

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ
ИНСТИТУТ (НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»**

На правах рукописи

Бойков Андрей Александрович



**Контактное взаимодействие металлических профилированных
уплотнений с сопрягаемыми поверхностями фланцев в соединениях
трубопроводов**

Специальность: 01.02.06 – «Динамика, прочность машин, приборов и
аппаратуры»

Автореферат диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель: доктор технических наук
профессор
Миронова Любовь Ивановна

Москва 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель:	Миронова Любовь Ивановна – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры 914 «Проектирование сложных технических систем» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»
Официальные оппоненты:	Кравченко Игорь Николаевич доктор технических наук, преподаватель отдела по подготовке научных кадров (Аспирантуры) федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук» (г. Москва) Хейло Сергей Валерьевич доктор технических наук, заведующий кафедрой теоретической и прикладной механики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина» (г. Москва)
Ведущая организация:	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта» (г. Москва)

Защита диссертации состоится 22 июня 2022 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.125.05 в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4. С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» и на сайте https://mai.ru/events/defence/?ELEMENT_ID=164672.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2022 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.125.05



Федотенков Григорий Валерьевич

Общая характеристика работы

Актуальность работы. В настоящее время в нефтегазовой промышленности, энергетическом и атомном машиностроении применяют системы трубопроводов технологического, магистрального и другого назначения. Они имеют сложные разветвленные конструкции значительной протяженности, состоящие из множества труб, которые в большинстве случаев стыкуются с помощью фланцевых соединений. Трубопроводы также применяются в передвижных агрегатах, смазочных системах механизмов, двигателях и прочих изделий авиа и ракетостроения. Вопросам прочности и эксплуатационной надежности таких систем уделяется огромное значение не только на стадии проектирования, но и в процессе изготовления, где одним из главных качественных показателей является герметичность уплотняемых стыков, обеспечивающая герметизацию систем, работающих при высоких давлениях.

Фланцевые соединения в системах трубопроводов применяются для соединения узлов и агрегатов, которые по технологическим, конструкционным или эксплуатационным причинам не могут быть выполнены в виде монолитной конструкции. В изделиях, требующих герметизацию стыка, часто применяют конструкции с неконтактирующими стыками и с самоуплотняющимися прокладками. К перспективным техническим решениям относят применение в стыках трубопроводов фланцевых соединений с металлическими уплотнениями специального профиля, например, с «Z» и «С» образными профильными сечениями, которые обеспечивают герметичность системы за счет плотного контакта при внедрении уплотнения в поверхности фланцев. Такие фланцевые соединения позволяют существенно снизить металлоемкость уплотняемых стыковых конструкций трубопроводов.

Следует отметить, что эксплуатационная безопасность ряда объектов гражданского и военного назначения определяется не только прочностью, но и герметичностью их систем. Превышение предельно допустимой утечки

уплотняемой среды может являться причиной параметрического отказа узла или агрегата. Так, например, известны случаи, когда аварии ракетной техники связаны с разгерметизацией соединений их пневмогидросистем (гибель американского космического корабля многоразового использования «Challenger» 28 января 1986 г.). К ним относятся масштабные техногенные катастрофы в результате взрыва на магистральных газопроводах, разлития нефти или отравляющих веществ и.т.п.

Вопросы прочности фланцевых соединений трубопроводов ответственного назначения не могут быть рассмотрены в рамках принятых подходах к расчетам на прочность деталей машин. Они требуют проведения комплексного исследования упругопластического состояния элементов конструкции, определения действующих контактных нагрузок и напряжений в зонах контакта, а также выявления влияния на требуемые показатели качества ряда геометрических параметров и физико-механических факторов вследствие контактного взаимодействия всех деталей уплотняемого стыка.

Расчеты трубопроводов на прочность проводятся на основе принятых нормативных документов, которые в настоящее время не рассматривают применение конструкций уплотняемых стыков с новыми техническими решениями. В этой связи, разработка адекватных математических моделей и методов исследования, проведение моделирования контактного взаимодействия металлических профилированных уплотнений с сопрягаемыми поверхностями фланцев соединений трубопроводов представляет собой актуальную проблему, имеющую как теоретическое, так и практическое значение.

Целью работы является разработка математических моделей и методов исследования особенностей контактного взаимодействия профилированных металлических уплотнений с сопрягаемыми поверхностями фланцев, вывод аналитических зависимостей, позволяющих получить решение конструкционно-контактных задач в виде параметров контакта уплотнения и фланца для оценки конструкционной прочности,

герметичности соединения и более полного использования ресурсов уплотняемых узлов.

Для достижения указанной цели поставлены и решены следующие основные задачи:

1. Разработан метод исследования контактного взаимодействия металлических профилированных уплотнений с сопрягаемыми поверхностями фланцев в соединениях трубопроводов, учитывающий особенности формирования уплотняемого стыка на этапах сборки и силового нагружения, позволяющий существенно снизить металлоемкость конструкции фланцевых соединений и повысить эксплуатационную надежность.

2. На основании проведенного исследования упругопластического деформирования поверхностей фланца, обусловленного контактной нагрузкой при внедрении металлического профилированного уплотнения разнообразной формы, дано теоретическое обоснование применения решений Хилла в рассмотрении конструкционно-контактных задач по определению предельных контактных нагрузок и деформаций, а также геометрических параметров сопрягаемых деталей фланцевого соединения.

3. Разработаны математические модели и получены аналитические зависимости, позволяющие определить предельные внешние нагрузки и плотность контакта уплотняемого стыка, требуемое усилие затяжки узла с учётом всех деформаций контактирующих деталей.

4. На основе полученных результатов исследования плотности контакта, обусловленного сжатием сопрягаемых деталей соединения, проведено математическое моделирование массопереноса рабочей среды и дана оценка степени герметичности уплотняемого стыка по критерию в виде функции проницаемости контакта для металлического уплотнения с клиновидной кромкой.

Объектом исследования является фланцевое соединение трубопроводов с неконтактирующими стыками и с самоуплотняющимися металлическими прокладками Z-образного профиля различной формы.

Предметом исследования является контактное взаимодействие металлических профилированных уплотнений с сопрягаемыми поверхностями фланцев в соединениях трубопроводов, упругопластическое деформирование поверхностей фланцев и контактная нагрузка, обусловленные механической сборкой уплотняемого узла, контактным взаимодействием его элементов, включая поля распределения пластических слоев и перемещения поверхностей.

Научная новизна заключается в следующем.

1. Для решения задачи о нахождении предельных контактных давлений и определении формы контактной поверхности фланца, обусловленных контактным взаимодействием Z-образного металлического уплотнения, предложен графоаналитический метод исследования упругопластического деформирования фланца. В сравнении с решениями Хилла применительно к внедрению в жестко-пластическую среду призматического клина получены соотношения величины контактного давления, формы и длины контакта для цилиндрического фланца конечных размеров при внедрении индентора в виде клинообразного кольца.

2. На основе известных уравнений теории осесимметричной деформации колец применительно к упругопластическому деформированию контактирующих деталей с помощью метода переменных параметров упругости получены аналитические зависимости, позволяющие определить напряженно-деформированное состояние и изгибную жесткость металлического Z-образного уплотнения.

3. На основе дискретно-континуального метода проведено математическое моделирование механизма формирования уплотняемого стыка и получены аналитические решения конструкционно-контактных задач

упругой разгрузки соединения с Z-образным металлическим уплотнением вследствие разгерметизации стыка при отрыве кромки уплотнения под действием внутренних и внешних нагрузок, адаптированных к рабочим условиям эксплуатации.

4. На основе уравнения Козени для металл-металлического контакта с учетом вероятностного распределения неровностей по радиусу стыка установлена зависимость коэффициента проницаемости пористого слоя от величины контактного сближения и параметрами микрорельефа уплотняемых поверхностей, предложены соотношения для вычисления проницаемости эквивалентного пористого слоя.

5. Предложен и обоснован критерий герметичности уплотняемого узла в виде функции проницаемости контакта, и впервые получена функциональная зависимость между утечкой герметизируемой среды, углом клиновидной кромки металлического уплотнения, позволяющая определить геометрические параметры кромки, при которых обеспечивается наименьший расход герметизируемой среды.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии прикладного метода исследования напряжённо-деформированного состояния при контактном взаимодействии жестких тел различной конфигурации, а также в математическом описании зависимости утечки герметизируемой среды от силовых факторов, действующих на фланцевое соединение, геометрических характеристик соединения и материалов деталей.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Разработан прикладной метод решения конструкционно-контактных задач и получены аналитические соотношения конструкционной прочности фланцевых соединений. Предложены рекомендации к оценке прочностных свойств уплотняемого стыка по деформационному зазору при контакте и остаточному осевому зазору между фланцами при затяжке болтов.

2. Результаты, полученные на основе исследования контактного взаимодействия металлических профилированных уплотнений с сопрягаемыми поверхностями фланцев в соединениях трубопроводов, могут быть использованы в проектных организациях на стадии проектирования изделий ответственного назначения при оценке прочности и эксплуатационной надежности в авиакосмической технике, энергетическом и атомном машиностроении.

3. Разработанные в диссертации математические модели позволяют получить аналитические решения контактных задач для других конструкций металлических уплотнений с врезающимися элементами, а также для фланцевых соединений с плоскими, рифлёными, клиновидными и линзовыми прокладками на базе уравнений теории оболочек, пластин и колец, что определяет перспективность работы.

Результаты диссертационной работы внедрены в расчетную практику организации ООО «Инструмент» и используются при проектировании изделий техники и инструментального производства, что подтверждено актом внедрения.

Методы исследования. Теоретическое исследование пластического формоизменения поверхностей фланцев проводилось на основе решения задачи осевой симметрии графоаналитическим методом построения линий скольжения в сравнении с решением Хилла при вдавливании недеформируемого жесткого тела в жестко-пластическую среду. Математические модели описания контактного взаимодействия и прочностных свойств соединения построены на основе решений с использованием основных положений механики деформируемого твердого тела и герметологии: теории эквивалентного пористого слоя Козени-Кармана, метода переменных параметров упругости И.А. Биргера, теории осесимметричной деформации колец К. Б. Бицено, моментной теории оболочек и общих уравнений механики.

Достоверность и обоснованность результатов обеспечиваются использованием фундаментальных положений механики деформируемого твёрдого тела, апробированных методов решения контактных задач, теории пластичности и прикладной теории герметологии, а также корреляцией полученных результатов с известными теоретическими и экспериментальными данными, которые приводятся другими авторами по аналогичным исследованиям.

Основные результаты диссертационной работы, выносимые на защиту:

1. Методы исследования и математические модели контактного взаимодействия металлических профилированных уплотнений с сопрягаемыми поверхностями фланцев в соединениях трубопроводов на этапе сборки и нагружения уплотняющих узлов.

2. Методы математического моделирования механизма формирования уплотняемого стыка, позволяющие провести качественную и количественную оценку прочности соединения и плотности контакта кромок Z-образного металлического уплотнения с сопрягаемыми поверхностями фланцев.

3. Постановка и решение конструкционно-контактных задач для фланцевых соединений с Z-образными металлическими уплотнениями, устанавливающие взаимосвязь контактных нагрузок, перемещения и формы поверхностей при пластическом течении металла фланцев вследствие контактного взаимодействия элементов уплотняемого стыка, ряда геометрических параметров сопрягаемых деталей и степень плотности контакта, характеризующую герметичность фланцевого соединения.

4. Методология расчёта герметичности фланцевого соединения трубопроводов с металлическим уплотнением с врезающимися элементами, на основе которой предложен критерий и дана оценка герметичности уплотняемого узла в виде функции проницаемости контакта.

Апробация основных результатов работы. Результаты диссертационной работы докладывались на российских и международных конференциях:

– XLV, XLVI, XLVII Международных молодёжных научных конференциях «Гагаринские чтения». Москва, МАИ, 2019, 2020, 2021;

– 18-ой, 19-ой, 20-ой Международная конференциях «Авиация и космонавтика». Москва, МАИ, 2019, 2020, 2021;

– Международной конференции «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении» (ICMTMTE 2021), Севастополь, 2021.

Личный вклад автора. Основные положения диссертации получены лично автором, либо при непосредственном его участии, что подтверждено публикациями.

Публикации. Основные материалы диссертации опубликованы в шести печатных работах, в том числе: 5-ти статьях в журналах из Перечня ВАК РФ; 1-ой статьи в журнале, цитируемом международной базой SCOPUS и 6 тезисов докладов по материалам Российских и международных конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников из 90 наименований и приложения. Общий объем диссертации включает 157 страниц, включая 28 рисунков и 12 таблиц.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, представлены объект и предмет научных исследований, сформулированы цель и задачи исследования, определена научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены основные результаты, выносимые на защиту и краткое содержание работы по главам.

В первой главе представлен анализ конструктивных решений фланцевых соединений с металлическими уплотнениями. В обзоре

существующих фланцевых соединений трубопроводов с металлическими уплотнениями приведены некоторые конструкции узлов уплотнения с металлическими прокладками, запатентованные фирмами из США и Германии. Отмечено, что в стыковых соединениях трубопроводов широкое распространение получили металлические упругие уплотнения, позволяющие в силу своей конструкции улучшить уплотняющие качества за счёт использования дополнительного эффекта: внутреннего давления среды, пластической деформации и т.д.

Дано описание объекта исследования, в качестве которого рассматривается конструкция фланцевого соединения различной формы с Z-образным металлическим уплотнением, конструктивное исполнение которого приведено на рис. 1.

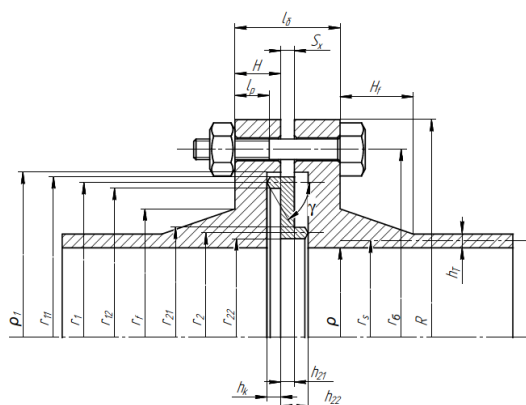


Рис. 1. Конструктивное исполнение фланцевого соединения с Z-образным металлическим уплотнением

Представленная конструкция состоит из двух фланцев, к которым приварены трубы, металлического уплотнения с Z-образным профилем и набора крепежных изделий. Соединение фланцев обеспечивается посредством равномерной затяжки гаек на болтах или шпильках. Вследствие этого происходит сближение торцевых поверхностей фланцев, между которыми установлено уплотнение. Отмечены особенности конструкции, которые заключаются в том, что уплотнение выполнено в виде тонкостенного полого тела (короба или кольца) с клинообразными выступами, отстоящими друг от друга на некотором расстоянии. По форме фланцевые соединения могут быть призматическими телами или телами

вращения. Высокая плотность контакта в них достигается за счёт врезания твёрдых клиновидных кромок уплотнения в сопрягаемые поверхности деталей при обжатии соединения. В результате локальной пластической деформации на них образуются кольцевые канавки, при этом часть металла выдавливается в наплывы.

Проведен анализ наиболее часто применяемых материалов деталей уплотняющих узлов, а также технических требований, предъявляемых к соединениям трубопроводов. Некоторые из них приведены в табл. 1, 2 и 3.

Таблица 1. Физико-механические свойства некоторых сталей фланцев и труб

Марка материала	Механические свойства			Физические свойства	
	Предел прочности (не менее), σ_B , Н/мм ²	Условный предел текучести (не менее), $\sigma_{0,2}$, Н/мм ²	Относительное удлинение (не менее), δ %	Модуль нормальной упругости, E , ГПа	Модуль упругости при сдвиге кручением G , ГПа
20	410	245	25	212	78
15ГС	490	295	18	210	80
08Х18Н10Т	490	196	40	196	80

Таблица 2. Физико-механические характеристики стали ЭП-678

Предел прочности, σ_B , МПа	Предел текучести, σ_T , МПа	Модуль нормальной упругости, E , 10 ⁵ МПа	Коэффициент Пуассона	Деформация на пределе прочности	Деформация на пределе текучести
1800	1000	1,96	0,3	0,165	0,0051

Таблица 2. Расчетные значения радиальных зазоров идеальной кольцевой щели в зависимости от перепада давления

Допускаемая мощность протечек, Вт - $N_y = 6,6 \cdot 10^{-7}$			
Δp , МПа	1,0	5	10
δ , мкм	9	3,1	1,94

В качестве материала для металлических уплотнений широкое применение получила сталь ЭП-678. Основное преимущество данной марки стали заключается в возможности её применения при высоких давлениях герметизируемой среды (5 МПа и более), высоких температурах (300°С и

выше), в контакте с химически агрессивными средами (кислоты, щёлочи, нефтепродукты).

Анализ приведённых конструкций фланцевых соединений и условий их работы позволил сделать вывод о том, что потеря работоспособности соединения может наступить не только из-за разрушения его деталей, но и вследствие не достаточной плотности контакта или качества уплотняемых поверхностей. Потеря работоспособности соединения выражается в превышении утечки герметизируемой среды предельно допустимого значения. Поэтому, в случае с фланцевыми соединениями трубопроводов ответственного назначения любой расчёт на прочность и эксплуатационную надёжность должны проводиться с учетом возникающих локальных контактных и общих деформаций сопрягаемых элементов в контексте герметологического анализа соединения.

Проведен обзор конструкционно-контактных задач в инженерных расчетных методах по обеспечению прочности и эксплуатационной надёжности уплотняющих узлов. Отмечено, что контактное взаимодействие металлических профилированных уплотнений с сопрягаемыми поверхностями фланцев в соединениях трубопроводов недостаточно изучено. Сформулирована постановка задачи исследования, которая заключается в разработке расчетного метода исследования контактного взаимодействия металлических профилированных уплотнений с сопрягаемыми поверхностями фланцев в соединениях трубопроводов на основе решений упругопластических, конструкционно-контактных задач и общих уравнений механики с учетом ряда геометрических параметров сопрягаемых деталей уплотняемого стыка.

Вторая глава посвящена разработке математических моделей и методов исследования контактного взаимодействия металлических профилированных уплотнений с сопрягаемыми поверхностями фланцев в соединениях трубопроводов. Проведено исследование упругопластического деформирования поверхностей фланцев при контактном взаимодействии Z-

образного металлического уплотнения. В качестве расчетной модели принята модель внедрения жесткого клина в полубесконечную жестко-пластическую среду и решения Хилла задачи неустановившегося пластического течения с геометрическим подобием. Рассмотрены схемы внедрения жесткого тела (индентора), имеющего две разновидности формы: плоского клина и клинообразного кольца, рис. 2.

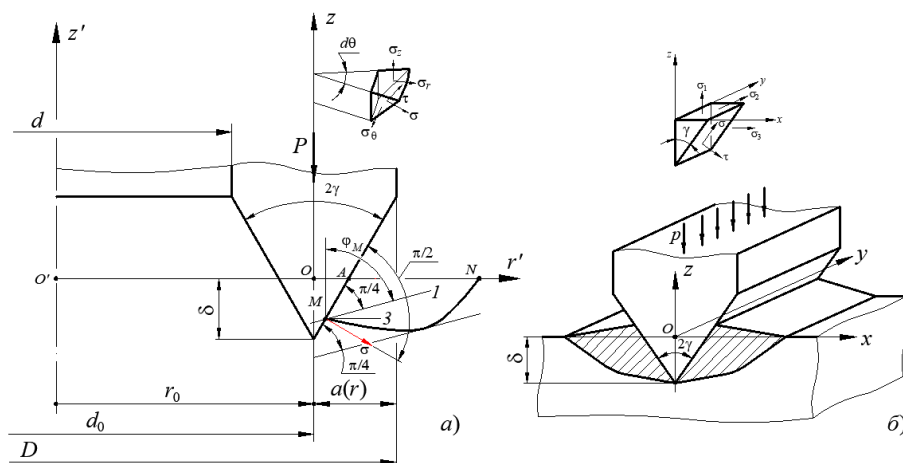


Рис. 2. Внедрение индентора в жестко-пластическую среду: а – внедрение клинообразного кольца; б – внедрение плоского клина

В случае плоского клина, рис. 2-б, задача рассматривается в постановке плоской деформации. Для случая внедрения тела вращения в виде клиновидного кольца рассматривается задача с осевой симметрией, рис. 2-а. В предположении того, что при внедрении недеформируемого твердого индентора в виде клиновидного кольца, поле скольжения и картина деформации соответствует схеме внедрения плоского клина, для исследования границ пластической области предложен графоаналитический метод. На его основе получены соотношения величины контактного давления, формы и длины контакта для натурной модели фланцевого соединения цилиндрической формы и индентора в виде клинообразного кольца конечных размеров. Характерные геометрические параметры индентора определяются по формулам для плоского клина и клиновидного кольца соответственно

$$\cos(2\gamma - \phi) = \frac{\cos \phi}{1 + \sin \phi}; \quad \delta = h \left[\frac{\sqrt{2} - 2 \sin(\gamma - \phi)}{2} \right], \quad (1)$$

где 2γ – угол раствора клина; ϕ – угол центрированного поля линий скольжения; δ – глубина внедрения индентора; h – линия контакта.

Дано обоснование применения решения Хилла в исследовании контактного взаимодействия для ряда конструктивных исполнений фланцевых соединений с профилированными металлическими уплотнениями.

Разработана математическая модель фланцевого соединения и проведено математическое моделирование осесимметричного изгиба фланца с учётом деформационного влияния болтов и присоединённых труб. Произведен расчёт напряжений в болтах в результате их перекоса из-за поворота поперечных сечений поверхностей фланцев. Расчетная схема приведена на рис. 3.

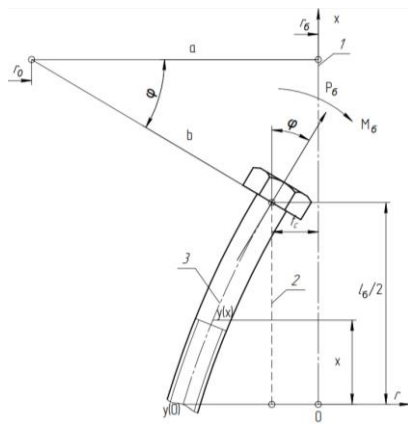


Рис. 3. Схема к определению изгибающего момента, действующего на болт при повороте поперечного сечения фланца при обжатии соединения

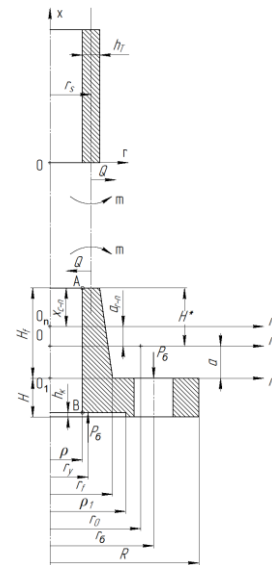


Рис. 4. Расчетная силовая схема сопряжения кольцевого фланца с коническим хвостовиком и тонкостенной цилиндрической оболочки

В рамках решения осесимметричной задачи деформации колец определены силовые факторы, радиальные и угловые смещения точек в сечении сопряжения фланца с трубой. Решения строились на основе условий равновесия и неразрывности деформаций всех элементов уплотняемого

стыка и решении дифференциального уравнения упругой линии цилиндрической оболочки

$$W_T(x) = e^{-\beta x} (A_1 \sin(\beta x) + A_2 \cos(\beta x)) + \bar{W}, \quad (2)$$

где β – параметр цилиндрической оболочки, \bar{W} – частное решение дифференциального; A_1, A_2 – постоянные интегрирования, которые находятся, исходя из граничных условий.

Условия неразрывности деформации фланца с оболочкой принимались в виде

$$\begin{cases} W_T(0) = W_\phi(r_s) \\ \varphi_T(0) = \varphi_\phi \end{cases}, \quad (3)$$

где $\varphi_T(0), \varphi_\phi$ – углы поворота поперечного сечения трубы и кольца; $W_T(0), W_\phi(r_s)$ – радиальное смещение трубы и фланца соответственно.

Параметр оболочки β и частное решение дифференциального уравнения упругой линии цилиндрической оболочки \bar{W} определялись соотношениями

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{3(1-\mu^2)}{r_s^2 h_m^2}}; \quad \bar{W} = \left(p_1 - \frac{\mu T_x}{r_s} \right) \frac{r_s^2}{E_m h_m}, \quad (4)$$

где μ – коэффициент Пуассона материала трубопровода, p_1 – давление на стенку оболочки в радиальном направлении, T_x – внутренняя осевая сила, E_T – модуль упругости материала трубопровода.

Граничные условия записаны в виде

$$D \frac{d^2 W_T(0)}{dx^2} = m; \quad D \frac{d^3 W_T(0)}{dx^3} = Q; \quad D = \frac{E_T h_T^3}{12(1-\mu^2)} \quad (5)$$

где D – цилиндрическая жёсткость оболочки. Соотношения констант интегрирования имеют вид

$$A_1 = -\frac{m}{2\beta^2 D}; \quad A_2 = \frac{Q}{2\beta^3 D} + \frac{m}{2\beta^2 D}, \quad (6)$$

где Q – перерезывающая сила; m – изгибающий момент.

Радиальное смещение точек сопряжения фланца с трубой и угол поворота сечения фланца определяются выражениями

$$W_{\phi}(r_s) = \frac{Mx_{c-n}}{EI_3} + \frac{N}{EI_1}; \quad \Phi_{\phi} = \frac{M}{EI_3} \quad (7)$$

где I_1, I_3 – геометрические характеристики сечения фланца; x_{c-n} – расстояние от нейтральной линии фланца до его сечения сопряжения с трубопроводом.

Изгибающий момент, вызванный силовым влиянием трубы на фланец, принимает следующий вид

$$M_T = ZM; \quad Z = \frac{\beta r_s D}{EI_3} [1 + \chi(1 + 2\beta H^*)]; \quad M = \frac{nP_{\sigma}(r_{\sigma} - r_y)}{2\pi(1 + (Z + \vartheta_{p,\sigma}))}, \quad (8)$$

где M – результирующий осесимметричный изгибающий момент фланца; неуказанные геометрические характеристики определялись из расчетной схемы.

Получены выражения для напряжений в опасных сечениях фланца с учетом силового влияния трубы и болтов в виде

$$\sigma_A = \frac{1}{\rho} \left(\frac{M}{I_3} H^* - \frac{Qr_s}{I_1} \right); \quad \sigma_B = \frac{1}{\rho} \left(\frac{M}{I_3} (H + H_f - h_k - H^*) + \frac{Qr_s}{I_1} \right). \quad (9)$$

Показаны возможности снижения уровней изгибающих моментов за счёт введения дополнительной жёсткости магистралей и сопротивления болтов.

На основе применения решения Хилла разработана математическая модель формирования уплотняемого стыка и проведено моделирование контакта кромок с поверхностью фланца в виде внедрения жёсткого клина в жестко-пластическую деформируемую среду. Определены значения контактной нагрузки, длины контакта и величина внедрения кромок при обжатии соединения. Для плоского клина и клиновидного тела вращения используются выражения соответственно

$$p = 1,155(1 + \phi)\sigma_T; \quad p = \sigma_T(1 + \gamma); \quad \sigma_T = \sqrt{3}\tau_T. \quad (10)$$

Здесь p – давление на линии контакта индентора; σ_T, τ_T – предел текучести при растяжении и сдвиге.

Величина врезания кромок вдоль оси x вычисляется из соотношения

$$\Delta_j = l_j [\cos \gamma - \sin(\gamma - \phi)]; l_j = \frac{nP_6}{4\pi r_j p \sin \gamma}. \quad (11)$$

Методом переменной упругости в условиях упругопластической деформации исследована жёсткость уплотнения на изгиб. В предположении того, что часть объёма металла уплотнения при малых углах поворота деформируется упруго, а его периферийная часть испытывает пластическую деформацию, предложено сплошную область пластической деформации металла заменить дискретно-континуальной расчётной моделью. Предложены формулы определения интенсивности деформаций и упругих постоянных для каждого объёма тела, характеризующего переменными параметрами упругости.

$$\dot{\varepsilon}_{v2(1)} = 2/3(1+\mu) \left| \dot{\varepsilon}_{v2(1)} \right|; E_{v2(1)}^* = \frac{\dot{E}_{v2(1)}}{1+Y}; \mu_{v2(1)}^* = \frac{1}{2} \cdot \frac{1-Y}{1+Y}; Y = \frac{2}{3} \frac{\dot{E}_{v2(1)}(1-2\mu_2)}{E_2}. \quad (12)$$

По результатам проведения математического моделирования получены основные зависимости, позволяющие рассчитать на прочность фланцевое соединение с Z-образным металлическим уплотнением, деформируемое упругопластически, в основе которых лежит представление интегральных характеристик, объединяющих в себе как геометрические, так и упругие характеристики уплотнения. Исследование показало возможность применения метода переменных параметров упругости по отношению к теории осесимметричной деформации колец, что расширяет возможности её использования в прочностных расчётах.

В третьей главе сформулирована постановка конструкционно-контактных задач и получены решения в обосновании прочности и герметичности фланцевых соединений.

Рассмотрена задача о нагружении соединения внутренним давлением и упругой разгрузки вследствие падения давления рабочей среды. Отмечено, что в соединениях с неконтактирующими фланцами (рис. 5) усилие затяжки болтов полностью «воспринимается» уплотнением. Поэтому такие конструкции узлов довольно чувствительны к растяжению. В результате

упругой разгрузки фланцевые болты дополнительно подвергаются нагружению за счёт усилия N_6 . При приложении внутреннего давления податливость болтов λ_6 служит причиной кинематического расхождения фланцев Δ_x^+ , профили которых также получают приращения углов поворота $\delta\varphi_i$. Принимается, что ввиду податливости деталей соединения, при разгрузке длина контакта кромок в уплотняемых стыках соединения не меняется, $l_j = \text{const}$. Решение задачи ищется в приращениях контактных усилий, используя принцип суперпозиции.

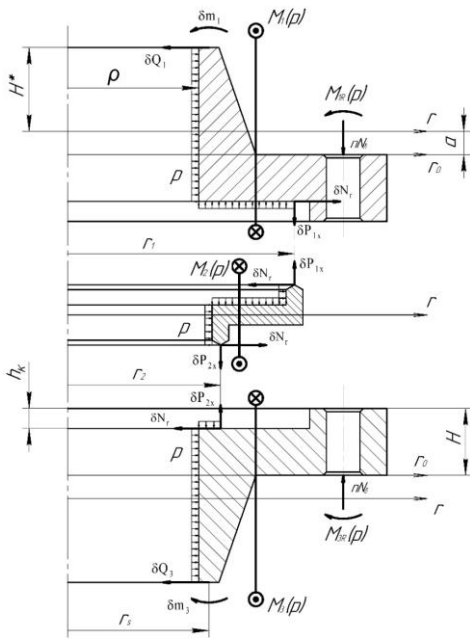


Рис. 5. Силовые факторы, действующие на детали соединения при его нагружении внутренним давлением

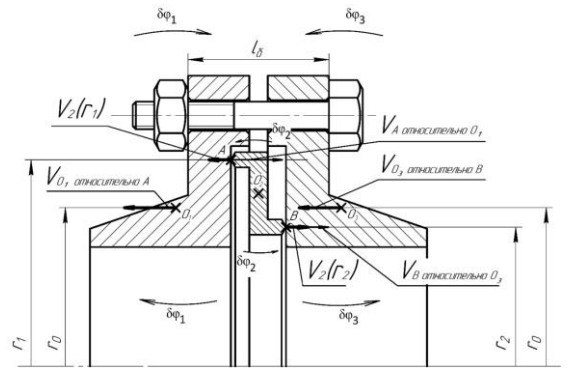


Рис. 6. Расчётная схема для вывода уравнения совместности осевых перемещений точек деталей соединения при его нагружении внутренним давлением

Из условий равновесия и совместности осевых перемещений фланцев компоненты приращений контактных усилий на кромках Z-образного уплотнения связаны следующими соотношениями

$$\begin{cases} 2\pi r_1 \times \delta P_{1x} + nN_6 = 2\pi p \times S_{1p}; \\ 2\pi r_2 \times \delta P_{2x} + nN_6 = 2\pi p \times S_{3p}; \\ \delta N_{1r} \times r_1 - \delta N_{2r} \times r_2 - p \times S_{2p} = 0, \end{cases} \quad \begin{cases} S_{1p} = \frac{1}{2}(r_1^2 - \rho^2); \quad S_{3p} = \frac{1}{2}(r_2^2 - \rho^2); \\ S_{2p} = (h_{22} - h_{21})r_{12} + h_{22}r_{22}; \\ \delta N_{1r} = \delta N_{2r} = \delta N_r. \end{cases} \quad (13)$$

$$\delta l_6 = \Delta_x^+ - [V_3(r_6) + V_1(r_6)].$$

Здесь δP_{ix} , δN_{ir} – компоненты приращений контактных усилий на кромках Z-образного уплотнения, равномерно распределённых по окружностям с радиусами r_i в осевом и радиальном направлении соответственно.

При разгрузке Z-образного уплотнения радиальные перемещения точек описываются следующим равенством

$$W_2(r_2, x_2) = -W_2(r_1, x_1). \quad (14)$$

Приращения углов поворота деталей (рис. 6) выражены через изгибающие моменты согласно теории осесимметричной деформации колец большой кривизны К.Б. Бицено в виде

$$\delta\varphi_2 = \frac{M_2(p)}{I_{32}(\varepsilon)}; \quad \delta\varphi_1 = \frac{M_1(p)}{EI_{31}}; \quad \delta\varphi_3 = \frac{M_3(p)}{EI_{33}}, \quad (15)$$

где $M_i(p)$ – приращение изгибающего момента, обусловленного действием внутреннего давления; E – модуль упругости материала фланца (аналогичен материалу трубы); I_{3i} – 3-я геометрическая характеристика жёсткости детали на изгиб.

Из решения дифференциальных уравнений и заданных граничных условий с учетом решения дифференциального уравнения упругой линии цилиндрической оболочки (2) определены соотношения силовых факторов и результирующего давления q_j в месте контакта уплотнения и фланца, используемые в дальнейшем для оценки степени герметичности узлового стыка

$$q_{jn} = q - \frac{1}{2l_j} \left(\delta P_{jx} \sin(\gamma) - (-1)^j \delta N_r \cos(\gamma) \right);$$

$$q_{jв} = q - \frac{1}{2l_j} \left(\delta P_{jx} \sin(\gamma) + (-1)^j \delta N_r \cos(\gamma) \right), \quad (15)$$

где индекс «н» означает «нижняя» грань кромки расположенная ближе к оси вращения, соответственно «в» – «верхняя», расположенная дальше от оси вращения.

Рассмотрены случаи разгерметизации соединения при отрыве кромки уплотнения. Получены формулы для расчета давления разгерметизации от действия осевой силы, приводящей к разгерметизации соединения

$$p_{\Gamma} = \frac{n(P_6 + Y_p)}{2\pi S_{1p} - nY}; \quad p_{\Gamma}^* = \frac{n(P_6 + Y_p)}{2\pi S_{3p} - nY^*}. \quad (16)$$

Здесь p_{Γ} , p_{Γ}^* – давление разгерметизации при отрыве верхней и нижней врезающей кромки соответственно.

Рассмотрена задача о нагружении внешней осевой силой и упругой разгрузке фланцевого соединения вследствие падения давления рабочей среды. Полагается, что при растяжении узла внешнее усилие T_x передаётся к фланцам как равномерно распределённая кольцевая нагрузка на радиусе r_s . Используя методику решения предыдущей задачи, получены соотношения силовых факторов и суммарного контактного давления на соответствующей кромке уплотнения $q_{\Sigma j}$ в виде

$$q_{\Sigma j} = q_p - \frac{\delta \dot{P}_{jk} \sin \gamma}{2l_j}, \quad (17)$$

где q_p – суммарное контактное давление, полученное на этапе нагружения соединения внутренним давлением.

Определены соотношения давления разгерметизации от действия внешней осевой силой при отрыве верхней и нижней врезающей кромки

$$t_{x\Gamma} = \frac{r_1 G_1}{r_s - nY_t / 2\pi}; \quad t_{x\Gamma}^* = \frac{r_2 G_2}{r_s - nY_t / 2\pi}. \quad (18)$$

В четвертой главе проведено математическое моделирование массопереноса рабочей среды при представлении шероховатого межповерхностного пространства эквивалентным пористым слоем, характеристики которого изменяются по мере сближения контактных поверхностей.

Используется уравнение фильтрационного потока в условиях стационарного изотермического ламинарного течения жидкости. Объёмный

расход жидкости в мм³/с через кольцевой контакт в радиальном направлении определяется по формуле

$$Q_V^{(жк)} = \frac{2\pi h_{сл} K}{\mu_t \ln(r_b / r_a)} (p - p_0), \quad (19)$$

где: $h_{сл}$ – толщина эквивалентного пористого слоя в мм под нагрузкой; μ_t – коэффициент вязкости среды при температуре t в МПа × с; r_a , r_b – внутренний и наружный радиус фактического контакта в мм; p , p_0 – давление жидкости перед уплотнением и на выходе из него в МПа; K – коэффициент проницаемости пористого слоя, характеризующий его способность пропускать через себя уплотняемую среду под действием перепада давления, в мм².

Эффективность герметизации уплотнения при учёте размеров можно оценить значением проницаемости контакта в мм³ в виде

$$\Pi = \frac{2\pi h_{сл} \rho_k}{l_k}; \quad \rho_k = \frac{r_a + r_b}{2}. \quad (20)$$

Принимается, что контактное сближение шероховатого межповерхностного пространства деталей реализуется только за счёт деформации неровностей врезающихся элементов уплотнения. Взаимосвязь коэффициента проницаемости пористого слоя с величиной контактного сближения и параметрами микрорельефа уплотняемых поверхностей определяется в соответствии с разработанной ранее математической моделью формирования уплотняемого стыка.

Используется способ описания реального распределения материала по высоте микрорельефа в виде построения кривой опорной поверхности по результатам статистической обработки профилограммы. Для металл-металлического контакта с соизмеримыми значениями твёрдости уплотняемых поверхностей деталей с учетом вероятностного распределения неровностей по радиусу стыка в работе, исходя из геометрических построений, получены формулы для вычисления проницаемости эквивалентного пористого слоя (уравнение Козени)

$$m_{\text{сл}} = 1 - \frac{2}{2-\varepsilon} \dot{\gamma}(\varepsilon_{\text{п}}); \quad B_{\text{сл}} = \frac{2 \left[1 - \frac{b_{\text{н}} \varepsilon^{\nu + \frac{2}{3}}}{(\nu + 2)^{2/3}} \right]}{Rz_2 \times \sin(\beta_{\text{пр}}/2) \times \sin(\beta_{\text{поп}}/2) \times \dot{\gamma}(\varepsilon_{\text{п}})}. \quad (21)$$

где $\beta_{\text{пр}}, \beta_{\text{поп}}$ – средние значения углов при вершинах профиля продольной и поперечной шероховатости.

Контактное сближение поверхностей $\delta_{\text{к}}$ определяется их прочностными свойствами и топографией микрорельефа кромок уплотнения. При малой протяжённости уплотняемого стыка можно считать, что волнистость сопрягаемых поверхностей деталей отсутствует. В случае контакта шероховатой поверхности с гладкой для вычисления значения $\delta_{\text{к}}$ используется приближённая формула Карагельского, которая удовлетворительно коррелирует с результатами эксперимента при испытании стандартных образцов с плоскими поясками. Формула имеет вид

$$\delta_{\text{к}} = 4,1 Ra_2 \sqrt{\frac{q}{H_{\mu}}}, \quad (22)$$

где H_{μ} – микротвёрдость более мягкой поверхности фланца Ra_2 – параметр шероховатости поверхности кромок уплотнения; q – контактное давление в стыке.

С учетом трения при врезании кромок уплотнения в результате относительного перемещения поверхностей при пластическом течении металла фланцев и выдавливании его в наплывы установлена зависимость контактного сближения фланцев от контактного давления в стыке, а также состояния поверхностного слоя, характеризующего микротвердостью и параметром шероховатости. На основе решения оптимизационной задачи проведена оценка герметичности уплотняемого стыка, где в качестве критерия выбрана функция проницаемости контакта \dot{I} , характеризующая зависимость утечки герметизируемой среды через уплотняемый стык от угла клиновидной кромки уплотнения

$$\dot{I} = \dot{K} \left(Rz_y - 6,683 Ra_y \sqrt{\frac{q}{H_{\mu}}} \right) q \sin \gamma. \quad (23)$$

Здесь \dot{K} – функция, характеризующая зависимость коэффициента проницаемости пористого слоя от угла γ и выраженная в условных единицах измерения.

Приведены расчетные значения функция проницаемости контакта для ряда значений углов клиновидной кромки уплотнения и графики ее изменения. Графики функция проницаемости контакта выборочно приведены на рис. 7 и 8.

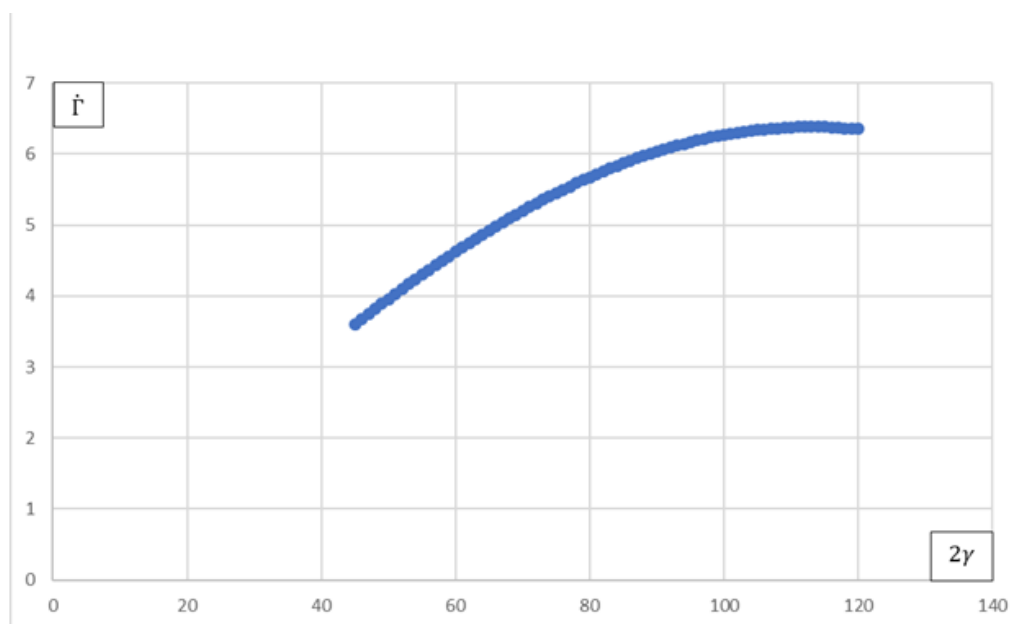


График функции проницаемости контакта при $H_{\mu} = 1900 \text{ МПа}$, $\sigma_{тф} = 225 \text{ МПа}$

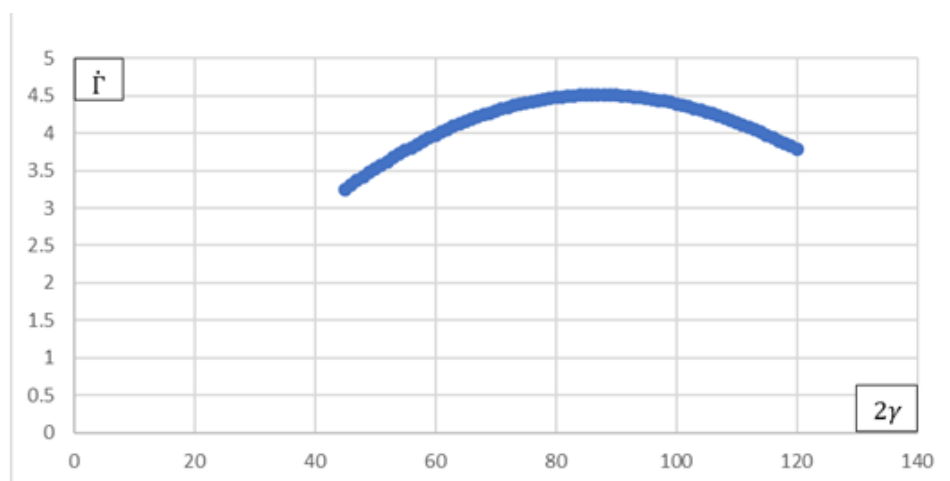


График функции проницаемости контакта при $H_{\mu} = 1900 \text{ МПа}$, $\sigma_{тф} = 300 \text{ МПа}$

Установлено, что окончательный вид данной функции для каждого конкретного случая будет определяться исключительно материалом фланца,

а именно, такими его характеристиками как $\sigma_{т.ф.}$ и H_{μ} . Для разных соединений с различными параметрами, относящихся к силам затяжки, радиусам контакта, характеристикам герметизируемой среды и шероховатости на кромках уплотнения, функции проницаемости контакта будут одинаковыми, если материалы фланцев в соединениях применены одни и те же. В таком случае оптимальный угол кромки для разных соединений будет одинаковым.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработан метод исследования контактного взаимодействия металлических профилированных уплотнений с сопрягаемыми поверхностями фланцев в соединениях трубопроводов, учитывающий особенности формирования уплотняемого стыка на этапах сборки и силового нагружения, позволяющий существенно снизить металлоемкость конструкции фланцевых соединений и повысить эксплуатационную надежность.

2. Проведено исследование упругопластического деформирования поверхностей фланца, обусловленного контактной нагрузкой при внедрении металлического Z-образного уплотнения, и дано теоретическое обоснование применения решений Хилла в рассмотрении конструкционно-контактных задач по определению предельных контактных нагрузок и деформаций, а также ряда геометрических параметров сопрягаемых деталей фланцевого соединения с учетом полученных соотношений для уплотнений разнообразной формы.

3. Разработаны математические модели фланцевого соединения и формирования уплотняемого стыка. Получены соотношения для напряжений в опасных сечениях фланца с учетом силового нагружения и влияния элементов уплотняемого стыка, определены значения контактной нагрузки, длины контакта и величина внедрения кромок при обжатии соединения.

4. Даны решения конструкционно-контактных задач и получены аналитические зависимости, позволяющие рассчитать напряжённо-

деформированное состояние и изгибную жёсткость металлического Z-образного уплотнения в условиях упругопластической деформации при его дискретно-континуальном моделировании в виде профилированного кольца при обжатию соединения.

5. Проведено математическое моделирование массопереноса герметизируемой среды и дана оценка степени герметичности уплотняемого стыка в виде функции проницаемости контакта для клиновидной кромки металлического уплотнения при контактном взаимодействии с сопрягаемой поверхностью фланца в соединении трубопроводов.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Публикации в изданиях, входящих в Перечень ВАК

1. Шишкин С.В., Бойков А.А., Колпаков А.М. К расчёту на прочность Z-образного металлического уплотнения с врезающимися элементами, деформируемого упруго-пластически // Труды МАИ. 2019. № 109. DOI: [10.34759/trd-2019-109-9](https://doi.org/10.34759/trd-2019-109-9)
2. Бойков А.А., Шишкин С.В. К расчёту на прочность фланцевого соединения трубопроводов с металлическим деформируемым Z-образным уплотнением // Космонавтика и ракетостроение. 2020. № 4 (115). С. 45 – 56.
3. Бойков А.А., Шишкин С.В. К расчёту на герметичность фланцевого соединения трубопроводов с металлическим деформируемым Z-образным уплотнением // Космонавтика и ракетостроение. 2020. № 5 (116). С. 86 – 99.
4. Шишкин С. В. , Бойков А. А. К расчёту на герметичность фланцевого соединения трубопроводов с Z-образным металлическим уплотнением при воздействии внешней осевой силы. // Труды МАИ. 2021. № 116. URL: DOI: [10.34759/trd-2021-116-04](https://doi.org/10.34759/trd-2021-116-04).
5. Бойков А.А. К расчёту нагрузок разгерметизации фланцевого соединения трубопроводов с Z-образным металлическим уплотнением. // Труды МАИ. 2021. № 120. DOI: [10.34759/trd-2021-120-05](https://doi.org/10.34759/trd-2021-120-05).

**Научные статьи в ведущих научных журналах и изданиях, включенных
в международные системы цитирования**

Andrey Boikov, Lubov Mironova, Sergey Shishkin. About One of the Approaches for the Research of the Stress-Strain State of a Flange Connection with a Seal Made of an Alloy with Shape Memory, Materials Research Proceedings, Vol. 21, pp 156-160, 2022. <https://doi.org/10.21741/9781644901755-28>