта, а затем постепенно распространяется к центру. Исследование контактных зон, проведенное Ю.И. Шалапко и Т.В. Тарасовой, позволило сделать вывод, что относительное движение контактирующих поверхностей представляет собой не только абсолютное смещение тел, но и деформационную мобильность приконтактных зон.

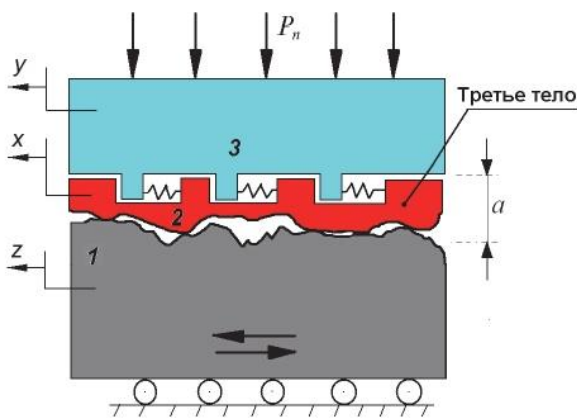


Рисунок 1.9 – Образование подвижного поверхностного слоя при малоамплитудном фреттинге [51]

Помимо вышеупомянутых исследователей представления процесса фреттинга как совокупности следующих друг за другом режимов или механизмов изнашивания сделали иностранные ученые, авторы работ [63-71].

В работах [65, 66] выдвинуты предложения, составлять карты механизмов фреттинга для описания этапов его развития. Данные карты имели

вид графических зависимостей нормальной нагрузки, приложенной к контакту от амплитуды тангенциального смещения, которые определяли границы трех областей, соответствующих механизмам фреттинг-изнашивания (рисунок 1.10).



Рисунок 1.10 – Типичная карта механизмов фреттинг-изнашивания:  
1 – область сцепления; 2 – область существенного проскальзывания;  
3 – область частичного проскальзывания [66]

На рисунке 1.10 область 1 характеризуется малыми смещениями и большими сжимающими нагрузками, то есть отсутствием относительного проскальзывания контактирующих поверхностей и называется областью сцепления. Для области 2 наоборот характерны большие смещения и малые сжимающие нагрузки, относительное проскальзывание в этом случае происходит на всех единичных площадках контакта неровностей контактирующих поверхностей и называется областью существенного проскальзывания. Область 3 в соответствии с [66] определяется как область частичного проскальзывания.

Каждой области соответствует свой механизм, определяющий каждый конкретный этап развития фреттинга. В области 1 на протяжении миллионов циклов деформации контакта износ практически отсутствует. В области 3 начинается формирование усталостных трещин на площадках контакта, а многократные деформации вызывают отделение частиц износа. В области 2 образование трещин уже не является главным фактором, изнашивание

контактирующих поверхностей носит обычный для трения скольжения характер [66].

Так как знание механизмов фреттинга необходимо для того, чтобы оценить срок службы контактного соединения, в рамках исследования [68] было представлено схематическое изображение зависимости срока службы от амплитуды перемещений с указанием названий областей изнашивания (рисунок 1.11).



Рисунок 1.11 – Схематическое изображение зависимости срока службы контактного соединения от амплитуды тангенциального смещения [67]

Согласно рисунку 1.11 наименьший срок службы наблюдается в период перехода от частичного проскальзывания к существенному. Данный факт согласно работе [67] связан с тем, что в этом диапазоне относительных тангенциальных смещений образование частиц износа происходит довольно интенсивно, причем на этом этапе удаление их из зоны контакта еще не затруднено. Согласно этой карте изнашивания, можно подобрать эксплуатационные режимы, позволяющие ограничить работу соединения в нежелательной области.

Как показывают результаты, полученные разными исследователями [36-71, 73], интенсивность развития фреттинга зависит от значительного числа факторов (рисунок 1.12), однако определение роли каждого из перечисленных факторов в механизме разрушения контактирующих поверхностей сопряженных деталей до сих пор не завершено [74].



Рисунок 1.12 – Влияние различных факторов на интенсивность фреттинга (↑ - увеличивают; ↓ - уменьшают) [38]

Основными факторами, влияющими на развитие фреттинга во фланцевых соединениях, являются амплитуда и частота вибрации, контактное давление, продолжительность эксплуатации, физико-механические свойства уплотнительного материала, а также шероховатость уплотнительной поверхности фланца. Температура в контакте фланец-уплотнение изменяется незначительно, так как стальная поверхность быстрее отводит тепло, чем оно успевает накопиться в зоне трения двух поверхностей с разными показателями механических свойств.

Анализ перечисленных представлений о механизме фреттинга показывает, что основное внимание уделяется контакту металлических поверхностей, в то время как во фланцевых соединениях технологических трубопроводов газотранспортных систем присутствует контакт металл–неметалл. Наличие в контакте неметаллического материала приводит к сосредоточению основной деформации и накоплению фреттинг-усталости в уплотнительном материале, поэтому продукты разрушения, образующиеся в



зоне контакта, состоят из частиц уплотнения, что исключает появление и развитие фреттинг-коррозии. Потеря массы и объема уплотнения вызывает нарушение герметичности фланцевого соединения.

Так как для фланцевых соединений наиболее важным фактором является сохранение герметичности, определяемой их ресурсом, весь процесс фреттинга необходимо рассматривать как 3 последовательно протекающих этапа: формирование условий для предварительного микросдвига, микросдвиг и многоцикловые возвратно-поступательные микроперемещения. При моделировании данных этапов необходимо учитывать, что в зоне контакта фланец-уплотнение формируется сложное напряженное состояние, включающее нормальную составляющую действующих напряжений сжатия и тангенциальную составляющую касательных напряжений сдвига.

#### **1.4 Выводы по первой главе**

1. Основной причиной нарушения герметичности фланцевых соединений технологических трубопроводов газотранспортной структуры в 40% случаев является высокий уровень вибрации.

2. Высокий уровень вибрации формируется, главным образом, вследствие повышения скоростных параметров движения потока газа. Нормативно оцениваемый диапазон относится к низкочастотной вибрации и изменяется от 1 до 60 Гц. Недопустимый уровень вибраций характеризуется значениями виброскорости, выше 18 мм/с.

3. Вибрации фланцевых соединений вызывают появление потенциально опасных факторов, не учтенных в нормативно-технической документации: развитие процесса фреттинга в уплотнительных элементах фланцевых соединений и снижение усилия затяжки резьбовых соединений. В соответствии с этим требуется разработка методики расчета фланцевых соединений, учитывающей воздействие указанных факторов.

4. Согласно данным исследований развитие фреттинга сопровождается на первом этапе адгезионным взаимодействием и

поверхностным деформированием, на втором этапе – частичным проскальзыванием, на третьем этапе – накоплением усталостных повреждений и объемным разрушением.

5. В большинстве научных работ, посвященных изучению фреттинга, исследовали контакт металлических поверхностей. Сопряжению деталей из материалов с разными показателями механических свойств внимания практически не уделялось.

### **1.5 Цель и задачи исследований**

В результате аналитического обзора поставлена цель и следующие задачи исследования.

Цель исследования – 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.

## ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Процесс зарождения и развития фреттинга во фланцевом соединении в условиях вибрации состоит из трех последовательных этапов.

Первый этап заключается в формировании условий для предварительного микросдвига контактирующих поверхностей фланцевого соединения друг относительно друга.

На втором этапе контактирующие поверхности осуществляют возвратно-поступательные микроперемещения, вызывающие первичную пластическую деформацию поверхностных слоев уплотнения в пределах внедрения выступов шероховатости в ответную поверхность.

Третий этап характеризуется отделением частиц материала уплотнения в результате действия многоцикловых виброперемещений, вызывающих многократное передеформирование поверхностного слоя.

Данное деление на этапы было положено в основу расчетно-теоретических и экспериментальных исследований.

В соответствии с поставленной целью структура диссертационного исследования включала следующие этапы:

- выбор материалов, применяемых для фланцевых соединений газовой промышленности, и определение их механических свойств;
- исследование трибологических параметров контактных поверхностей разного материального исполнения и разной шероховатости при трении покоя и трении скольжения,
- исследование износостойкости материалов контактных поверхностей при циклическом виброперемещении.

Структурная схема исследований представлена на рисунке 2.1.

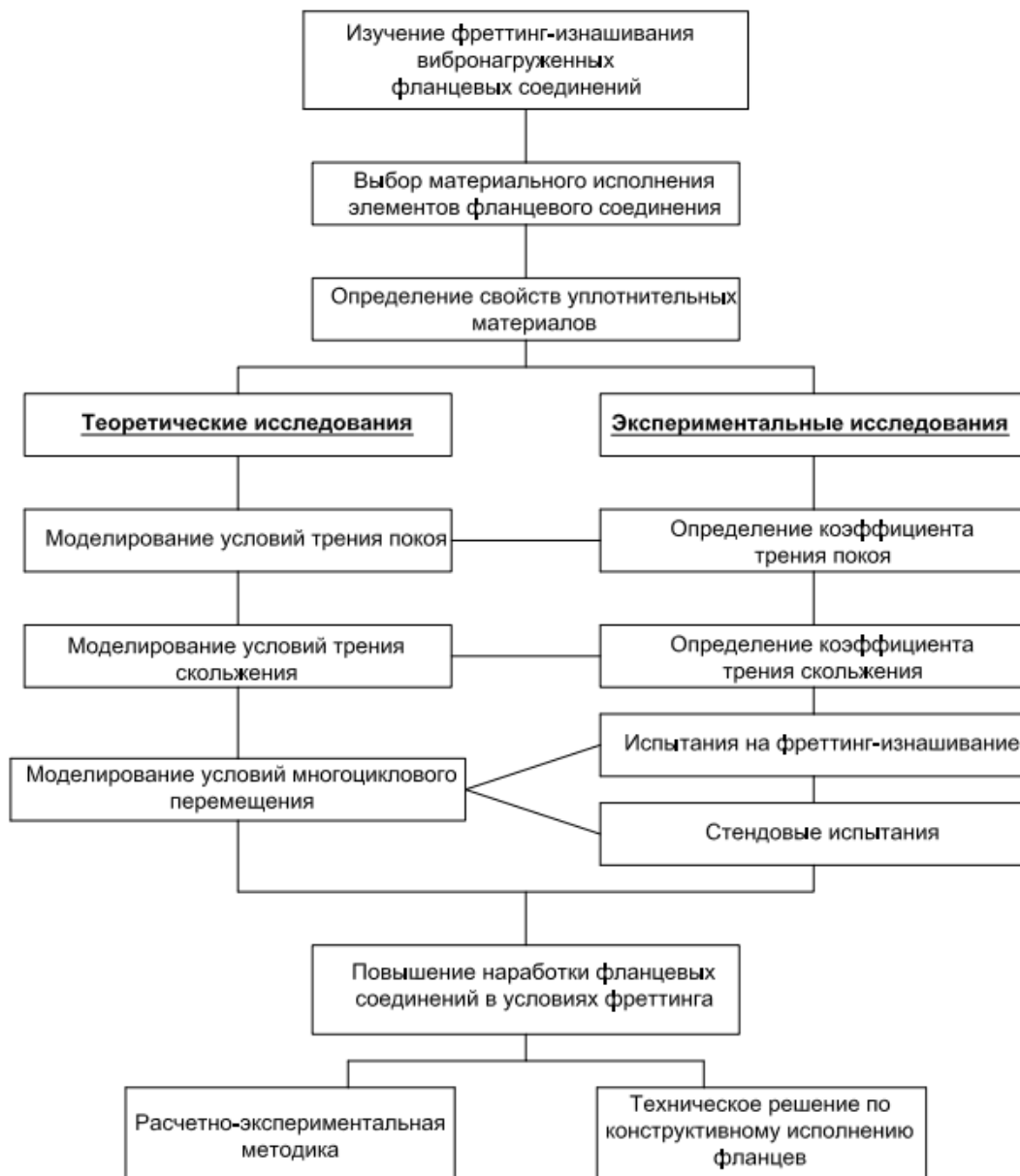


Рисунок 2.1 – Структурная схема исследований

## 2.1 Выбор материалов для исследований и определение механических свойств

Для исследований выбраны следующие неметаллические уплотнительные материалы:

- паронит (марка ПМБ ГОСТ 481–80 [75]);
- фторопласт (марка ПН ГОСТ 10007–80 [76]);

- терморасширенный графит (производитель Силур ТУ 5728-006-93978201–2008 [77]);
- полиуретан (СКУ-7Л ТУ 22.29.29-001-15762649–2017 [78]).

В качестве материала фланца выбрана сталь 20 по ГОСТ 1050–2013 [79].

Основными характеристиками уплотнительных материалов по ГОСТ 34233.4–2017 [3], обеспечивающими герметичность фланцевого соединения, являются прокладочный коэффициент, давление обжатия и условный модуль сжатия. Нормативные требования к ним представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Характеристики уплотнений по ГОСТ 34233.4–2017 (Приложение И) [3]

Тип и материал уплотнения	Прокладочный коэффициент $m$	Давление обжатия $q_{обж}$ , МПа	Предельно допустимое давление $q$ , МПа	Условный модуль сжатия $E_{п}$ , МПа*
Паронит при толщине не более 2-3 мм	2,5	20,0 <sup>1</sup>	130,0	$2 \cdot 10^3$
Резина с твердостью выше 65 единиц по Шору А	1,0	4,0	20,0	$4 \cdot (1 - \frac{h}{2b})$
Фторопласт 4 при толщине 1-3 мм	2,5	10,0	40,0	$2 \cdot 10^3$
Терморасширенный графитовый материал (ТРГ) с обтюратором	2,0	4,0	200,0	$2 \cdot 10^3$
Терморасширенный графитовый материал (ТРГ) без обтюратора	2,5	4,0	120 при $h_n = 2$ мм 100 при $h_n = 3$ мм	$2 \cdot 10^3$
$b_n$ и $h_n$ – ширина и высота уплотнения соответственно.				

Для определения механических свойств принятых к исследованию уплотнительных материалов выполнены испытания:

- измерение твердости по шкале Шора (D) в соответствии с ГОСТ 24621–2015 [80] твердомером Шор Тип D «ВОСТОК-7»;

– испытания при одноосном растяжении по ГОСТ 11262–2017 [82] на испытательной машине Shimadzu AGS-X 100 kN. При данных испытаниях образцы с расчетной длиной 25 мм из выбранных уплотнительных материалов растягивают вдоль их главной продольной оси с постоянной скоростью 5 мм/мин для паронита, ТРГ, полиуретана и 10 мм/мин для фторопласта и в процессе растяжения измеряют нагрузку, выдерживаемую образцом, и его удлинение;

– испытания при сжатии по ГОСТ 33784–2016 [83] на испытательной машине Shimadzu AGS-X 100 kN. При данных испытаниях образцы в форме прямоугольника со стороной не менее 25 мм помещают под индентор диаметром  $6,400 \pm 0,0025$  мм, обеспечивая расстояние от края образца не менее 10 мм, и прикладывают предварительную нагрузку 22,2 Н. Через 15 с после приложения предварительной нагрузки измеряют толщину образца. Затем в течение 10 с постепенно увеличивают предварительную нагрузку до основной, величиной 1112 Н, выдерживают 60 с и снова измеряют толщину образца. Потом уменьшают нагрузку до предварительной и через 60 с определяют толщину образца после возврата в первоначальное состояние.

Результаты выше перечисленных испытаний представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Показатели механических свойств выбранных для исследования уплотнительных материалов

Показатели механических свойств	Уплотнительный материал			
	Паронит	Фторопласт	ТРГ	Полиуретан
Твердость по Шору ( $H_D$ )	65	60	27	25
Предел прочности при растяжении, МПа	3,34	36,26	4,03	2,20
Предел текучести при растяжении МПа	0,53	0,31	0,65	0,23
Удлинение при разрыве, %	0,07	201,58	0,42	2,09
Сжимаемость, %	10,88	12,56	55,59	63,04
Восстанавливаемость, %	44,05	52,91	17,78	92,36

Химический состав и механические свойства стали 20, выбранной для исследования в качестве материала фланца и ответных резьбовых соединений, представлены в таблице 2.3 и 2.4 соответственно.

Таблица 2.3 – Химический состав стали 20 по ГОСТ 1050–2013 [79]

Массовая доля элементов, %									
C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr	Cu	V	Fe
0,17-0,24	0,17-0,37	0,35-0,65	0,035	0,030	0,30	0,25	0,30	-	≈98

Таблица 2.4 – Механические свойства стали 20 по ГОСТ 1050–2013 [79]

Механические свойства, не менее				
Предел текучести $\sigma_{0,2}$ , МПа	Временное сопротивление $\sigma_B$ , МПа	Относительное удлинение $\delta_5$ , %	Относительное сужение $\psi$ , %	Твердость по Бринеллю <i>HB</i>
245	410	25	55	163

Для проведения испытаний поверхность стального образца подвергалась механической обработке, в результате которой формировался микрорельеф с искусственной шероховатостью разной величины. В качестве механической обработки применялось шлифование, пескоструйная обработка корундом в течение 1 и 3 мин и грубая обработка напильником. После проведения обработки шероховатость поверхности стальных образцов контролировалась на профилографе-профилометре XR20 (Mahr GmbH, Германия). Значения основных параметров шероховатости поверхности стального образца представлены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Основные параметры шероховатости стального образца в зависимости от вида механической обработки

Вид механической обработки	Высота неровностей профиля по десяти точкам ( $R_z$ ), мкм	Среднеарифметическое отклонение профиля ( $R_a$ ), мкм	Средний шаг неровностей профиля ( $S_m$ ), мкм
шлифование	1,9	0,394	351,500

Продолжение таблицы 2.5

Вид механической обработки	Высота неровностей профиля по десяти точкам ( $R_z$ ), мкм	Среднеарифметическое отклонение профиля ( $R_a$ ), мкм	Средний шаг неровностей профиля ( $S_m$ ), мкм
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

## 2.2 Методика и оборудование для определения коэффициента трения покоя и трения скольжения

Для проведения исследований по влиянию контактного давления и микрогеометрии поверхностей на формирование условий возникновения фреттинга выполнены лабораторные испытания на устройстве МТ-085 для определения статического и динамического коэффициентов трения по стандарту ISO 8295–2004 [84] с модернизированным тензодатчиком, настроенным на возможность задания усилия прижатия до  $5000 \pm 5$  г. Скорость относительного перемещения пар трения  $100 \pm 10$  мм/мин. Внешний вид и схема устройства представлены на рисунке 2.2 и 2.3 соответственно.



Рисунок 2.2 – Внешний вид устройства МТ-085



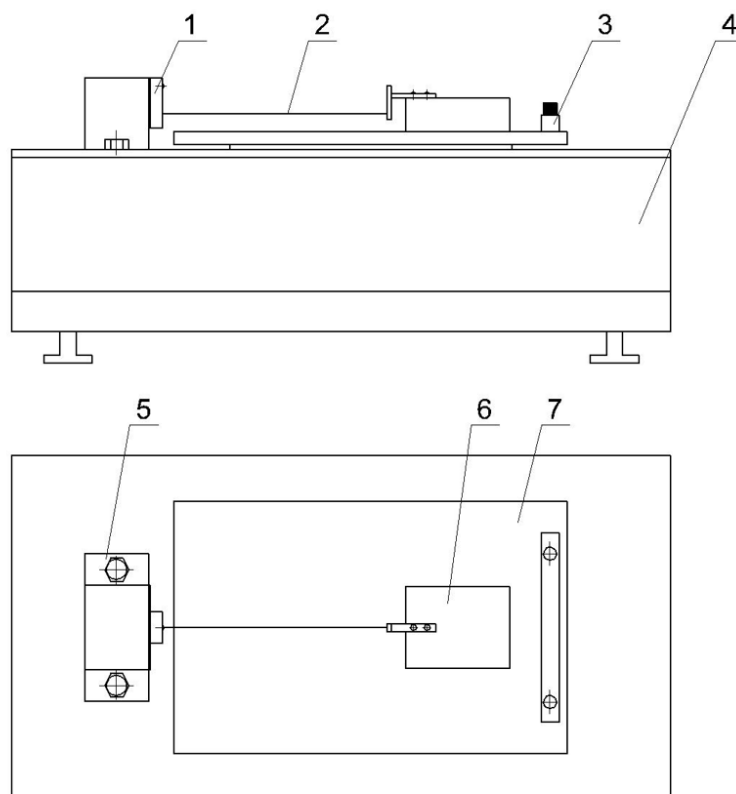


Рисунок 2.3 – Схема устройства МТ-085: 1 – тензодатчик; 2 – нейлоновая нить; 3 – зажимная пластина; 4 – корпус; 5 – защитный кожух для тензодатчика; 6 – неподвижный образец; 7 – испытательный столик на салазках

Измерение фрикционных свойств проводилось на образцах из уплотнительных листовых материалов, зафиксированных зажимной пластиной 3 на испытательном столике 7, при скольжении относительно их поверхности неподвижного образца 6, прикрепленного нейлоновой нитью 2 к тензодатчику 1, расположенному в защитном кожухе 5.

В качестве переменных параметров при проведении испытаний выбраны прижимная нагрузка и шероховатость поверхности стального образца, параметры которой определяются в соответствии с таблицей 2.5.

Методика испытания для каждого вида шероховатости включает в себя следующие этапы:

1. Неподвижный образец размером 65x65 мм изготавливается из стали 20 и поочередно подвергается механической обработке для формирования различной микрогеометрии поверхности в соответствии с таблицей 2.5. Из выбранных для исследования уплотнительных материалов подготавливаются пластины размером 80x200 мм.

2. Образец из уплотнительного материала фиксируется зажимной пластиной на испытательном столике, перемещающемся по салазкам, а неподвижный образец при помощи нейлоновой нити с минимальным натяжением прикрепляется к тензодатчику.

3. Включение устройства обеспечивает поступательное движение испытательного столика, в результате чего возникает скольжение стального неподвижного образца по поверхности уплотнительного материала. Величина определяемых коэффициентов трения покоя и скольжения зависит от свойств уплотнительного материала.

4. В процессе испытаний нагрузка на неподвижный образец меняется и составляет  $200 \pm 5$  г,  $500 \pm 5$  г,  $1000 \pm 5$  г,  $2100 \pm 5$  г,  $3000 \pm 5$  г,  $5200 \pm 5$  г для каждого цикла испытаний, что обеспечивает формирование контактного давления в диапазоне от 0,0005 до 0,012 МПа.

5. Статический и динамический коэффициенты трения (коэффициенты трения покоя и скольжения соответственно) определяются по результатам трех испытаний при одном значении шероховатости и усилия прижатия для каждого уплотнительного материала.

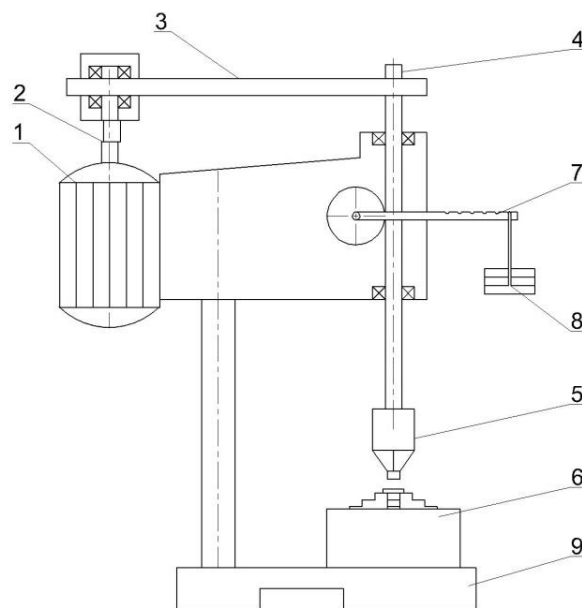
### **2.3 Методика и оборудование для испытаний на фреттинг-изнашивание**

Для испытаний на фреттинг-изнашивание использована расширенная методика в соответствии с ГОСТ 23.211–80 [85]. В качестве кинематической схемы реализации процесса фреттинга при экспериментальных исследованиях принято колебательное (осциллирующее) движение на фрикционных контактах при следующих режимах нагружения:

- частота возвратно-вращательного перемещения образцов друг относительно друга – 50 Гц с погрешностью не более 10%;
- амплитуда перемещения образцов – 500 мкм с погрешностью не более 10 мкм;
- среднеквадратическое значение виброскорости при данных значениях частоты и амплитуды – 224 мм/с;
- нагрузка образцов в осевом направлении – 2 Н, 10 Н, 20 Н, 36 Н с погрешностью не более 0,5 Н, что обеспечивает контактное давление 0,04 МПа, 0,2 МПа, 0,4 МПа, 0,72 МПа соответственно.

Длительность испытаний образцов при разных нагрузках принята равной 5 часов 30 минут, что соответствует  $5 \cdot 10^5 \pm 50$  циклов.

Внешний вид и схема установки для проведения испытаний представлены на рисунке 2.4 а, б. Работа установки осуществляется следующим образом: электродвигатель 1 передает вращательное движение эксцентрику 2. Эксцентрик 2 через подшипник качения связан с рычагом 3 шпинделя 4, совершающего возвратно-вращательное движение контробразца. Амплитуда перемещения контробразца постоянна и определяется эксцентриком 2. Подвижный образец закрепляется в регулируемом патроне 5, а неподвижный образец (нижний) крепится в патроне 6, установленном на плите станка 9. Нагружение образцов осуществляется нагружающим устройством, при помощи рычага 7 и груза 8.



а

б

Рисунок 2.4 – Внешний вид (а) и схема (б) установки для испытаний на фреттинг: 1 – электродвигатель; 2 – эксцентрик; 3 – рычаг; 4 – шпиндель; 5 – регулируемый патрон; 6 – патрон; 7 – рычаг; 8 – груз; 9 – плита станка

Величина износа по результатам испытаний определяется с применением весового метода на электронных весах НТР-120 СЕ с точностью до 0,0001 г.

Методика испытания по ГОСТ 23.211–80 [85] включает в себя следующие этапы:

1. Образцы для проведения испытаний подготавливаются в соответствии с чертежами, представленными на рисунке 2.5 а, б.

*Примечание.* При испытаниях по режиму II допускается отклонение шероховатости рабочей поверхности образцов от указанных на чертежах 1 и 2 в пределах  $R_a = 0,020 — 2,5$  мкм и  $R_z = 0,025 — 0,100$  мкм по ГОСТ 2789–73 [86].

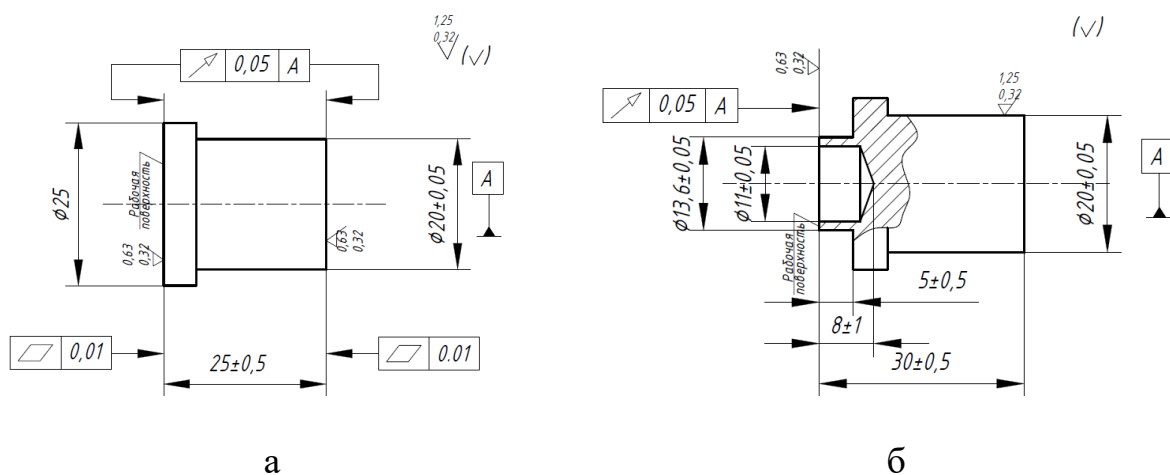


Рисунок 2.5 – Чертежи образцов для испытаний [85]:

а) неподвижный образец, б) контрообразец

В качестве материала контрообразца и неподвижного образца используется сталь 20, а выбранные уплотнительные материалы, подготовленные в виде цилиндрических заготовок диаметром 25 мм и толщиной не менее 3 мм, фиксируются на неподвижном образце.

2. Неподвижный образец и контрообразец закрепляются в зажимах испытательной установки и прижимаются друг к другу рабочими поверхностями для обеспечения их взаимного прилегания.

3. Прикладывается сжимающая нагрузка разной величины.

4. Включается привод установки и фиксируется время начала испытаний.

5. После достижения заданного количества циклов испытаний, равного  $5 \cdot 10^5 \pm 50$  циклов, привод установки выключается.

6. Образцы освобождаются из цанговых зажимов, последовательно промываются в бензине и ацетоне и высушиваются на воздухе.

7. Износ неподвижного образца измеряется весовым методом.

Изменение массы образца при испытании вычисляется по следующей формуле:

$$\Delta G = G_{\text{н}} - G_{\text{к}}, \quad (2.1)$$

где  $\Delta G$  – изменение массы образца, г;

$G_n$  – вес образца до испытаний, г;

$G_k$  – вес образца после испытаний, г.

По изменению массы образца в соответствии с ГОСТ 23.224–86 [87] определяется интенсивность линейного изнашивания:

$$I = \frac{\Delta G}{\rho \cdot S_{\text{конт}} \cdot L}, \quad (2.2)$$

где  $I$  – интенсивность изнашивания;

$\rho$  – плотность изношенного материала, г/мм<sup>3</sup>;

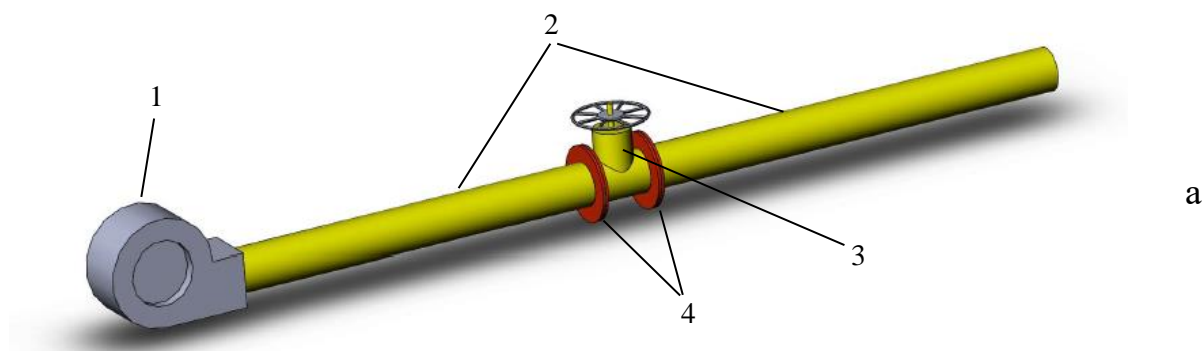
$S_{\text{конт}}$  – контурная площадь контакта образцов, мм<sup>2</sup>;

$L$  – путь трения, мм.

#### 2.4 Методика и оборудование для стендовых испытаний фланцевых соединений в условиях повышенных вибраций

Для сопоставления результатов лабораторных испытаний выполнен цикл стендовых испытаний, оценивающих снижение момента затяжки фланцевых соединений.

Для создания вынужденных вибраций во фланцевом соединении разработан и изготовлен стенд, имитирующий работу ТПО в условиях вибрации от движения высокоскоростного потока газа. Схема стенда и внешний вид представлены на рисунках 2.6, а и б, в соответственно.





б

Рисунок 2.6 – Схема (а) и фотография (б) стенда: 1 – вентилятор, 2 – участки трубопровода, 3 – задвижка, 4 – фланцевые соединения

Для проведения испытаний выбраны стальные приварные плоские фланцы с условным диаметром 200 мм по ГОСТ 33259–2015 [1], выполненные из стали 20. Для сборки фланцев использовались 12 болтовых и 12 шпилечных соединений М20, класса прочности 5,8.

Для создания стенда также использовались:

- бесшовные трубы диаметром 219 мм, толщиной стенки 6,0 мм из стали 20 по ГОСТ 10705–80 [88];
- отводы 90-219×6 из стали 20 по ГОСТ 17375–2001 [89];
- тройник 219×6 равнопроходной из стали 20 по ГОСТ 17376–2001 [90].

Основными регулируемыми параметрами испытаний являлись:

- скорость движения потока газа – 24 м/с;
- параметры вибрации: виброскорость 18 мм/с, частота вибрации 33 Гц.

Технические характеристики стенда для проведения испытаний представлены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Технические характеристики испытательного стенда

Источник воздушного потока	вентилятор <b>ВР 132-30-5</b>
Напряжение электрической сети	<b>380 В</b>
Электрическая мощность	<b>15 кВт</b>
Расход воздуха	<b>84 м<sup>3</sup>/мин</b>
Уровень шума	<b>~100 дБ</b>
Габариты	<b>15×5×3,5 м</b>

Методика стендовых испытаний включает в себя следующие этапы:

1. Перед началом испытаний резьбовые соединения фланцев свинчиваются с моментами затяжки 230 Н·м, формируя нормативный уровень затяжки для выбранного типоразмера болтов и шпилек.

2. Включается вентилятор, воздушный поток от которого при попадании в трубопровод создает условия для формирования вибрационных воздействий на его участках, и фиксируется время начала испытаний. Параметры вибрации контролируются виброметром ВК-5М на поверхностях фланцев и головках болтов и шпилек в верхнем, среднем и нижнем положениях.

3. После накопления фиксированного количества циклов вибрации, которое подбирается опытным путем, выполняются замеры максимального момента затяжки при страгивании каждого из 12 резьбовых соединений фланцев с фиксацией полученных значений.

4. Перед началом следующего цикла испытаний резьбовые соединения затягиваются с моментом, соответствующим измеренному максимальному моменту на предыдущем этапе.

5. После окончания серии испытаний определяется скорость снижения момента затяжки на каждом этапе испытаний по формуле:

$$v_M = \frac{M_{\text{нач}} - M_i}{N_{\text{цикл}}} \quad (2.3)$$

где  $v_M$  – скорость снижения момента затяжки, Н·м/цикл;



$M_{нач}$  – исходный момент затяжки,  $H \cdot м$ ;

$M_i$  – измеренный момент затяжки при определенном количестве циклов испытаний,  $H \cdot м$ ;

$N_{цикл}$  – количество циклов испытаний, млн. циклов.

## 2.5 Выводы по второй главе

1. Для исследований выбраны типовые неметаллические материалы, применяемые в качестве уплотнений во фланцевых соединениях: паронит, фторопласт, ТРГ и один из возможных перспективных материалов – полиуретан. В качестве материала фланца выбрана сталь 20.

2. Испытания механических свойств уплотнительных материалов показали, что по уровню твердости их можно разделить на материалы с низкой твердостью – ТРГ и полиуретан (25-27 по Шору D), и материалы с высокой твердостью – паронит и фторопласт (60-65 по Шору D). Максимальный уровень прочности и пластичности имеет фторопласт, значительно превосходя по этим показателям остальные материалы. Сжимаемость уплотнительных материалов коррелируется с твердостью. По показателю восстанавливаемости наихудшие значения имеет ТРГ, промежуточные, близкие по значению – паронит и фторопласт, а наилучшие – полиуретан, который, при этом, характеризуется минимальным уровнем прочности, что определяет его ограничение по предельной величине контактного давления.

3. Для моделирования контакта уплотнительных поверхностей разного материального исполнения и оценки их поведения при трении покоя и трении скольжения выбрана методика определения статического и динамического коэффициентов трения МТ-085 по стандарту ISO 8295–2004 [84].

4. Для определения показателей изнашивания при многоцикловом нагружении использована методика и оборудование для испытаний на фреттинг-изнашивание по ГОСТ 23.211–80 [85] с расширением диапазона относительной амплитуды перемещения при вибрации.

5. Для натурных испытаний изготовлен стенд ТПО с фланцевыми соединениями, а также разработана методика для оценки изменения момента затяжки фланцевого соединения, работающего в условиях повышенных вибраций.

6. Предложенные методики испытаний позволяют провести экспериментальную оценку параметров трения согласно поставленным задачам.

## ГЛАВА 3. РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 3.1 Моделирование условий неподвижного контакта уплотнительного материала со стальной поверхностью фланца

Параметром, полностью предотвращающим зарождение фреттинга на уплотнительных поверхностях фланцевого соединения на первом этапе, является сила трения покоя. Ее величина зависит от двух факторов [91, 92]:

- степени деформирования поверхностных слоев менее жесткого материала уплотнения от внедрения более жестких микронеровностей ответной стальной поверхности фланца;
- молекулярного (адгезионного) взаимодействия контактирующих поверхностей сопряженных тел [93-96].

Анализ существующих теорий, описывающих процесс фреттинга [36-71], показал, что одним из основных параметров, влияющих на его развитие, является контактное давление. Во фланцевых соединениях контактное давление зависит от усилия прижатия уплотнения к поверхности фланца. Повышение контактного давления должно приводить к сохранению неподвижности контакта и, тем самым, предотвращать или затормаживать переход к процессу возвратно-поступательного микроперемещения. Предотвращение процесса зарождения фреттинга определяется не только изменением контактного давления, но и механическими свойствами применяемого материала уплотнения, а также микрогеометрией уплотнительных поверхностей фланцев.

Особенность изнашивания фланцевых соединений заключается в сопряжении деталей из материалов с разными показателями механических свойств (сталь–уплотнительный материал). В таком сопряжении при регламентированном давлении наблюдается максимальный контакт двух тел с заполнением впадин шероховатости поверхности фланца материалом уплотнения. Таким образом, фактическая площадь контакта фланца с уплотнением превышает его номинальную площадь. Этот факт

принципиально отличает пару трения металл–неметалл от пары трения металл–металл и определяет существенный вклад адгезионной составляющей в величину силы трения покоя.

Из обобщенного закона трения следует, что увеличение фактической площади контакта при сохранении нормального давления на том же уровне приводит к увеличению силы трения покоя [94].

Для моделирования контакта фланец–уплотнение в условиях трения покоя использована схема внедрения стальной шероховатой поверхности в упругое полупространство уплотнительного материала [97, 98] (рисунок 3.1).

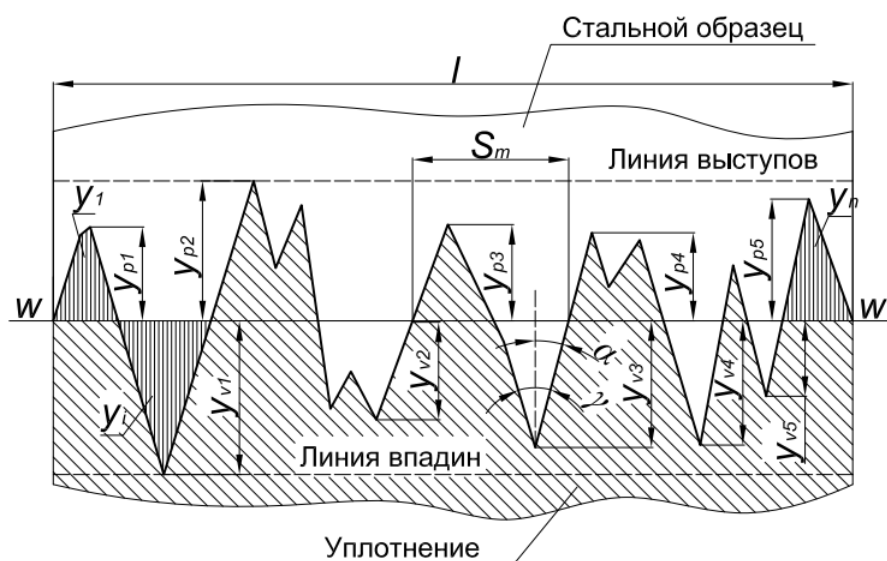


Рисунок 3.1 – Схема внедрения стальной поверхности в материал уплотнения:  $l$  – базовая длина;  $w$  – средняя линия профиля;  $S_m$  – средний шаг неровностей профиля;  $y_i$  – отклонение профиля от средней линии;  $y_{pi}$  – высота  $i$ -го наибольшего выступа профиля;  $y_{vi}$  – высота  $i$ -й наибольшей впадины профиля  $\gamma$  – угол при вершине выступа;  $\alpha$  – половина угла при вершине выступа

Фактическая площадь контакта при таком внедрении будет определяться параметрами шероховатости стальной поверхности, характеризующейся величинами среднеарифметического отклонения профиля  $R_a$ , наибольшей высоты профиля  $R_z$ , и средним шагом неровностей профиля  $S_m$ .

Для моделирования условий формирования неподвижного контакта при внедрении шероховатой поверхности фланца в материал уплотнения в качестве базовой характеристики высоты выступов шероховатости выбран параметр  $R_a$ . При необходимости параметр  $R_a$  может быть пересчитан в параметр  $R_z$  по следующему соотношению  $R_a \approx 0,2 \cdot R_z$  при  $R_z < 8$  мкм,  $R_a \approx 0,25 \cdot R_z$  при  $R_z \geq 8$  мкм [99]. Параметр  $S_m$ , определяемый как среднее значение шага неровностей профиля в пределах базовой длины  $l$ , характеризует средний угол при вершине выступов шероховатости  $\gamma = 2 \cdot \alpha$  ( $\alpha$  – половина угла при вершине выступов шероховатости).

Внедрение единичного выступа шероховатости стальной поверхности фланца в уплотнение представлено схемой вдавливания жесткого конуса в упругое полупространство уплотнительного материала [97, 98] (рисунок 3.2).

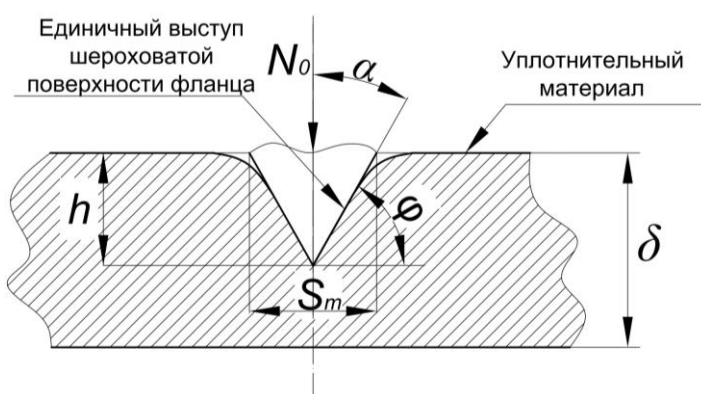


Рисунок 3.2 – Схема внедрения единичного выступа шероховатости стальной поверхности фланца в упругое полупространство уплотнительного материала:  $N_0$  – усилие прижатия, действующее на единичный выступ;  $h$  – глубина неполного внедрения выступа;  $S_m$  – средний шаг неровностей профиля;  $\delta$  – толщина уплотнительного материала;  $\alpha$  – половина угла при вершине выступа;  $\varphi$  – угол наклона выступа

При внедрении единичного выступа образуется поверхность контакта, площадь которой, в соответствии с рисунком 3.2, зависит от глубины внедрения и угла при вершине, определяемого средним шагом неровностей профиля и параметром шероховатости  $R_a$ :

– неполное внедрение (определяется глубиной неполного внедрения выступа шероховатости  $h$ ):

$$S_{\phi \text{ неполн}} = \pi \cdot h \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \frac{h}{\cos \alpha} = \pi \cdot \frac{h^2 \cdot \tan \alpha}{\cos \alpha} \quad (3.1)$$

– полное внедрение (глубина внедрения соответствует удвоенному значению параметра шероховатости  $R_a$ )

$$S_{\phi \text{ полн}} = \pi \cdot \frac{S_m}{2} \cdot \frac{2 \cdot R_a}{\cos \alpha} = \pi \cdot \frac{S_m \cdot R_a}{\cos \alpha} \quad (3.2)$$

где  $S_{\phi \text{ неполн}}$  и  $S_{\phi \text{ полн}}$  – фактическая площадь контакта единичного выступа шероховатости поверхности фланца с уплотнительным материалом при неполном и полном внедрении соответственно,  $\text{мм}^2$ .

$$\alpha = \operatorname{arctg} \left( \frac{S_m}{4 \cdot R_a} \right) \quad (3.3)$$

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 (рисунок 3.3).



Рисунок 3.3 – Чертеж индентора для дюрометра типа D

Твердость, определенная по Шору (D) и приложенное при ее измерении усилие  $F_{HD}$ , в соответствии с ГОСТ 24621–2015 (ISO 868:2003) [80], связаны выражением:

$$F_{HD} = 0,445 \cdot H_D \quad (3.4)$$

где  $H_D$  – твердость, измеренная дюрометром типа D.

Учитывая, что индентор представляет собой шток с конусным окончанием фиксированного диаметра  $D$  и углом при основании  $30^\circ$  (рисунок 3.3), площадь поверхности отпечатка  $S_{HD}$ , на которую приходится приложенная нагрузка, определяется следующим образом:

$$S_{HD} = \pi \cdot \frac{D}{2} \cdot l \quad (3.5)$$

где  $l$  – длина образующей конуса, мм, рассчитываемая по формуле:

$$l = \frac{D}{2 \cdot \sin 15^\circ} \quad (3.6)$$

Таким образом, площадь поверхности отпечатка:

$$S_{HD} = \pi \cdot \frac{D^2}{4 \cdot \sin 15^\circ} = 4,74 \text{ мм}^2 \quad (3.7)$$

Используя значение твердости уплотнительного материала по Шору (D) и полученное значение площади отпечатка (формула 3.7) можно выразить условную характеристику твердости уплотнительного материала  $Hd$ , представляющую собой отношение приложенного усилия к площади поверхности полученного отпечатка:

$$Hd = \frac{F_{HD}}{S_{HD}} = 0,0939 \cdot H_D \quad (3.8)$$

При замере твердости методом Шора (D) внедрение индентора происходит на глубину 2,5 мм. Отношение этой величины к глубине полного внедрения выступа шероховатости ( $2 \cdot R_a$ ) позволяет определить усилие прижатия  $N_o$ , действующее на единичный выступ:

$$\frac{F_{HD}/S_{HD}}{N_o/S_\phi} = \frac{2,5}{2 \cdot R_a} \quad (3.9)$$

где  $S_\phi$  – фактическая площадь контакта единичного выступа шероховатости поверхности фланца с уплотнением,  $мм^2$  (определяется в соответствии с уравнениями (3.1) и (3.2)).

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

$$N_0 = \frac{N}{n} \quad (3.10)$$

где  $N$  – усилие прижатия, действующее на площадь шероховатой поверхности,  $H$ .

Упрощенно количество выступов шероховатости, находящихся на поверхности площадью  $S$ , можно определить как квадрат со стороной, равной параметру шероховатости  $S_m$ :

$$n = \frac{S}{S_m^2} \quad (3.11)$$

При совмещении выражений (3.1), (3.2), (3.8-3.11) получаем формулу для расчета минимального контактного давления, обеспечивающего полное внедрение выступов шероховатости (3.12) и формулу для расчета глубины неполного внедрения (3.13):

$$p_{вн} = 0,236 \cdot \frac{H_D \cdot R_a^2}{S_m \cdot \cos \alpha} \quad (3.12)$$

где  $p_{вн}$  – минимальное контактное давление, обеспечивающее полное внедрение выступов шероховатости,  $МПа$ ;

$$h = \sqrt[3]{8,479 \cdot \frac{p \cdot S_m^2 \cdot \cos \alpha}{H_D \cdot \operatorname{tg} \alpha}} \quad (3.13)$$

Напряжения сжатия  $\sigma_{сж}$ , формирующиеся в уплотнении при внедрении единичного выступа шероховатости, рассчитываются следующим образом:

$$\sigma_{сж} = \frac{N_0}{S_\phi} \quad (3.14)$$



Подставляя выражения (3.1), (3.2), (3.10) и (3.11) в формулу (3.14), получим:

– для неполного внедрения:

$$\sigma_{\text{сж неполн}} = \frac{N \cdot S_m^2}{S} \cdot \frac{\cos \alpha}{\pi \cdot h^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha} = p \cdot \frac{S_m^2 \cdot \cos \alpha}{\pi \cdot h^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha} \quad (3.15)$$

– для полного внедрения:

$$\sigma_{\text{сж полн}} = \frac{N \cdot S_m^2}{S} \cdot \frac{\cos \alpha}{\pi \cdot S_m \cdot R_a} = p \cdot \frac{4 \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \cos \alpha}{\pi} = p \cdot \frac{4 \cdot \sin \alpha}{\pi} \quad (3.16)$$

где  $\sigma_{\text{сж неполн}}$  и  $\sigma_{\text{сж полн}}$  – напряжения сжатия в зоне контакта двух поверхностей при полном и неполном внедрении выступов шероховатости, соответственно, *МПа*.

При известной величине коэффициента трения покоя  $f_n$  тангенциальные напряжения  $\tau$  в зоне контакта определяются как:

$$\tau = \sigma_{\text{сж}} \cdot f_n \quad (3.17)$$

Тангенциальные напряжения, возникающие при контакте выступов шероховатости поверхности фланца с уплотнением, характеризуют адгезионную составляющую силы трения покоя. Согласно работам И.В. Крагельского [95], Б.В. Дерягина [100], Н.М. Михина [101] и др. [102-104], зависимость адгезионной составляющей удельной силы трения описывается в виде двучленного закона:

$$\tau = \tau_0 + \beta \cdot \frac{N}{S} \quad (3.18)$$

где  $\tau_0$  и  $\beta$  – молекулярные константы трения, определяемые физико-химическим состоянием поверхностей контактирующих тел.

При замене усилия прижатия и площади контакта на контактное давление, а также учитывая формулы (3.15-3.18), выражение для определения коэффициента трения покоя, возникающего при неполном внедрении, приобретает следующий вид:

$$f_{\text{п неполн}} = \frac{(\tau_0 + \beta \cdot p)}{p} \cdot \frac{\pi \cdot h^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha}{S_m^2 \cdot \cos \alpha} = \frac{(\tau_0 + \beta \cdot p)}{p} \cdot \frac{S_{\Phi}}{S_m^2} \quad (3.19)$$

При росте контактного давления до значений, обеспечивающих полное внедрение выступов микронеровностей, коэффициент трения покоя под действием постоянного контактного давления определяется углом при вершине выступов шероховатости, который меняется в зависимости от параметров шероховатости  $R_a$  и  $S_m$ :

$$f_{п\text{ полн}} = \frac{(\tau_0 + \beta \cdot p)}{p} \cdot \frac{\pi}{4 \cdot \sin \alpha} \quad (3.20)$$

Таким образом, на основании моделирования условий формирования трения покоя при контакте шероховатой поверхности фланца и уплотнения можно сделать следующие выводы:

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

2. При неполном внедрении наибольшее влияние на рост коэффициента трения покоя оказывает увеличение площади контакта микронеровностей с уплотнительным материалом, а рост параметра шероховатости  $S_m$  снижает данный показатель.

### **3.2 Результаты экспериментальных исследований по определению коэффициента трения покоя при разных параметрах контакта**

Целью экспериментальных исследований являлось определение влияния параметров шероховатости стальной поверхности на изменение коэффициента трения покоя при контакте с различными уплотнительными материалами. Для формирования постепенного внедрения выступов шероховатости стальной поверхности в уплотнительный материал использовался диапазон контактных давлений от 0,0005 МПа до 0,0121 МПа. Полное внедрение микронеровностей стального образца в исследуемые уплотнительные материалы достигалось при контактных давлениях, рассчитанных по формуле (3.12) и указанных в таблице 3.1 [105].

Таблица 3.1 – Значения контактного давления для полного внедрения выступов микронеровностей в зависимости от параметров шероховатости

Вид механической обработки	Параметры шероховатости			Контактное давление для полного внедрения, МПа			
	$R_a$ , мкм	$S_m$ , мкм	$\alpha$ , °	полиуретан (25 НВ)	ТРГ (27 НВ)	фторопласт (60 НВ)	паронит (65 НВ)
Шлифование	0,394	351,5	89,7	0,0006	0,0006	0,0014	0,0015
Пескоструйная обработка в течение 1 мин	3,41	267,41	87,1	0,0050	0,0054	0,0121	0,0131
Пескоструйная обработка в течение 3 мин	5,23	220,568	84,6	0,0077	0,0084	0,0186	0,0201
Грубая обработка напильником	6,621	611,002	87,5	0,0098	0,0106	0,0234	0,0254

Полученные экспериментальные значения коэффициентов трения покоя, формирующиеся в выбранных парах трения с разной шероховатостью стальной поверхности представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Коэффициенты трения покоя в зависимости от параметра шероховатости  $R_a$  и контактного давления [105]

Контактное давление, $10^{-3}$ МПа	Коэффициент трения покоя ( $f_n$ ) в зависимости от параметра шероховатости ( $R_a$ ) стальной поверхности, мкм							
	0,394		3,410		5,230		6,621	
	Ср. знач.	Станд. отклон.	Ср. знач.	Станд. отклон.	Ср. знач.	Станд. отклон.	Ср. знач.	Станд. отклон.
полиуретан – сталь 20 (25 НВ)								
0,5	0,860	0,113	0,677	0,028	0,597	0,073	0,620	0,028
1,2	0,775	0,062	0,687	0,014	0,690	0,018	0,633	0,001
2,3	1,071	0,024	0,677	0,065	0,679	0,044	0,573	0,025
4,9	1,191	0,062	0,661	0,041	0,650	0,034	0,537	0,031
7,0	1,129	0,029	0,599	0,063	0,592	0,009	0,467	0,026
12,1	1,300	0,067	0,597	0,043	0,626	0,020	0,527	0,007
ТРГ – сталь 20 (27 НВ)								
0,5	0,202	0,020	0,327	0,055	0,302	0,039	0,107	0,038
1,2	0,189	0,011	0,298	0,018	0,243	0,013	0,156	0,039
2,3	0,193	0,024	0,302	0,007	0,244	0,015	0,176	0,013
4,9	0,213	0,066	0,275	0,047	0,259	0,014	0,188	0,008

Продолжение таблицы 3.2

Контактное давление, $10^{-3}$ МПа	Коэффициент трения покоя ( $f_n$ ) в зависимости от параметра шероховатости ( $R_a$ ) стальной поверхности, мкм							
	0,394		3,410		5,230		6,621	
	Ср. знач.	Станд. отклон.	Ср. знач.	Станд. отклон.	Ср. знач.	Станд. отклон.	Ср. знач.	Станд. отклон.
ТРГ – сталь 20 ( $27 H_D$ )								
7,0	0,237	0,023	0,266	0,019	0,211	0,017	0,194	0,003
12,1	0,256	0,034	0,239	0,017	0,229	0,062	0,201	0,017
фторопласт – сталь 20 ( $60 H_D$ )								
0,5	0,158	0,020	0,375	0,101	0,268	0,046	0,055	0,028
1,2	0,120	0,019	0,346	0,030	0,249	0,013	0,157	0,010
2,3	0,128	0,019	0,254	0,020	0,274	0,050	0,140	0,048
4,9	0,143	0,022	0,273	0,022	0,333	0,020	0,176	0,041
7,0	0,122	0,027	0,226	0,073	0,274	0,011	0,182	0,021
12,1	0,157	0,009	0,271	0,019	0,263	0,026	0,152	0,012
паронит – сталь 20 ( $65 H_D$ )								
0,5	0,248	0,013	0,395	0,077	0,345	0,018	0,318	0,086
1,2	0,274	0,003	0,398	0,026	0,401	0,007	0,346	0,091
2,3	0,263	0,006	0,433	0,021	0,386	0,021	0,302	0,034
4,9	0,313	0,017	0,401	0,008	0,422	0,007	0,338	0,036
7,0	0,255	0,013	0,322	0,027	0,365	0,006	0,325	0,040
12,1	0,284	0,019	0,437	0,038	0,360	0,018	0,343	0,041

По полученным данным с использованием уравнений (3.13), (3.15-3.17) определена глубина внедрения микронеровностей стального образца в уплотнительный материал, рассчитаны сжимающие и тангенциальные напряжения при разной величине контактного давления (таблица 3.3).

Таблица 3.3 – Расчетные значения глубины внедрения и тангенциальных напряжений для исследованных сопряжений

Контактное давление, $10^{-3}$ МПа	Значения глубины внедрения ( $h$ ), и тангенциальных напряжений ( $\tau$ ) при трении покоя для сопряжений с разной шероховатостью стальной поверхности ( $R_a$ ), мкм							
	0,394		3,410		5,230		6,621	
	h, мкм	$\tau, 10^{-3}$ МПа	h, мкм	$\tau, 10^{-3}$ МПа	h, мкм	$\tau, 10^{-3}$ МПа	h, мкм	$\tau, 10^{-3}$ МПа
полиуретан – сталь 20 ( $25 H_D$ )								
0,5	0,731	0,59	3,081	1,96	4,093	2,29	4,795	2,79
1,2	0,788	1,15	4,181	2,70	5,555	3,60	6,508	3,87
2,3	0,788	3,17	5,270	3,35	7,000	4,47	8,202	4,42
4,9	0,788	7,39	6,747	4,19	8,963	5,47	10,502	5,30

Продолжение таблицы 3.3

Контактное давление, $10^{-3}$ МПа	Значения глубины внедрения ( $h$ ), и тангенциальных напряжений ( $\tau$ ) при трении покоя для сопряжений с разной шероховатостью стальной поверхности ( $R_a$ ), мкм							
	0,394		3,410		5,230		6,621	
	$h$ , мкм	$\tau$ , $10^{-3}$ МПа	$h$ , мкм	$\tau$ , $10^{-3}$ МПа	$h$ , мкм	$\tau$ , $10^{-3}$ МПа	$h$ , мкм	$\tau$ , $10^{-3}$ МПа
полиуретан – сталь 20 ( $25 H_D$ )								
7,0	0,788	10,01	6,820	5,30	10,096	5,61	11,828	5,19
12,1	0,788	19,99	6,820	9,16	10,460	9,58	13,242	8,10
ТРГ – сталь 20 ( $27 H_D$ )								
0,5	0,713	0,15	3,003	0,99	3,989	1,22	4,674	0,51
1,2	0,788	0,28	4,075	1,23	5,414	1,34	6,343	1,00
2,3	0,788	0,57	5,136	1,57	6,823	1,69	7,995	1,42
4,9	0,788	1,32	6,576	1,83	8,736	2,29	10,236	1,95
7,0	0,788	2,10	6,820	2,36	9,840	2,11	11,529	2,27
12,1	0,788	3,94	6,820	3,67	10,460	3,51	13,242	3,09
фторопласт – сталь 20 ( $60 H_D$ )								
0,5	0,546	0,19	2,301	1,94	3,057	1,85	3,581	0,44
1,2	0,741	0,20	3,123	2,43	4,149	2,33	4,861	1,72
2,3	0,788	0,38	3,936	2,26	5,229	3,23	6,126	1,93
4,9	0,788	0,89	5,039	3,10	6,695	5,02	7,844	3,12
7,0	0,788	1,08	5,676	2,90	7,540	4,66	8,835	3,62
12,1	0,788	2,41	6,818	4,16	9,058	5,36	10,612	3,64
паронит – сталь 20 ( $65 H_D$ )								
0,5	0,532	0,32	2,240	2,16	2,976	2,51	3,487	2,71
1,2	0,722	0,48	3,041	2,95	4,039	3,96	4,733	4,00
2,3	0,788	0,78	3,832	3,99	5,091	4,80	5,965	4,40
4,9	0,788	1,94	4,907	4,80	6,518	6,72	7,637	6,30
7,0	0,788	2,26	5,526	4,34	7,342	6,54	8,602	6,82
12,1	0,788	4,37	6,638	7,08	8,819	7,74	10,333	8,65

Примечание: серым цветом выделены условия испытаний, при которых была достигнута глубина полного внедрения выступов шероховатостей в уплотнительный материал

Анализ полученных данных показал, что при параметре шероховатости стальной поверхности  $R_a=0,394$  мкм практически во всем использованном диапазоне контактных давлений значения коэффициента трения покоя получены преимущественно в условиях полного внедрения выступов шероховатости в исследованные уплотнительные материалы. При значениях

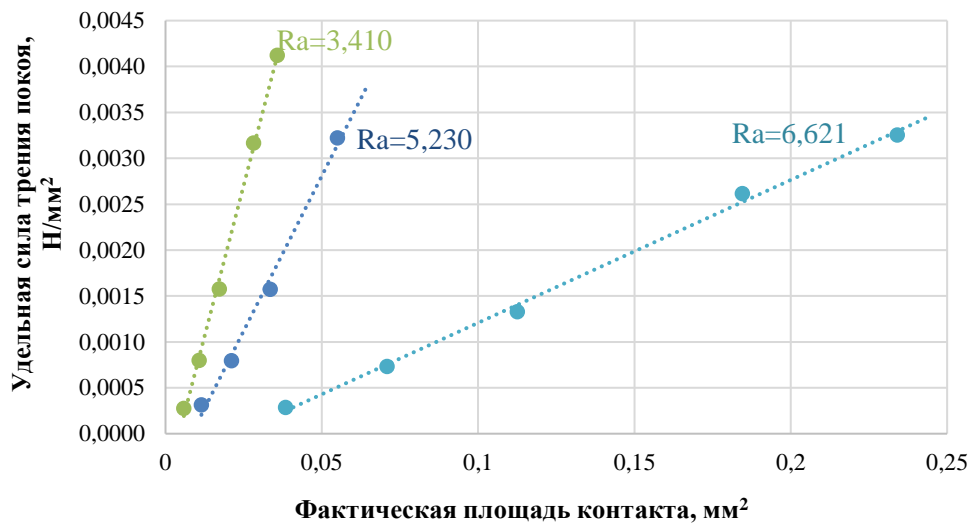
$R_a=3,41$  мкм и выше коэффициент трения покоя получен в условиях частичного внедрения выступов шероховатости в уплотнительные материалы.

Для оценки взаимосвязи между фактической площадью контактной поверхности выступов шероховатости и полученными значениями коэффициента трения покоя выражение (3.19) преобразовано в уравнение (3.21).

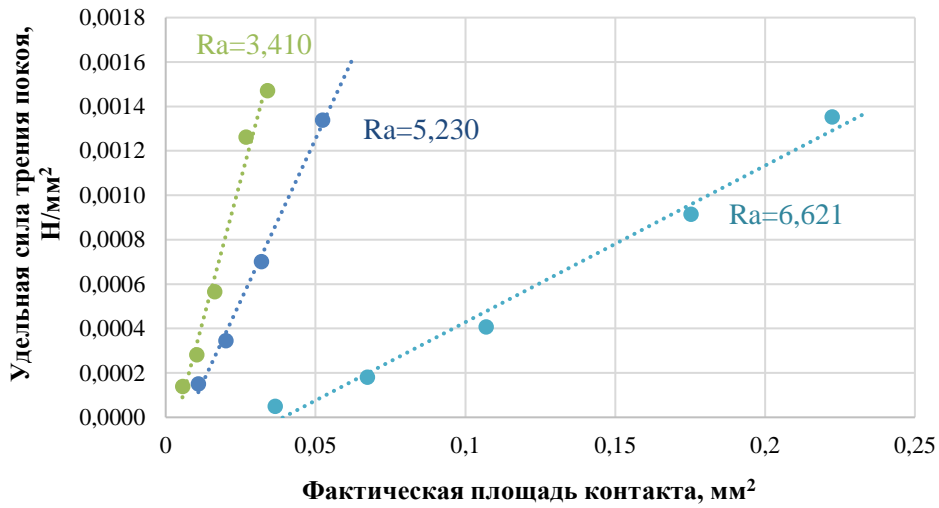
$$f_{\text{п}} \cdot \frac{N}{S} = f_{\text{п}} \cdot p = \frac{1}{S_m^2} \cdot (\tau_0 + \beta \cdot p) \cdot S_{\phi} \quad (3.21)$$

где  $f_{\text{п}} \cdot \frac{N}{S}$  – удельная сила трения покоя,  $H/\text{мм}^2$ .

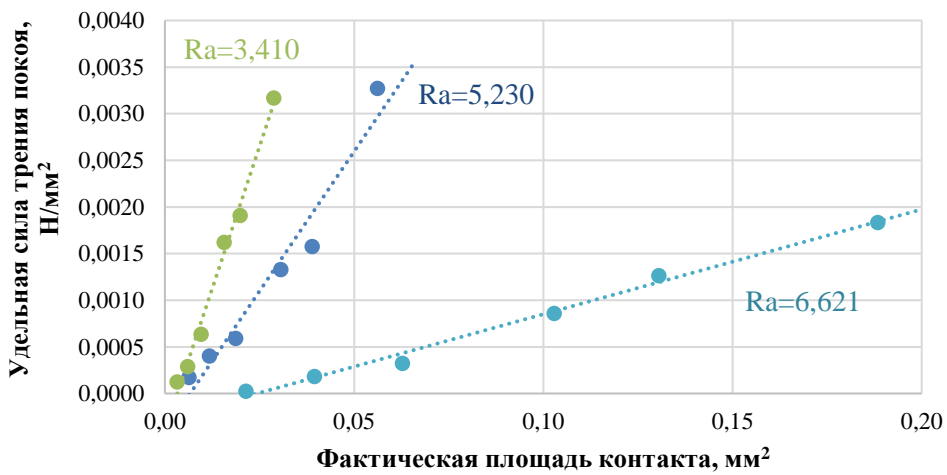
С использованием уравнения (3.21) выполнена обработка полученных экспериментальных данных и построены графически зависимости  $f_n \cdot p - S_{\phi}$  при разной величине параметра шероховатости  $R_a$  стальной поверхности (рисунок 3.4).



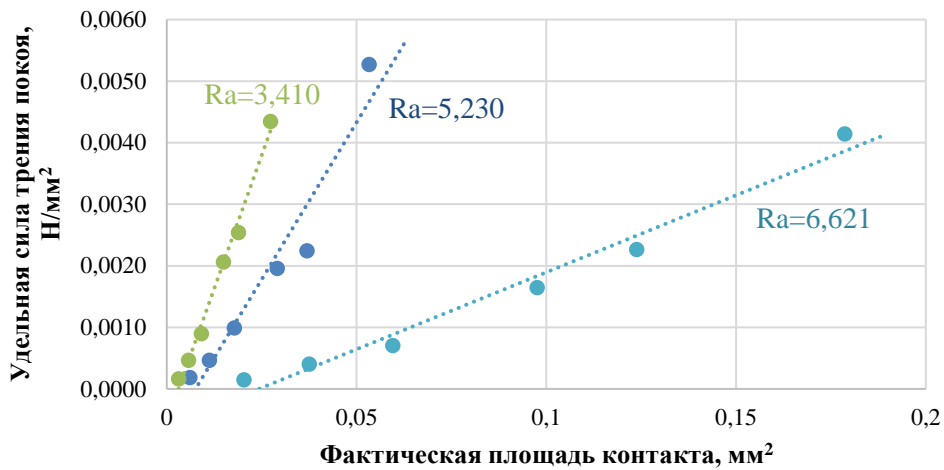
а



б



в



г

Рисунок 3.4 – Изменения удельной силы трения покоя в зависимости от фактической площади контакта выступов шероховатости стальной поверхности с уплотнительным материалом при неполном внедрении 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  $H_D$ )

Полученные графики подтверждают наличие линейной зависимости между удельной силой трения покоя, формируемой в зоне контакта исследованных сопряжений, и фактической площадью контакта выступов шероховатости стальной поверхности с уплотнительным материалом, определяемой глубиной его внедрения (формула (3.1)).

По экспериментальным значениям коэффициента трения покоя и рассчитанным в таблице 3.3 значениям тангенциального напряжения для исследованных сопряжений с разной шероховатостью стальной поверхности построены графики, пример которых представлен на рисунке 3.5, и получены уравнения тренда, представленные в таблице 3.4. Коэффициенты в уравнениях тренда рассмотрены, в соответствии с формулой (3.18), как молекулярные константы трения.

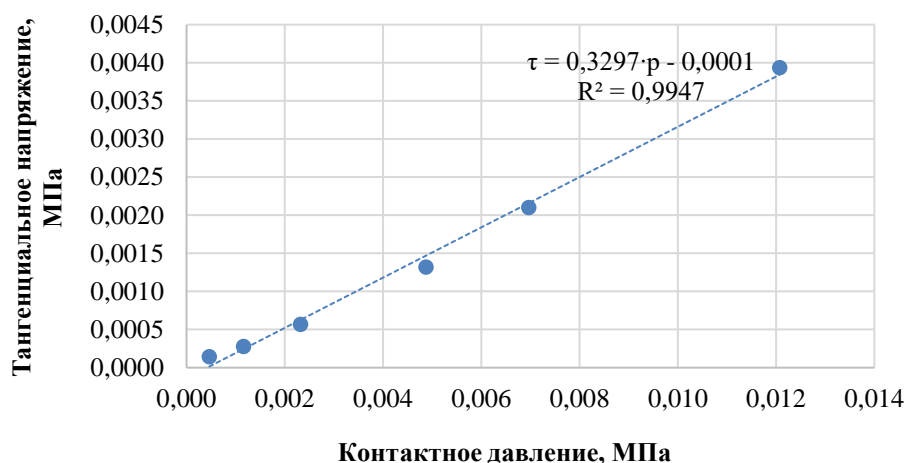


Рисунок 3.5 – Изменение тангенциальных напряжений для пары трения ТРГ-сталь 20 в зависимости от величины контактного давления при  $R_a=0,394$  мкм

Таблица 3.4 – Уравнения для определения тангенциальных напряжений и молекулярные константы трения в зависимости от шероховатости стальной поверхности

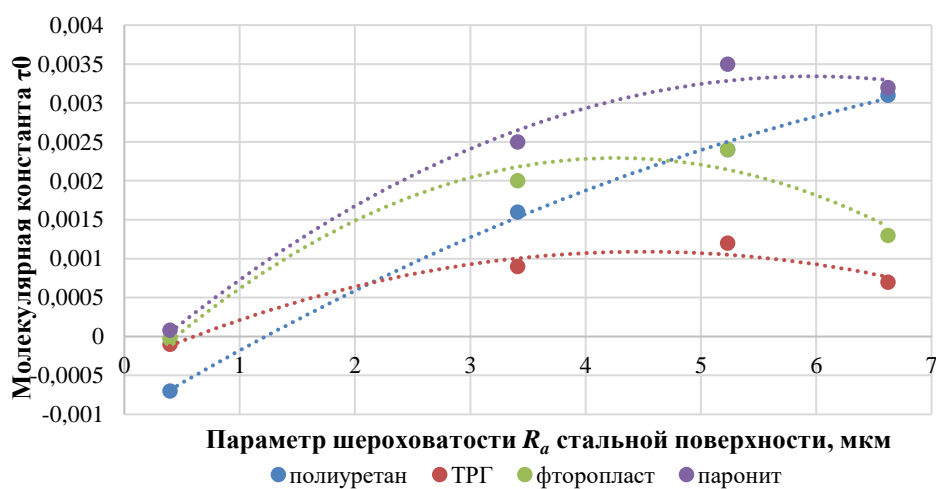
Параметр шероховатости ( $R_a$ ) стальной поверхности, мкм	Уравнение	Коэффициент достоверности аппроксимации ( $R^2$ )	Значения молекулярных констант трения	
			$\tau_0$	$\beta$
полиуретан-сталь 20 (25 $H_D$ )				
0,394	$\tau = 1,67 \cdot p - 7 \cdot 10^{-4}$	0,995	$-7 \cdot 10^{-4}$	1,67
3,410	$\tau = 0,5942 \cdot p + 16 \cdot 10^{-4}$	0,981	$16 \cdot 10^{-4}$	0,5942

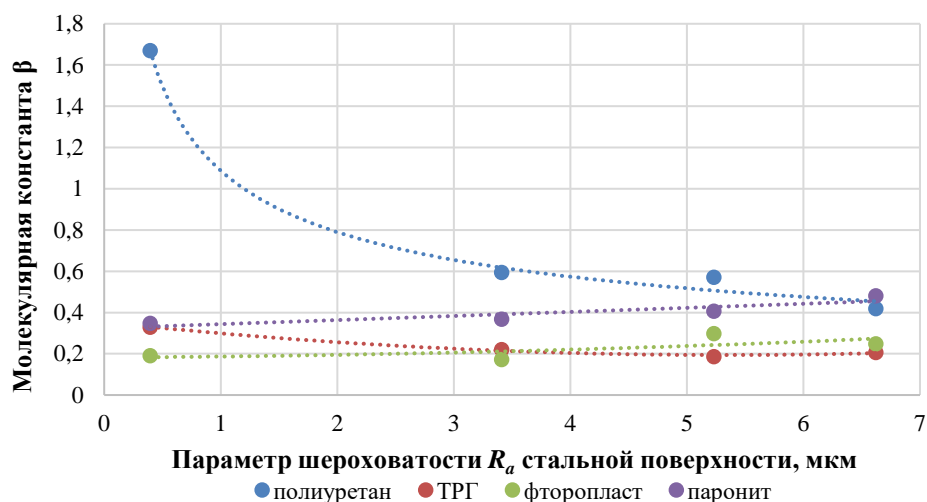


Продолжение таблицы 3.4

Параметр шероховатости ( $R_a$ ) стальной поверхности, мкм	Уравнение	Коэффициент достоверности аппроксимации ( $R^2$ )	Значения молекулярных констант трения	
			$\tau_0$	$\beta$
полиуретан-сталь 20 ( $25 H_D$ )				
5,230	$\tau = 0,5722 \cdot p + 24 \cdot 10^{-4}$	0,961	$24 \cdot 10^{-4}$	0,5722
6,621	$\tau = 0,4191 \cdot p + 31 \cdot 10^{-4}$	0,971	$31 \cdot 10^{-4}$	0,4191
ТРГ-сталь 20 ( $27 H_D$ )				
0,394	$\tau = 0,3297 \cdot p - 1 \cdot 10^{-4}$	0,995	$-1 \cdot 10^{-4}$	0,3297
3,410	$\tau = 0,2204 \cdot p + 9 \cdot 10^{-4}$	0,986	$9 \cdot 10^{-4}$	0,2204
5,230	$\tau = 0,1862 \cdot p + 12 \cdot 10^{-4}$	0,945	$12 \cdot 10^{-4}$	0,1862
6,621	$\tau = 0,2066 \cdot p + 7 \cdot 10^{-4}$	0,949	$7 \cdot 10^{-4}$	0,2066
фторопласт-сталь 20 ( $60 H_D$ )				
0,394	$\tau = 0,191 \cdot p - 0,3 \cdot 10^{-4}$	0,976	$-0,3 \cdot 10^{-4}$	0,191
3,410	$\tau = 0,1729 \cdot p + 20 \cdot 10^{-4}$	0,916	$20 \cdot 10^{-4}$	0,1729
5,230	$\tau = 0,2979 \cdot p + 24 \cdot 10^{-4}$	0,775	$24 \cdot 10^{-4}$	0,2979
6,621	$\tau = 0,249 \cdot p + 13 \cdot 10^{-4}$	0,738	$13 \cdot 10^{-4}$	0,249
паронит-сталь 20 ( $65 H_D$ )				
0,394	$\tau = 0,3484 \cdot p + 0,8 \cdot 10^{-4}$	0,990	$0,8 \cdot 10^{-4}$	0,3484
3,410	$\tau = 0,368 \cdot p + 25 \cdot 10^{-4}$	0,898	$25 \cdot 10^{-4}$	0,368
5,230	$\tau = 0,4065 \cdot p + 35 \cdot 10^{-4}$	0,817	$35 \cdot 10^{-4}$	0,4065
6,621	$\tau = 0,4823 \cdot p + 32 \cdot 10^{-4}$	0,944	$32 \cdot 10^{-4}$	0,4823

Для учета влияния параметров шероховатости на значения тангенциальных напряжений выполнена обработка полученных значений молекулярных констант трения по методике регрессивного анализа. Результаты обработки для исследованных сопряжений представлены на рисунке 3.6 и в таблице 3.5.





б

Рисунок 3.6 – Изменение молекулярных констант трения  $\tau_0$  (а) и  $\beta$  (б) в зависимости от параметра шероховатости  $R_a$  стальной поверхности для исследованных сопряжений

Таблица 3.5 – Уравнения для молекулярных констант трения

Пара трения	Уравнение для молекулярных констант трения $\tau_0, \beta$	Коэффициент достоверности аппроксимации ( $R^2$ )
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	$\tau_0 = -0,0002 \cdot R_a^2 + 0,0013 \cdot R_a - 0,0006;$ $\beta = 0,0016 \cdot R_a^2 + 0,0031 \cdot R_a + 0,1821;$	0,9974 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

Анализ зависимостей, представленных на рисунке 3.6 показал, что максимальная чувствительность к  $R_a$  по обеим константам наблюдается у полиуретана. Для типовых уплотнительных материалов существенное влияние  $R_a$  отмечается только на константу  $\tau_0$ , константа  $\beta$  в зависимости от  $R_a$  меняется в узком диапазоне.

На основании таблицы 3.5 и учитывая выражение 3.20 получены уравнения для расчета коэффициента трения покоя:

### Полиуретан-сталь 20

$$f_{\Pi} = \frac{(-0,00004 \cdot R_a^2 + 0,0009 \cdot R_a - 0,001 + 1,0877 \cdot R_a^{-0,461} \cdot p)}{p} \cdot \frac{\pi}{4 \cdot \sin \alpha} \quad (3.22)$$

### ТРГ-сталь 20

$$f_{\Pi} = \frac{(-0,00007 \cdot R_a^2 + 0,0006 \cdot R_a - 0,0004 + 0,2754 \cdot R_a^{-0,188} \cdot p)}{p} \cdot \frac{\pi}{4 \cdot \sin \alpha} \quad (3.23)$$

### Фторопласт-сталь 20

$$f_{\Pi} = \frac{(-0,0002 \cdot R_a^2 + 0,0013 \cdot R_a - 0,0006 + (0,0016 \cdot R_a^2 + 0,0031 \cdot R_a + 0,1821) \cdot p)}{p} \cdot \frac{\pi}{4 \cdot \sin \alpha} \quad (3.24)$$

### Паронит-сталь 20

$$f_{\Pi} = \frac{(-0,0001 \cdot R_a^2 + 0,0013 \cdot R_a - 0,0004 + (0,0198 \cdot R_a + 0,3239) \cdot p)}{p} \cdot \frac{\pi}{4 \cdot \sin \alpha} \quad (3.25)$$

## 3.3 Моделирование условий трения скольжения стальной поверхности фланца по материалу уплотнения

Возникновение первичного проскальзывания в зоне контакта фланца с уплотнением формирует возвратно-поступательные микроперемещения, вызывающие первичную упругопластическую деформацию его поверхностных слоев в пределах внедрения выступов шероховатости [106].

Моделирование процесса скольжения шероховатой поверхности фланца по уплотнению осуществлялось с использованием схемы, изображенной на рисунке 3.7.

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

$$p = \frac{N}{a \cdot b} = \frac{N}{S} \quad (3.26)$$

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

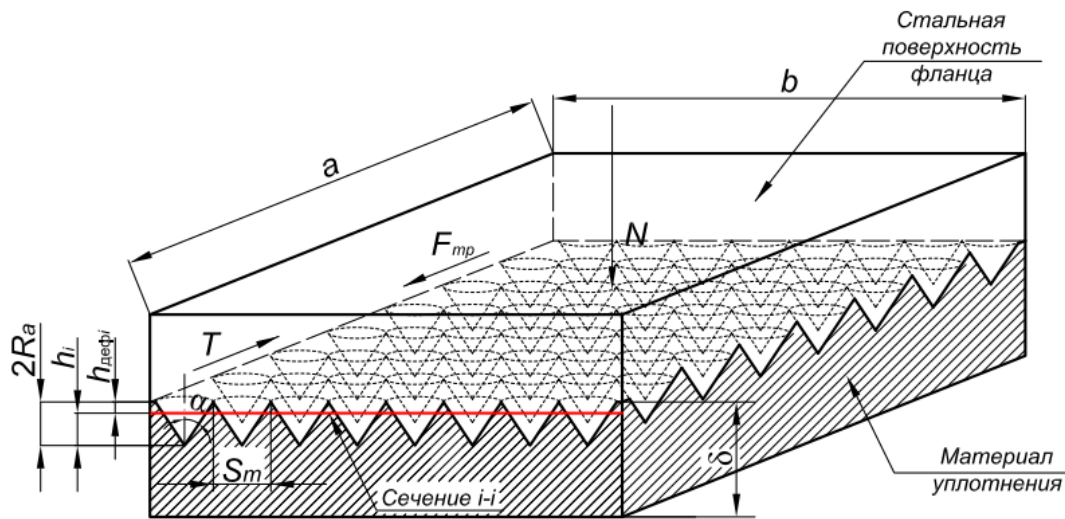


Рисунок 3.7 – Схема скольжения выступов шероховатости стальной поверхности по материалу уплотнения [106]:  $a$  – длина шероховатой стальной поверхности;  $b$  – ширина шероховатой стальной поверхности;  $N$  – усилие прижатия;  $T$  – тангенциальная сила;  $F_{тр}$  – сила трения;  $S_m$  – средний шаг неровностей профиля;  $\delta$  – толщина уплотнительного материала;  $2 \cdot R_a$  – полная глубина внедрения выступов шероховатости стальной поверхности;  $h_i$  – расстояние  $i$ -той плоскости от вершины выступов шероховатости;  $h_{деф}$  – толщина деформированного слоя уплотнения

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

$$S_0 = b \cdot v \cdot t \quad (3.27)$$

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 [106]:

$$n_0 = \frac{4 \cdot S_0}{\pi \cdot S_m^2} = \frac{4 \cdot b \cdot v \cdot t}{\pi \cdot S_m^2} \quad (3.28)$$

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  $t_{уд}$  [106]:

$$t_{уд} = \frac{f_{ск} \cdot N \cdot b \cdot h_{деф\ i}'}{b \cdot \delta} = \frac{f_{ск} \cdot N}{\delta} \quad (3.29)$$

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

На основании уравнения (3.29) получена формула для расчета коэффициента трения скольжения:

$$f_{ск} = \frac{t_{уд} \cdot \delta}{N} \quad (3.30)$$

Под действием удельной тангенциальной силы в сечении  $i-i$  уплотнения формируются удельные касательные напряжения среза  $\tau_{уд\ i}$ , зависящие от площади среза  $S_i$ , занимаемой уплотнительным материалом в данном сечении в единицу времени при относительном движении составляющих пары трения с постоянной скоростью [106]:

$$\tau_{уд\ i} = \frac{f_{ск} \cdot N}{\delta \cdot S_i} \quad (3.31)$$

где:  $S_i$  – площадь среза, занимаемая уплотнительным материалом в сечении  $i-i$  зоны внедрения выступов шероховатости, мм<sup>2</sup>.

Площадь уплотнительного материала в сечении  $i-i$  с учетом конусной формы выступов шероховатости составит:

$$S_i = S_0 - n_0 \cdot \pi \cdot (h_i \cdot \operatorname{tg} \alpha)^2 = S_0 - \frac{S_0 \cdot h_i^2}{4 \cdot R_a^2} \quad (3.32)$$

где:  $h_i$  – расстояние  $i$ -той плоскости от вершины выступов шероховатости, мм:

$$h_i = 2 \cdot R_a - h_{\text{деф}i} \quad (3.33)$$

Площадь  $S_i$ , в которой удельные касательные напряжения среза превысят критические касательные напряжения, является границей, отделяющей зону пластической деформации уплотнительного материала от зоны его упругой деформации.

Согласно [94], критические касательные напряжения  $\tau^*$ , вызывающие срез поверхностного слоя материала уплотнения, выдавленного во впадины шероховатости ответной поверхности, определяются как:

$$\tau^* = 0,5 \cdot \cos(\pi - 2\alpha) \cdot p_{\text{кр}} \quad (3.34)$$

где:  $p_{\text{кр}}$  – критическое давление сжатия материала уплотнения, МПа (соответствует предельно допустимому давлению в таблице 2.1).

Удельные критические касательные напряжения среза  $\tau_i^*$  с учетом толщины уплотнения:

$$\tau_i^* = \frac{0,5 \cdot \cos(\pi - 2\alpha) \cdot p_{\text{кр}}}{\delta} \quad (3.35)$$

Таким образом, если удельные касательные напряжения среза в сечении  $i-i$  станут равными или превысят критическое значение, рассчитанное по формуле (3.35), то возникнет пластическая деформация поверхностного слоя уплотнения.

Для определения толщины слоя с критическими напряжениями из условия  $\tau_{\text{уд}i} = \tau_i^*$  найдена площадь уплотнительного материала в сечении  $i-i$  [106]:

$$\frac{f_{\text{ск}} \cdot N}{\delta \cdot S_i} = \frac{0,5 \cdot \cos(\pi - 2\alpha) \cdot p_{\text{кр}}}{\delta} \quad (3.36)$$

$$S_i = \frac{f_{\text{ск}} \cdot N}{0,5 \cdot p_{\text{кр}} \cdot \cos(\pi - 2\alpha)} \quad (3.37)$$

На основании уравнений (3.28), (3.32) и (3.33) определена толщина единичного деформированного слоя уплотнения ( $h_{деф\ i}$ ):

$$h_{деф\ i} = 2 \cdot R_a \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{f_{ск} \cdot N}{0,5 \cdot S_o \cdot p_{кр} \cdot \cos(\pi - 2\alpha)}}\right) \quad (3.38)$$

Так как величина  $\cos(\pi - 2\alpha)$  мала, выражение (3.38) приведено к следующему виду [106]:

$$h_{деф\ i} = 2 \cdot R_a \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot f_{ск} \cdot N}{S_o \cdot p_{кр}}}\right) \quad (3.39)$$

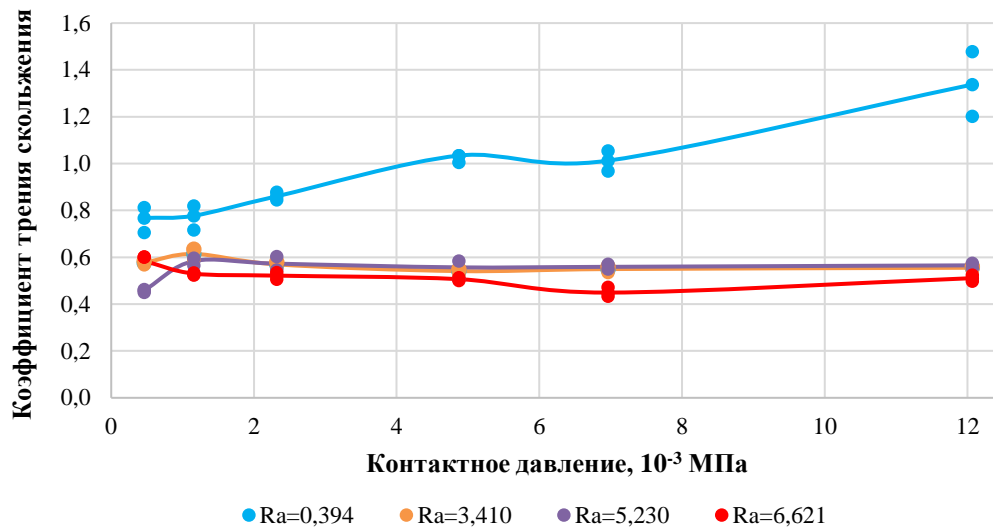
При замене отношения усилия прижатия к единичной площади стального образца на контактное давление, получено выражение, по которому можно определить толщину единичного деформированного слоя, формирующуюся во фланцевых соединениях при регламентированных значениях давления обжатия:

$$h_{деф\ i} = 2 \cdot R_a \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot f_{ск} \cdot p}{p_{кр}}}\right) \quad (3.40)$$

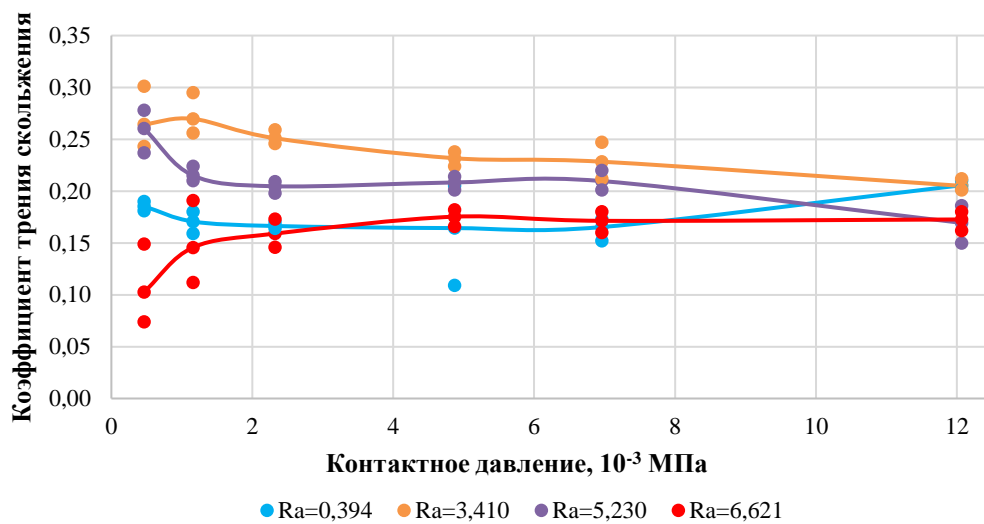
По полученной зависимости видно, что толщина единичного слоя уплотнения, подвергаящаяся пластической деформации, с ростом параметра шероховатости  $R_a$  стальной поверхности увеличивается, а при уменьшении отношения коэффициента трения к критическому контактному давлению  $f_{ск}/p_{кр}$  – уменьшается [106].

### **3.4 Результаты экспериментальных исследований по определению коэффициента трения скольжения при разных параметрах контакта**

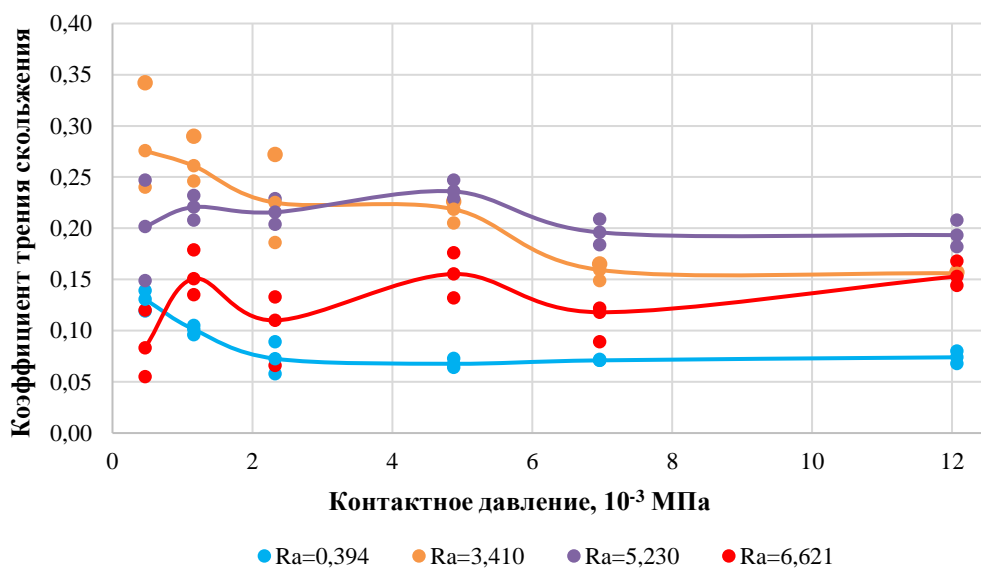
Обобщенные экспериментальные значения коэффициентов трения скольжения для исследованных сопряжений представлены на рисунке 3.8.



а

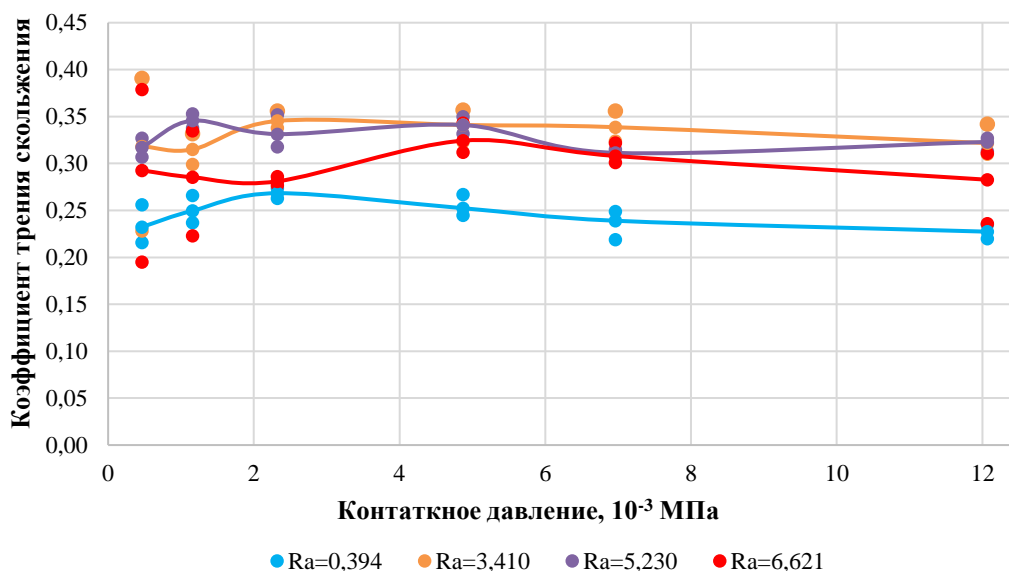


б



в





Г

Рисунок 3.8 – Изменение коэффициента трения скольжения в зависимости от контактного давления и шероховатости стальной поверхности для сопряжений: *a* – 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 полученных данных 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 [107].

В сопряжении с полиуретаном максимальное значение коэффициента трения скольжения наблюдается только при шероховатости  $R_a=0,394$  мкм и наибольшем контактном давлении, в остальных случаях он имеет стабильные значения независимо от шероховатости и усилия прижатия.

Результаты обработки экспериментальных данных по каждой величине шероховатости представлены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Коэффициенты трения скольжения в зависимости от величины шероховатости и контактного давления [106]

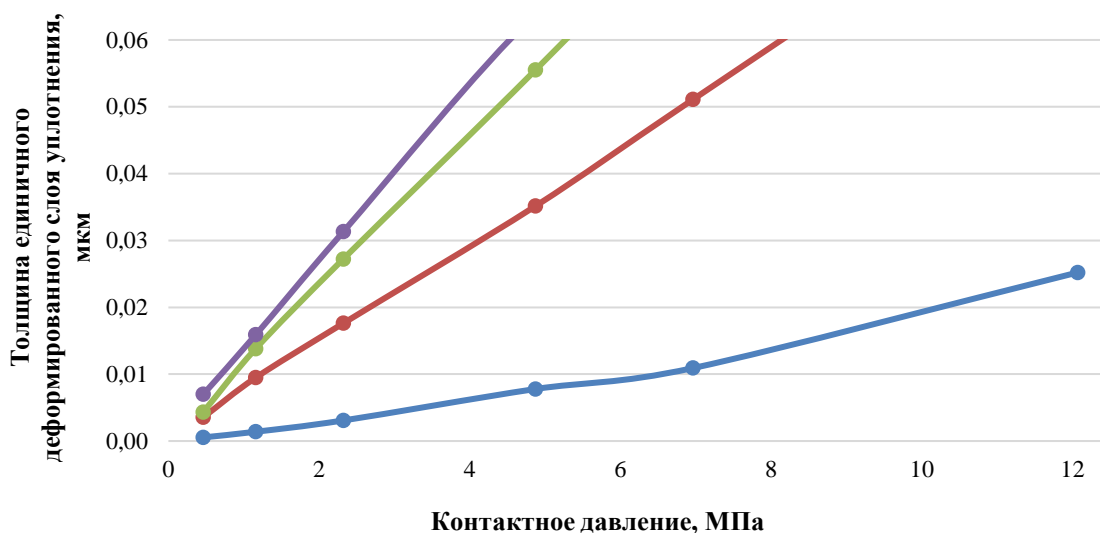
Контактное давление, $10^{-3}$ МПа	Коэффициент трения скольжения ( $f_{ск}$ ) в зависимости от параметра шероховатости ( $R_a$ ) стальной поверхности, мкм							
	0,394		3,410		5,230		6,621	
	Ср. знач.	Станд. отклон.	Ср. знач.	Станд. отклон.	Ср. знач.	Станд. отклон.	Ср. знач.	Станд. отклон.
полиуретан – сталь 20 ( $25 H_D$ )								
0,5	0,762	0,054	0,577	0,009	0,459	0,007	0,584	0,030
1,2	0,778	0,054	0,614	0,022	0,584	0,016	0,530	0,006
2,3	0,861	0,017	0,570	0,014	0,574	0,029	0,522	0,015
4,9	1,034	0,028	0,541	0,012	0,557	0,043	0,507	0,007
7,0	1,013	0,043	0,550	0,012	0,559	0,010	0,449	0,021
12,1	1,338	0,138	0,555	0,011	0,566	0,011	0,511	0,013
ТРГ – сталь 20 ( $27 H_D$ )								
0,5	0,185	0,005	0,264	0,032	0,260	0,021	0,103	0,041
1,2	0,171	0,011	0,270	0,022	0,215	0,008	0,146	0,041
2,3	0,166	0,003	0,251	0,007	0,205	0,006	0,159	0,014
4,9	0,164	0,050	0,232	0,007	0,208	0,007	0,175	0,008
7,0	0,165	0,012	0,228	0,018	0,210	0,010	0,171	0,010
12,1	0,206	0,004	0,205	0,006	0,169	0,018	0,173	0,009
фторопласт – сталь 20 ( $60 H_D$ )								
0,5	0,131	0,010	0,276	0,058	0,202	0,049	0,083	0,033
1,2	0,101	0,005	0,261	0,025	0,221	0,012	0,151	0,025
2,3	0,073	0,016	0,225	0,044	0,216	0,013	0,110	0,038
4,9	0,068	0,005	0,219	0,012	0,236	0,010	0,155	0,022
7,0	0,071	0,001	0,159	0,009	0,196	0,013	0,118	0,027
12,1	0,074	0,006	0,156	0,001	0,193	0,013	0,153	0,013
паронит – сталь 20 ( $65 H_D$ )								
0,5	0,232	0,021	0,318	0,083	0,317	0,010	0,293	0,093
1,2	0,250	0,015	0,315	0,017	0,346	0,008	0,285	0,057
2,3	0,268	0,006	0,345	0,009	0,331	0,018	0,281	0,005
4,9	0,252	0,013	0,341	0,017	0,341	0,009	0,324	0,016
7,0	0,239	0,017	0,339	0,016	0,311	0,003	0,308	0,012
12,1	0,227	0,008	0,322	0,018	0,321	0,007	0,283	0,041

С использованием полученных средних значений коэффициента трения скольжения и значений критических давлений сжатия (таблица 3.7) по формуле (3.39) выполнен расчет толщины единичного деформированного слоя уплотнения.

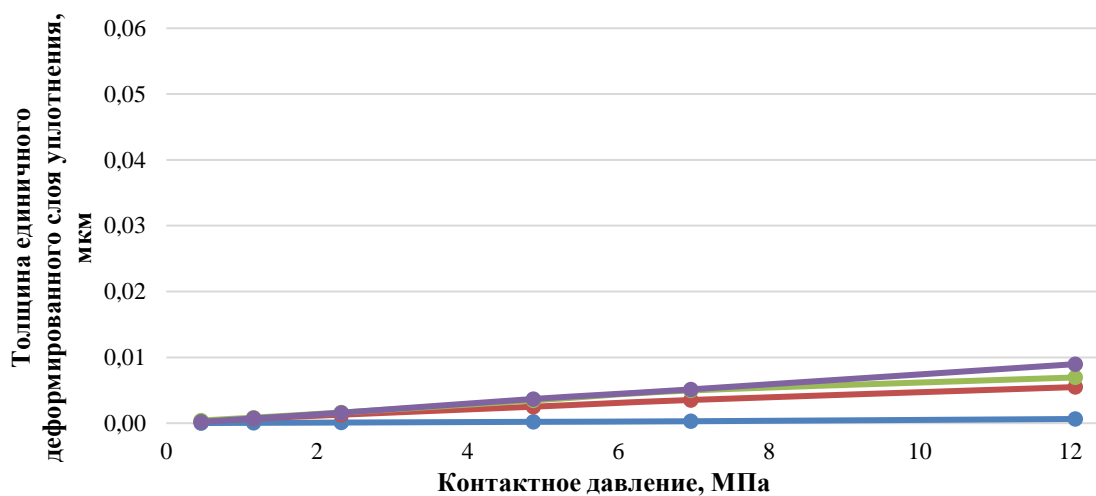
Таблица 3.7 – Критические характеристики уплотнительных материалов

Характеристики	Уплотнительный материал			
	полиуретан	ТРГ	фторопласт	паронит
Толщина уплотнения, мм	6,42	0,53	4,52	1,19
$p_{кр}$ , МПа	20	120	40	130
$\tau_i^*$ , МПа/мм	1,56	113,21	4,42	54,62

Графические зависимости изменения толщины единичного деформированного слоя для исследованных сопряжений в диапазоне заданных контактных давлений представлены на рисунке 3.9.



а



б

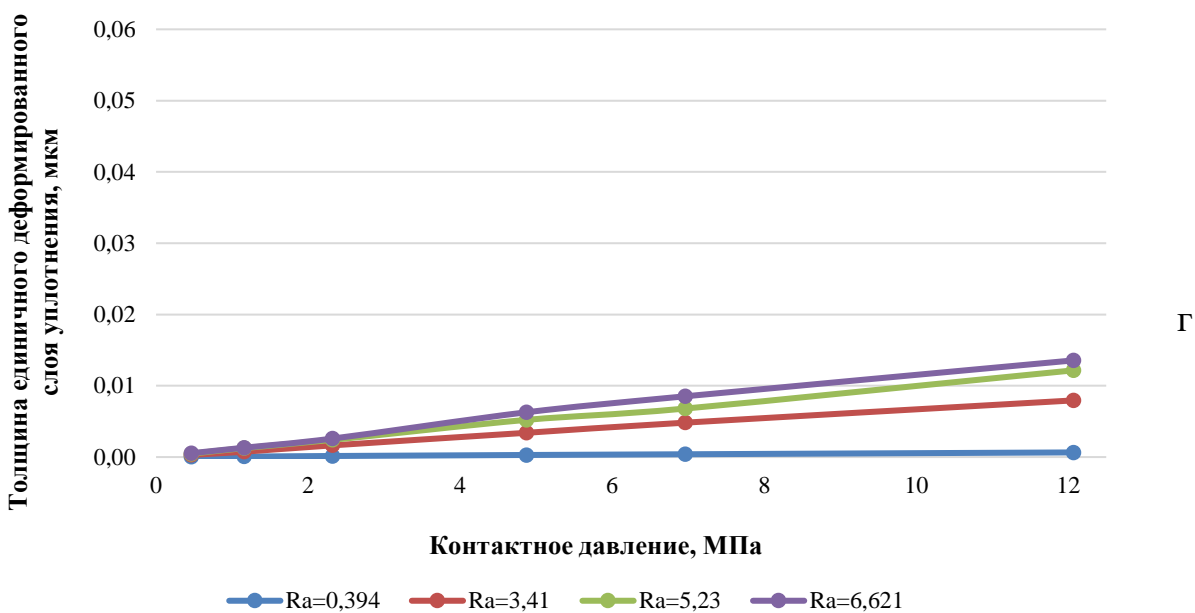
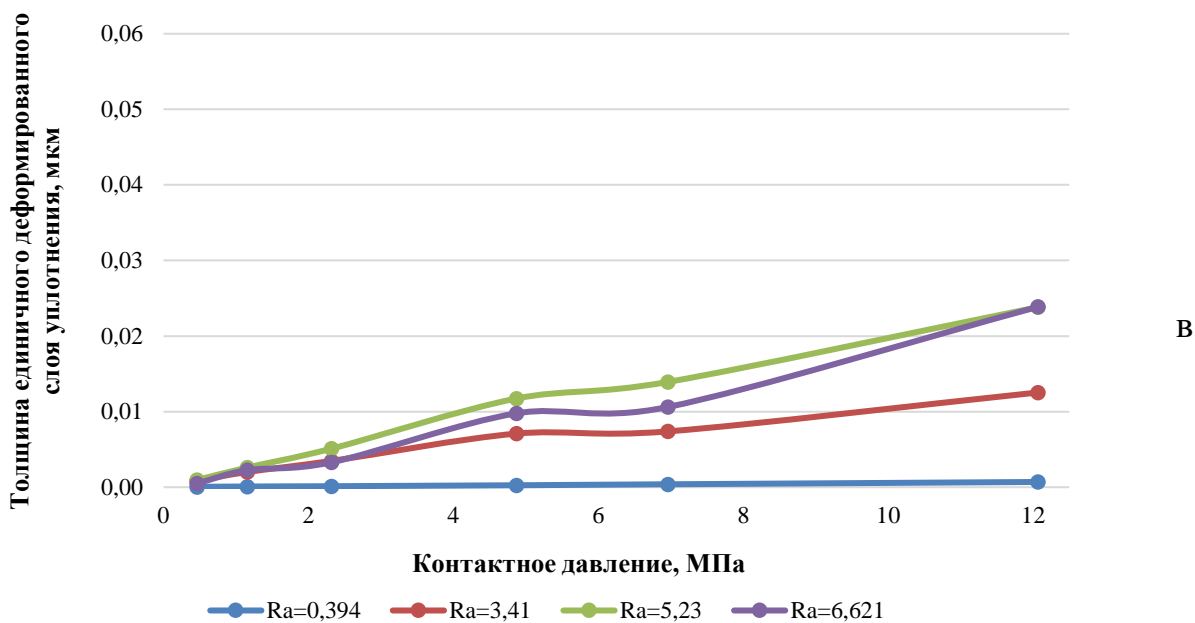


Рисунок 3.9 – Изменение толщины единичного деформированного слоя уплотнения в зависимости от контактного давления и шероховатости стальной поверхности для сопряжений: *а* – полиуретан–сталь 20 (25  $H_D$ ); *б* – ТРГ–сталь 20 (27  $H_D$ ); *в* – фторопласт–сталь 20 (60  $H_D$ ); *г* – паронит–сталь 20 (65  $H_D$ )

Согласно полученным графикам, наименьшему изнашиванию подвергается уплотнение из ТРГ, а наибольшему – уплотнение из полиуретана. Уплотнение из фторопласта изнашивается быстрее паронита.

### 3.5 Результаты экспериментальных исследований по определению интенсивности изнашивания уплотнения в условиях многоциклового нагружения при фреттинге

Экспериментальные исследования в условиях многоциклового нагружения проводились по методике испытаний на фреттинг согласно ГОСТ 23.211-80 [85] в соответствии с разделом 2.3. При испытаниях поверхность уплотнительного материала подвергалась многократному передеформированию под действием возвратно-поступательного перемещения стального образца с шероховатостью 2,5 мкм. Регулируемым параметром испытаний являлась нагрузка, диапазон изменения которой представлен в разделе 2.3.

Для обработки экспериментальных данных, полученных в процессе испытаний на фреттинг, при разных режимах нагружения, введен комплексный показатель фреттинга  $k_{\phi}$ , характеризующий кинетическую энергию вибрации, отнесенную к единице площади контактной поверхности образцов [108, 109]:

$$k_{\phi} = \frac{N \cdot V_{\text{скз}}^2}{2 \cdot g \cdot S_{\text{конт}}} = \frac{p \cdot V_{\text{скз}}^2}{2 \cdot g} \quad (3.41)$$

где:  $V_{\text{скз}}$  – среднеквадратическое значение виброскорости, м/с;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$S_{\text{конт}}$  – контурная площадь контакта образцов, м<sup>2</sup>;

$p$  ( $q_{\text{обж}}$ ) – контактное давление (давление обжатия), МПа (таблица 2.1).

В диапазоне выбранных прижимных нагрузок комплексный показатель фреттинга изменялся до 1843 Н/м. Данный диапазон соответствует фактическим условиям нагружения фланцевых соединений с контактным давлением до 20 МПа и подвергающихся вибрации с виброскоростью до 18 мм/с (таблица 3.8).

Таблица 3.8 – Комплексный показатель фреттинга для разных уплотнительных материалов

Нагрузочные и вибрационные характеристики	Уплотнительный материал			
	Полиуретан	ТРГ	Фторопласт	Паронит
$p$ ( $q_{обж}$ ), МПа	4	4	10	20
$k_f$ (при $V_{скз}$ до 18 мм/с), Н/м	до 66,1	до 66,1	до 165,3	до 330,6

Результаты испытаний исследованных сопряжений оценивались по показателю интенсивности изнашивания, определяемой в соответствии с весовым износом образцов по формуле (2.2), представлены в таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Интенсивность изнашивания исследованных сопряжений ( $S=50 \text{ мм}^2$ ,  $L=488400 \text{ мм}$ ) [108]

№	Пара трения	$N, H$	$\Delta G, г$	$\rho, г/см^3$	$I$
1.1	ТРГ–сталь 20	2	0,0056	1,50	$2,9 \cdot 10^{-8}$
			0	7,85	0
10		0,0056	1,50	$2,9 \cdot 10^{-8}$	
		0	7,85	0	
1.3		20	0,0056	1,50	$2,9 \cdot 10^{-8}$
			0	7,85	0
1.4		36	0,0056	1,50	$2,9 \cdot 10^{-8}$
			0	7,85	0
2.1	Паронит–сталь 20	2	0,0002	2,00	$4,1 \cdot 10^{-9}$
0,0001			7,85	$5,2 \cdot 10^{-10}$	
2.2		10	0,0007	2,00	$1,4 \cdot 10^{-8}$
			0,0001	7,85	$5,2 \cdot 10^{-10}$
2.3		20	0,0011	2,00	$2,3 \cdot 10^{-8}$
			0,0001	7,85	$5,2 \cdot 10^{-10}$
2.3		36	0,0036	2,00	$7,4 \cdot 10^{-8}$
			0,0001	7,85	$5,2 \cdot 10^{-10}$
3.1	Фторопласт–сталь 20	2	0,0010	2,24	$1,8 \cdot 10^{-8}$
0			7,85	0	
3.2		10	0,0031	2,24	$5,7 \cdot 10^{-8}$
			0,0001	7,85	$5,7 \cdot 10^{-10}$
3.3		20	0,0035	2,24	$6,4 \cdot 10^{-8}$
			0	7,85	0

Продолжение таблицы 3.9

№	Пара трения	$N, Н$	$\Delta G, г$	$\rho, г/см^3$	$I$	
3.4	Фторопласт– сталь 20	36	0,00455	2,24	$8,3 \cdot 10^{-8}$	
			0	7,85	0	
4.1	Полиуретан– сталь 20	2	0,0047	1,20	$1,6 \cdot 10^{-7}$	
			0	7,85	$6,8 \cdot 10^{-9}$	
4.2		10	0,0008	1,20	$2,7 \cdot 10^{-8}$	
			0,0001	7,85	$4,7 \cdot 10^{-9}$	
4.3		20	0,0002	1,20	$6,8 \cdot 10^{-9}$	
			0,0001	7,85	$3,1 \cdot 10^{-9}$	
4.4		36	0,0001	1,20	$3,4 \cdot 10^{-9}$	
			0	7,85	$4,7 \cdot 10^{-9}$	
5.1		Сталь 20–сталь 20	2	0,0007	7,85	$3,7 \cdot 10^{-9}$
0,0004				7,85	$2,1 \cdot 10^{-9}$	
5.2	10		0,0041	7,85	$2,1 \cdot 10^{-8}$	
			0,0044	7,85	$2,3 \cdot 10^{-8}$	
5.3	20		0,0073	7,85	$3,8 \cdot 10^{-8}$	
5.3	Сталь 20–сталь 20		20	0,0073	7,85	$3,8 \cdot 10^{-8}$
		0,0074		7,85	$3,9 \cdot 10^{-8}$	
5.4		36	0,0132	7,85	$6,9 \cdot 10^{-8}$	
			0,0960	7,85	$5,0 \cdot 10^{-7}$	

Внешний вид образцов после лабораторных испытаний на примере пары трения паронит-сталь 20 представлен на рисунке 3.10.



а



б

Рисунок 3.10 – Внешний вид образцов пары трения паронит-сталь 20 после испытаний при нагрузке 36 Н [108]: а – образец из стали 20; б – образец из паронита

Графики изменения интенсивности изнашивания при фреттинге в зависимости от комплексного показателя фреттинга, полученные на основании результатов испытаний представлены на рисунке 3.11.

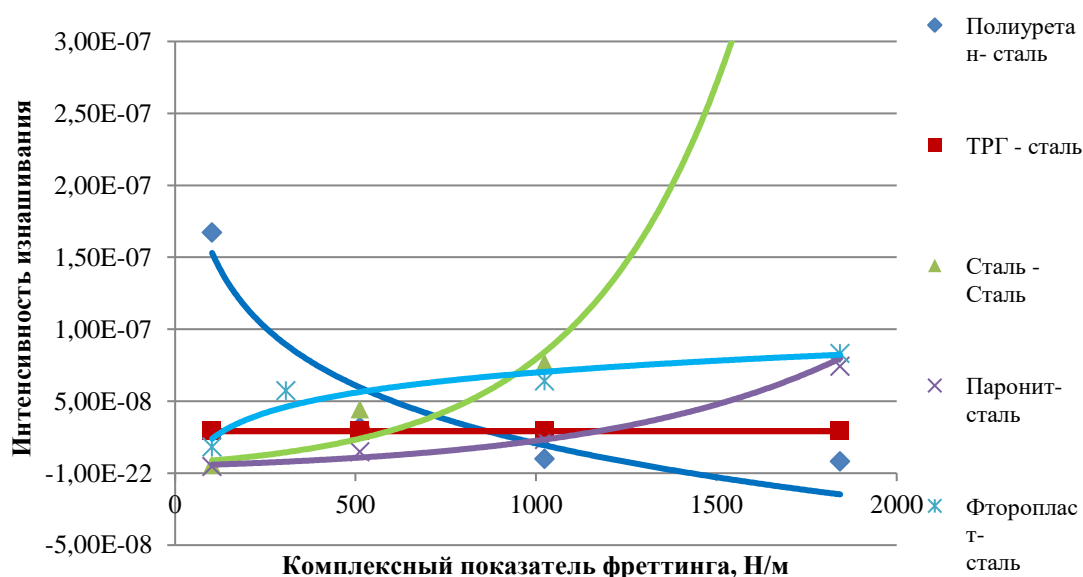


Рисунок 3.11 – Изменение интенсивности изнашивания при фреттинге в зависимости от комплексного показателя фреттинга [108, 109]

С увеличением комплексного показателя фреттинга в сопряжениях сталь 20–сталь 20, фторопласт–сталь 20 и паронит–сталь 20 наблюдается возрастающий характер изменения интенсивности изнашивания, однако при контакте стальных поверхностей износ накапливается быстрее. В паре трения полиуретан–сталь 20 интенсивность изнашивания снижается по мере роста комплексного показателя фреттинга, а при использовании уплотнений из ТРГ интенсивность изнашивания не зависит от  $k_{\phi}$ . [108, 109].

На основании графиков, представленных на рисунке 3.11, получены уравнения для определения интенсивности изнашивания уплотнений в зависимости от нагрузочных и вибрационных параметров (таблица 3.10).



Таблица 3.10 – Уравнения для определения интенсивности изнашивания уплотнительных материалов [108, 109]

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

Примечание:  $k_{\phi}$  – комплексный показатель фреттинга, определяемый по формуле (3.41).

Используя зависимости, представленные в таблице 3.10, и, опираясь на ГОСТ 23.211–80 [85], выведена формула для расчета линейного износа уплотнительного материала:

$$I = 2 \cdot I_{Me-упл} \cdot A \cdot N_{исп} \quad (3.42)$$

где:  $I_{Me-упл}$  – интенсивность изнашивания уплотнительных материалов в соответствии с таблицей 3.10;

$A$  – амплитуда перемещения, *мкм*;

$N_{исп}$  – общее количество циклов возвратно-поступательного перемещения, которое при длительности испытаний образцов 5 часов 30 минут составило  $5 \cdot 10^5 \pm 50$  циклов.

Толщина единичного деформированного слоя уплотнительного материала рассчитывалась с учетом единичной площади, определяемой площадью сектора, образовавшегося при относительном смещении образцов за единицу времени:

$$h_{деф_i} = 2 \cdot R_a \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot R \cdot f_{ск} \cdot N}{V_{скз} \cdot t \cdot (R^2 - r^2) \cdot p_{кр}}}\right) \quad (3.43)$$

где:  $R$  и  $r$  – внешний и внутренний радиусы контурной площади контакта образцов, *мм*.

Износ уплотнительного материала при испытаниях формировался в результате многократной пластической деформации части поверхностного слоя, которая испытывала касательные напряжения среза выше критических значений. При этом в зависимости от свойств уплотнительного материала

разрушение поверхностного слоя происходило за определенное количество этапов.

Для оценки стойкости уплотнительных материалов к циклическим нагрузкам проведено сравнение полученной величины линейного износа (3.42) с толщиной единичного слоя, в котором формировались критические касательные напряжения (3.43), и определено количество этапов разрушения поверхности  $Z$ :

$$Z = \frac{I}{h_{\text{деф}_i}} \quad (3.44)$$

Коэффициент трения скольжения, формируемый в процессе испытаний на фреттинг-изнашивание рассчитан по зависимостям (ПЗ.2-ПЗ.5) Приложения 3.

Отделение частиц уплотнительного материала на каждом этапе разрушения поверхности происходило за  $X$  циклов деформации поверхностного слоя:

$$X = \frac{N_{\text{исп}}}{Z} \quad (3.45)$$

В таблице 3.11 приведены рассчитанные показатели фреттинг-изнашивания для исследованных уплотнительных материалов в результате многократной деформации.

Таблица 3.11 – Показатели изнашивания уплотнительных материалов при фреттинге

№	Пара трения	$N, H$	$p_{кр}, МПа$	$f_{ск}$	$h_{\text{деф}_i}, мкм$	$I, мм$	$Z, \text{этапы}$	$X, \text{циклы}$
1.1	Полиуретан-сталь 20	2	4	0,518	0,00246	0,3389	138	3628
1.2		10		0,532	0,01263	0,3871	31	16311
1.3		20		0,637	0,03034	0,4079	13	37188
1.4		36		0,659	0,05660	0,4256	8	66492
2.1	ТРГ-сталь20	2	4	0,259	0,00123	0,1000	81	6139
2.2		10		0,233	0,00554	0,1000	18	27682
2.3		20		0,216	0,01026	0,1000	10	51301
2.4		36		0,208	0,01783	0,1000	6	89138
3.1	Фторопласт-сталь 20	2	10	0,235	0,00045	0,0113	25	19775
3.2		10		0,200	0,00190	0,0274	14	34650
3.3		20		0,171	0,00324	0,0343	11	47183
3.4		36		0,157	0,00538	0,0402	7	66972

Продолжение таблицы 3.11

№	Пара трения	$N, H$	$P_{кр}, МПа$	$f_{ск}$	$h_{дефi}, мкм$	$I, мм$	$Z, этапы$	$X, циклы$
4.1	Паронит-сталь 20	2	20	0,382	0,00036	0,0029	8	62210
4.2		10		0,322	0,00153	0,0054	4	141905
4.3		20		0,315	0,00299	0,0116	4	128630
4.4		36		0,311	0,00532	0,0397	7	67056

На рисунке 3.12 и 3.13 представлены диаграмма, описывающая изменение количества этапов разрушения поверхностного слоя уплотнительных материалов, и график изменения числа циклов деформации, которые испытывал материал на каждом этапе, в зависимости от контактного давления.

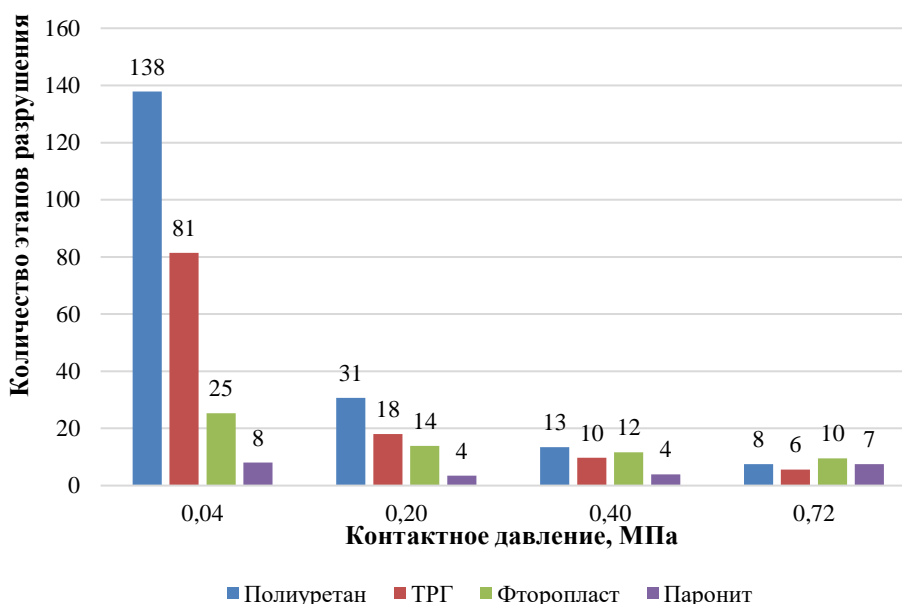


Рисунок 3.12 – Изменение количества этапов разрушения поверхности уплотнительных материалов от контактного давления

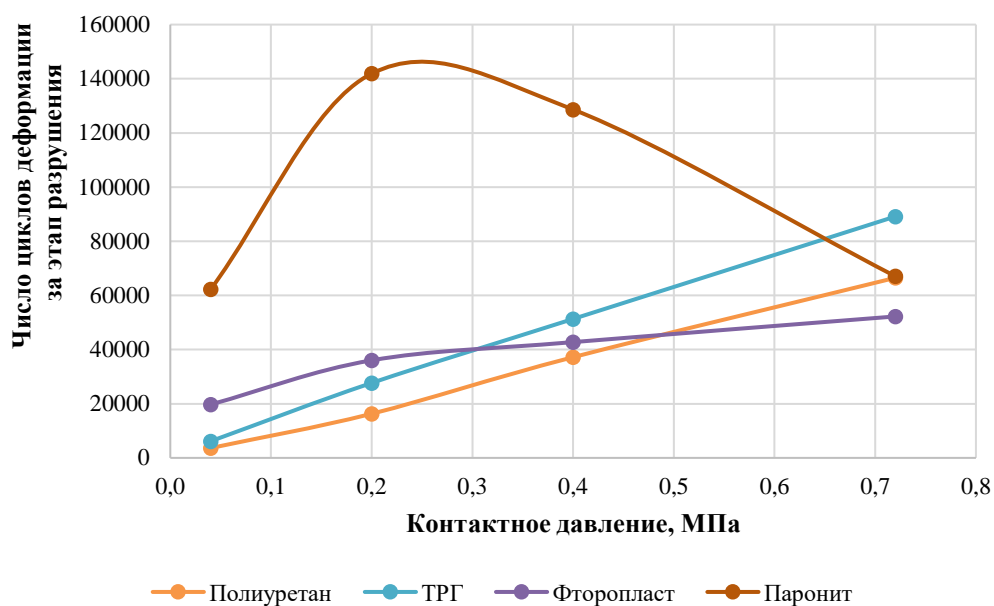


Рисунок 3.13 – Изменение числа циклов деформации за каждый этап разрушения в зависимости от контактного давления

Анализ зависимостей показал, что при минимальном уровне контактного давления исследованные уплотнительные материалы демонстрируют значительную разницу в количестве этапов разрушения поверхностного слоя. 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 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.

### 3.6 Сравнительный анализ параметров пар трения сталь–уплотнительный материал, работающих в условиях фреттинга

Выполненные расчетно-экспериментальные исследования параметров пар трения сталь–уплотнительный материал позволили выделить геометрические и триботехнические факторы, влияющие на развитие процесса трения на разных стадиях фреттинга во фланцевых соединениях.

На первой стадии фреттинга при наличии неподвижного контакта двух поверхностей, на основании выполненных исследований, выявлено, что основными показателями, характеризующими триботехнические параметры зоны контакта являются:

- угол при вершине выступов шероховатости уплотнительной поверхности фланца, который меняется в зависимости от параметров шероховатости  $R_a$  и  $S_m$ ;
- молекулярные константы трения  $\tau_0$  и  $\beta$ , определяемые физико-химическим состоянием поверхностей контактирующих тел.

Уменьшение угла при вершине выступов шероховатости и рост молекулярных констант трения способствует увеличению коэффициента трения покоя и снижает вероятность развития фреттинга.

Влияние параметра  $R_a$  на значение коэффициента трения покоя менее однозначно. При низкой твердости 25-27  $H_D$ , которая характерна для полиуретана и ТРГ, наибольший коэффициент трения покоя формируется при  $R_a=0,394$  мкм, что соответствует максимально гладкой отполированной поверхности. У полиуретана данная зависимость связана с его недостаточной прочностью и при внедрении поверхности фланца с большей шероховатостью под высокой прижимной нагрузкой этот материал будет накапливать внутренние пластические деформации. У ТРГ – объясняется наличием слоистой кристаллической структуры, которая при контакте с поверхностью большей шероховатости будет нарушена и между слоями возникнет проскальзывание.

При более высокой твердости 60-65  $H_D$ , характерной для фторопласта и паронита, наибольший коэффициент трения покоя наблюдается при максимальном значении параметра  $R_a$ , равном 6,621 мкм. При этом значения коэффициентов трения покоя у паронита и полиуретана выше, чем у ТРГ и фторопласта, что объясняется более высокой адгезией стали к этим материалам.

Формирование второй стадии фреттинга характеризуется возникновением первичного возвратно-поступательного микроперемещения, вызывающего пластическую деформацию поверхностных слоев уплотнения. Расчетно-экспериментальные исследования показали, что толщина единичного пластически деформированного слоя уплотнения зависит от параметра шероховатости  $R_a$  уплотнительной поверхности фланца и отношения коэффициента трения скольжения к предельно допустимому контактному давлению уплотнительного материала ( $f_{ск}/p_{кр}$ ). При снижении значений этих показателей толщина единичного деформированного слоя уплотнительного материала снижается.

Для формирования минимального коэффициента трения скольжения в зоне контакта фланец–уплотнение для всех исследованных уплотнительных материалов, кроме полиуретана, целесообразно применять фланцы с параметром шероховатости уплотнительной поверхности  $R_a = 0,394$  мкм или  $R_a = 6,621$  мкм. При использовании полиуретана для минимизации коэффициента трения скольжения предпочтительнее шероховатость с  $R_a = 3,41$  мкм и выше вне зависимости от контактного давления. Минимизация коэффициента трения скольжения позволяет снизить энергию, затрачиваемую на процесс разрушения материала уплотнения.

Третья стадия фреттинга характеризуется многократным пластическим передеформированием поверхностного слоя уплотнения. Экспериментальные исследования показали, что интенсивность изнашивания уплотнительных материалов зависит от таких параметров как контактное давление, виброскорость и число циклов деформации до отделения частиц износа.

Использование комплексного показателя фреттинга позволяет оценить скорость разрушения уплотнения фланцевого соединения при разных условиях вибрации.

На основании сделанных выводов сформирована обобщенная схема, отражающая влияние характеристик пар трения сталь–уплотнительный материал на развитие фреттинга во фланцевых соединениях (рисунок 3.14).

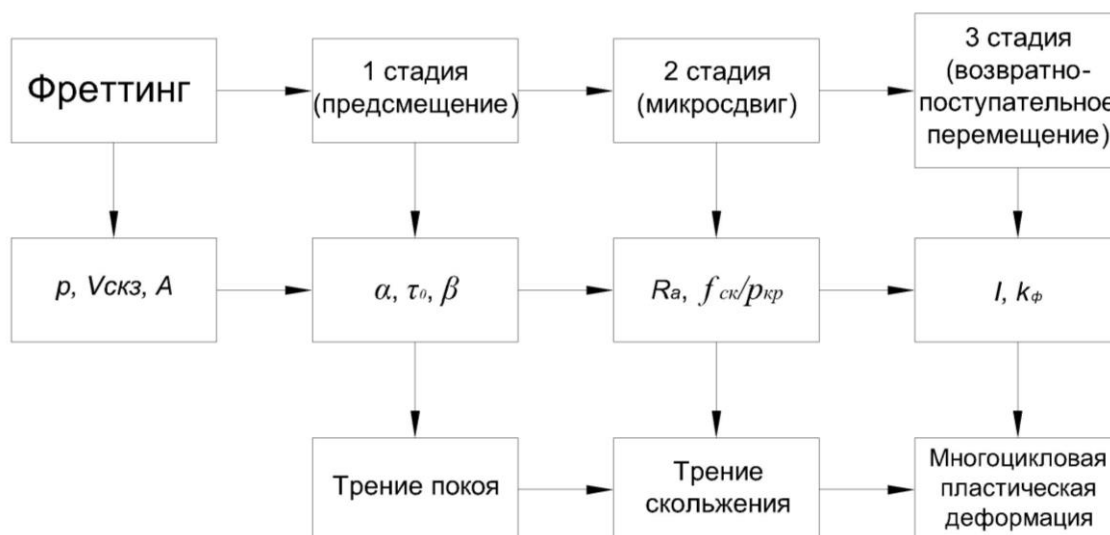
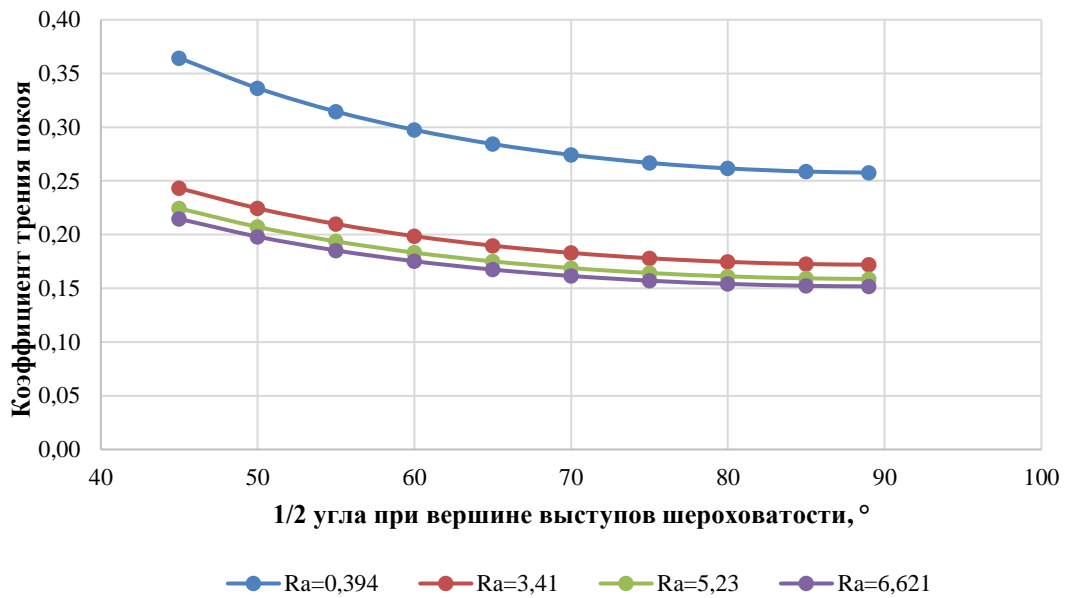
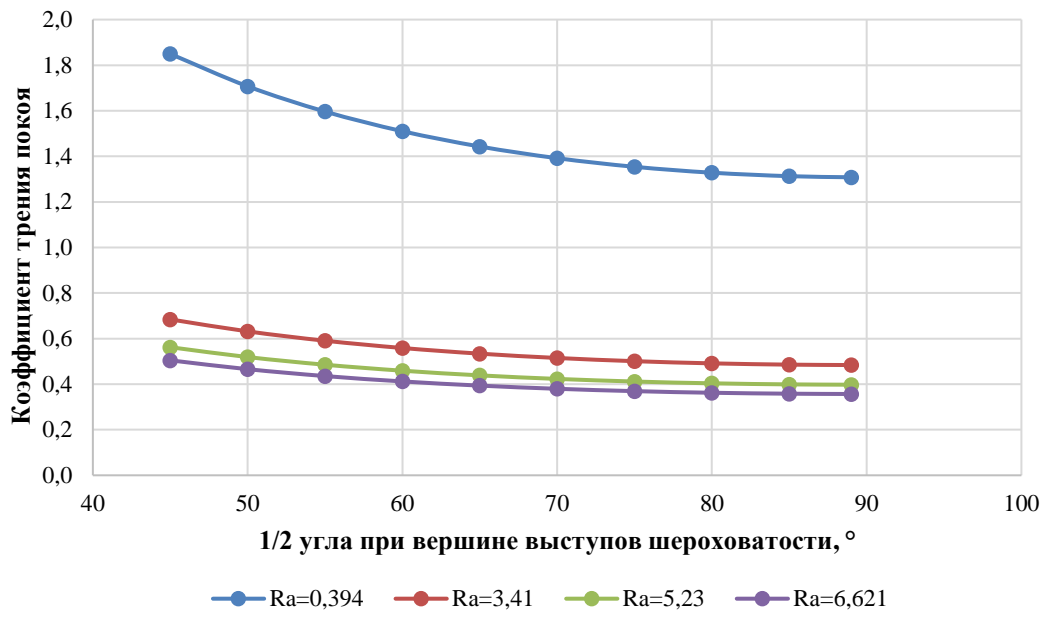


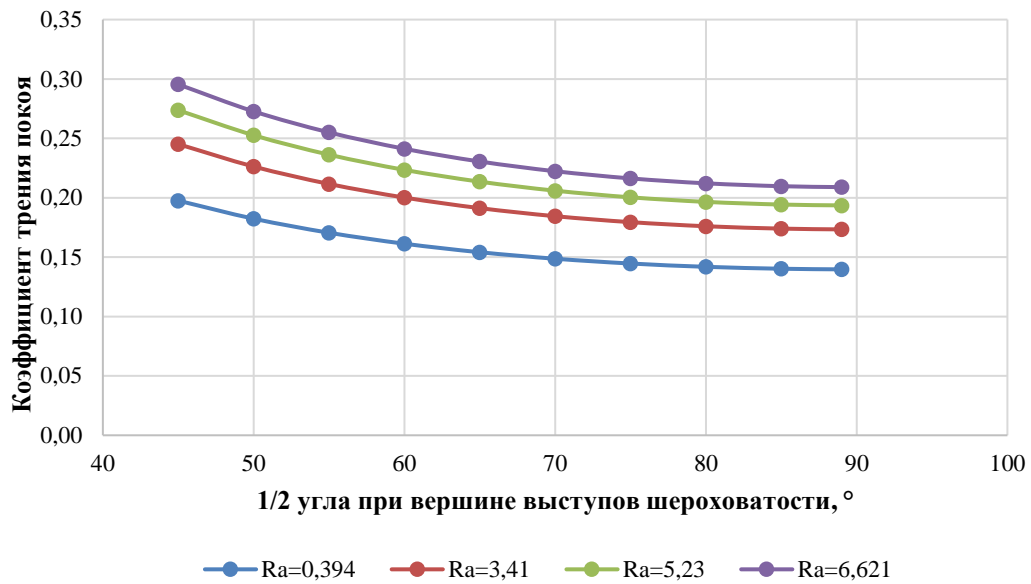
Рисунок 3.14 – Обобщенная схема фреттинга

По результатам всех исследований выполнена оценка характера изменения значимых при развитии фреттинга в зоне контакта фланец–уплотнение характеристик, возникающих при нагрузках, соответствующих фактическим условиям эксплуатации фланцевых соединений.

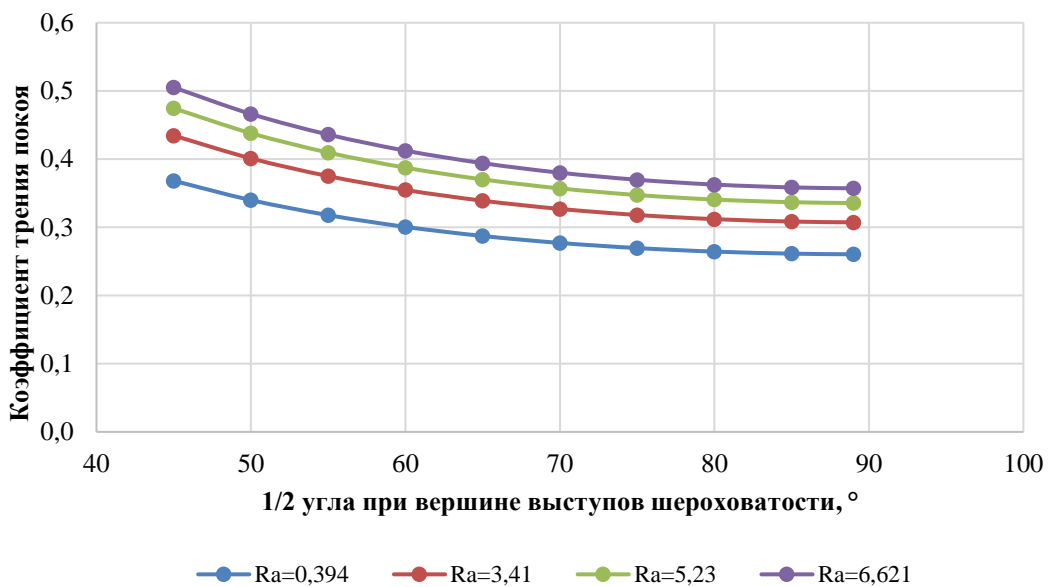
На рисунке 3.15 для первой стадии процесса фреттинга показано изменение коэффициента трения покоя в зависимости от угла при вершине выступов шероховатости уплотнительной поверхности фланца.







В



Г

Рисунок 3.15 – Изменение коэффициента трения покоя в зависимости от угла при вершине выступов шероховатости и параметра  $R_a$  для сопряжений:

- a* - полиуретан-сталь 20 ( $25 H_D$ ); *б* - ТРГ-сталь 20 ( $27 H_D$ );
- в* - фторопласт-сталь 20 ( $60 H_D$ ); *г* - паронит-сталь 20 ( $65 H_D$ )

Из графиков видно, что уменьшение угла при вершине выступов шероховатости поверхности фланца способствует росту коэффициента трения покоя в зоне контакта фланец–уплотнение независимо от уплотнительного материала.

На рисунке 3.16 представлены графики изменения толщины единичного пластически деформированного слоя, сформированного при первичном сдвиге поверхности фланца относительно уплотнения в зависимости от параметра  $R_a$ .

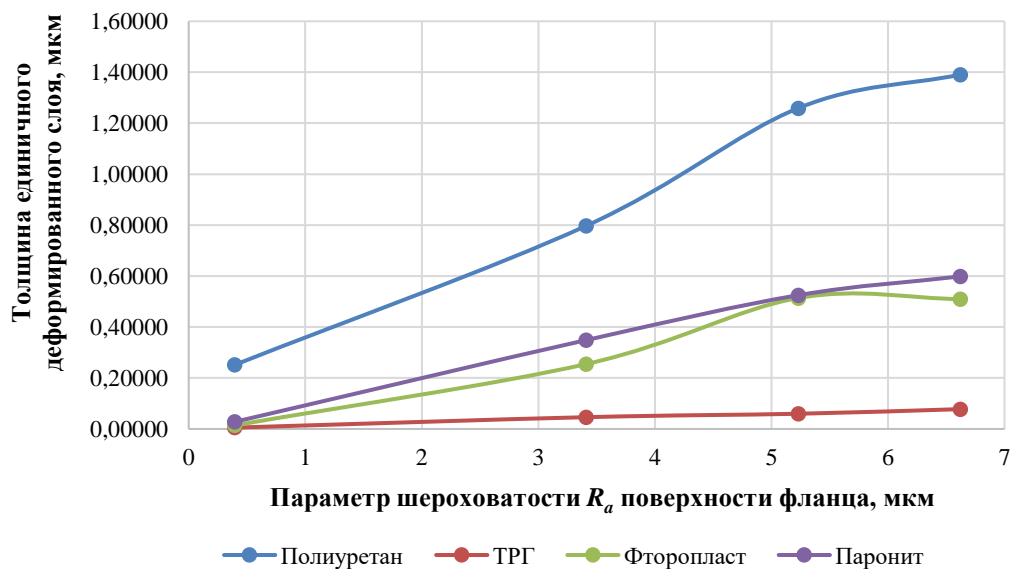


Рисунок 3.16 – Изменение толщины единичного деформированного слоя уплотнения в зависимости от параметра шероховатости  $R_a$  поверхности фланца [106]

Анализ полученных данных показал, что наименьшая толщина единичного деформированного слоя при фактических нагрузочных параметрах эксплуатации для всех уплотнительных материалов формируется при  $R_a = 0,394$  мкм, а с ростом шероховатости начинает увеличиваться. Исключение составляет ТРГ, для которого данный показатель практически не зависит от  $R_a$ .

В таблице 3.12 представлены значения интенсивности изнашивания уплотнения при регламентированном ГОСТ 34233.4–2017 [3] давлении обжатия и предельно допустимой виброскорости 18 мм/с.

Таблица 3.12 – Значения интенсивности изнашивания для разных уплотнительных материалов

Уплотнительный материал	Давление обжатия (регламентированное), МПа	Интенсивность изнашивания
Полиуретан (25 $H_D$ )	4	$1,49 \cdot 10^{-7}$
ТРГ (27 $H_D$ )	4	$2,00 \cdot 10^{-7}$
Фторопласт (60 $H_D$ )	10	$3,22 \cdot 10^{-8}$
Паронит (65 $H_D$ )	20	$5,19 \cdot 10^{-8}$

Из данных таблицы 3.12 следует, что полиуретан и ТРГ с твердостью 25-27  $H_D$  характеризуются более высокими показателями интенсивности изнашивания, чем фторопласт и паронит с твердостью 60-65  $H_D$ .

На рисунке 3.17 приведены графики изменения интенсивности изнашивания от виброскорости при регламентированном давлении обжатия уплотнения.

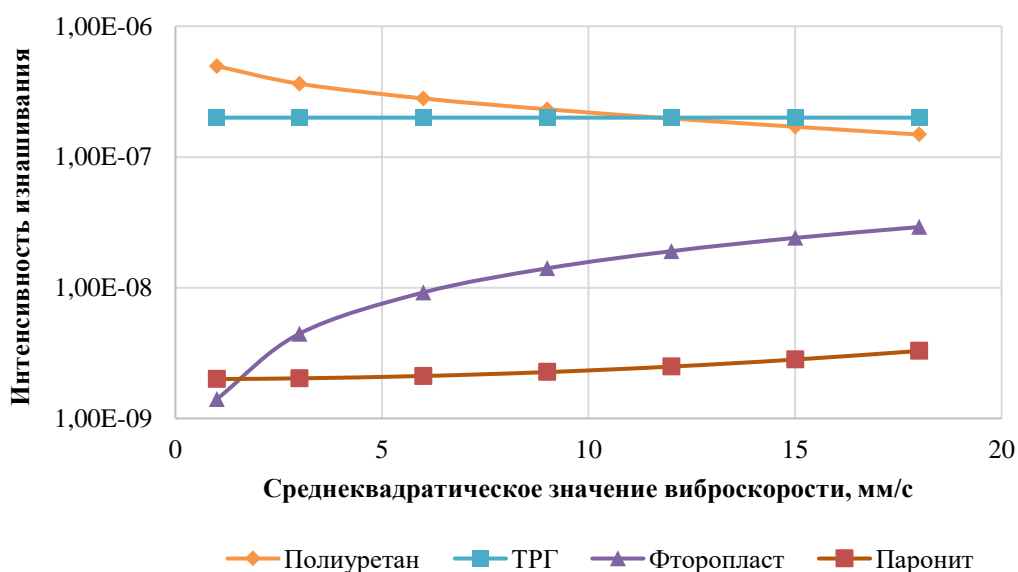


Рисунок 3.17 – Изменение интенсивности изнашивания уплотнительных материалов в зависимости от виброскорости

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 виброскорости выше 12 мм/с полиуретан имеет более высокую стойкость к изнашиванию, чем ТРГ.

### 3.7 Выводы по третьей главе

1. Выделены геометрические и триботехнические факторы, влияющие на развитие процесса трения на разных стадиях фреттинга во фланцевых соединениях.

2. Установлено, что основными показателями, характеризующими развитие фреттинга в зоне контакта фланец–уплотнение на первой стадии являются угол при вершине выступов шероховатости уплотнительной поверхности фланца  $\alpha$ , определяемый параметрами  $R_a$  и  $S_m$ , и молекулярные константы трения  $\tau_0$  и  $\beta$ ; на второй стадии – параметр шероховатости  $R_a$  уплотнительной поверхности фланца и предельно допустимое давление сжатия  $p_{кр}$ ; на третьей стадии – интенсивность изнашивания  $I$  и комплексный показатель фреттинга  $k_f$ .

3. Определено, что уменьшение угла при вершине выступов шероховатости и рост молекулярных констант трения способствуют увеличению коэффициента трения покоя и снижают вероятность развития фреттинга. Влияние параметра  $R_a$  на значение коэффициента трения покоя менее однозначно. При низкой твердости 25-27  $H_D$ , 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  $H_D$ , характерной для фторопласта и паронита, наибольший коэффициент трения покоя наблюдается при максимальном значении параметра  $R_a = 6,621$  мкм.

4. Определено, что для формирования минимального коэффициента трения скольжения в зоне контакта фланец–уплотнение для всех

исследованных уплотнительных материалов, кроме полиуретана, целесообразно применять фланцы с параметром шероховатости уплотнительной поверхности  $R_a = 0,394$  мкм или  $R_a = 6,621$  мкм. При использовании полиуретана для минимизации коэффициента трения скольжения предпочтительнее шероховатость с  $R_a = 3,41$  мкм и выше вне зависимости от контактного давления.

5. Выявлено, что толщина единичного пластически деформированного слоя уплотнительного материала зависит от параметра шероховатости  $R_a$  уплотнительной поверхности фланца и отношения коэффициента трения скольжения к предельно допустимому контактному давлению уплотнительного материала ( $f_{ск}/p_{кр}$ ). При снижении значений этих показателей толщина единичного деформированного слоя уплотнительного материала снижается.

6. Установлено, что интенсивность изнашивания уплотнительного материала при наличии виброперемещений в зоне контакта фланец–уплотнение зависит от комплексного показателя фреттинга, включающего такие параметры нагружения как контактное давление, виброскорость и частоту вибрации. Обобщение экспериментальных данных с использованием комплексного показателя фреттинга показало, что исследуемые пары трения имеют индивидуальные зависимости изменения интенсивности изнашивания.

7. Выявлено, что при регламентированном давлении обжатия 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 виброскорости выше 12 мм/с полиуретан имеет более высокую стойкость к изнашиванию, чем ТРГ.

8. 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.

## **ГЛАВА 4. ПОВЫШЕНИЕ НАРАБОТКИ ВИБРОНАГРУЖЕННЫХ ФЛАНЦЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ**

Под действием вибрационных нагрузок в процессе эксплуатации фланцевые соединения со временем теряют герметичность вследствие протекания двух параллельных процессов:

- развития фреттинга в зоне контакта фланец–уплотнение;
- снижения момента затяжки резьбовых соединений в результате самопроизвольного развинчивания при отсутствии применения конструктивно-технических решений для его предотвращения.

### **4.1 Стендовые испытания по оценке момента затяжки фланцевых соединений в условиях вибрации**

Для оценки интенсивности снижения герметичности фланцевых соединений, работающих в условиях вибрационных воздействий, в соответствии с разделом 2.4, выполнены стендовые испытания на участке трубопровода, работающего в условиях вынужденных колебаний, создаваемых потоком воздуха. Параметры вынужденных колебаний замерялись с использованием виброметра ВК-5М, обеспечивающего измерение виброскорости от 0,1 до 70 мм/с в частотном диапазоне 10-1500 Гц.

Измерение виброскорости на поверхностях фланцев и торцевых поверхностях резьбовых соединений в процессе испытаний представлено в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Изменение значений виброскорости на различных участках фланцевых соединений при равномерной затяжке и начальной виброскорости на поверхности трубы 18 мм/с

№ п/п	Число циклов	Виброскорость, мм/с					
		В вертикальной плоскости		В горизонтальной плоскости		шпилька на первом фланце	шпилька на втором фланце
		первый фланец	второй фланец	первый фланец	второй фланец		
1	0	19,0	18,0	25,2	26,0	21,2	22,3
2	2 197 800	22,0	21,1	28,5	28,0	24,4	25,1
3	3 207 600	28,7	27,3	20,8	20,9	19,9	19,9
4	5 583 600	33,5	33,2	19,7	18,5	15,8	15,1

Сравнение полученных данных с начальной виброскоростью на трубе показывает, что вибрация фланцевых соединений неоднородна по разным сечениям.

Изменение момента затяжки шпилек представлено в таблице 4.2, изменение момента затяжки болтов – в таблице 4.3. На основе замеренных данных рассчитаны значения скорости снижения момента затяжки шпилек и болтов в зависимости от накопленного количества циклов вибрации между замерами.

Таблица 4.2 – Изменение параметров затяжки шпилек фланцевых соединений при виброскорости на поверхности трубы 18 мм/с

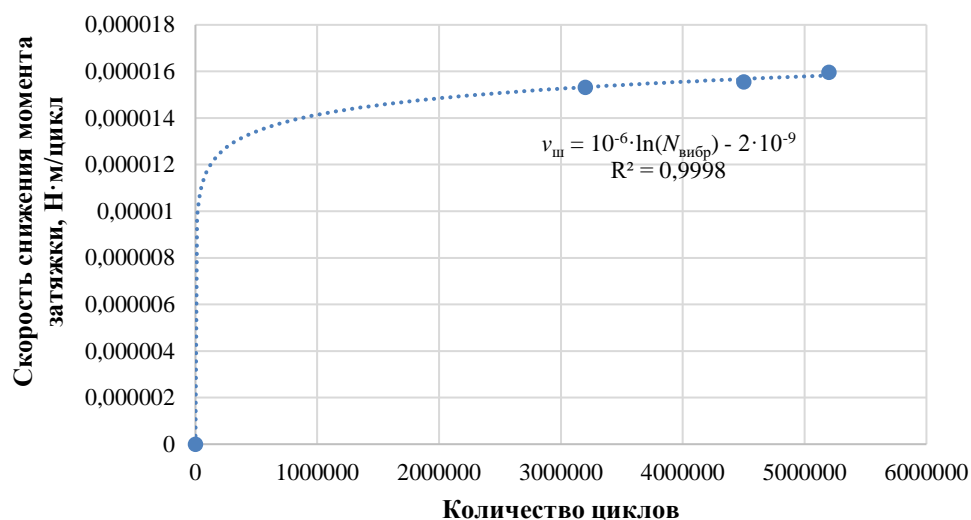
Виброскорость	Контролируемые показатели	Значения контролируемых показателей при разных моментах затяжки			
		230 Н м	181 Н м	160 Н м	147 Н м
18 мм/с	Количество циклов вибрации	0	$3,2 \cdot 10^6$	$4,5 \cdot 10^6$	$5,2 \cdot 10^6$
	Скорость снижения момента затяжки, Н м/цикл	0	$15,3 \cdot 10^{-6}$	$15,5 \cdot 10^{-6}$	$16,0 \cdot 10^{-6}$

Таблица 4.3 – Изменение параметров затяжки болтов фланцевых соединений при виброскорости на поверхности трубы 18 мм/с

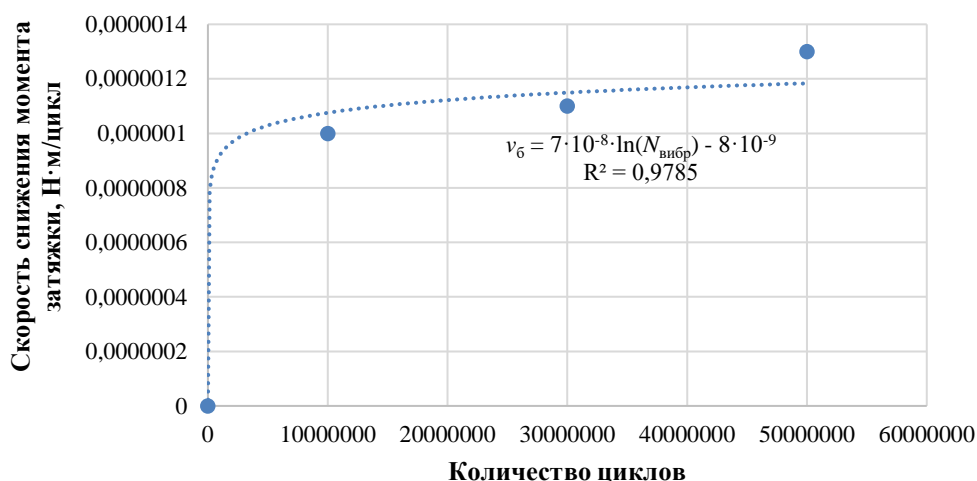
Виброскорость	Контролируемые показатели	Значения контролируемых показателей при разных моментах затяжки			
		230 Н м	220 Н м	197 Н м	165 Н м
18 мм/с	Количество циклов вибрации	0	$10 \cdot 10^6$	$30 \cdot 10^6$	$50 \cdot 10^6$
	Скорость снижения момента затяжки, Н м/цикл	0	$10^{-6}$	$1,1 \cdot 10^{-6}$	$1,3 \cdot 10^{-6}$



По приведенным в таблицах 4.2, 4.3 данным построены зависимости (рисунок 4.1) и получены уравнения (таблица 4.4) для определения скорости снижения момента затяжки в зависимости от количества циклов.



а



б

Рисунок 4.1 – Изменение скорости снижения момента затяжки для шпилек (а) и болтов (б) в зависимости от количества циклов вибрации

Таблица 4.4 – Уравнения для определения скорости снижения момента затяжки при виброскорости до 18 мм/с

Резьбовое соединение	Уравнение
шпильки	$v_{ш} = 10^{-6} \cdot \ln(N_{\text{вибр}}) - 2 \cdot 10^{-9}$
болты	$v_{б} = 7 \cdot 10^{-8} \cdot \ln(N_{\text{вибр}}) - 8 \cdot 10^{-9}$

Примечание:  $N_{\text{вибр}}$  – накопленное количество циклов вибрации

После проведения испытаний в течении 50 млн. циклов выполнена разборка фланцевого соединения. На уплотнительных поверхностях фланцев (рисунок 4.2) и уплотнении из паронита (рисунок 4.3) обнаружены следы фреттинга в виде продуктов износа уплотнительного материала.



Рисунок 4.2 – Фотографии уплотнительных поверхностей фланцев со слоем порошкообразных продуктов изнашивания [110]



Рисунок 4.3 – Фотографии следов износа на поверхности уплотнения [110]

На наружной поверхности фланцев в местах соприкосновения с головками болтов и гаек выявлены концентрические следы износа (рисунок 4.4).



Рисунок 4.4 – Фотографии следов износа на наружных поверхностях фланцев в местах крепления болтовыми соединениями [110]

Глубина износа на поверхностях фланцевого соединения измерена микрометром МК 0-25 и представлена в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Глубина износа на поверхностях фланцевого соединения [110]

<b>Изношенная поверхность</b>	<b>Износ, мкм</b>	<b>Средняя величина износа, мкм</b>
Зона контакта фланец–головка болта (шайба)	70 – 140	105
Уплотнение (прокладка)	34,5 – 58,5	46,5

Полученные величины износа сопоставлены со значениями, рассчитанными на основании формулы (3.42) при тех же нагрузочных и вибрационных параметрах (таблица 4.6).

Таблица 4.6 – Сопоставление величины износа элементов фланцевого соединения

Изношенная поверхность	Рассчитанная величина износа	Замеренная величина износа	Погрешность
Зона контакта фланец–головка болта (шайба): $И = 0,22 \cdot 7 \cdot 10^{-9} \cdot e^{0,0025 \cdot k_{\phi}} \cdot \frac{V_{\text{СКЗ}}}{f} \cdot N_{\text{исп}}$	96 мкм	105 мкм	8,6%
Уплотнение (прокладка): $И = 0,22 \cdot 5 \cdot 10^{-9} \cdot e^{0,0015 \cdot k_{\phi}} \cdot \frac{V_{\text{СКЗ}}}{f} \cdot N_{\text{исп}}$	49,3 мкм	46,5 мкм	6,0%

Согласно данным таблицы 4.6 погрешность между результатами испытаний и результатами расчета по выведенным зависимостям составляет менее 10%, что является допустимым и подтверждает возможность использования полученных в ходе исследования зависимостей для разработки методики повышения наработки фланцевых соединений, работающих в условиях вибраций.

#### 4.2 Стендовые испытания для подтверждения достоверности зависимостей по определению коэффициентов трения

Чтобы проверить достоверность полученных для определения коэффициентов трения зависимостей, выполнены стендовые испытания, имитирующие зону контакта фланцев с заданной шероховатостью поверхности и уплотнения при контактном давлении 1 МПа. Схема стенда представлена на рисунке 4.5.

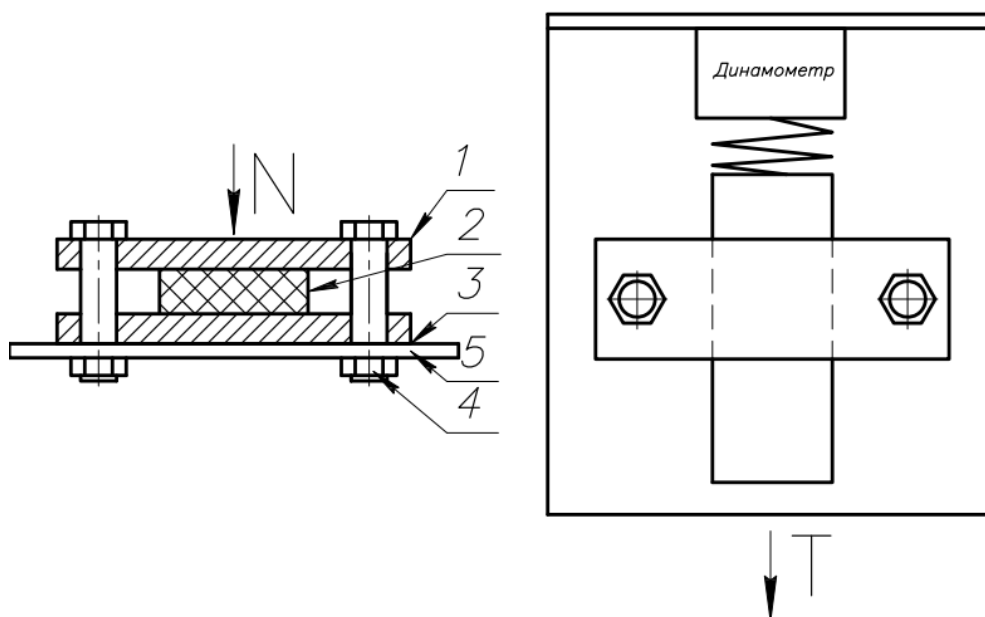


Рисунок 4.5 – Схема стенда, имитирующего фланцевое соединение: 1 и 3 – стальные пластины; 2 – уплотнительный материал; 4 – болтовое соединение; 5 – основа

Стенд для определения силы трения покоя и скольжения состоит из стальных пластин 1 и 3 с шероховатостью  $R_a = 3,41$  мкм и уплотнительного материала 2, закрепленных с помощью болтовых соединений 4 на основе 5 и прижатых друг к другу под нагрузкой 400 Н, формируемой в зоне контакта напряжения. Динамометром фиксируется усилие при перемещении испытуемого уплотнительного материала относительно стальных пластин. Площадь контакта в процессе испытаний остается неизменной и равной 400 мм<sup>2</sup>.

Результаты испытаний и их сравнение с расчетными данными представлены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Сравнение расчетных и экспериментальных значений коэффициентов трения покоя и скольжения для разных уплотнительных материалов при контактном давлении 1 МПа

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%

Сопоставление результатов лабораторных и стендовых испытаний показало погрешность значений в пределах 10%, что подтверждает достоверность выведенных зависимостей.

#### 4.3 Методика оценки герметичности фланцевых соединений, подверженных фреттинг-изнашиванию

Как отмечалось ранее, на развитие процесса разгерметизации фланцевых соединений влияет частота и амплитуда вибраций, а при вибродиагностике технологических трубопроводов контролируют значения виброперемещения и виброскорости.

Низкочастотные вибрации в технологических трубопроводах могут возникать вследствие следующих факторов [111, 112]:

- автоколебаний, связанных с резонансом в газодинамической системе трубопровода в диапазоне его собственных частот;
- турбулентностью потока газа, возникающей в местах местных сопротивлений (неоднородностей);
- турбулентностью потока газа, возникающей по причине гидравлического трения о стенки труб.

Поэтому при оценке интенсивности изнашивания уплотнительного материала необходимо учитывать параметры вибрации, формирующиеся от движения потока газа.

Частота вынужденных колебаний труб  $f_p$ , формирующихся в местах местных гидравлических сопротивлений, определяется скоростью потока газа, геометрическими параметрами неоднородности и числом Струхала:

$$f_p = St \cdot \frac{W}{D_i} \quad (4.1)$$

где:  $W$  – скорость потока газа, м/с;

$D_i$  – эквивалентный диаметр неоднородности, м;

$St$  – число Струхала.

Число Струхала является безразмерной величиной, характеризующей нестационарное течение жидкостей и газов и изменяется в зависимости от числа Рейнольдса ( $Re$ ).

В соответствии с ГОСТ 32388-2013 [113] для одиночных преград минимальное значение числа Струхала принимают равным 0,2, а при отсутствии местного сужения (вариант с прямой трубой) – 0,5. Согласно [112, 113], для расчета диапазона частот вынужденных колебаний, возникающих при движении потока газа через присутствующие в трубопроводах неоднородности, необходимо использовать весь диапазон значений числа Струхала от 0,2 до 0,5:

$$0,2 \cdot \frac{W}{D_i} < f_p < 0,5 \cdot \frac{W}{D_i} \quad (4.2)$$

Расчетный анализ условий возникновения вынужденных колебаний, формирующихся на участках трубопроводов разного диаметра от потока газа, движущегося с разными скоростями представлен в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Диапазоны значений частоты вынужденных колебаний в зависимости от скорости потока газа

Диаметр трубопровода, мм	Диапазон предельных значений частоты вынужденных колебаний, Гц при разных скоростях потока газа									
	9 м/с		18 м/с		24 м/с		36 м/с		48 м/с	
	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
<b>57</b>	32	79	63	158	84	211	126	316	168	421
<b>76</b>	24	59	47	118	63	158	95	237	126	316
<b>89</b>	20	51	40	101	54	135	81	202	108	270
<b>102</b>	18	44	35	88	47	118	71	176	94	235
<b>108</b>	17	42	33	83	44	111	67	167	89	222
<b>114</b>	16	39	32	79	42	105	63	158	84	211
<b>133</b>	14	34	27	68	36	90	54	135	72	180
<b>159</b>	11	28	23	57	30	75	45	113	60	151
<b>219</b>	8	21	16	41	22	55	33	82	44	110
<b>325</b>	6	14	11	28	15	37	22	55	30	74
<b>426</b>	4	11	8	21	11	28	17	42	23	56
<b>530</b>	3	8	7	17	9	23	14	34	18	45
<b>630</b>	3	7	6	14	8	19	11	29	15	38
<b>720</b>	3	6	5	13	7	17	10	25	13	33

Как видно из представленных данных, увеличение скорости потока газа приводит к увеличению частоты вынужденных колебаний.

В зависимости от частоты колебаний и среднего квадратического значения виброскорости изменяется виброперемещение:

$$s = 0,22 \cdot \frac{V_{\text{скз}}}{f} \quad (4.3)$$

где:  $f$  – частота собственных колебаний трубопровода, Гц.

Методика повышения наработки фланцевых соединений, эксплуатируемых в условиях вибрации, заключается в следующем:

1. Определить параметры вибрации в зависимости от скорости потока газа, диаметра трубопровода, замеренной виброскорости и частоты вибрации:

– диапазон частоты вынужденных колебаний по формуле (4.2). Если собственная частота колебаний трубопровода входит в этот диапазон, то необходимо отрегулировать положение опор, чтобы предупредить



возникновение резонанса и увеличение интенсивности изнашивающих процессов во фланцевых соединениях;

– виброперемещение по формуле (4.3).

2. Сравнить значения виброперемещения с величиной зазора ( $\Delta$ ) в отверстиях фланцев при сборке резьбовых соединений (болтовых или шпилечных), например по ГОСТ 11284-75 [114] или по технической документации производителя. При выполнении условия  $\Delta \geq S$  амплитуда вибрации принимается равной  $S/2$ . При невыполнении вышеуказанного условия амплитуда вибрации принимается равной  $\Delta/2$ .

3. Рассчитать величину суммарного износа во фланцевом соединении при фреттинге  $I_\phi$ , используя рассчитанные в пунктах 1, 2 параметры вибрации и заданную продолжительность эксплуатации:

$$I_\phi = 86400 \cdot 2 \cdot (I_{Me-Me} + I_{Me-упл}) \cdot A \cdot f \cdot T \quad (4.4)$$

где  $I_{Me-Me}$  и  $I_{Me-упл}$  – интенсивность изнашивания зоны контакта фланец–болт (гайка) и фланец–уплотнение (таблица 3.10);

$T$  – продолжительность эксплуатации, *сутки*.

При известной величине виброскорости величину износа можно посчитать, подставив уравнение (4.3) в выражение (4.4):

$$I_\phi = 19008 \cdot (I_{Me-Me} + I_{Me-упл}) \cdot V_{скз} \cdot T \quad (4.5)$$

При использовании стопорных и самоконтрающихся элементов в резьбовых соединениях составляющая  $I_{Me-Me}$  принимается равной нулю.

4. Определить фактическое давление обжатия уплотнения (вывод уравнений представлен в Приложении 3) по рассчитанной в пункте 3 величине износа:

$$q_{обж\ i}^{факт} = 2 \cdot E_\Pi \cdot \frac{(1 - k_{обж\ i-1}^{факт}) \cdot (h_\Pi - 2 \cdot I_\phi)}{h_\Pi \cdot k_{обж\ i-1}^{факт}}, \quad (i=1, 2, \dots, n), \quad \text{при } b_\Pi \leq 15 \text{ мм}, \quad (4.6)$$

$$q_{обж\ i}^{факт} = 2 \cdot E_\Pi \cdot \frac{(1 - k_{обж\ i-1}^{факт}) \cdot (h_\Pi - 2 \cdot I_\phi)}{h_\Pi \cdot k_{обж\ i-1}^{факт}} \cdot \frac{b_\Pi}{b_0}, \quad (i=1, 2, \dots, n), \quad (4.7)$$

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

где  $i$  – межремонтный период ( $i=0$  соответствует начальным условиям обжатия уплотнения при регламентированном давлении обжатия (таблица 2.1));

$E_{\Pi}$  – условный модуль сжатия (таблица 2.1), МПа;

$h_{\Pi}$  – исходная толщина прокладки, мм;

$b_{\Pi}$  – ширина прокладки, мм;

$b_0$  – эффективная ширина прокладки, мм:

$$b_0 = b_{\Pi}, \text{ при } b_{\Pi} \leq 15 \text{ мм}, \quad (4.8)$$

$$b_0 = 3,8 \times \sqrt{b_{\Pi}}, \text{ при } b_{\Pi} > 15 \text{ мм} \quad (4.9)$$

$k_{\text{обж } i}^{\text{факт}}$  – фактический коэффициент обжатия в определенный межремонтный период:

$$k_{\text{обж } i}^{\text{факт}} = \frac{2 \cdot E_{\Pi}}{q_{\text{обж } i}^{\text{факт}} + 2 \cdot E_{\Pi}}, \quad (i=0, 1, 2, \dots n), \text{ при } b_{\Pi} \leq 15 \text{ мм} \quad (4.10)$$

$$k_{\text{обж } i}^{\text{факт}} = \frac{2 \cdot E_{\Pi} \cdot b_{\Pi}}{q_{\text{обж } i}^{\text{факт}} \cdot b_0 + 2 \cdot E_{\Pi} \cdot b_{\Pi}}, \quad (i=0, 1, 2, \dots n), \quad (4.11)$$

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

$q_{\text{обж } i}^{\text{факт}}$  – фактическое давление обжатия, МПа, при этом  $q_{\text{обж } 0}^{\text{факт}}$  соответствует регламентированному ГОСТ Р 34233.4 – 2017 (Приложение И) [3] давлению обжатия  $q_{\text{обж}}$  (таблица 2.1), а  $k_{\text{обж } 0}^{\text{факт}}$  представляет собой исходный коэффициент обжатия, сформированный при  $q_{\text{обж}}$ .

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

Снижение герметичности фланцевого соединения до минимально допустимого уровня наблюдается, когда фактическое давление обжатия (контактное давление) достигает минимально допустимой величины, необходимой для обеспечения герметичности фланцевого соединения [113, 115]:

$$q_{\text{обж}}^{\text{min}} = m \cdot P \quad (4.12)$$

где  $m$  – прокладочный коэффициент (таблица 2.1);

$P$  – рабочее давление в трубопроводе, МПа.

Герметичность фланцевого соединения сохраняется при условии:

$$q_{обж\ i}^{факт} \leq q_{обж}^{min} \quad (4.13)$$

6. Для предотвращения самопроизвольного развинчивания резьбовых соединений фланцев в производственной практике применяются стопорные пружинные шайбы, стопорные шайбы с внутренними зубцами, самоконтрящиеся гайки с нейлоновым кольцом, контргайки, а также шплинтование.

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

7.1. Провести расчет снижения момента затяжки после определенной продолжительности эксплуатации при критическом значении виброскорости с использованием уравнений из таблицы 4.4

$$\Delta M = 86400 \cdot v_{ш(б)} \cdot f \cdot T. \quad (4.14)$$

7.2. По нормативным требованиям на резьбовые соединения определить величину нормативного и минимально допустимого момента затяжки ( $M_{норм}$  и  $M_{min}$ ), например, в соответствии с требованиями, указанными в РД 37.001.131-89 [116] для разных классов резьбовых соединений.

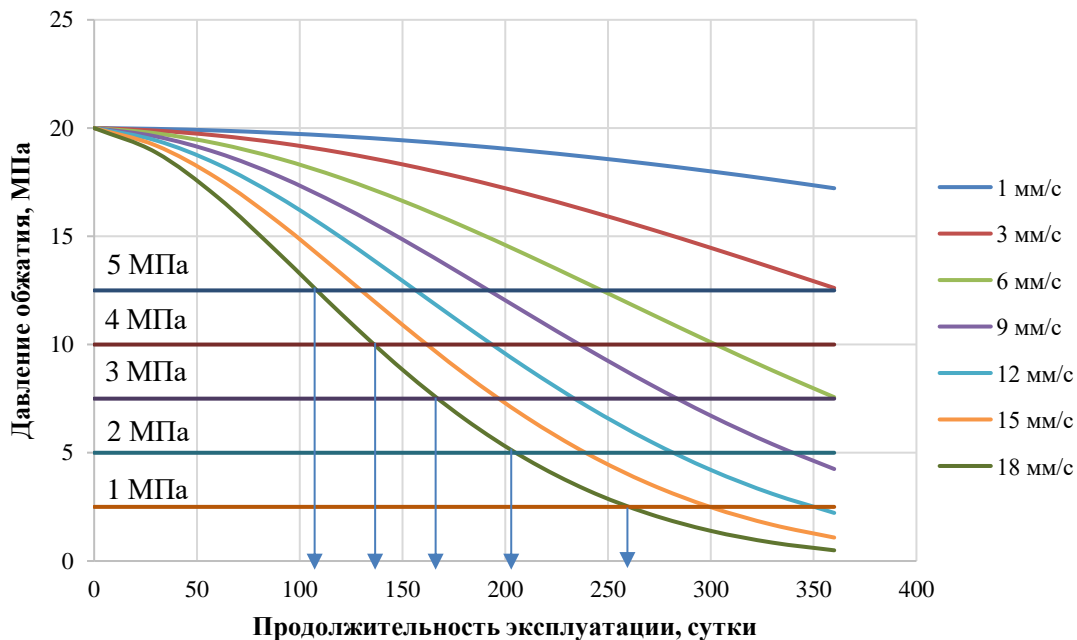
7.3. Сравнить полученное значение фактического момента затяжки с минимально допустимым. Эксплуатация может быть продолжена, если выполняется условие:

$$M_{min} < (M_{норм} - \Delta M) \quad (4.15)$$

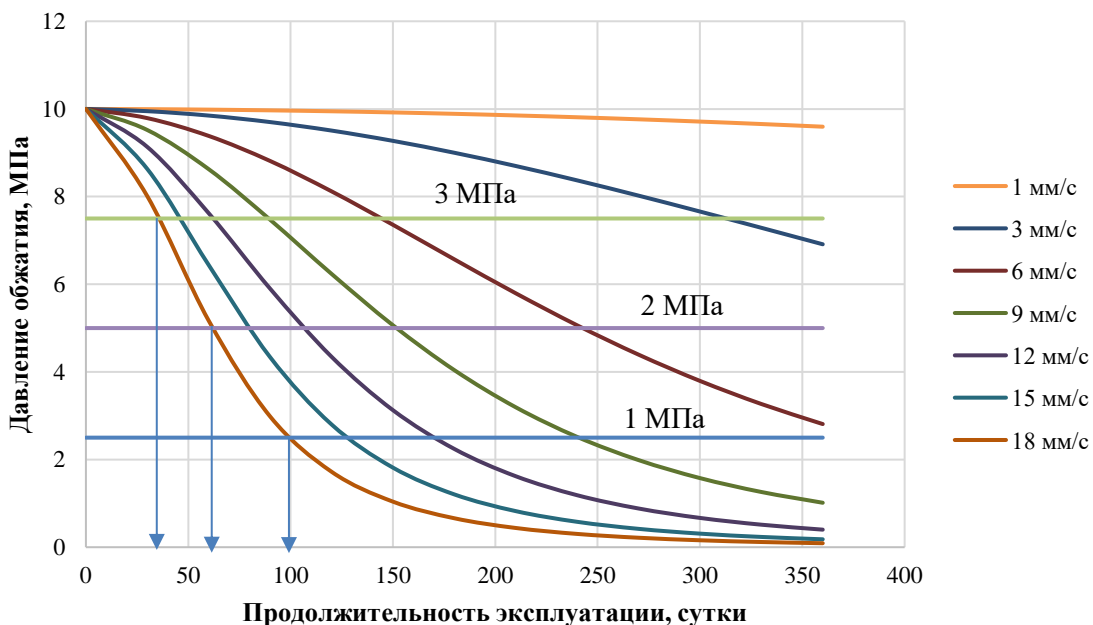
При невыполнении условия (4.15) необходимо остановить транспортировку газа и провести техническое обслуживание.

Для примера применения расчетных зависимостей методики на рисунке 4.6 а, б представлены графики изменения фактического давления обжатия в результате изнашивания при фреттинге для уплотнений толщиной 3,0 мм, выполненных из паронита и фторопласта, с исходным давлением обжатия 20 МПа и 10 МПа, соответственно, при эксплуатации в течении 1 года в условиях

вибрации. Горизонтальными линиями на рисунке 4.6 *а, б* показаны значения минимально допустимого давления, обеспечивающего герметичность газопровода с рабочим давлением в трубопроводе 5 МПа, 4 МПа, 3 МПа и 2 МПа [117, 118].



а



б

Рисунок 4.6 – Изменение давления обжатия уплотнений из паронита (*а*) и фторопласта (*б*) в течение 1 года эксплуатации фланцевого соединения при разных скоростях вибрации

Согласно полученным графикам, чем выше скорость вибрации, тем интенсивнее идет процесс износа и, как следствие снижается давления обжатия. Однако, чем меньше рабочее давление в трубопроводе, тем дольше сохраняется герметичность фланцевых соединений, работающих в условиях вибрационных нагрузок [117, 118].

Применение уплотнений из паронита и фторопласта позволяет сохранять герметичность фланцевого соединения в течение 1 года при параметрах, представленных в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Параметры эксплуатации фланцевых соединений с уплотнениями из паронита и фторопласта для поддержания их герметичности в течение 1 года

<b>Паронит</b>	<b>Фторопласт</b>
– скорость вибрации 1-3 мм/с, рабочее давление в трубопроводе до 4-5 МПа;	– скорость вибрации 1-2,5 мм/с, рабочее давление в трубопроводе до 3 МПа;
– скорость вибрации 1-6 мм/с, рабочее давление в трубопроводе до 3 МПа;	– скорость вибрации 1-4 мм/с, рабочее давление в трубопроводе до 2 МПа;
– скорость вибрации 1-8 мм/с, рабочее давление в трубопроводе до 2 МПа;	– скорость вибрации 1-6 мм/с, рабочее давление в трубопроводе до 1 МПа;
– скорость вибрации 1-11 мм/с, рабочее давление в трубопроводе до 1 МПа.	

Спустя 1 год эксплуатации в условиях вибрационных нагрузок следует произвести подтяжку резьбовых соединений фланцев для обеспечения исходного давления обжатия, если толщина уплотнения еще позволяет продолжить его дальнейшую эксплуатацию. Изменение толщины уплотнения из паронита и фторопласта, подверженного фреттингу в течение 1 года, приведены в таблице 4.10 и на рисунке 4.7.

Таблица 4.10 – Изменение толщины уплотнений из паронита и фторопласта при фреттинге в течение 1 года

Вибро ско рость, мм/с	Толщина уплотнения, мм в зависимости от продолжительности эксплуатации, сутки											
	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360
Паронит												
1	2,994	2,989	2,983	2,977	2,971	2,966	2,960	2,954	2,949	2,943	2,937	2,931
3	2,983	2,965	2,948	2,931	2,913	2,896	2,879	2,862	2,844	2,827	2,810	2,793
6	2,964	2,928	2,892	2,856	2,820	2,785	2,750	2,715	2,681	2,647	2,613	2,579
9	2,942	2,884	2,827	2,771	2,716	2,662	2,610	2,559	2,509	2,460	2,411	2,363
12	2,915	2,830	2,749	2,671	2,597	2,526	2,460	2,396	2,334	2,273	2,212	-
15	2,879	2,762	2,652	2,552	2,462	2,381	2,305	2,233	2,162	-	-	-
18	2,831	2,672	2,533	2,416	2,319	2,233	2,154	2,077	-	-	-	-
Фторопласт												
1	2,998	2,997	2,995	2,994	2,992	2,990	2,989	2,987	2,986	2,984	2,983	2,981
3	2,985	2,970	2,955	2,940	2,926	2,912	2,899	2,887	2,875	2,864	2,854	2,845
6	2,937	2,875	2,817	2,764	2,718	2,678	2,647	2,622	2,603	2,591	2,583	2,580
9	2,856	2,718	2,599	2,504	2,436	2,393	2,371	2,365	-	-	-	-
12	2,740	2,503	2,322	2,210	2,159	2,151	-	-	-	-	-	-
15	2,589	2,238	2,020	1,938	1,945	-	-	-	-	-	-	-
18	2,402	1,936	1,732	1,732	-	-	-	-	-	-	-	-

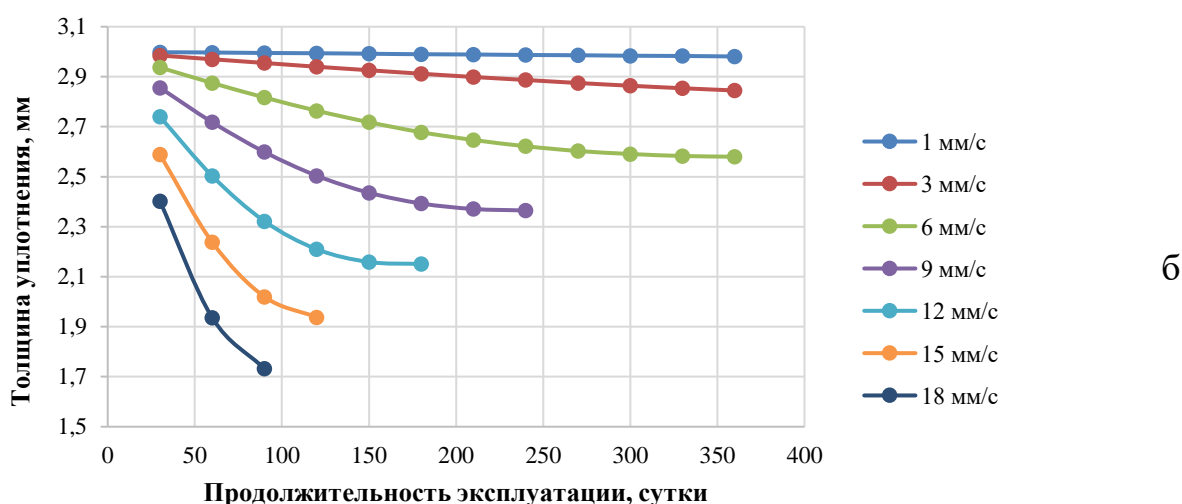
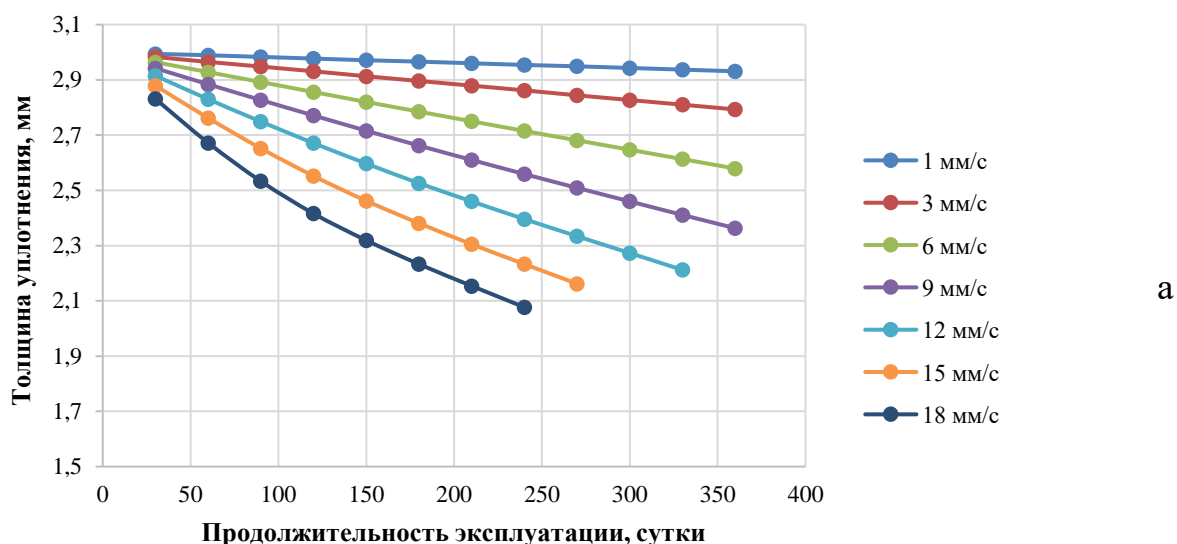


Рисунок 4.7 - Изменение толщины уплотнений из паронита (а) и фторопласта (б) при фреттинге в течение 1 года

Расчет давления обжатия для уплотнений из ТРГ и полиуретана показал, что в силу своей низкой твердости эти материалы в условиях высоких вибрационных нагрузок изнашиваются быстрее, способствуя нарушению герметичности в пределах 1-3 месяцев эксплуатации.

#### 4.4 Оптимизация технического решения для повышения наработки фланцевого соединения работающего в условиях вибрации

Основой технического решения для повышения наработки фланцевого соединения, работающего в условиях вибрации, является изменение

макрогеометрии уплотнительной поверхности фланца для снижения уровня касательных напряжений сдвига, возникающих в материале уплотнения.

Подход, связанный с формированием макрогеометрии уплотнительной поверхности фланцевых соединений, приведен в ASME B16.5-2013 [15]. В п.6.4.5.3 данного документа указано, что уплотнительные поверхности фланцев должны быть подвергнуты либо зубчатой концентрической, либо зубчатой спиральной обработке, имеющим среднюю чистоту обработки поверхности от 3,2 мкм до 6,3 мкм, а плотность нанесения должна быть от 1,8 пазов/мм до 2,2 пазов/мм [15].

Формирование макрогеометрии уплотнительных поверхностей фланцев требует учета механических и триботехнических характеристик применяемого уплотнительного материала, а также параметров вибрационного воздействия.

Для обоснования рациональной макрогеометрии уплотнительной поверхности фланцев необходимо оценить объем материала уплотнения, подвергающийся изнашиванию. На основании формулы (3.42) линейный износ уплотнения  $I_{упл}$  фланцевого соединения с плоскими фланцами при вибрации за единицу времени определяется в зависимости от параметров вибрации:

$$I_{упл} = 2 \cdot I_{Ме-упл} \cdot A \cdot f \cdot t \quad (4.16)$$

где  $t$  – время, с (принята 1 с).

С учетом площади контактной поверхности уплотнения, с поверхностью фланца объем изношенного материала в единицу времени составит:

$$V_{изн} = 2 \cdot I_{Ме-упл} \cdot A \cdot f \cdot t \cdot S_{изн} \quad (4.17)$$

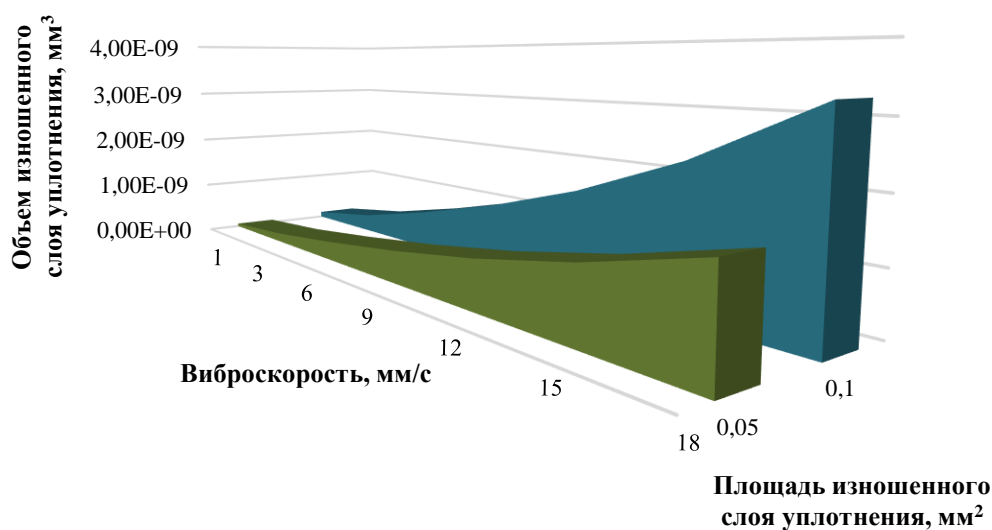
где  $S_{изн}$  – площадь контактной поверхности материала уплотнения, подвергающаяся изнашиванию в единицу времени,  $мм^2$ .

Основываясь на формуле (4.3), указанный выше объем можно выразить в зависимости от величины виброскорости:

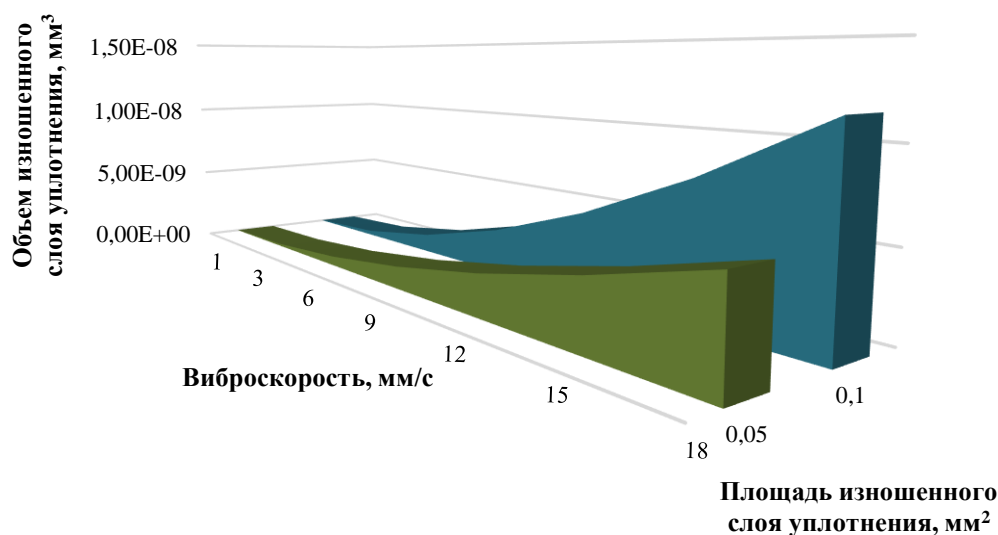
$$V_{изн} = 0,22 \cdot I_{Ме-упл} \cdot V_{скз} \cdot S_{изн} \cdot t \quad (4.18)$$



Используя зависимости по интенсивности изнашивания уплотнительных материалов (таблица 3.10), получены графики для определения объемов изношенного материала уплотнения в единицу времени при разной площади контактной поверхности с фланцем (рисунок 4.8 *а, б*). Область на диаграмме, закрашенная цветом, соответствует уровню напряжений выше критического значения, а область, расположенная выше закрашенной – характеризуется напряжениями ниже критических.



а



б

Рисунок 4.8 – Изменение объема изношенного материала уплотнения из паронита при давлении обжатия 20 МПа (*а*) и фторопласта при давлении обжатия 10 МПа (*б*) для разной площади контакта с фланцами

Затраты энергии  $W$  на разрушение данного объема уплотнительного материала можно оценить по критическому значению касательных напряжений:

$$W = \tau^* \cdot V_{кр} \quad (4.19)$$

где  $V_{кр}$  – объем уплотнительного материала, испытывающий критические касательные напряжения,  $мм^3$ .

Из-за низкой теплопроводности уплотнительного материала, большой разницы в прочностных характеристиках со стальной поверхностью и низкой прочностью, примем, что вся энергия трения затрачивается на деформацию поверхностного слоя уплотнения.

Для снижения величины износа уплотнения необходимо, чтобы напряжения, формирующиеся в его деформируемом слое, стали меньше критических. Для этого согласно формуле (4.19) при том же уровне приложенной энергии необходимо увеличить объем уплотнительного материала, подвергающийся деформации. Согласно диаграммам на рисунке 4.8 для снижения касательных напряжений объем материала уплотнения, задействованный в вибрационных воздействиях, но подвергающийся деформациям с напряжениями ниже критических, должен располагаться выше закрашенной области.

Для увеличения объема материала уплотнения, участвующего в деформации, необходимо создать профилированную уплотнительную поверхность фланца, обеспечивающую увеличение глубины контакта ( $H_i$ ) с уплотнительным материалом (рисунок 4.9).

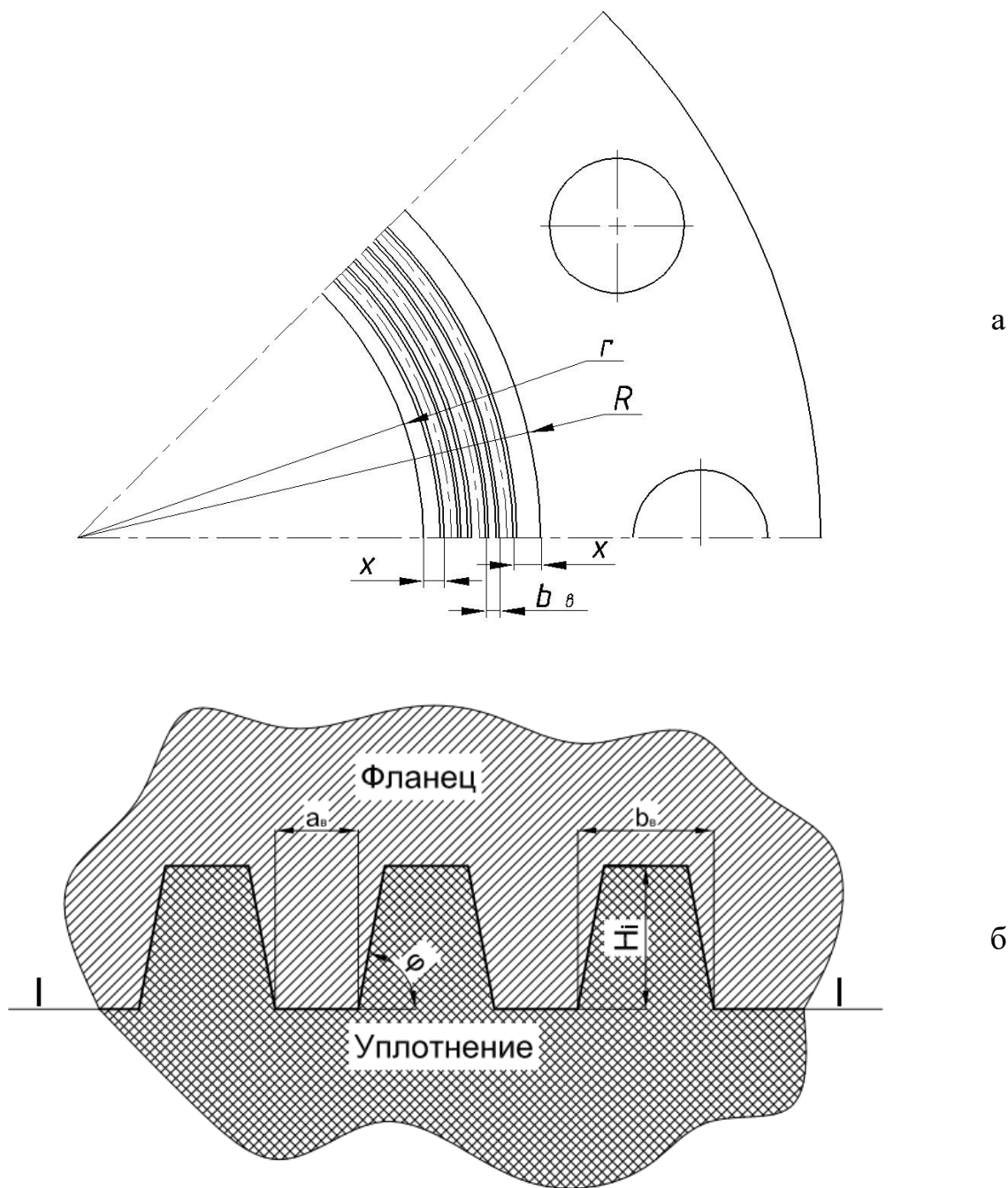


Рисунок 4.9 – Схема профилированной поверхности фланца (а) и ее внедрения в материал уплотнения (б):  $a_{\theta}$  – ширина выступа у основания в сечении  $I-I$ ;  $b_{\theta}$  – шаг между выступами, соответствующий ширине основания ответной впадины в сечении  $I-I$ ;  $H_{\theta}$  – высота выступа;  $\varphi$  – 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 макрорельефа фланца в поверхность уплотнения в его сечениях при вибрации в зависимости от заданной нагрузки и площади контакта формируются касательные напряжения сдвига:

$$\tau_{I-I} = \frac{f_{ск} \cdot p \cdot S_{фл}}{S_{I-I}} \quad (4.20)$$

где:  $S_{фл}$  – площадь уплотнительной поверхности фланца, мм<sup>2</sup>;

$S_{I-I}$  – площадь материала уплотнения в сечении  $I-I$  зоны внедрения выступов профилированной поверхности фланца, мм<sup>2</sup>.

При превышении критического уровня напряжений возникают условия для среза части уплотнения, попадающего во впадины профилированной поверхности фланцев.

Сопоставив уравнение (4.20) с уравнением (3.34), получим выражение для определения максимальной площади, занимаемой выступами в плоскости уплотнения ( $I-I$ ) для формирования касательных напряжений ниже критического уровня:

$$S_{в}^{max} = S_{фл} - \frac{f_{ск} \cdot p \cdot S_{фл}}{0,5 \cdot \cos(\pi - 2 \cdot \varphi) \cdot p_{кр}} \quad (4.21)$$

где  $\varphi$  – угол наклона выступа на профилированной поверхности фланца, °.

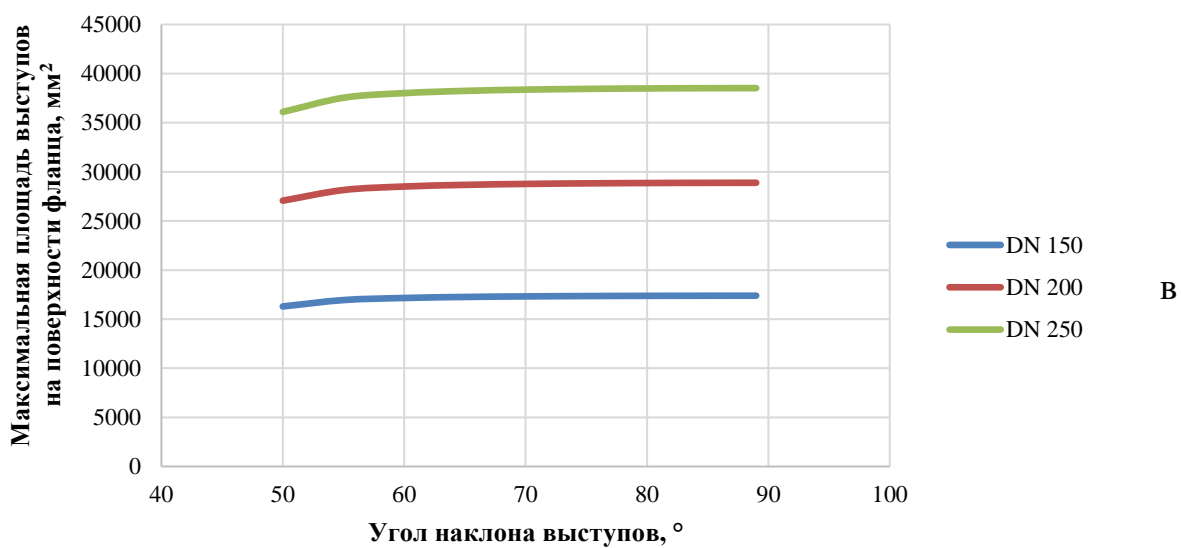
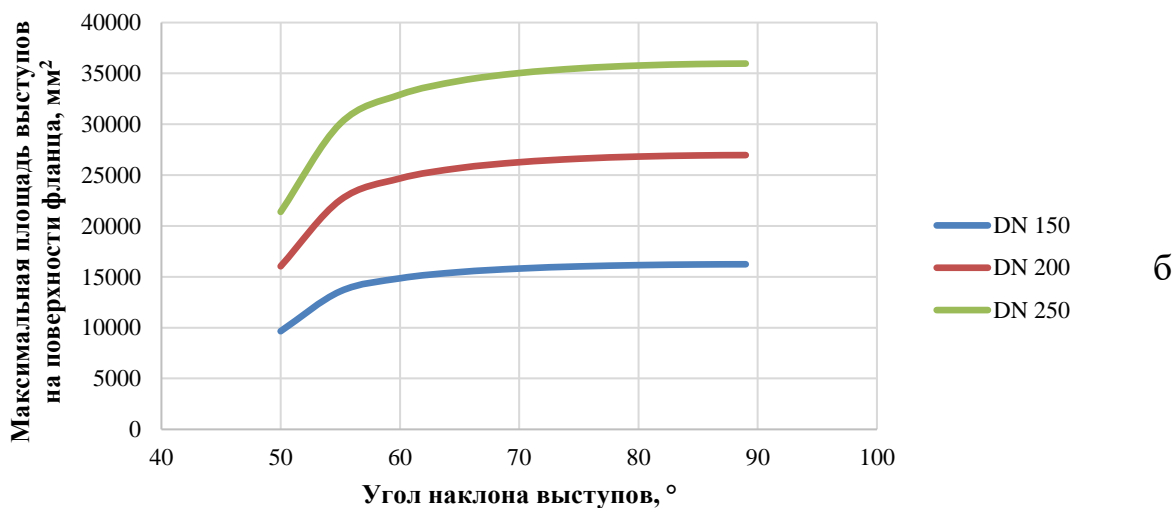
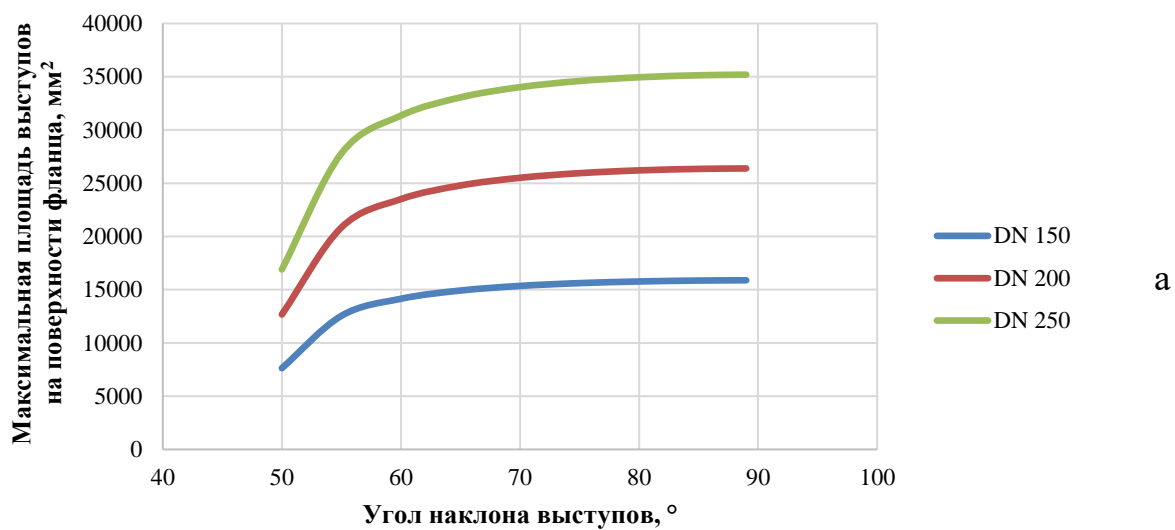
Значения коэффициента трения скольжения для рабочих условий эксплуатации фланцев и регламентированной в соответствии с ГОСТ 33259–2015 [1] шероховатостью 3,2 мкм, представлены в таблице 4.11.

Таблица 4.11 – Коэффициент трения скольжения при регламентированных параметрах контакта фланца с уплотнением

Уплотнительный материал	Давление обжатия, МПа	Предельно допустимое давление, МПа	Коэффициент трения скольжения
Паронит	20	130	0,320
Фторопласт	10	40	0,157
ТРГ	4	120	0,196
Полиуретан	4	20	0,629

Изменение максимальной площади выступов в зависимости от угла их наклона для разных уплотнительных материалов и разных типоразмеров

фланца, выбранных в соответствии с ГОСТ 33259-2015 [1], представлено на рисунке 4.10.



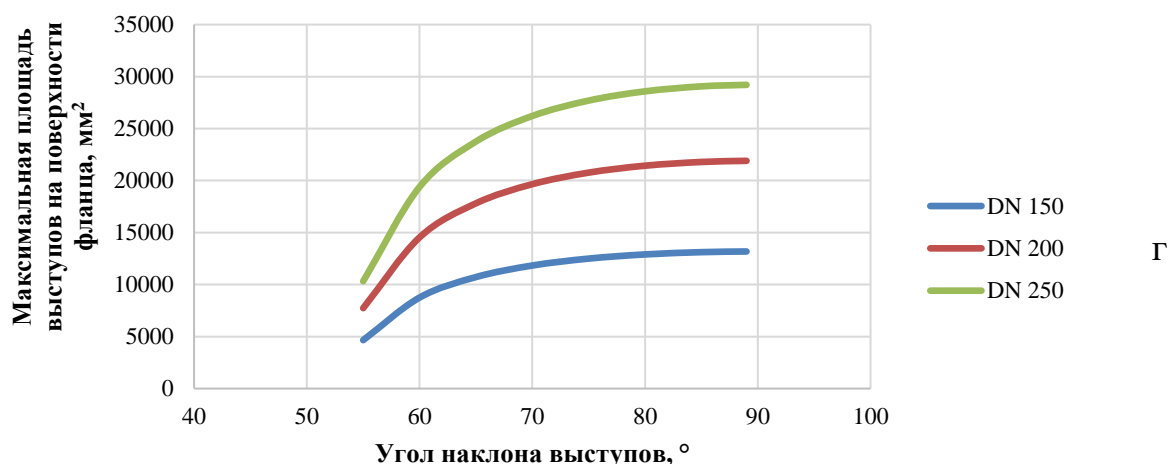


Рисунок 4.10 – Изменение максимальной площади выступов в плоскости уплотнений из паронита (а), фторопласта (б), ТРГ (в) и полиуретана (г) в зависимости от угла наклона выступа

Из представленных графиков видно, чем больше угол наклона выступов профилированной поверхности фланца, тем большую площадь внедрения в материале уплотнения они формируют. А чем больше угол наклона выступов, тем меньше формируется угол при их вершине для предупреждения относительного смещения в зоне контакта фланец–уплотнение, что подтверждает вывод из зависимости 3.20.

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 и площадь ( $S_{фл}$ ) его уплотнительной поверхности (ГОСТ 33259-2015 [1]).

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 выступов – концентрическое;
- форма выступов – равнобедренная трапеция;
- угол наклона выступов –  $\varphi, ^\circ$ .

3. По формуле (4.21) определить максимальную площадь выступов для заданного размера фланца  $S_B^{max}$ , с учетом данных таблицы 2.1 и 4.11.

4. Учитывая форму выступа в сечении в виде равнобедренной трапеции, рассчитать шаг между выступами:

$$b_B = a_B + 2 \cdot H_B \cdot ctg \varphi \quad (4.22)$$

5. Рассчитать площадь и количество выступов, размещающихся на уплотнительной поверхности фланца:

$$S_B^{факт} = S_B^1 + S_B^2 + S_B^3 + S_B^4 + \dots + S_B^m \quad (4.23)$$

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

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

$$S_B^3 = \pi \cdot ((r + x + 3 \cdot a + 2 \cdot b)^2 - (r + x + 2 \cdot a + 2 \cdot b)^2)$$

$$S_B^4 = \pi \cdot ((r + x + 4 \cdot a + 3 \cdot b)^2 - (r + x + 3 \cdot a + 3 \cdot b)^2) \quad (4.24)$$

...

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

При расчете площади выступов важным моментом является соблюдение условия:

$$r + x + m \cdot a + (m - 1) \cdot b \leq R - x, \quad (m - \text{количество выступов})$$

6. Расчет считается верным, если выполняется условие:

$$S_B^{факт} < S_B^{max} \quad (4.25)$$

7. Определить фактические касательные напряжения по формуле (4.20) и сравнить их с критическим значением, рассчитанным по формуле (3.34).

В качестве примера применения данной методики выполнен расчет для фланца DN150 с уплотнением из паронита, представленный в приложении 4.

## 4.5 Выводы по четвертой главе

1. Сопоставление результатов лабораторных и стендовых испытаний показало погрешность значений менее 10%, что подтверждает достоверность выведенных зависимостей.

2. На основании проведенных испытаний разработана методика повышения наработки фланцевых соединений, работающих в условиях вибрации. Выявлено, что при вибрационных нагрузках в результате фреттинг-изнашивания уплотнительного материала и саморазвинчивания резьбовых соединений увеличивается коэффициент обжатия и уменьшается давление обжатия уплотнения.

3. Для предотвращения потери герметичности фланцевого соединения вследствие фреттинг-изнашивания необходимо контролировать величину давления обжатия и его соответствие условию  $q_{обж\ i}^{факт} \leq q_{обж}^{min}$ . При этом герметичность фланцевого соединения сохраняется дольше при меньшем рабочем давлении в трубопроводе.

4. Для предотвращения потери герметичности вследствие самопроизвольного развинчивания резьбовых соединений фланцев необходимо установить стопорную пружинную шайбу или стопорную шайбу с внутренними зубцами, использовать гайки с нейлоновым кольцом или контргайки, провести шплинтование. При невозможности применения данных технических решений необходимо контролировать величину снижения момента затяжки и ее соответствие условию  $M_{min} < (M_{норм} - \Delta M)$ .

5. Для снижения величины износа необходимо увеличить объем уплотнительного материала, подвергающийся деформации, в котором будут формироваться касательные напряжения меньше критических. Таким образом, необходимо создать профилированную поверхность фланца в виде концентрических трапецеидальных выступов.

6. Разработана методика расчета количества выступов для профилированной поверхности фланцев.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований получены следующие результаты.

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. 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  $\alpha$ , определяемый параметрами  $R_a$  и  $S_m$ , и молекулярные константы трения  $\tau_0$  и  $\beta$ .

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  $H_D$ , 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  $H_D$ , 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  $H_D$  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  $q_{обж\ i}^{факт} \leq q_{обж}^{min}$ ; 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.

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

КС	Компрессорная станция
ГРС	Газораспределительная станция
ТПО	Трубопроводная обвязка
СТО	Стандарт организации
МН	Магистральный нефтепровод
МГ	Магистральный газопровод
СКЗ	Среднее квадратическое значение
НЧ	Низкочастотная вибрация
ТРГ	Терморасширенный графит
$\Delta G$	Изменение массы образца, г
$G_n$	Вес образца до испытаний, г
$G_k$	Вес образца после испытаний, г
$I$	Интенсивность изнашивания
$\rho$	Плотность изношенного материала, г/мм <sup>3</sup>
$S_{\text{конт}}$	Контурная площадь контакта образцов, мм <sup>2</sup>
$L$	Путь трения, мм
$\Delta v$	Снижение скорости момента затяжки, Н·м/цикл
$M_{\text{нач}}$	Исходный момент затяжки, Н·м
$M_i$	Момент затяжки, измеренный за определенное количество циклов испытаний, Н·м
$N_{\text{цикл}}$	Накопленное количество циклов за фиксированный интервал времени с момента затяжки болтов (шпилек), млн. циклов
$S_{\text{ф неполн}}$	Фактическая площадь контакта единичного выступа шероховатости поверхности фланца с уплотнительным материалом при неполном и полном внедрении соответственно, мм <sup>2</sup>
$S_{\text{ф полн}}$	
$h$	Глубина неполного внедрения выступа шероховатости, мкм
$\alpha$	Половина угла при вершине выступа °

$R_a$	Среднеарифметическое отклонение профиля шероховатости, <i>мкм</i>
$S_m$	Средний шаг неровностей профиля, <i>мкм</i>
$F_{HD}$	Усилие, прилагаемое для внедрения дюрометра типа D, <i>H</i>
$H_D$	Твердость по Шору
$S_{HD}$	Площадь поверхности отпечатка, образованная при внедрении индентора, <i>мм<sup>2</sup></i>
$D$	Диаметр основания конусного окончания индентора, <i>мм</i>
$l$	Длина образующей конуса, <i>мм</i>
$Hd$	Условная характеристика твердости уплотнительного материала Фактическая площадь контакта единичного выступа
$S_\phi$	шероховатости поверхности фланца с уплотнительным материалом, <i>мм<sup>2</sup></i>
$N_0$	Усилие прижатия, действующее на единичный выступ, <i>H</i>
$N$	Усилие прижатия, действующее на площадь шероховатой поверхности, <i>H</i> ;
$n$	Количество выступов шероховатости, шт.
$S$	Площадь шероховатой стальной поверхности, <i>мм<sup>2</sup></i>
$p_{вн}$	Минимальное контактное давление или давление обжатия, обеспечивающее полное внедрение выступов шероховатости, <i>МПа</i>
$\sigma_{сж}$	Напряжения сжатия в контакте двух поверхностей, <i>МПа</i>
$\sigma_{сж\ неполн}$	Напряжения сжатия в контакте двух поверхностей при неполном и полном внедрении, <i>МПа</i>
$\sigma_{сж\ полн}$	
$\tau$	Тангенциальные напряжения в зоне контакта, <i>МПа</i>
$f_n$	Коэффициент трения покоя
$\tau_0$ и $\beta$	Молекулярные константы трения
$f_n\ неполн$	Коэффициент трения покоя при неполном и полном внедрении
$f_n\ полн$	
$p$ ( $q_{обж}$ )	Контактное давление (давление обжатия), <i>МПа</i>

$a$	Длина стального образца, <i>мм</i>
$b$	Ширина стального образца, <i>мм</i>
$S_0$	Площадь сдвига, образованная за единицу времени, <i>мм<sup>2</sup></i>
$n_0$	Количество зон деформации в результате внедрения выступов шероховатости стальной поверхности, <i>шт</i>
$v$	Скорость скольжения стального образца, <i>мм/с</i>
$t$	Время скольжения, <i>с</i>
$h_{\text{деф } i}$	Толщина единичного деформированного слоя уплотнительного материала в сечении <i>i-i</i> , <i>мм</i>
$\delta$	Толщина образца уплотнительного материала, <i>мм</i>
$f_{\text{ск}}$	Коэффициент трения скольжения
$t_{y\delta}$	Удельная тангенциальная сила, <i>Н/мм</i>
$\tau_{\text{уд } i}$	Удельные касательные напряжения среза в сечении <i>i-i</i> , <i>МПа/мм</i>
$S_i$	Площадь среза, занимаемая уплотнительным материалом в сечении <i>i-i</i> зоны внедрения выступов шероховатости, <i>мм<sup>2</sup></i>
$h_i$	Расстояние <i>i</i> -той плоскости от вершины выступов шероховатости, <i>мм</i>
$\tau^*$	Критические касательные напряжения, <i>МПа</i>
$p_{\text{кр}}(q)$	Критическое контактное давление (предельно допустимое давление), <i>МПа</i>
$\tau_i^*$	Удельные критические касательные напряжения среза в сечении <i>i-i</i> , <i>МПа/мм</i>
$k_{\text{ф}}$	Комплексный показатель фреттинга, <i>Н/м</i>
$V_{\text{СКЗ}}$	Среднее квадратическое значение виброскорости, <i>мм/с</i>
$g$	Ускорение свободного падения, <i>м/с<sup>2</sup></i>
$I$	Линейный износ уплотнительного материала, <i>мкм</i>
$I_{\text{Ме-упл}}$	Интенсивность изнашивания зоны контакта фланец–болт (гайка)
$I_{\text{Ме-Ме}}$	и фланец–уплотнение
$A$	Амплитуда перемещения, <i>мкм</i>

$N_{\text{исп}}$	Общее количество циклов возвратно-поступательного перемещения
$R$ и $r$	Внешний и внутренний радиусы контурной площади контакта образцов, мм.
$Z$	Число этапов разрушения поверхности уплотнения
$X$	Число циклов деформации за этап разрушения
$v_{ш}$	Скорость снижения момента затяжки шпилек, $H \cdot м/цикл$
$v_{б}$	Скорость снижения момента затяжки болтов, $H \cdot м/цикл$
$N_{\text{вибр}}$	Накопленное количество циклов вибрации
$f_p$	Частота вынужденных колебаний, $Гц$
$W$	Скорость потока газа, $м/с$
$D_i$	Эквивалентный диаметр неоднородности, $м$
$St$	Число Струхала
$s$	Виброперемещение, мм
$f$	Частота собственных колебаний трубопровода, $Гц$
$\Delta$	Величина зазора в отверстиях резьбовых соединений фланцев, мм
$I_{\phi}$	Накопленный в процессе эксплуатации износ, $мкм$
$T$	Продолжительность эксплуатации, <i>сутки</i>
$q_{\text{обж } i}^{\text{факт}}$	Фактическое давление обжатия, $МПа$
$i$	Межремонтный период
$E_{\text{п}}$	Условный модуль сжатия, $МПа$
$k_{\text{обж } i}^{\text{факт}}$	Фактический коэффициент обжатия в определенный межремонтный период
$h_n$	Толщина прокладки, мм
$b_n$	Ширина прокладки, мм
$b_0$	Эффективная ширина прокладки, мм
$q_{\text{обж}}^{\text{min}}$	Минимальное контактное давление, обеспечивающее герметичность фланцевого соединения, $МПа$

$t$	Прокладочный коэффициент
$P$	Рабочее давление в трубопроводе, МПа
$\Delta M$	Снижение момента затяжки
$M_{\text{норм}}$	Нормативный момент затяжки, Н·м
$M_{\text{min}}$	Минимально допустимый момент затяжки, Н·м
$I_{\text{упл}}$	Линейный износ уплотнения фланцевого соединения в единицу времени, мм
$V_{\text{изн}}$	Объем изношенного слоя уплотнения в единицу времени, мм <sup>3</sup>
$S_{\text{изн}}$	Площадь контактной поверхности уплотнения, подвергающаяся изнашиванию в единицу времени, мм <sup>2</sup>
$W$	Удельные затраты энергии на разрушение объема уплотнительного материала
$V_{\text{кр}}$	Объем изношенного уплотнительного материала, формирующийся при критических напряжениях, мм <sup>3</sup>
$\tau_{I-I}$	Касательное напряжение сдвига в сечении I-I, МПа
$S_{\text{фл}}$	Площадь поверхности фланца, мм <sup>2</sup>
$S_{I-I}$	Площадь материала уплотнения в сечении I-I зоны внедрения выступов профилированной поверхности фланца, мм <sup>2</sup>
$S_{\text{в}}^{\text{max}}$	Максимальная площадь, занимаемая выступами в плоскости уплотнения, мм <sup>2</sup>
$\varphi$	Угол наклона выступа на профилированной поверхности фланца, °
$P_{\text{обж}}$	Усилие для смятия прокладки, Н
$R_{\text{н}}$	Усилие, обеспечивающее герметичность фланцевого соединения, Н
$D_{\text{сп}}$	Расчетный диаметр плоской прокладки, мм
$D_{\text{нп}}$	Наружный диаметр прокладки, мм
$\gamma_{\text{п}}$	Податливость прокладки, мм/Н
$k_{\text{обж}}$	Коэффициент обжатия прокладки



$\Delta h$	Уменьшение толщины прокладки после свинчивания фланцев, <i>мм.</i>
$h_k$	Толщина прокладки после свинчивания фланцевого соединения, <i>мм</i>

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 33259–2015. Фланцы арматуры, соединительных частей и трубопроводов на номинальное давление до *PN* 250. Конструкция, размеры и общие технические требования. – Введ. 2016-04-01. – М.: Стандартиформ, 2016. – 100 с.
2. СТО Газпром РД 1.10-098–2004. Методика проведения технического диагностирования трубопроводов и обвязок технологического оборудования газораспределительных станций магистральных газопроводов. – М.: ООО «ИРЦ Газпром», 2004. – 71 с.
3. ГОСТ 34233.4–2017. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет на прочность и герметичность фланцевых соединений. – Введ. 2018-08-01. – М.: Стандартиформ, 2019. – 40 с.
4. **Шагалова, К.А.** Диагностика газораспределительных станций, основные дефекты и методы их выявления / К.А. Шагалова, Д.А. Гуцин // Наука и Безопасность – 2015. - №1(14), март – С. 19-22.
5. **Поникаров, С.И.** Анализ причин возникновения аварий на магистральных нефтепроводах / С.И. Поникаров, В.А. Алексеев, П.В. Вилохина, А.Ф. Маннанова // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17. – № 23. – С. 365-368.
6. **Лепеш, Г.В.** Прогнозирование рисков отказов в газораспределительных сетях / Г.В. Лепеш // Газовые технологии. – 2020. – №3. – С.4-12.
7. **Большаков, А.М.** Частотный анализ отказов газопроводов, работающих в условиях Севера / А.М. Большаков, М.И. Захарова // Нефтегазовое дело. – 2020. – № 3. – С. 4-17.
8. Годовой отчет о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2020 году.
9. Годовой отчет о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2021 году.

10. Годовой отчет о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2022 году.

11. **Чубукаева, Т.Ф.** Сборник лекций по программе курсов целевого назначения для слесарей выездных бригад БПО (по безопасной эксплуатации и ремонту основного и вспомогательного оборудования объектов МН) // Канаш: ГАПОУ ЧР Канашский транспортно-энергетический техникум, 2015 – 208 с.

12. **Леонович, И.А.** Основные принципы формирования системы предупреждения аварийных и чрезвычайных ситуаций на КС МГ / И.А. Леонович, А.М. Ревазов // Материалы VIII Международной научно-технической конференции «Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта». 25-28 ноября 2014 г. – Новополоцк: Полоцкий государственный университет, 2014. – С. 58-61.

13. **Дубов, В.В.** Оценка технического состояния трубопроводной обвязки компрессорных станций / В.В. Дубов // Материалы II Международной научно-практической конференции «Наука. Новое поколение. Успех»: в 2 т. 17 апреля 2021 г. – Краснодар: Кубанский государственный технологический университет, 2021. – Т.1. – С. 153-158.

14. **Никулина, Д.П.** Совершенствование системы комплексного мониторинга технического состояния площадных объектов: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.19 / Никулина Дарья Павловна – М., 2022. – 169 с.

15. ASME B16.5–2013 Pipe Flanges and Flanged Fittings.

16. **Полякова, Н.С.** Герметичность фланцевых соединений с прокладками из терморасширенного графита в химическом оборудовании, работающем под давлением газовых сред: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.13 / Полякова Надежда Сергеевна. – Тамбов, 2016. – 124 с.

17. **Голубев, А.И.** Уплотнения машин и механизмов / А.И. Голубев, Е.И. Пятигорская – М.: Издательство МЭИ, 2001 – 312 с.

18. **Божко, Г.В.** Разъемные герметичные соединения / Г.В Божко // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2010. – Т. 16. – № 2. – С. 404-419.
19. **Ряховский, О.А.** Новый способ герметизации стыка фланцев корпусов при высоком внутреннем давлении / О.А. Ряховский, Г.В. Малышева, А.Н. Воробьев // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2013. – № 5. – С. 29-33.
20. **Кузьбожев, П.А.** Совершенствование методов снижения вибраций в трубопроводах газораспределительных станций: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.19 / Кузьбожев Павел Александрович. – Ухта, 2019. – 128 с.
21. **Соколинский, Л.И.** Нормирование вибрации редуцирующих линий газораспределительных станций / Л.И. Соколинский, Ю.Ю. Толстихин, Ф.В. Блинов // Газовая промышленность. – 2017. - №12(761). – С.78-82.
22. **Пат. № 2599612 Российская Федерация, МПК F 16 В 39/26.** Резьбовое соединение повышенной надежности и универсальности / Соколов Ю.С., Орлов Ю.А., Морозов В.В. [и др.]; заявитель и патентообладатель ВлГУ. – 2015113415/12; заявл. 10.04.2015; опубл. 10.10.2016, Бюл. № 28.
23. **Пат. 2743494 Российская Федерация, МПК F 16 В 39/12.** Самостопорящая цанговая гайка / Шайдоров В.В.; заявитель и патентообладатель Шайдоров В.В. – № 2020112572; заявл. 25.03.2020; опубл. 19.02.2021, Бюл. № 5.
24. **Пат. 2743635 Российская Федерация, МПК F 16 В 39/36.** Крепежный элемент стопорного резьбового соединения и стопорное резьбовое соединение с его использованием / Мельников М.Б.; заявитель и патентообладатель Мельников М.Б. – № 2020124250; заявл. 21.07.2020; опубл. 20.02.2021, Бюл. № 5
25. **Пат. 2194198 Российская Федерация, МПК F 16 В 39/34.** Самостопорящееся резьбовое соединение / Кирин Е.М.; заявитель и патентообладатель Пензенский государственный университет. – № 2001113850; заявл. 21.05.2001; опубл. 10.12.2002, Бюл. № 34

26. Пат. **2553316** Российская Федерация, МПК F 16 B 39/02. Стопорное резьбовое устройство / Халидов С.И., Бангаев С.Ш., Халадов А.Ш. [и др.]; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова». – № 2014100948/02; заявл. 13.01.2014; опубл. 10.06.2015, Бюл. № 16.

27. Пат. **2392507** Российская Федерация, МПК F 16 B 39/02. Способ Землякова Н.В. стопорения гайки относительно резьбового стержня / Земляков Н.В.; заявитель и патентообладатель ОрелГТУ. – № 2009103349/11; заявл. 02.02.2009; опубл. 20.06.2010, Бюл. № 17.

28. Пат. **2594866** Российская Федерация, МПК F 16 B 39/24. Стопорная шайба двойного действия / Дельшер К.; заявитель и патентообладатель НОРД-ЛОК ИНТЕРНЭШНЛ АБ. – № 2013103022/12; заявл. 24.06.2011; опубл. 20.08.2016, Бюл. № 23.

29. Пат. **2193702** Российская Федерация, МПК F 16 B 39/24, МПК F 16 B 39/26. Пружинная шайба / Леконцев Ю.М., Цыганков Д.А.; заявитель и патентообладатель Институт горного дела – Научно-исследовательское учреждение СО РАН. – № 2001111307/28; заявл. 23.04.2001; опубл. 27.11.2002, Бюл. № 33.

30. Пат. **183020** Российская Федерация, МПК F 16 B 37/00. Гайка самоконтрящаяся, герметизирующая / Арапов А.П., Бухаров О.В., Гуров В.Ф. [и др.]; заявитель и патентообладатель ПАО «Туполев». – № 2018119977; заявл. 30.05.2018; опубл. 07.09.2018, Бюл. № 25.

31. Пат. **2486378** Российская Федерация, МПК F 16 B 43/00, F 16 B 39/24. Самоконтрящийся комплект болт-гайка / Ли Санг Чеол; заявитель и патентообладатель Ли Санг Чеол. – № 2011128310/12; заявл. 07.12.2009; опубл. 27.06.2013, Бюл. № 18.

32. Пат. **2602776** Российская Федерация, МПК F 16 B 39/34. Стопорящееся резьбовое соединение / Шакиров Р.И., Лашков В.А., Вавилов

Ю.Г. [и др.]; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «КНИТУ». – № 2015118277/12; заявл. 15.05.2015; опубл. 20.11.2016, Бюл. № 32.

33. **Пат. 2690150 Российская Федерация, МПК F 16 B 39/24, МПК F 16 B 43/00, МПК F 16 B 53/22.** Клиновая стопорная шайба с повышенной коррозионной стойкостью и способ ее изготовления / Андерсон Маттиас; заявитель и патентообладатель НОРД-ЛОК АБ. – № 2017130648; заявл. 29.01.2016; опубл. 30.05.2019, Бюл. № 16.

34. **Пат. 2745053 Российская Федерация, МПК F 16 B 13/06.** Устройство для ограничения крутящего момента с фиксирующими захватами / Шимахара Х., Инфангер Э.; заявитель и патентообладатель ХИЛЬТИ АКЦИЕНГЕЗЕЛЬШАФТ. – № 2019124637; заявл. 05.12.2017; опубл. 18.03.2021, Бюл. № 4.

35. ГОСТ 27674–88. Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения. – Введ. 1989-01-01. – М.: Издательство стандартов, 1988. – 19 с.

36. **Голего, Н.Л.** Фреттинг-коррозия металлов / Н.Л. Голего, А.Я. Алябьев, В.В. Шевеля. – К.: Техника. 1974. – 271 с.

37. **Островский, М.С.** Исследование латентного периода фреттинга: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.00.00 / Островский Михаил Сергеевич. – М., 1967. – 18 с.

38. **Островский, М.С.** Фреттинг как причина снижения надёжности горных машин / М.С. Островский // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – № 3. – С. 315-331.

39. **Островский, М.С.** Триботехнические методы повышения надёжности горных машин / М.С. Островский, Ю.Ф. Набатников, Я.М. Радкевич // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – № S1. – С. 519-537.

40. **Петухов, А.Н.** Фреттинг и фреттинг усталость в малоподвижных соединениях / А.Н. Петухов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. Академика С.П. Королёва. – 2006. – № 2-1 (10). – С. 115-120.

41. **Петухов, А.Н.** Фреттинг и фреттинг-усталость высоконагруженных малоподвижных соединений ГТД и ГТУ / А.Н. Петухов // Труды XI Международной научно-технической конференции «Трибология – Машиностроению». – М.: Институт компьютерных исследований, 2016. – С. 191-192.
42. **Петухов, А.Н.** Вопросы многоцикловой усталости для материалов и деталей современных ГТД / А.Н. Петухов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2009. – № 3. – С. 172-177.
43. **Петухов, А.Н.** Метод оценки предела выносливости деталей при фреттинг-коррозии / А.Н. Петухов // Сборник трудов ЦИАМ № 1109 «Проблемы прочности и динамики в двигателестроении. – 1985. – Вып. 3. – С. 225-238.
44. **Артемов, И.И.** Дислокационная модель фреттинг-усталости в условиях вибрационного нагружения металла / И.И. Артемов, В.Д. Кревчик // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2004. – № 5. – С. 42-45.
45. **Артемов, И.И.** Модель развития фреттинг-коррозии в поверхностном слое листа рессоры / И.И. Артемов, В.Д. Кревчик, С.Б. Меньшова, В.В. Келасьев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 1. – С. 213-224.
46. **Дрязгин, А.В.** Технологическое обеспечение фреттингостойкости ёлочных замковых соединений лопаток турбин: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Дрязгин Алексей Владимирович. – Пенза, 2004. – 148 с.
47. **Ковалевский, В.В.** Малоамплитудный фреттинг-износ и фреттинг-усталость металлов и сплавов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.04 / Ковалевский Владимир Викторович. – Москва, 1986. – 36 с.
48. **Ковалевский, В.В.** Адгезионная модель износа при малоамплитудном фреттинг-процессе / В.В. Ковалевский // Трение и износ. – 1986. – Т. 7. – № 4. – С. 647-653.
49. **Ковалевский, В.В.** Совершенствование моделей малоамплитудного фреттинг – процесса / В.В. Ковалевский, Т.Э. Сергутина //

Материаловедение и производство: Юбилейный сборник научных трудов/Под ред. Г.И. Сильмана, Брянск: Изд-во БГИТА, 2000. – С. 91-101.

50. **Сергутина, Т.Э.** Силовые и энергетические закономерности в контактируемых материалах в условиях малоамплитудного фреттинга: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01 / Сергутина Татьяна Эдуардовна. – Брянск, 2003. – 160 с.

51. **Шалапко, Ю.И.** Процессы динамики поверхностных слоев при малоамплитудном фреттинге / Ю.И. Шалапко, Т.В. Тарасова // Трение и износ. – 2013. – Т. 34. - № 3. – С. 227-236.

52. **Тарасова, Т.В.** Износостойкость в условиях абразивного изнашивания и фреттинга образцов из жаропрочного кобальтового сплава, полученных методом селективного лазерного плавления / Т.В. Тарасова, А.П. Назаров, Ю.И. Шалапко // Трение и износ. – 2014. – Т. 35. - № 5. – С. 546-556.

53. **Асланян, И.Р.** Изнашивание электролитических NiP покрытий при фреттинге / И.Р. Асланян, Л.Ш. Шустер // Авиационные материалы и технологии. – 2015. – №3. – С.38-43.

54. **Асланян, И.Р.** Повышение эффективности применения износостойких электролитических покрытий: дис. ... докт. техн. наук: 05.02.04 / Асланян Ирина Рудиковна. – Уфа, 2014. – 291 с.

55. **Докшанин, С.Г.** Влияние смазочных композиций с ультрадисперсными добавками на фреттинг-усталостные процессы / С.Г. Докшанин // Вестник СибГАУ – 2014. – № 3(55) – С. 198-201.

56. **Горлов, Д.С.** Влияние типа покрытия на демпфирующую способность / Д.С. Горлов, А.В. Щепилов, О.В. Заклякова, С.И. Гаджихалилова // ТРУДЫ ВИАМ – 2018. – № 8(68) – С. 120-129.

57. **Горлов, Д.С.** Исследование фреттинг-износа твердосмазочного, шликерного и ионно-плазменного покрытий / Д.С. Горлов, В.И. Скрипак, С.А. Мубояджян, Л.П. Егорова // ТРУДЫ ВИАМ – 2017. – № 3(51) – С. 65-73.



58. **Заверюха, Г.Г.** Влияние контактных напряжений на долговечность соединяемых элементов / Г.Г. Заверюха // Ученые записки ЦАГИ – 2010. – Т. XLI. – №6. – С.62-71.
59. **Заверюха, Г.Г.** Исследование выносливости конструктивных элементов при сложном периодическом процессе нагружения: дис. ... канд. техн. наук: 01.02.06 / Заверюха Геннадий Григорьевич. – Жуковский, 1979. – 225 с.
60. **Tomlinson, G.A.** The Rusting of Steel Surfaces in Contact / G.A. Tomlinson // Proceedings of the Royal Society of London. 1927. Vol. 115. Issue 771. P. 472-483.
61. **Hills, D.A.** Mechanics of Fretting fatigue / D.A. Hills, D. Nowell. Springer. 1994. 260 pp.
62. **Улиг, Г.Г., Ревн, Р.У.** Коррозия и борьба с ней. Введение в коррозионную науку и технику: Пер. с англ. А. М. Сухотина и А. И. Хентова / А.М. Сухотин, А.И. Хентов; под ред. А. М. Сухотина. - Л.: Химия, Ленинградское отделение, 1989. – 455 с.
63. **Уотерхауз, Р.Б.** Фреттинг-коррозия / Р.Б. Уотерхауз – М.: Машиностроение, 1976. – 272 с.
64. **Хейвуд, Р.Б.** Проектирование с учетом усталости / Пер. с англ. под ред. И. Ф. Образцова. — М.: Машиностроение, 1969. – 504 с.
65. **Vingsbo, O.** On Fretting Maps / O. Vingsbo, S. Soderberg // Wear. 1988. V. 126. P. 131-147.
66. **Vincent, L.** Mechanisms and materials in fretting / L. Vincent, Y. Berthier, M.C. Dubourg, M. Godet // Wear. 1992. V. 153. P. 135-138.
67. **Stachowiak, G.W.** Engineering Tribology / G.W. Stachowiak, A.W. Batchelor Elsevier. 2005. 802 pp.
68. **Nowell, D.** Recent developments in the understanding of fretting fatigue / D. Now-ell, D. Dini, D.A. Hills // Engineering Fracture Mechanics. 2006. V. 73. P. 207-222.

69. **Bohorquez, L.** On the Prediction of the Crack Initiation Path in Fretting Fatigue / L. Bohorquez, J. Vazquez, C. Navarro, J. Dominguez // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. – 2019. – Vol. 99. – P. 140-146.
70. **Xin Liu** The Effect of Wear on Short Crack Propagation under Fretting Conditions / Liu Xin, Liu Jinxiang, Zuo Zhengxing, Zhang Huayang // International Journal of Mechanical Sciences. – 2019. – Vol. 157-158. – P. 552-560.
71. **Eduardo MartinsFontes do Rego** A Methodology for Fretting Fatigue Life Estimation Using Strain-Based Fracture Mechanics / Eduardo MartinsFontes do Rego, Marcelo Avelar Antunes, and Antonio Carlos de Oliveira Miranda // Engineering Fracture Mechanics. – 2018. – Vol. 194. – P. 24-41.
72. **Хаинг Мин** Повышение надежности малоподвижных соединений деталей авиационных двигателей, подверженных в эксплуатации влиянию фреттинг-коррозии: дис. ... канд. техн. наук: 05.07.05 / Хаинг Мин. – Москва, 2015. – 140 с.
73. **Гура, Г.С.** Качение тел с трением. Фреттинг: монография / Г.С. Гура. – Сочи: ООО «Полиграфический центр «Дория», 2009. – 295 с.
74. **Ковшов, А.Г.** Влияние динамических параметров нагружения при вибротрении на эквивалентные напряжения и скорость износа в скользящем контакте / А.Г. Ковшов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2020. – Т. 22. – № 3. – С.98-102.
75. ГОСТ 481–80 Паронит и прокладки из него. Технические условия. – Введ. 1981-01-01. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1981. – 14 с.
76. ГОСТ 10007–80 Фторопласт-4. Технические условия. – Введ. 1981-07-01. – М.: Стандартиформ, 2005. – 15 с.
77. ТУ 5728-006-93978201–2008 Прокладки уплотнительные из терморасширенного графита (ПУТГ). Технические условия. – Пермь: ООО «Силур», 2008. – 48 с.
78. ТУ 22.29.29-001-15762649–2017

79. ГОСТ 1050–2013Metalлопродукция из нелегированных конструкционных качественных и специальных сталей. Общие технические условия. – Введ. 2015-01-01. – М.: Стандартиформ, 2014. – 31 с.
80. ГОСТ 24621–2015 (ISO 868:2003) Пластмассы и эбонит. Определение твердости при вдавливании с помощью дюрометра (твердость по Шору). – Введ. 2017-01-01. – М.: Стандартиформ, 2016. – 7 с.
81. ГОСТ 9012–59 Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю. – Введ. 1960-01-01. – М.: Стандартиформ, 2007. – 38 с.
82. ГОСТ 11262–2017 Пластмассы. Метод испытаний на растяжение. – Введ. 2018-10-01. – М.: Стандартиформ, 2018. – 19 с.
83. ГОСТ 33784–2016 Материалы уплотнительные и прокладки из них. Метод определения сжимаемости и восстанавливаемости. – Введ. 2018-01-01. – М.: Стандартиформ, 2016. – 5 с.
84. Plastics – Film and sheeting – Determination of the coefficients of friction (ISO 8295:1995); German version EN ISO 8295:2004.
85. ГОСТ 23.211–80 Обеспечение износостойкости изделий. Метод испытаний материалов на изнашивание при фреттинге и фреттинг-коррозии. – Введ. 1982-01-01. – М.: Стандартиформ, 2005. – 5 с.
86. ГОСТ 2789-73 Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. – Введ. 1975-01-01. – М.: Стандартиформ, 2016. – 6 с.
87. ГОСТ 23.24-86 Обеспечение износостойкости изделий. Методы оценки износостойкости восстановленных изделий. – Введ. 1987-01-01. – М.: Стандартиформ, 2005. – 20 с.
88. ГОСТ 10705-80 Трубы стальные электросварные. Технические условия. – Введ. 1982-01-01. – М.: Стандартиформ, 2005. – 85 с.
89. ГОСТ 17375-2001 Детали трубопроводов бесшовные приварные из углеродистой и низколегированной стали. Отводы крутоизогнутые типа 3D (R=1,5 DN). Конструкция. – Введ. 2003-01-01. – М.: Стандартиформ, 2010. – 8 с.

90. ГОСТ 17376-2001 Детали трубопроводов бесшовные приварные из углеродистой и низколегированной стали. Тройники. Конструкция. – Введ. 2003-01-01. – М.: Стандартиформ, 2010. – 10 с.

91. **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.

92. **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.

93. **Крагельский, И.В.** Коэффициенты трения: справочное пособие / И.В. Крагельский, И.Э. Виноградова. – М.: МАШГИЗ, 1962. – 222.

94. **Крагельский, И.В.** Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.

95. **Ахматов, А.С.** Молекулярная физика граничного трения / А.С. Ахматов. – М.: Физматгиз, 1963. – 472 с.

96. **Загайко, С.А.** Основы теории трения и изнашивания: конспект лекций / С.А. Загайко. – Уфа: УГАТУ, 2011. – 102 с.

97. **Heise, R.** Friction between a temperature dependent viscoelastic body and rough surface / R. Heise // Friction. – 2016. – Vol. 4. – No 1. – P. 50-64.

98. **Dimaki, A.V.** Coefficient of Friction between a Rigid Conical Indenter and a Model Elastomer: Influence of Local Frictional Heating / A.V. Dimaki, V.L. Popov // Physical Mesomechanics. – 2015. – Vol. 18. – No 1. – P. 75-80.

99. **Маркова, Т.В.** Шероховатость поверхности: Методические указания / Т.В. Маркова, И.М. Крыжановская. – СПб.: Издательство Политехнического университета, 2006. – 32 с.
100. **Дерягин, Б.В.** Что такое трение?: Изд. 2-е, перераб. и доп. / Б.В. Дерягин. – М.: Изд-во Академии наук СССР, 1963. – 230 с.
101. **Михин, Н.М.** Внешнее трение твердых тел / Н.М. Михин. – М.: Наука, 1977. – 221 с.
102. **Доценко, А.И.** Основы трибологии: учебник / А.И. Доценко, И.А. Буяновский. – М.: ИНФРА-М, 2020. – 336 с.
103. **Полюшкин, Н.Г.** Основы теории трения, износа и смазки: учеб. Пособие / Н.Г. Полюшкин. – Красноярск: КГАУ, 2013. – 192 с.
104. **Чичинадзе, А.В.** Основы трибологии (трение, износ, смазка) / А.В. Чичинадзе, Э.Д. Браун, Н.А. Буше и др.; Под общ. ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2001. – 664 с.
105. **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.
106. **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.
107. **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.

108. **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.

109. **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.

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

111. **Якубович, В.А.** Вибрационная диагностика трубопроводов компрессорных станций / В.А. Якубович. – Москва, Недра. – 2004. – 334 с.

112. **Ландау, Л.Д.** Теоретическая физика: учебное пособие. В 10 т. Т. VI. Гидродинамика / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Наука, 1986. – 736 с.

113. ГОСТ 32388-2013 Трубопроводы технологические. Нормы и методы расчета на прочность, вибрацию и сейсмические воздействия. – Введ. 2014-08-01. – М.: Стандартинформ, 2016. – 108 с.

114. ГОСТ 11284-75 Отверстия сквозные под крепежные детали. Размеры. – Введ. 1977-01-01. – М.: Стандартинформ, 2006. – 3 с.

115. **Биргер, И.А.** Резьбовые и фланцевые соединения / И.А. Биргер, Г.Б. Иосилевич. – М.: Машиностроение, 1990. – 368 с.

116. РД 37.001.131-89 Затяжка резьбовых соединений. Нормы затяжки и технические требования. – Нижний Новгород, 1989. – 19 с.

117. **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.

118. **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 «Губкинский университет в решении вопросов нефтегазовой отрасли России». 19-21 апреля 2022 г. – М.: РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2022. – С. 421-422.

119. ГОСТ 15180-86 Прокладки плоские эластичные. Основные параметры и размеры. – Введ. 1988-01-01. – М.: Издательство стандартов, 1987. – 21 с.



Проверено. Разрешаю в печать	
_____	_____
(подпись)	(Ф.И.О.)
_____ 20__ г.	

Рекомендации организации

Документы нормативные для проектирования,  
строительства и эксплуатации объектов ПАО «Газпром»

**МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРЕДЕЛЬНО  
ДОПУСТИМЫХ РЕЖИМОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ  
ТРУБОПРОВОДОВ И ОБОРУДОВАНИЯ  
ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СТАНЦИЙ**

**Р Газпром 2-2.3-1292—2023 (26-4.0-003—2023)**

ИЗДАНИЕ ОФИЦИАЛЬНОЕ

Санкт-Петербург 2024



### Введение

Настоящие рекомендации разработаны в соответствии с перечнем Основных направлений НИОКР ПАО «Газпром», определенных в составе Программы инновационного развития ПАО «Газпром» до 2025 года решением Совета директоров ПАО «Газпром» от 21.06.2016 № 2762, пункт 3.1 «Разработка технологий, технических средств и организационных мероприятий, направленных на повышение безопасности производственного комплекса Общества (экологической, промышленной, информационной, от противоправных действий и др.)».

Настоящие рекомендации разработаны по поручению Председателя Правления ПАО «Газпром» А.Б. Миллера от 26.09.2017 № 01-3762 и в рамках программы научных исследований и разработок на 2018–2020 годы (РД от 10.11.2017 № 01-18).

Целью разработки настоящих рекомендаций является создание комплексной методики оценки предельно допустимых режимов эксплуатации газораспределительных станций, работающих в режиме краткосрочной повышенной производительности при движении высокоскоростного газового потока, и их воздействия на состояние основных элементов трубопроводной обвязки и оборудования газораспределительных станций.

Инновационная составляющая настоящих рекомендаций содержится в комплексной методике оценки и влияния высокоскоростного потока газа на работоспособность элементов и узлов трубопроводной обвязки и оборудования газораспределительных станций.

Настоящие рекомендации разработаны ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина» по договору с ПАО «Газпром» от 12.11.2019 № 7053-308-19-9 «Исследование зависимости износа элементов газораспределительных станций от скорости потока газа».

Разработка настоящих рекомендаций выполнена авторским коллективом в следующем составе: д.т.н. О.Ю. Елагина, к.т.н. А.Г. Буклаков, к.т.н. А.В. Бурякин, к.т.н. И.В. Волков, к.т.н. Ю.С. Дубинов, О.Б. Дубинова (ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина»); М.П. Посмак, А.В. Лигачев, Н.С. Шабалин (ПАО «Газпром»).

Пунктирной рамкой по тексту настоящих рекомендаций выделены положения, имеющие региональные особенности применения в ПАО «Газпром», которые приведены в региональных приложениях 1, 2.

**ПРИЛОЖЕНИЕ 2**

Таблица П2.1 – Замеры скорости потока газа и параметров вибрации на ГРС

Параметры	Объект №4 (2018 г)													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Производительность, нм <sup>3</sup> /ч	-	-	-	-	-	-	-	-	-	83333	83333	83333	83333	83333
Температура газа, С	30	10	10	30	10	10	30	10	10	30	10	10	30	10
Давление, МПа	4,35	1,0	1,0	4,35	1,0	1,0	4,35	1,0	1,0	4,35	1,0	1,0	4,35	1,0
Коэффициент сжимаемости	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,11	1,04	1,04	1,11	1,04
Диаметр трубопровода, м	0,219	0,219	0,325	0,219	0,219	0,325	0,219	0,219	0,325	0,219	0,219	0,325	0,219	0,219
Фактическая плотность газа, кг/м <sup>3</sup>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	24,6	6,5	6,5	24,6	6,5
Производительность фактическая, м <sup>3</sup> /ч	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2428	9262	9262	2428	9262
Скорость газа, м/с	-	-	-	-	-	-	-	-	-	17,9	68,4	31	17,9	68,4
Виброперемещение, мкм	5,1	6,3	6,1	7,2	5,9	6,2	5,8	4,7	5,5	1620	1320	325	1780	1600
Виброскорость (среднеквадратическое значение), мм/с	0,2	1,8	2,1	1,2	1,3	2	1,5	1,3	1,6	139	96	25	123	92
Частота вибрации, Гц	9	63	76	37	48	71	57	61	64	19	16	17	15	13

Продолжение таблицы П2.1

Параметры	Объект №4 (2018 г)													
	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
Производительность, нм <sup>3</sup> /ч	83333	-	-	-	83333	83333	83333	83333			83333			83333
Температура газа, С	10	30	10	10	30	10	10	30	10	10	30	10	10	30
Давление, МПа	1,0	4,35	1,0	1,0	4,35	1,0	1,0	4,35	1,0	1,0	4,35	1,0	1,0	4,35
Коэффициент сжимаемости	1,04	-	-	-	1,11	1,04	1,04	1,11	1,04	1,04	1,11	1,04	1,04	1,11
Диаметр трубопровода, м	0,325	0,219	0,219	0,325	0,219	0,219	0,325	0,219	0,219	0,325	0,219	0,219	0,325	0,219
Фактическая плотность газа, кг/м <sup>3</sup>	6,5	-	-	-	24,6	6,5	6,5	24,6	6,5	6,5	24,6	6,5	6,5	24,6
Производительность фактическая, м <sup>3</sup> /ч	9262	-	-	-	2428	9262	9262	2428	9262	9262	2428	9262	9262	2428
Скорость газа, м/с	31	-	-	-	17,9	68,4	31	17,9	68,4	31	17,9	68,4	31	17,9
Виброперемещение, мкм	390	4,8	5,4	6,1	1391	900	370	1418	1237	521	1710	1411	1100	690
Виброскорость (среднеквадратическое значение), мм/с	31	1,2	1,2	1,4	55	38	26	47	49	31	29	75	42	23
Частота вибрации, Гц	17	55	49	50	9	9	15	7	9	13	4	12	8	7

### ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Опираясь на средние значения коэффициента трения скольжения, представленные в таблице 3.6 раздела 3.3, для исследованных пар трения рассчитаны удельные тангенциальные нагрузки (таблица ПЗ.1).

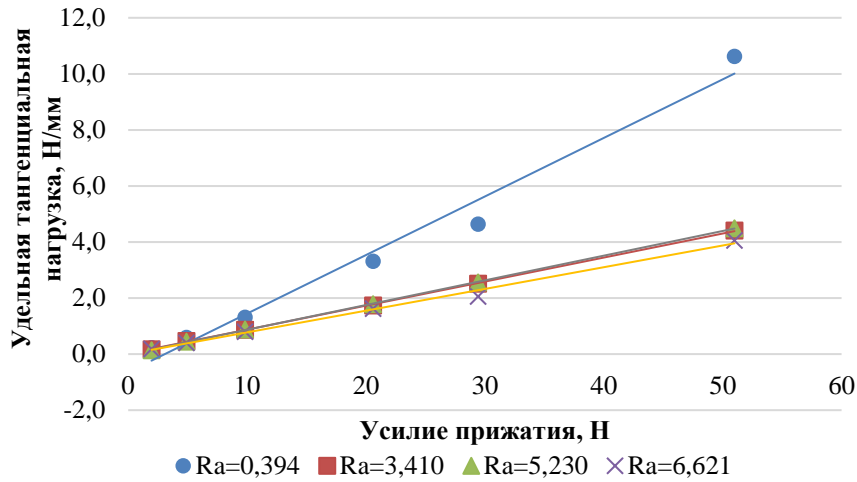
Таблица ПЗ.1 – Расчетные значения удельной тангенциальной нагрузки

Контактное давление, $10^{-3}$ МПа	Удельная тангенциальная нагрузка ( $t_{y0}$ ), МПа в зависимости от параметра шероховатости ( $R_a$ ), мкм уплотнительной поверхности фланца			
	0,394	3,410	5,230	6,621
полиуретан-сталь 20 (25 $H_D$ )				
0,5	0,233	0,176	0,140	0,178
1,2	0,594	0,469	0,446	0,405
2,3	1,315	0,870	0,878	0,797
4,9	3,317	1,735	1,786	1,625
7,0	4,641	2,519	2,563	2,059
12,1	10,625	4,411	4,493	4,059
ТРГ-сталь 20 (27 $H_D$ )				
0,5	0,685	0,978	0,963	0,380
1,2	1,578	2,493	1,988	1,347
2,3	3,079	4,646	3,788	2,943
4,9	6,384	9,000	8,094	6,812
7,0	9,178	12,675	11,638	9,511
12,1	19,789	19,724	16,293	16,613
фторопласт-сталь 20 (60 $H_D$ )				
0,5	0,057	0,120	0,087	0,036
1,2	0,110	0,283	0,239	0,163
2,3	0,158	0,488	0,468	0,239
4,9	0,308	0,996	1,075	0,708
7,0	0,464	1,037	1,276	0,768
12,1	0,835	1,760	2,181	1,726
паронит-сталь 20 (65 $H_D$ )				
0,5	0,114	0,156	0,155	0,143
1,2	0,306	0,386	0,423	0,350
2,3	0,658	0,847	0,813	0,689
4,9	1,299	1,755	1,755	1,670
7,0	1,758	2,491	2,290	2,265
12,1	2,898	4,101	4,092	3,604

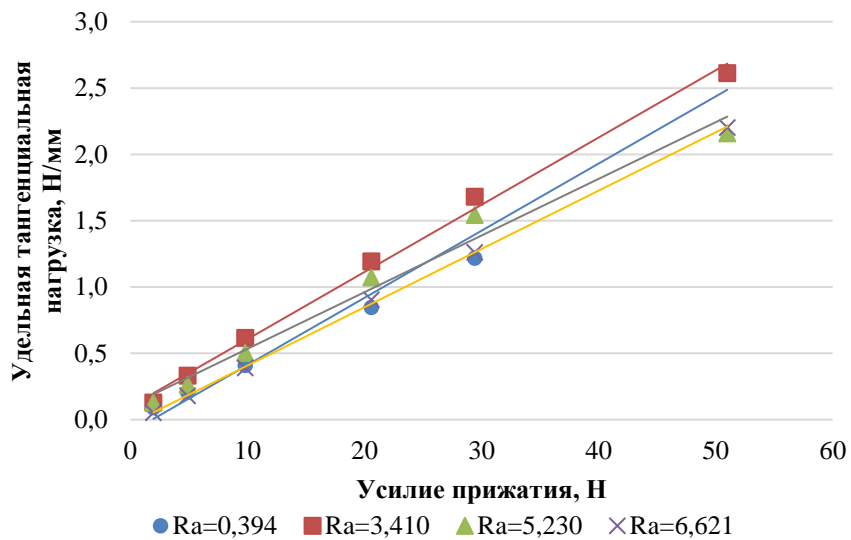
Основываясь на данных таблицы ПЗ.1, построены зависимости удельной тангенциальной нагрузки от усилия прижатия и параметра

шероховатости  $R_a$  уплотнительной поверхности фланца для исследованных пар трения (рисунок ПЗ.1). Путем аппроксимации для каждого сопряжения определены зависимости (таблица ПЗ.2), которые в общем случае имеют вид:

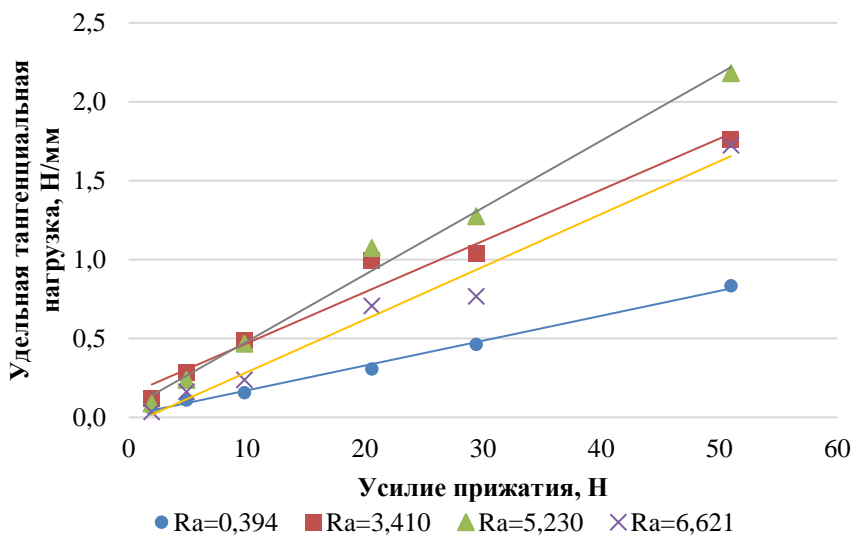
$$t_{уд} = k_1 \cdot N + k_2 \quad (\text{ПЗ.1})$$



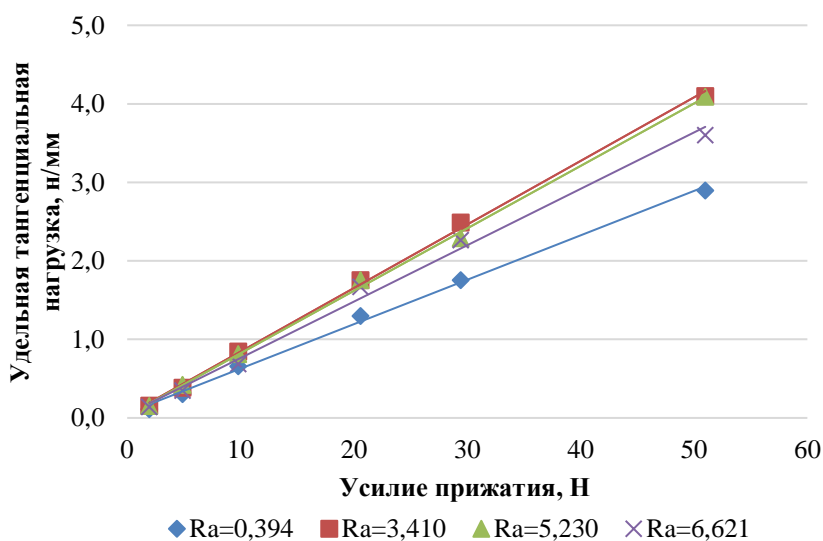
а



б



В



Г

Рисунок ПЗ.1 - Изменение удельных тангенциальных нагрузок в зоне контакта двух поверхностей в зависимости от величины усилия прижатия 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  $H_D$ )

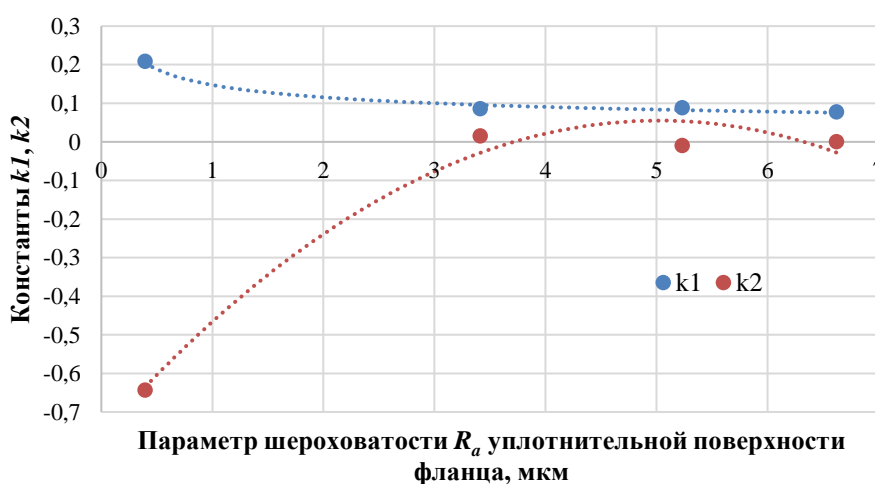
Таблица ПЗ.2 – Зависимости для определения удельных тангенциальных нагрузок в зависимости от микрорельефа уплотнительной поверхности фланца

Параметр шероховатости ( $R_a$ ), мкм	Уравнение	Коэффициент достоверности аппроксимации ( $R^2$ )	Значения коэффициентов	
			$k_1$	$k_2$
полиуретан-сталь 20 (25 $H_D$ )				
0,394	$t_{уд} = 0,2089 \cdot N - 0,6436$	0,9801	0,2089	-0,6436

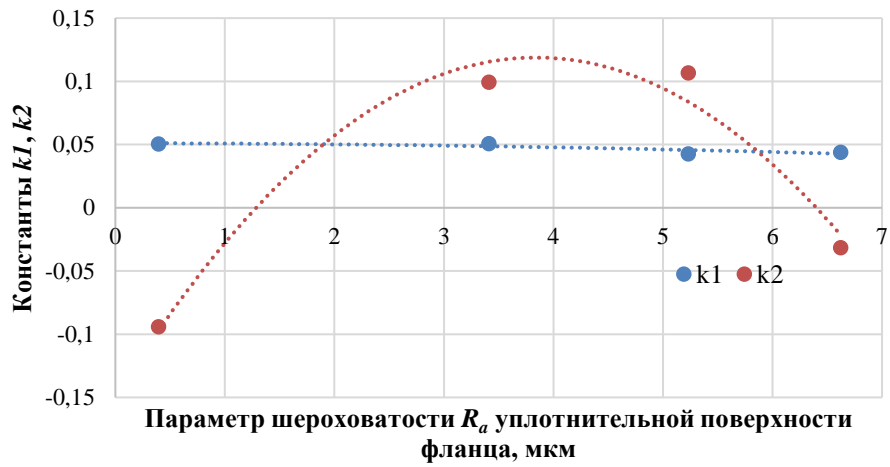
Продолжение таблицы ПЗ.2

Параметр шероховатости ( $R_a$ ), мкм	Уравнение	Коэффициент достоверности аппроксимации ( $R^2$ )	Значения коэффициентов	
			$k_1$	$k_2$
полиуретан-сталь 20 (25 $H_D$ )				
3,410	$t_{уд} = 0,0857 \cdot N + 0,0151$	0,9997	0,0857	0,0151
5,230	$t_{уд} = 0,0881 \cdot N - 0,0095$	0,9998	0,0881	-0,0095
6,621	$t_{уд} = 0,0775 \cdot N + 0,0003$	0,9938	0,0775	0,0003
ТРГ-сталь 20 (27 $H_D$ )				
0,394	$t_{уд} = 0,0506 \cdot N - 0,0941$	0,984	0,0506	-0,0941
3,410	$t_{уд} = 0,0507 \cdot N + 0,0995$	0,9353	0,0507	0,0995
5,230	$t_{уд} = 0,0427 \cdot N + 0,1067$	0,9803	0,0427	0,1067
6,621	$t_{уд} = 0,044 \cdot N - 0,0315$	0,9997	0,044	-0,0315
фторопласт-сталь 20 (60 $H_D$ )				
0,394	$t_{уд} = 0,0158 \cdot N + 0,0128$	0,9953	0,0158	0,0128
3,410	$t_{уд} = 0,0324 \cdot N + 0,1448$	0,974	0,0324	0,1448
5,230	$t_{уд} = 0,0424 \cdot N + 0,056$	0,9914	0,0424	0,056
6,621	$t_{уд} = 0,0334 \cdot N - 0,0487$	0,9786	0,0334	-0,0487
паронит-сталь 20 (65 $H_D$ )				
0,394	$t_{уд} = 0,0566 \cdot N + 0,0628$	0,9973	0,0566	0,0628
3,410	$t_{уд} = 0,0809 \cdot N + 0,0351$	0,9986	0,0809	0,0351
5,230	$t_{уд} = 0,0795 \cdot N + 0,0287$	0,9986	0,0795	0,0287
6,621	$t_{уд} = 0,0718 \cdot N + 0,0452$	0,9942	0,0718	0,0452

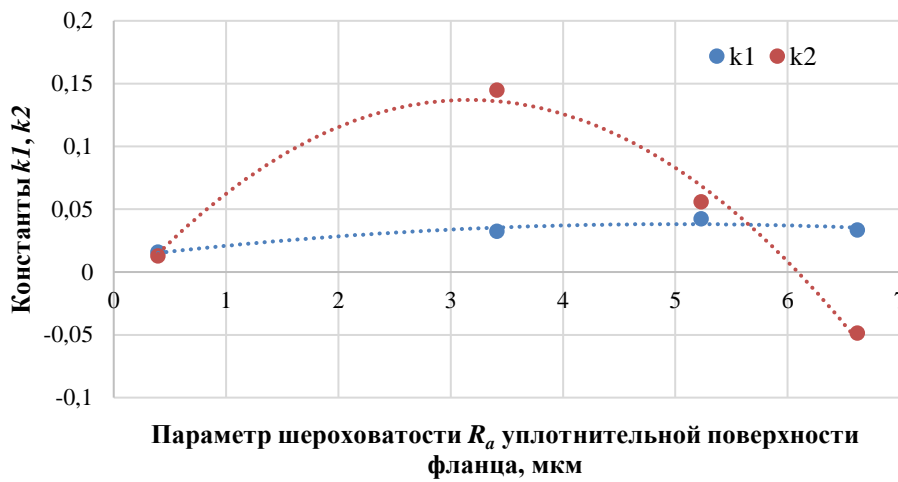
По методике, описанной в разделе 3.2, определены зависимости для констант  $k_1$  и  $k_2$  (рисунок ПЗ.2, таблица ПЗ.3).



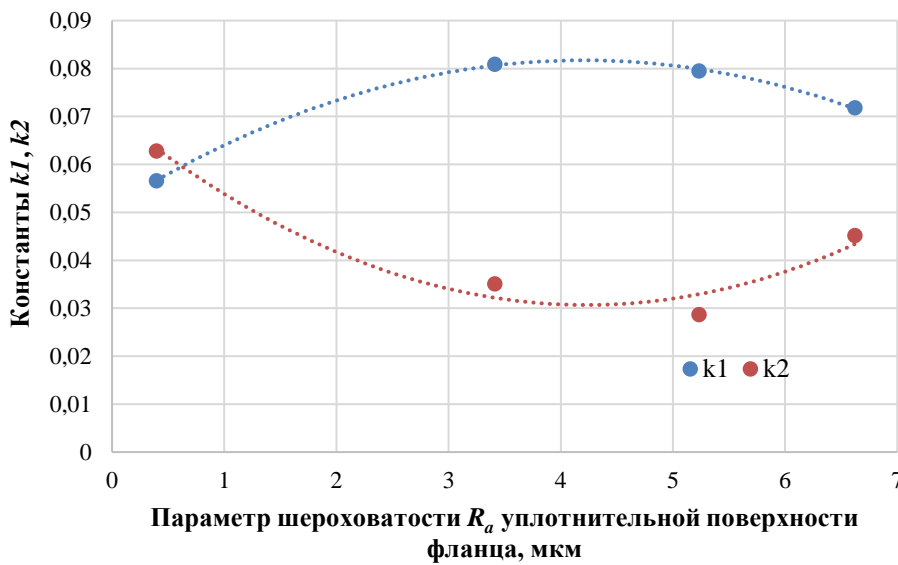
а



б



в



г

Рисунок ПЗ.2 – Изменение констант  $k_1$  и  $k_2$  в зависимости от параметра шероховатости  $R_a$  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 ( $65 H_D$ )



Таблица ПЗ.3 – Зависимости для определения констант  $k_1$  и  $k_2$

Пара трения	Уравнение для констант $k_1$ и $k_2$
Полиуретан-сталь 20	$k_1 = 0,1474 \cdot R_a^{-0,352};$ $k_2 = -0,0322 \cdot R_a^2 + 0,3236 \cdot R_a - 0,7576$
ТРГ-сталь 20	$k_1 = -0,0002 \cdot R_a^2 - 0,0001 \cdot R_a + 0,0511;$ $k_2 = -0,0182 \cdot R_a^2 + 0,1396 \cdot R_a - 0,1494$
Фторопласт-сталь 20	$k_1 = -0,0011 \cdot R_a^2 + 0,0108 \cdot R_a + 0,0111;$ $k_2 = -0,016 \cdot R_a^2 + 0,1011 \cdot R_a - 0,0228$
Паронит-сталь 20	$k_1 = -0,0017 \cdot R_a^2 + 0,0145 \cdot R_a + 0,0512;$ $k_2 = 0,0022 \cdot R_a^2 - 0,0188 \cdot R_a + 0,0704$

На основании таблицы ПЗ.3 и учитывая выражение (3.30) из раздела 3.3 получены следующие зависимости для расчета коэффициента трения скольжения:

Полиуретан-сталь 20

$$f_{\text{СК}} = \frac{(0,1474 \cdot R_a^{-0,352} \cdot N - 0,0322 \cdot R_a^2 + 0,3236 \cdot R_a - 0,7576) \cdot \delta}{N} \quad (\text{ПЗ.2})$$

ТРГ-сталь 20

$$f_{\text{СК}} = \frac{((-0,0002 \cdot R_a^2 - 0,0001 \cdot R_a + 0,0511) \cdot N - 0,0182 \cdot R_a^2 + 0,1396 \cdot R_a - 0,1494) \cdot \delta}{N} \quad (\text{ПЗ.3})$$

Фторопласт-сталь 20

$$f_{\text{СК}} = \frac{((-0,0011 \cdot R_a^2 + 0,0108 \cdot R_a + 0,0111) \cdot N - 0,016 \cdot R_a^2 + 0,1011 \cdot R_a - 0,0228) \cdot \delta}{N} \quad (\text{ПЗ.4})$$

Паронит-сталь 20

$$f_{\text{СК}} = \frac{((-0,0017 \cdot R_a^2 + 0,0145 \cdot R_a + 0,0512) \cdot N + 0,0022 \cdot R_a^2 - 0,0188 \cdot R_a + 0,0704) \cdot \delta}{N} \quad (\text{ПЗ.5})$$

## ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Основными параметрами, влияющими на герметичность фланцевого соединения, являются давление обжатия и коэффициент обжатия.

Согласно ГОСТ 33259–2015 [1] усилие для смятия прокладки при затяжке фланцевого соединения вычисляют по формуле:

$$P_{\text{обж}} = 0,5 \cdot \pi \cdot D_{\text{сп}} \cdot b_0 \cdot q_{\text{обж}} \quad (\text{П4.1})$$

а усилие, необходимое для обеспечения герметичности фланцевого соединения определяется уравнением:

$$R_{\text{н}} = \pi \cdot D_{\text{сп}} \cdot b_0 \cdot m \cdot P \quad (\text{П4.2})$$

где  $D_{\text{сп}}$  – расчетный диаметр плоской прокладки, мм:

$$D_{\text{сп}} = D_{\text{нп}} - b_0 \quad (\text{П4.3})$$

$D_{\text{нп}}$  – наружный диаметр прокладки, мм;

$b_0$  – эффективная ширина прокладки, мм:

$$b_0 = b_{\text{п}}, \text{ при } b_{\text{п}} \leq 15 \text{ мм}, \quad (\text{П4.4})$$

$$b_0 = 3,8 \times \sqrt{b_{\text{п}}}, \text{ при } b_{\text{п}} > 15 \text{ мм} \quad (\text{П4.5})$$

$b_{\text{п}}$  – ширина прокладки, мм.

В соответствии с [113, 115] произведение прокладочного коэффициента на рабочее давление в трубопроводе представляет собой минимальное контактное давление на прокладку, предотвращающее утечку рабочей среды:

$$q_{\text{обж}}^{\text{min}} = m \cdot P \quad (\text{П4.6})$$

Эксплуатация фланцевого соединения в диапазоне нормативно допустимых параметров определяется диапазоном контактных давлений от  $q_{\text{обж}}$  (таблица 2.1) до  $q_{\text{обж}}^{\text{min}}$ . Снижение давления обжатия ниже минимального значения определяет начало процесса потери герметичности.

Давление обжатия во фланцевом соединении рассчитывается исходя из податливости прокладки, которая, с одной стороны, согласно ГОСТ Р 34233.4–2017 [2] выражается формулой:

$$\gamma_{\text{п}} = \frac{h_{\text{п}} \cdot k_{\text{обж}}}{E_{\text{п}} \cdot \pi \cdot D_{\text{сп}} \cdot b_{\text{п}}} \quad (\text{П4.7})$$

а с другой стороны, представляет собой отношение деформации прокладки к вызывающей ее силе:

$$\gamma_{\Pi} = \frac{\Delta h}{P_{\text{обж}}} \quad (\text{П4.8})$$

где  $\Delta h$  - уменьшение толщины прокладки после свинчивания фланцев, мм.

Коэффициент обжатия является параметром, характеризующим величину сжатия прокладки при сборке фланцевого соединения, зависящий от исходной толщины прокладки и величины зазора, сформированного после сборки и свинчивания фланцевого соединения [108]:

$$k_{\text{обж}} = \frac{h_{\text{к}}}{h_{\Pi}} \quad (\text{П4.9})$$

где  $h_{\text{к}}$  – толщина прокладки после свинчивания фланцевого соединения, мм.

Величина уменьшения толщины прокладки после свинчивания представляет собой разницу между толщиной прокладки до и после сжатия:

$$\Delta h = h_{\Pi} - h_{\text{к}} = h_{\Pi} \cdot (1 - k_{\text{обж}}) \quad (\text{П4.10})$$

На основании формул (П3.1), (П3.4), (П3.5), (П3.7) и (П3.8) выведены уравнения для вычисления давления обжатия в зависимости от ширины прокладки:

$$q_{\text{обж}} = \frac{2 \cdot \Delta h \cdot E_{\Pi}}{h_{\Pi} \cdot k_{\text{обж}}}, \text{ при } b_{\Pi} \leq 15 \text{ мм} \quad (\text{П4.11})$$

$$q_{\text{обж}} = \frac{2 \cdot \Delta h \cdot E_{\Pi} \cdot b_{\Pi}}{h_{\Pi} \cdot k_{\text{обж}} \cdot b_0}, \text{ при } b_{\Pi} > 15 \text{ мм, } b_0 = 3,8 \cdot \sqrt{b_{\Pi}} \quad (\text{П4.12})$$

Принимая во внимание формулу (П4.10), зависимости (П4.11) и (П4.12) преобразуются в следующие уравнения:

$$q_{\text{обж}} = \frac{2 \cdot E_{\Pi} \cdot (1 - k_{\text{обж}})}{k_{\text{обж}}}, \text{ при } b_{\Pi} \leq 15 \text{ мм} \quad (\text{П4.13})$$

$$q_{\text{обж}} = \frac{2 \cdot E_{\Pi} \cdot (1 - k_{\text{обж}}) \cdot b_{\Pi}}{k_{\text{обж}} \cdot b_0}, \text{ при } b_{\Pi} > 15 \text{ мм, } b_0 = 3,8 \cdot \sqrt{b_{\Pi}} \quad (\text{П4.14})$$

Таким образом, исходя из уравнений (П4.13), (П4.14) для прокладок ширина, которых не превышает 15 мм, фактический коэффициент обжатия определяется исходя из фактического давления обжатия и условного модуля сжатия для каждого материала, а для прокладок шириной больше 15 мм коэффициент обжатия зависит также от ее ширины:

$$k_{\text{обж } i}^{\text{факт}} = \frac{2 \cdot E_{\text{п}}}{q_{\text{обж } i}^{\text{факт}} + 2 \cdot E_{\text{п}}}, (i=0, 1, 2, \dots n), \text{ при } b_{\text{п}} \leq 15 \text{ мм} \quad (\text{П4.15})$$

$$k_{\text{обж } i}^{\text{факт}} = \frac{2 \cdot E_{\text{п}} \cdot b_{\text{п}}}{q_{\text{обж } i}^{\text{факт}} \cdot b_0 + 2 \cdot E_{\text{п}} \cdot b_{\text{п}}}, (i=0, 1, 2, \dots n), \text{ при } b_{\text{п}} > 15 \text{ мм}, b_0 = 3,8 \cdot \sqrt{b_{\text{п}}} \quad (\text{П4.16})$$

где  $i$  – межремонтный период ( $i=0$  соответствует начальным условиям обжатия прокладки при регламентированном давлении обжатия (таблица 2.1));

$k_{\text{обж } i}^{\text{факт}}$  – фактический коэффициент обжатия в определенный межремонтный период;

$q_{\text{обж } i}^{\text{факт}}$  – фактическое давление обжатия, МПа, при этом  $q_{\text{обж } 0}^{\text{факт}}$  соответствует регламентированному ГОСТ Р 34233.4 – 2017 (Приложение И) [3] давлению обжатия прокладки  $q_{\text{обж}}$  (таблица 2.1), а  $k_{\text{обж } 0}^{\text{факт}}$  представляет собой исходный коэффициент обжатия, сформированный при  $q_{\text{обж}}$ .

Изнашивание прокладки при фреттинге приводит к снижению ее толщины, изменению величины зазора между фланцами, и как следствие, изменению коэффициента обжатия. Учитывая данные факты, а также наличие двух зон контакта фланец–прокладка во фланцевом соединении, давление обжатия при эксплуатации в условиях вибрации будет определяться по следующей зависимости:

$$q_{\text{обж } i}^{\text{факт}} = 2 \cdot E_{\text{п}} \cdot \frac{(1 - k_{\text{обж } i-1}^{\text{факт}}) \cdot (h_{\text{п}} - 2 \cdot U_{\phi})}{h_{\text{п}} \cdot k_{\text{обж } i-1}^{\text{факт}}}, (i=1, 2, \dots n), \text{ при } b_{\text{п}} \leq 15 \text{ мм}, \quad (\text{П4.17})$$

$k_{\text{обж } i-1}^{\text{факт}}$  – по формуле ПЗ.15

$$q_{\text{обж } i}^{\text{факт}} = 2 \cdot E_{\text{п}} \cdot \frac{(1 - k_{\text{обж } i-1}^{\text{факт}}) \cdot (h_{\text{п}} - 2 \cdot U_{\phi})}{h_{\text{п}} \cdot k_{\text{обж } i-1}^{\text{факт}}} \cdot \frac{b_{\text{п}}}{b_0}, (i=1, 2, \dots n), \quad (\text{П4.18})$$

при  $b_{\text{п}} > 15 \text{ мм}$ ,  $b_0 = 3,8 \cdot \sqrt{b_{\text{п}}}$ ,  $k_{\text{обж } i-1}^{\text{факт}}$  – по формуле ПЗ.16

## ПРИЛОЖЕНИЕ 5

Таблица П5.1 – Пример расчета количества выступов для профилированной поверхности фланца

<b>Исходные характеристики фланца и уплотнительного материала</b>	
Наружный диаметр уплотнительной поверхности фланца ( $D_2$ ), мм	212
Внутренний диаметр уплотнительной поверхности фланца ( $DN$ ), мм	150
Давление обжатия для паронита ( $p$ ), МПа	20
Предельно допустимое давление для паронита ( $p_{кр}$ ), МПа	130
Коэффициент трения скольжения для пары трения сталь-паронит ( $f_{ск}$ )	0,320
<b>Принятые для расчета геометрические параметры выступа</b>	
Угол наклона выступа ( $\varphi$ ), °	80
Высота выступа $H_в$ , мм	1,0
Ширина выступа $a_в$ , мм	3,0
Отступ первого выступа от внутреннего края уплотнительной поверхности фланца ( $x_1$ ), мм	2,0
Отступ последнего выступа от внешнего края уплотнительной поверхности фланца ( $x_2$ ), не менее мм	2,0
Расположение выступов	концентрическое

Продолжение таблицы П5.1

<b>Результаты расчета</b>	
Площадь уплотнительной поверхности фланца ( $S_{фл}$ ), $мм^2$	17618,54
Предельно допустимая площадь выступов ( $S_ε^{max}$ ), $мм^2$	15772,46
Расстояние между выступами ( $b_ε$ ), $мм$	3,35
Условие для соблюдения отступа от внешнего края уплотнительной поверхности фланца ( $R-x_1$ ), $мм$	104
Расчетная площадь выступов ( $S_ε^{общ}$ ), $мм^2$ :	
1 выступ	1478,94
2 выступ	1598,62
3 выступ	1718,31
4 выступ	1837,99
5 выступ	1957,68
Условие $r + x + m \cdot a + (m - 1) \cdot b \leq R - x$ для 5 выступов	<b>105,4 &gt; 104</b> <b>Не выполняется</b>
Условие $r + x + m \cdot a + (m - 1) \cdot b \leq R - x$ для 4 выступов	<b>99,1 &lt; 104</b> <b>Выполняется</b>
Общая площадь 4 выступов, $мм^2$	6633,86
Сравнение $S_ε^{общ}$ и $S_ε^{max}$	<b>6,633,86 &lt; 15772,46</b> <b>Выполняется</b>
<b>Расчет напряжений в уплотнительном материале</b>	
Критическое касательное напряжение, $МПа$	65,0
Фактическое касательное напряжение, $МПа$	17,0