

На правах рукописи



СЕМИТКИНА ЕКАТЕРИНА ВЛАДИМИРОВНА

ОБОСНОВАНИЕ И ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ
МУФТОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ
ИЗ МАТЕРИАЛА С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ
ДЛЯ НЕФТЕПРОМЫСЛОВЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Специальность 25.00.19 –Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов,
баз и хранилищ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Ухта – 2019

Диссертация выполнена в
Ухтинском государственном техническом университете на кафедре
«Проектирование и эксплуатация магистральных газонефтепроводов»

Научный руководитель:

Андронов Иван Николаевич

доктор технических наук профессор,
почетный работник высшего
профессионального образования РФ

Некучаев Владимир Орович

доктор физ.-мат. наук, профессор,
заслуженный работник высшей школы РФ

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор
кафедры ракетно-космической техники и
энергетических установок
ФГБОУ ВО «Пермский национальный
исследовательский политехнический
университет»,

Сальников Алексей Федорович

кандидат технических наук, доцент
кафедры «Транспорт углеводородных
ресурсов» ФГБОУ ВО «Тюменский
индустриальный университет»,

Сильницкая Наталья Юрьевна

Ведущая организация:

АО «Гипрогазцентр», г. Нижний Новгород

Защита состоится 21 июня 2019 г. в 12⁰⁰ часов на заседании
диссертационного совета Д 212.291.02 в Ухтинском государственном
техническом университете по адресу: 169300, г. Ухта, Республика Коми,
ул. Первомайская, д. 13.

С авторефератом и диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный технический университет», а
также на сайте вуза по адресу: www.ugtu.net в разделе
«Наука→Диссертация».

Автореферат разослан 13 мая 2019 года.

Ученый секретарь диссер-
тационного совета, кандидат
технических наук



Д. А. Борейко

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Практика наблюдений за эксплуатацией недавно построенных промысловых трубопроводов показывает, что случаи разливов нефти происходят в большей степени в результате разрывов соединительных стыков, их высокоинтенсивного коррозионного разрушения, вызванного несовершенством изоляции. Значительные материальные и человеческие ресурсы затрачиваются на ликвидацию аварий из-за разливов нефти, связанных с порывами зоны стыков трубопроводов, кроме того, наносится необратимый экологический ущерб окружающей природе.

Для повышения отказоустойчивости магистральных и промысловых трубопроводов и снижения уровня рисков негативных последствий в случае их возникновения применяются различные превентивные методы защиты трубопроводов от коррозии, например, использование коррозионностойких труб. Тем не менее, зона соединения таких трубопроводов, впоследствии, при эксплуатации остается недостаточно защищенной.

В тоже время проблема прочного, герметичного и конструктивно не сложного соединения труб, плетей, отдельных участков трубопроводов с эффективной защитой зон их соединений требует своего решения. В связи с этим задача разработки научно обоснованного технического решения по созданию технологичных и эффективных соединений для промысловых трубопроводных систем является актуальной.

Степень разработанности темы исследования. Значительный вклад в обеспечение защиты от коррозии нефтепромысловых трубопроводов, находящихся в цехах по подготовке нефти и пунктов сдачи-приема нефти, внесли отечественные и зарубежные ученые и исследователи, среди которых: Г. Л. Агафонова, А. А. Бекбаулиева, Д. А. Болотов, Д. Н. Воронин, С. А. Гуров, П. Ю. Денисов, В. Ф. Зараев, Н. Ю. Сильницкая, С. Г. Низьев, И. А. Щербинин, Фам Хоанг Вьет и др. В частности, в диссертации Сильницкой Н. Ю. приводится методика оценки конструктивной надежности муфтовых соединений полиэтиленовых трубопроводов, однако в настоящее время большинство промысловых трубопроводов выполнены из металла, поэтому применение данной методики для этих трубопроводов ограничено.

В СП 34-116-97 и ВСН 006-89 имеются требования о проведении мероприятий, обеспечивающих защиту трубопроводов от коррозионного воздействия или сероводородного растрескивания, а также применении труб с внутренним антикоррозионным покрытием, однако рекомендации по проведению антикоррозионных мероприятий по защите сварного шва на стадии проектирования, проведению пусконаладочных работ и последующей эксплуатации, устраняющей влияние высокоагрессивной среды в частности для обеспечения сохранности сварного шва, в полной мере не разработаны.

Однако, вопросам обоснования и выбора рациональных параметров муфтовых соединений из материала с эффектом памяти формы (ЭПФ) применительно к нефтепромысловым трубопроводам не уделено достаточного внимания, а реализация таких соединений требует проведения дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

Целью исследования является обоснование и выбор рациональных величин основных конструктивных параметров муфтовых соединений из материала с ЭПФ, обеспечивающих их прочность и герметичность для нефтепромысловых трубопроводов, на основе установления закономерностей изменения напряженно-деформированного состояния как функции изменения температуры.

Задачи исследования:

1. Провести сбор и анализ статистических данных причин отказов на нефтепромысловых трубопроводных системах и обобщить результаты теоретических и экспериментальных исследований, полученных ранее по рассматриваемой тематике.

2. Выполнить экспериментальные исследования функциональной зависимости деформации, обусловленной ЭПФ, от задаваемой температуры для оценки влияния соотношения концентраций титана и никеля на выбор рациональных величин параметров муфтового соединения в эксплуатационном интервале температур.

3. Выявить рациональные значения основных параметров обжимного соединения муфты из материала с памятью: технологического зазора между стальной трубой и муфтой из ТН-1 и деформации, вызванной ЭПФ, для обеспечения герметичности термомеханического соединения (ТМС).

4. Разработать конечно-элементную модель предлагаемых конструкций обжимных муфт на основе программного комплекса ANSYS, определить предельно допустимые величины эквивалентных напряжений для заданных значений пределов текучести и прочности материала.

5. Разработать способ создания ТМС путем низкотемпературного деформирования и предложить рекомендации по технологическому процессу монтажа обжимных муфт для нефтепромысловых систем.

Идея исследования состоит в том, чтобы измерив величину деформации образцов из никелида титана, обусловленной ЭПФ, как функцию температуры, подобрать компонентный состав сплава, рассчитать реактивные напряжения в муфте, а также провести аналитические и численные расчеты эквивалентных напряжений для эксплуатационных условий, на основании которых обосновать и выбрать рациональные величины основных конструктивных параметров муфтовых соединений из материала с эффектом памяти формы, а именно, деформации, вызванной ЭПФ, технологического зазора между муфтой и трубой, и критерия обжимной жесткости соединения трубопровода и запорной арматуры.

Соответствие паспорту специальности. Тема диссертационного исследования соответствует п.1 «Напряженное состояние и взаимодействие с окружающей средой трубопроводов, резервуаров и оборудования при различных условиях эксплуатации с целью разработки научных основ и методов прочностного, гидравлического и теплового расчетов нефтегазопроводов и газонефтехранилищ», п.3 «Разработка научных основ и усовершенствование технологии трубопроводного транспорта газа, нефти и нефтепродуктов, гидро- и пневмоконтейнерного транспорта», п.7 «Исследования в области ресурса трубопроводных конструкций, в том числе прогнозируемого при проектировании и остаточного при их эксплуатации» области исследований паспорта специальности 25.00.19 «Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ».

Научная новизна исследования:

1. Установлены зависимости деформационных откликов ряда образцов из никелида титана от температур фазовых превращений, на основе которых выбран наиболее подходящий сплав для температурных условий эксплуатации ТМС.

2. Получены зависимости изменения коэффициентов загруженности муфтовых соединений из никелида титана от величин проекторочных параметров, которые позволяют выбрать рациональные значения технологического зазора между стальной трубой и муфтой из никелида титана и деформации, вызванной ЭПФ, для обеспечения герметичности ТМС.

3. По результатам численных экспериментов с применением разработанной модели получены зависимости возникающих эквивалентных напряжений в муфте из никелида титана и соединяемых частях от величины деформации, обусловленной эффектом памяти формы, значения которых не превышают предела прочности и текучести материала, что указывает на сохранение целостности и надежности системы «труба-муфта» для эксплуатационного интервала температур.

4. Обоснован критерий обжимной жесткости системы «муфта – труба», характеризующий функциональное состояние контактной зоны элементов системы, позволяющий оценить степень обжатия термомеханического соединения на трубопроводе.

Теоретическая и практическая значимость работы. Установлены зависимости деформационных откликов и реактивных напряжений сплава ТН-1 для различных концентраций титана и никеля, позволяющие выбрать оптимальный состав сплава для заданного интервала температур эксплуатации муфтового соединения.

Получены уравнения для расчета технологических параметров двух вариантов соединения обжимных муфт из материала с памятью для промышленного трубопровода и запорной арматуры.

Представлены результаты моделирования распределения возникающих напряжений в муфте из материала с памятью и соединяемых частях в зависимости от величины деформации, обусловленной эффектом памяти формы.

Предложен и обоснован зависящий от конструкционных параметров коэффициент для определения степени обжатия термомеханического соединения «муфта-труба».

Результаты диссертационного исследования внедрены в образовательный процесс обучающихся по направлению подготовки 21.03.01 «Нефтегазовое дело» (бакалавриат) в рамках дисциплин «Технология трубопроводостроительных материалов» и «Технологии сварки трубопроводов и резервуаров».

Предложены мероприятия по технологическому процессу монтажа термомеханического соединения – муфты из никелида титана, обеспечивающие повышение качества соединения и упрощение процесса сборки.

Разработано новое технологическое решение, защищенное патентом № 2619578. Способ тренировки материала с памятью (способ задания деформации памяти применительно к ТМС).

Методология и методы исследования. При решении поставленных задач диссертационного исследования используется комплексный подход, включающий научный анализ и обобщение ранее опубликованных исследований, планирование и проведение экспериментальных исследований, измерение, сравнение, компьютерное моделирование.

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработанная модель оценки эквивалентных напряжений и осевых деформаций обжимных муфт трубопроводов позволяет выявлять область рациональных значений основных параметров муфт из материала с эффектом памяти формы как конструкционных элементов промышленных трубопроводных систем, для которых будет обеспечена герметичность и прочность соединения.

2. Предложенный критерий обжимной жесткости системы «муфта – труба», равный произведению отношения модуля Юнга материала с ЭПФ в аустенитном состоянии к модулю Юнга стали на отношение произведения величины деформации, вызванной ЭПФ и величины внешнего радиуса трубы к величине технологического зазора элементов системы «муфта – труба», позволяет оценить степень обжатия термомеханического соединения для различных значений конструкционных параметров с достаточной для инженерных расчетов точностью.

Степень достоверности и апробация результатов работы. Достоверность результатов работы подтверждается корректностью постановки задач исследований; удовлетворительной сходимостью результатов математического планирования с реальными значениями экспериментальных исследований, описанными в научной литературе.

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались в рамках международной научной конференции «Сплавы с эффектом памяти формы: свойства, технологии, перспективы» (г. Витебск, Беларусь, 2014 г.), международной конференции «Рассохинские чтения» (г. Ухта, 2015-2018 гг.), международной конференции ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ «Материалы для технических устройств и конструкций, применяемых в Арктике» (г. Москва, 2015 г.), XVIII международном семинаре (г. Воронеж, 2017 г.), XVIII международной молодежной научной конференции «СЕВЕРГЕОЭКОТЕХ» (г. Ухта, 2015-2018 г.), межрегиональных вебинарах «Актуальные вопросы нефтегазотранспортной отрасли» (г. Ухта, 2014-2019 гг.).

Сведения о публикациях автора: по теме диссертации опубликовано 12 печатных работ, из них 3 – в ведущих рецензируемых изданиях, включенных в перечень ВАК Министерства науки и высшего образования РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов, одного приложения. Основные материалы работы содержат 137 страниц машинописного текста с учётом приложения, в том числе включает 55 рисунков, 34 таблицы. Список цитируемой литературы состоит из 110 наименований.

Личный вклад соискателя заключается в постановке цели и задачи исследования, изучение отечественных и зарубежных источников соответствующей области науки, проведение теоретических и экспериментальных исследований, анализе полученных результатов, их апробации, подготовки публикаций по выполненной работе.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цели, задачи исследования, раскрыты научная новизна и практическая значимость.

В первой главе «Надежность соединений нефтепромысловых трубопроводов» приведён обобщенный анализ причин отказов на нефтепромысловых трубопроводах. Установлено, что первопричиной большинства отказов является воздействие коррозионных процессов. В России расход стали, который используется ежегодно для замены более 5 тыс. км нефтепромысловых сетей, выходящих из строя, превышает сотни тысяч тонн.

Более половины отказов промышленных трубопроводов происходит из-за коррозии материала труб (рисунок 1).

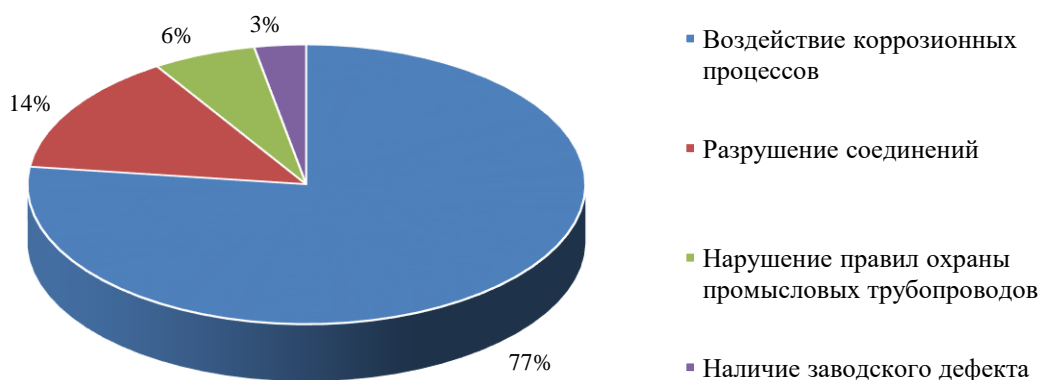


Рисунок 1 – Причины отказов промышленных трубопроводов России

Сейчас при производстве строительно-монтажных работ на территории нефтепромыслов используют трубы, обладающие повышенной стойкостью в коррозионно-активных средах, например, полиэтиленовые, стеклопластиковые, металлопластиковые, а также стальные трубы с внутренним защитным покрытием, однако, зона стыка остается недостаточно защищенной от воздействия внешних и внутренних факторов, и это минимизирует эффект их использования.

Разрушение промышленных трубопроводов в местах их соединений является основной причиной возникновения отказов. На рисунке 2 представлена диаграмма данных об отказах на промышленных трубопроводах в РФ.

Исследования и анализ причин разрушения промышленных трубопроводов показывают возможность возникновения отказов трубопроводов с выходом (утечкой) транспортируемого продукта.

Проведенный анализ исследований И. А. Щербинина, П. Ю. Денисова, В. Ф. Зараевой, Д. А. Болотова, Г. Л. Агафоновой, М. В. Кузнецова, А. В. Конева, С. Г. Низьева и др., посвященных научной области защиты промышленных трубопроводов от коррозии, а также оценке прочностной надежности промышленных систем трубопроводного транспорта, показывает, что выбранная тема исследования является актуальной.

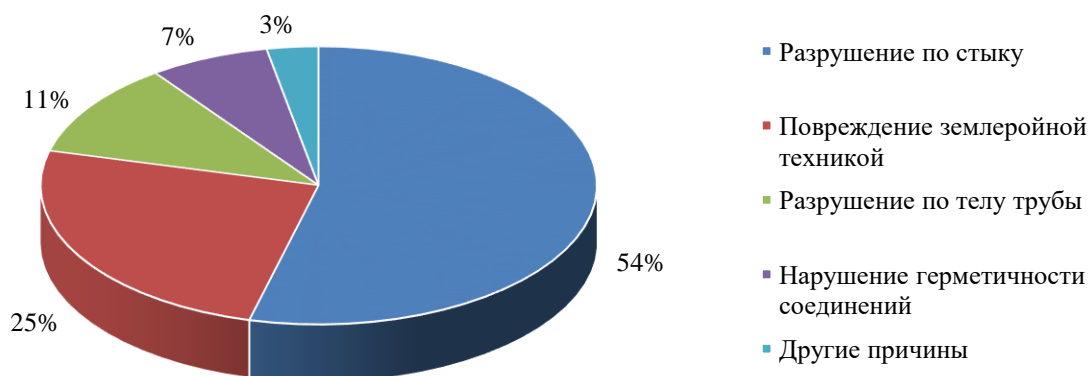


Рисунок 2 – Причины разрушения промышленных трубопроводов РФ

Совокупность всех факторов технологического режима работы оборудования (высокое давление, расход технологических жидкостей потока, коррозионная активность перекачиваемого продукта), а также трудоемкость сварки трубопроводов высокого давления приводит к повреждению и дальнейшему разрушению сварных соединений, к выходу из строя оборудования, разрушительному влиянию на экологию, и дальнейшим финансовым затратам.

Создание технологии и конструкции, способных решить проблему коррозионного разрушения сварных соединений при наличии перечисленных факторов, а также обеспечивающих надежность соединения является актуальной задачей.

В настоящий момент безогневое соединение труб оказывается альтернативой сварочной технологии монтажа трубопроводов. Эти решения реализуются в муфтовых соединениях.

В диссертационной работе предложены и исследованы два конструктивных соединения – муфты из материала с ЭПФ.

На основе проведенного автором анализа сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе «**Экспериментальное исследование деформационно-силовых характеристик образцов ТН-1 для разработки термомеханического соединения**» представлены основные направления экспериментальных и теоретических исследований:

1. Опытные исследования деформационных откликов и характеристических температур сплавов в режиме растяжения при постоянной нагрузке, с целью выбора оптимального и подходящего сплава под условия эксплуатации ТМС;

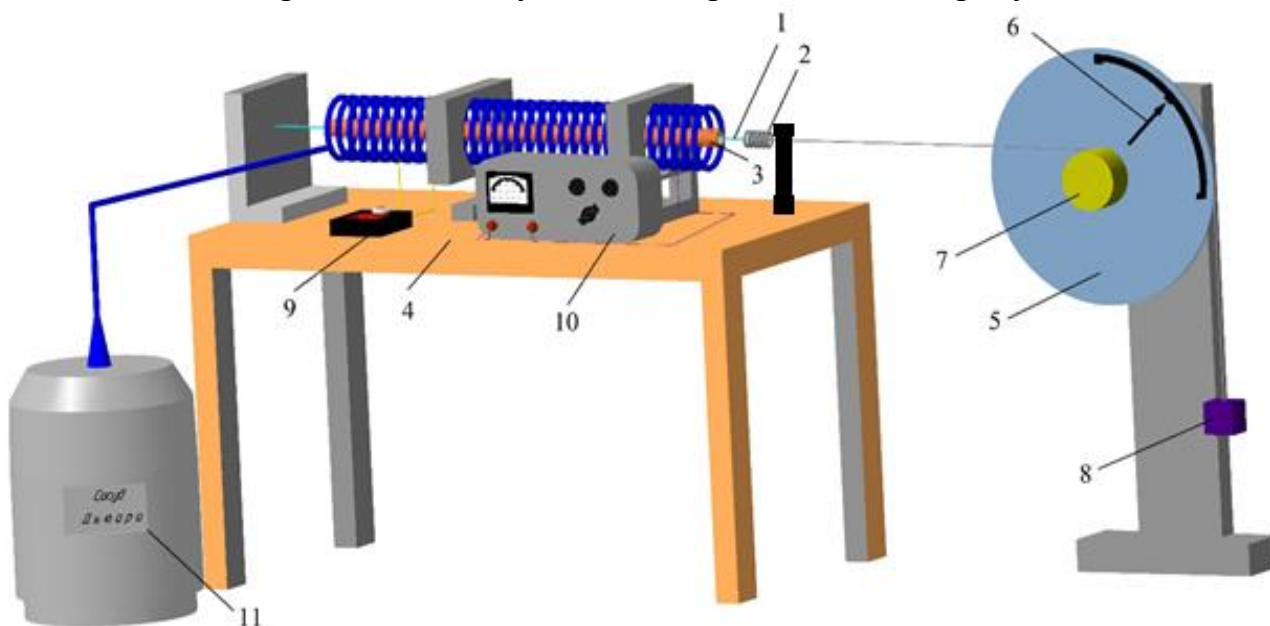
2. Определение деформационно-силовых характеристик образцов выбранного сплава в условиях жесткости противодействия системы «образец – заземление – контртело», моделирующих эксплуатационные условия;

3. Математическое планирование эксперимента и проведение оценки сходимости результатов математической модели с данными натурального эксперимента.

Для исследования был выбран сплав с ЭПФ, ТН-1 – никелид титана. Обоснованием выбора данного материала служит широкий диапазон температурных переходов, необходимый для эксплуатационных условий термомеханических соединений, а также комплекс свойств, делающих его пригодным для практического применения в качестве материала соединительных муфт для промышленных трубопроводов.

Для проведения эксперимента была использована специальная установка, спроектированная в ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный технический университет».

Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 3.



**1 – проволока из материала с ЭПФ; 2 – витая пружина;
3 – нагревательный элемент; 4 – рама; 5 – силовое устройство;
6 – шкала; 7 – шкив; 8 – груз; 9 – термopара; 10 – лабораторный
автотрансформатор (ЛАТР); 11 – сосуд Дьюара с жидким азотом**
Рисунок 3 – Схема экспериментальной установки

Эксперимент состоял из 2 этапов:

1. Опытные исследования деформационных откликов и характеристических температур сплавов проводили в режиме растяжения при постоянной нагрузке, с целью выбора оптимального и подходящего сплава под условия эксплуатации термомеханического соединения.

2. Определение деформационно-силовых характеристик образцов выбранного сплава в условиях жесткости противодействия системы «образец – заземление – контртело», моделирующих взаимодействие муфты и трубы.

Для выявления наиболее подходящего состава сплава ТН-1, по характеристическим температурам, испытывали 5 образцов с разным процентным содержанием титана и никеля.

Для всех образцов были построены графики зависимости деформации, обусловленной эффектом памяти формы, от задаваемой температуры.

Для исследуемой области применения наиболее оптимальным является образец, температурная зависимость деформации которого показана на рисунке 4. Температурные условия работы разрабатываемого конструкционного соединения входят в рабочую зону температур выбранного сплава. Состав сплава Ni50,75%Ti49,25% демонстрирует требуемые характеристики работы функционального устройства – ТМС.

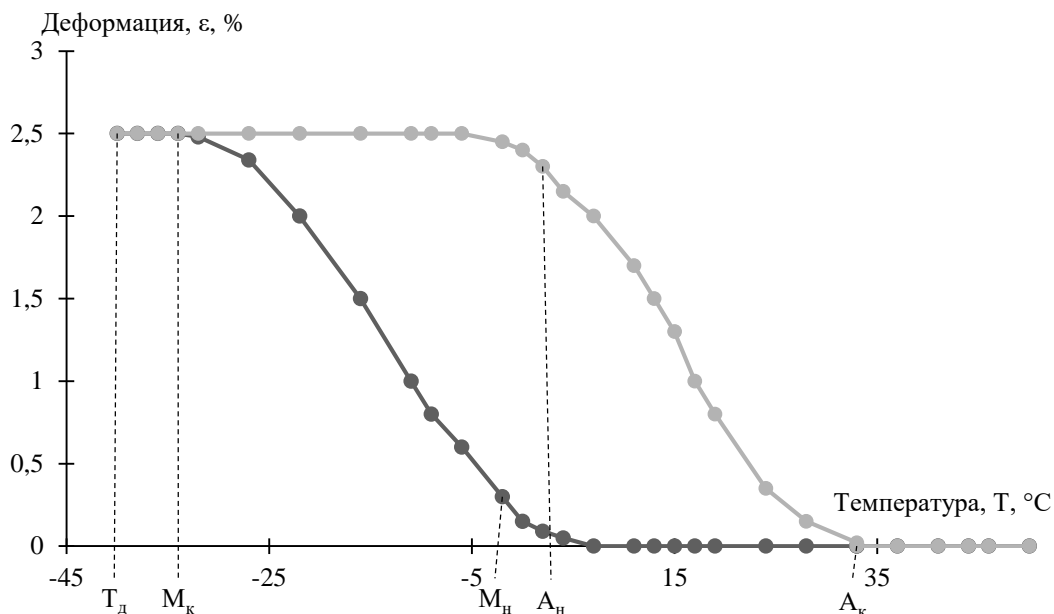


Рисунок 4 – Зависимость накопленной и восстановленной деформации от температуры в сплаве Ni50,75%Ti49,25%, $T_0 = \text{минус } 40^\circ\text{C}$

На 2 этапе опытов в экспериментальной установке использовали витые стальные контрпружины, которые одним концом прикреплялись к проволоке из никелида титана, а другим к стальному тросу.

Величина жесткости противодействия K зависит от толщины сечения проволоки и жесткости пружины. Жесткость противодействию системы «образец – заземление» K определяется по уравнению (1):

$$K = \frac{k \cdot L_{\text{э}}}{s}, \quad (1)$$

где k - жесткость упругого элемента, кН/м;
 $L_{\text{э}}$ - длина рабочей части образца, 2,0 м;
 s - площадь поперечного сечения образца, $0,785 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2$.

$$k = \frac{G \cdot d_D^4}{8 \cdot d_F^3 \cdot n} \quad (2)$$

где d_D - диаметр проволоки;
 d_F - диаметр намотки (измеряемый от оси проволоки);
 n - число витков;
 G - модуль сдвига (для обычной стали $G \approx 80 \text{ ГПа}$).

Реактивные напряжения σ_p при условии пренебрежения обычной пластической деформацией:

$$\sigma_p = K \cdot \varepsilon, \quad (3)$$

где ε - осевые деформации, способные к возврату за счет ЭПФ.

На рисунке 5 показаны деформационно-силовые кривые, показывающие связь между реактивными напряжениями σ_p и осевой деформацией ε . Ломаная 1-ABCDE-2 определяет значения реактивных напряжений σ_p и осевых деформаций ε , реализуемых при нагреве через интервал обратного мартенситного превращения.

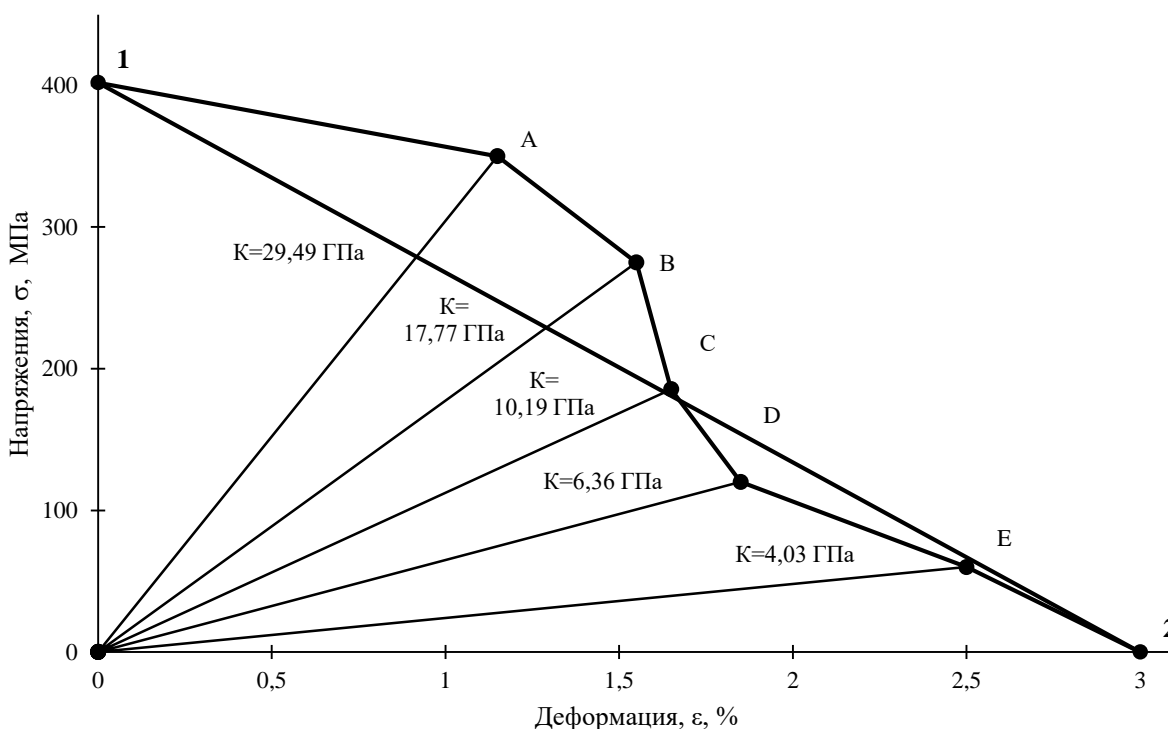


Рисунок 5 – Деформационно-силовые характеристики

Полученные экспериментальные результаты позволяют разработать теоретические методы расчета реактивных напряжений, деформаций и осевых усилий, генерируемых в материале с ЭПФ, функционирующих при обратимых мартенситных переходах.

Математическое планирование эксперимента и регрессионный анализ экспериментальных данных

Для повышения достоверности экспериментальных данных проведено математическое планирование эксперимента. С целью разработки математической модели, описывающей влияние значимых факторов (характеристическая температура сплава ТН-1, предел прочности сплава ТН-1, жесткость упругого контртела) на изменение функции отклика (ε – деформация, обусловленная ЭПФ) исследуемой модели процесса, был выбран ортогональный центральнокомпозиционный план второго порядка (ОЦКП) (рисунок 6).

В результате математического планирования эксперимента были определены условия ортогональности (таблица 1).

Таблица 1 – Параметры ОЦКП

Ядро плана	Общее количество опытов	φ	α
23	15	0,7303	1,2154

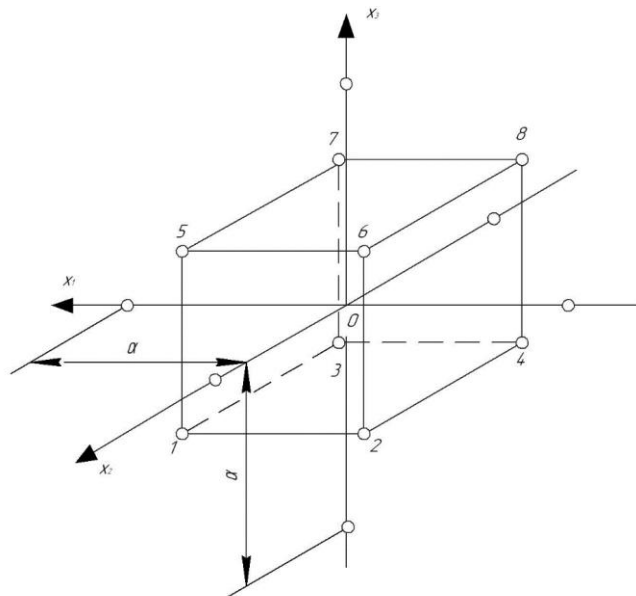


Рисунок 6 - Схема трехфакторного ОЦКП второго порядка

Кодирование и интервал варьирования значимых факторов представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Матрица трехфакторного ОЦКП

Уровни варьирования	Область эксперимента			Кодированное значение
	$x_1=T, \text{ К}$	$x_2=\sigma_b, \text{ МПа}$	$x_3=K, \text{ кН/м}$	
Нижний	241 - M_H	500	1,6	-1
Основной	287	600	7,0	0
Верхний	333 - A_K	700	12,4	+1

Регрессионный анализ полученных экспериментальных данных позволил аппроксимировать искомую математическую модель полным квадратичным полиномом:

$$\varepsilon = 1,62 - 0,0002 \cdot x_1 - 0,02 \cdot x_2 - 0,01 \cdot x_3 - 0,0125 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,004 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,008 \cdot x_2 \cdot x_3 + 0,0006 \cdot x_1^2 + 0,011 \cdot x_2^2 + 0,011 \cdot x_3^2 \quad (4)$$

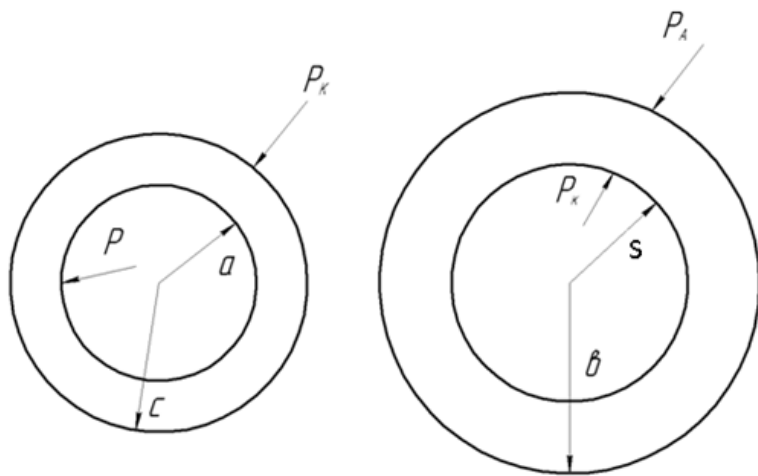
Уравнение (4) показывает изменение деформации, обусловленной ЭПФ с учетом изменения (варьирования) значимых факторов.

В третьей главе «Аналитические и численные методы решения задач деформирования цилиндрических оболочек» для двух видов разрабатываемых муфтовых соединений описаны инженерные расчеты путем адаптации задачи Ламе и реализованы конечно-элементные модели в интерфейсе ANSYS.

Рассмотрены соединения промышленных трубопроводов обжимной цилиндрической муфтой (рисунок 7а, 7б) и с помощью ступенчатой муфты (рисунок 9).

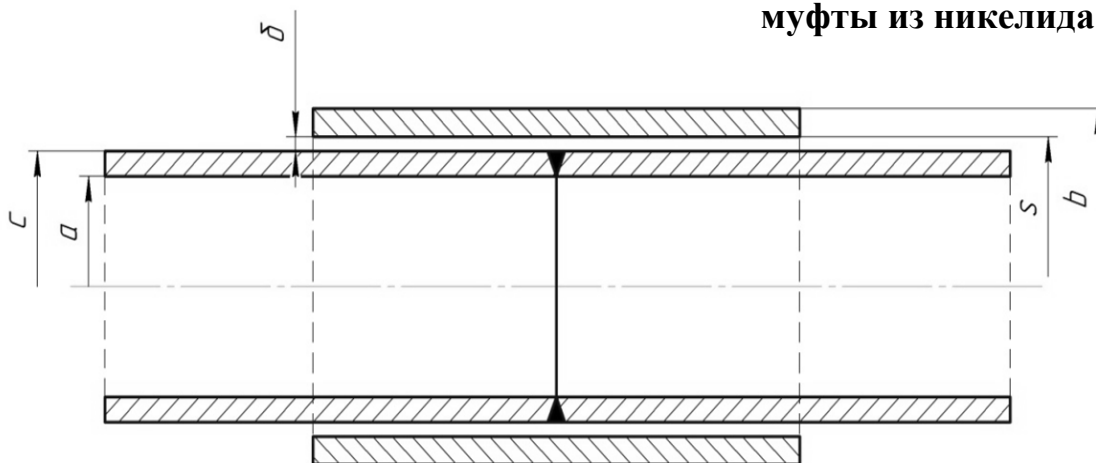
Оценка надежности соединений промышленных трубопроводов проводилась при следующих параметрах: в качестве модельных материалов берется сталь, близкая по свойствам к классу сталей 17Г1С, $\sigma_b = 530 \text{ МПа}$; $E = 2 \cdot 10^{11} \text{ Па}$ и

никелид титана ТН-1, $\sigma_s = 600$ МПа, принимаем коэффициент запаса прочности для стали и никелида титана, равный $n = 1,5$, при этом $[\sigma_1] = 355$ МПа; $[\sigma_2] = 400$ МПа; модуль Юнга для никелида титана $E = 7 \cdot 10^{10}$ Па.



a – внутренний радиус трубы; c – внешний радиус трубы; s – внутренний радиус муфты; b – внешний радиус муфты; P – внутреннее давление; P_a – атмосферное давление; P_k – контактное давление

Рисунок 7а – Схема поперечного сечения трубы из стали 17Г1С и муфты из никелида титана



a, c, s, b – обозначения те же что и в рисунке 7а; δ – зазор между соединяемыми элементами, равный $s - c$. Величина $(s - c)/1 \ll 1$, поэтому в дальнейших расчетах полагаем, что после «срабатывания муфты» $s \cong c$.

Рисунок 7б – Продольное сечение труб и муфты с ЭПФ

Расчёт цилиндрической муфты

Согласно решению задачи Ламе, находим кольцевые (окружные) и радиальные нормальные напряжения в стальной трубе при $c \leq r \leq b$:

$$\sigma_r^r = \frac{P_k \cdot c^2}{b^2 - c^2} \cdot \left(1 \pm \frac{b^2}{r^2}\right) - \frac{P_a^2 \cdot b^2}{b^2 - c^2} \cdot \left(1 \pm \frac{c^2}{r^2}\right), \quad (5)$$

В месте стыка труб внутреннее давление в трубе будет являться внутренним для муфты, механические напряжения, возникающие в муфте - σ_r^r будут:

$$\sigma_r^r = \frac{P \cdot c^2}{b^2 - c^2} \cdot \left(1 \pm \frac{b^2}{r^2}\right) - \frac{P_a^2 \cdot b^2}{b^2 - c^2} \cdot \left(1 \pm \frac{b^2}{r^2}\right), \quad (6)$$

Определение контактного давления между трубой и муфтой.

$$P_k = \frac{\Delta + \frac{4 \cdot P}{E_1} \cdot \frac{a^2 \cdot c}{c^2 - a^2}}{\left[\frac{1 - \mu_2}{E_2} \cdot \frac{c^3}{b^2 - c^2} + \frac{1 - \mu_1}{E_1} \cdot \frac{c^3}{c^2 - a^2} + \frac{1 + \mu_2}{E_2} \cdot \frac{b^2 \cdot c}{b^2 - c^2} + \frac{1 + \mu_1}{E_1} \cdot \frac{a^2 \cdot c}{c^2 - a^2} \right]}, \quad (7)$$

где E_1, E_2 – модули Юнга для стали и никелида титана;
 μ_1, μ_2 – коэффициенты Пуассона для стали и никелида титана.

Условие неразъемности соединения:

$$\alpha \cdot P_k \cdot 4 \cdot \pi \cdot c \cdot L \geq [\sigma^2] \cdot \pi \cdot (b^2 - c^2) \quad (8)$$

$$P_k \geq \frac{[\sigma^2] \cdot (b^2 - c^2)}{4 \cdot \alpha \cdot c \cdot L} \quad (9)$$

где α – коэффициент трения покоя между сталью и никелидом титана.

По 4-й энергетической теории прочности находим эквивалентные напряжения, что в полной мере соответствует интенсивности нормальных напряжений – σ_i в классической теории пластичности и записано в виде (10).

$$\sigma_i = \sigma_s = \sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_t^2 + \sigma_z^2 - \sigma_r \cdot \sigma_t - \sigma_z \cdot \sigma_r - \sigma_z \cdot \sigma_t}, \quad (10)$$

Для эффективности использования конструкции вводим условие загруженности конструкции

$$\max(\sigma_s^1(a); \sigma_s^1(c)) \geq k_1 \cdot [\sigma^1], \quad \max(\sigma_s^2(a); \sigma_s^2(c)) \geq k_2 \cdot [\sigma^2], \quad (11)$$

Коэффициенты $k_1 = k_2 = k$ принимали равным 0,8.

Зависимость минимальной длины соединения от величин технологических параметров (деформация, вызванная ЭПФ, зазор между трубой и муфтой) приведена на рисунке 8.

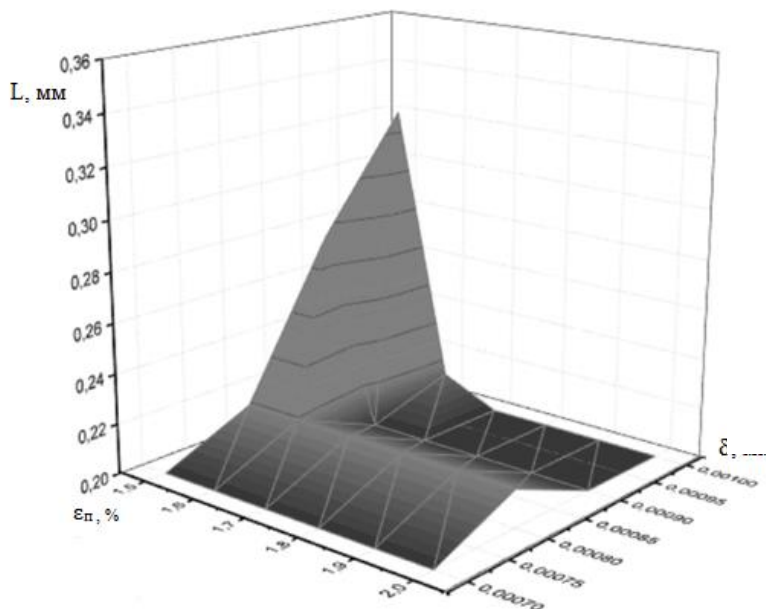
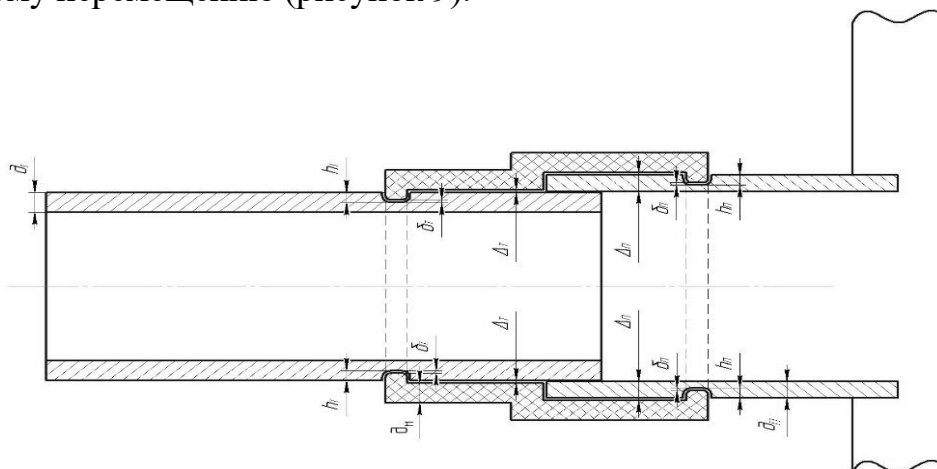


Рисунок 8 – Зависимость минимальной длины соединения от величин технологических параметров: деформация, вызванная ЭПФ - ε_p , зазор между трубой и муфтой- δ

Из рисунка видно, что вариация конструкционных параметров соединений: задаваемой деформации ЭПФ в радиальном направлении и величины технологического зазора в границах поверхности диаграммы позволяет получить оптимальную конструкцию муфты с соблюдением условий загруженности и неразъемности.

Расчёт цилиндрической ступенчатой муфты

Муфта ступенчатого профиля, с целью ограничения осевых перемещений, имеет два кольцевых выступа (буртика), на наружной поверхности трубы и патрубка есть ответные кольцевые углубления (проточки) препятствующий продольному перемещению (рисунок 9).



δ_T - толщина стальной трубы; δ_n - толщина стального патрубка;
 Δ_T - зазор между муфтой и трубой; Δ_n - зазор между муфтой и патрубком (задвигжкой); $\delta_T = \delta_n = \delta$ зазор между муфтой и соединяемыми элементами;
 h_T - глубина проточки в трубе, h_n - глубина проточки в патрубке
Рисунок 9 – Чертеж цилиндрической ступенчатой муфты

Для коротких муфт ступенчатого профиля задача Ламе в чистом виде не вполне приемлема и поэтому может быть использовано лишь как первое приближение для определения напряжений в муфте.

Расчёт кольцевых, радиальных нормальных напряжений находим по такому же принципу, как и в случае с цилиндрической муфтой.

Расчет контактного давления между трубой и муфтой.

Определяем разность перемещений для муфты и трубы:

$$u_2 - u_1 = \Delta, \quad (12)$$

где Δ натяг, который равен:

$$\Delta = \Delta_n - \delta, \quad (13)$$

Здесь Δ_n - величина радиального перемещения в муфте сформированная путем предварительного термомеханического воздействия; δ - величина радиального технологического зазора, используемая при монтаже соединения.

$$\Delta_n = r \cdot \varepsilon_n \quad (14)$$

Далее,

$$P_k = \frac{\Delta_n - \delta + \frac{4 \cdot P}{E_1} \cdot \frac{a^2 \cdot c}{c^2 - a^2}}{\left[\frac{1 - \mu_2}{E_2} \cdot \frac{c^3}{b^2 - c^2} + \frac{1 - \mu_1}{E_1} \cdot \frac{c^3}{c^2 - a^2} + \frac{1 + \mu_2}{E_2} \cdot \frac{b^2 \cdot c}{b^2 - c^2} + \frac{1 + \mu_1}{E_1} \cdot \frac{a^2 \cdot c}{c^2 - a^2} \right]}, \quad (15)$$

Условие нагруженности для данной конструкции имеет вид:

$$k_1 = \frac{\sigma_{\varepsilon 1}}{[\sigma_1]}; k_2 = \frac{\sigma_{\varepsilon 2}}{[\sigma_2]} \quad (16)$$

Оценка глубины буртика для трубы:

$$h_m \geq \frac{\varepsilon_n \cdot D_m}{2 \cdot (1 + \varepsilon_n)} \approx \frac{\varepsilon_n \cdot D_m}{2} = h_m^0 \quad (17)$$

где h_T – глубина проточки в трубе;

h_T^0 – минимальная величина проточки в трубе, при которой «буртик» не касается трубы.

Для патрубка:

$$h_n \geq \frac{\varepsilon_n \cdot D_n}{2 \cdot (1 + \varepsilon_n)} \approx \frac{\varepsilon_n \cdot D_n}{2} = h_n^0 \quad (18)$$

где h_{II} – глубина проточки в патрубке;

h_{II}^0 – минимальная величина проточки в патрубке, при которой «буртик» не касается трубы.

Оценка изменения кольцевых напряжений за счет проточек.

В проточках возрастают кольцевые напряжения, за счет уменьшения толщины стенки трубы. Для оценки номинальных напряжений приемлемо приближение тонкостенных сосудов по формуле (19):

$$\sigma_k = \frac{P \cdot D}{2 \cdot \delta} \quad (19)$$

где D – диаметр трубы, мм;

δ – толщина стенки трубы, мм.

В утонченном месте на глубину проточки – h

$$\sigma_k^y = \frac{P \cdot (D - 2 \cdot h)}{2 \cdot (\delta - h)} \quad (20)$$

Коэффициент усиления напряжений за счет утончения трубы на глубину проточки – h .

$$k = \frac{(D - 2 \cdot h) \cdot \delta}{D \cdot (\delta - h)} = \frac{\left(1 - \frac{2 \cdot h}{D}\right)}{\left(1 - \frac{h}{\delta}\right)} = \frac{\left(1 - \frac{h}{\delta} + \frac{h}{\delta} - \frac{2 \cdot h}{D}\right)}{1 - \frac{h}{\delta}} = 1 + \frac{\frac{h}{\delta} - \frac{2 \cdot h}{D}}{1 - \frac{h}{\delta}} \approx 1 + \frac{h}{\delta} \quad (21)$$

Тогда с учетом ослабления труб за счет проточек формулы для коэффициентов загруженности примут вид.

$$k_1 = \frac{\sigma_{\varepsilon 1}}{k_m \cdot [\sigma_1]}; \quad k_2 = \frac{\sigma_{\varepsilon 2}}{k_n \cdot [\sigma_2]} \quad (22)$$

На графиках ниже представлены зависимости, которые удалось получить в результате данного расчета.

Наибольший интерес представляет влияния величин проектировочных параметров – ε_n , δ на величины коэффициентов загруженности конструкций: $\sigma_{1\varepsilon_{KB}}/[\sigma_1]$ и $\sigma_{2\varepsilon_{KB}}/[\sigma_2]$, представленный на рисунках 10а, 10б.

Величины коэффициентов загруженности конструкций k_1 , k_2 довольно сложным образом зависят от величин параметров проектирования – ε_n , δ .

При этом характерным оказалось следующее: для трубной части, как для стальной трубы, так и для муфты из NiTi, справедливо, что коэффициенты с загруженностью в целом возрастают с ростом ε_n и с уменьшением δ на рисунках 10а, 10б. В то время как для патрубка, как для стальной его в части,

так и для муфты, коэффициенты k_1 , k_2 изменяются «волнообразно» при изменении величин проектировочных параметров.

На рисунке 10б представлена область изменения проектировочных параметров, отвечающая пересечению гиперповерхности и секущей плоскости на рисунке 10а.

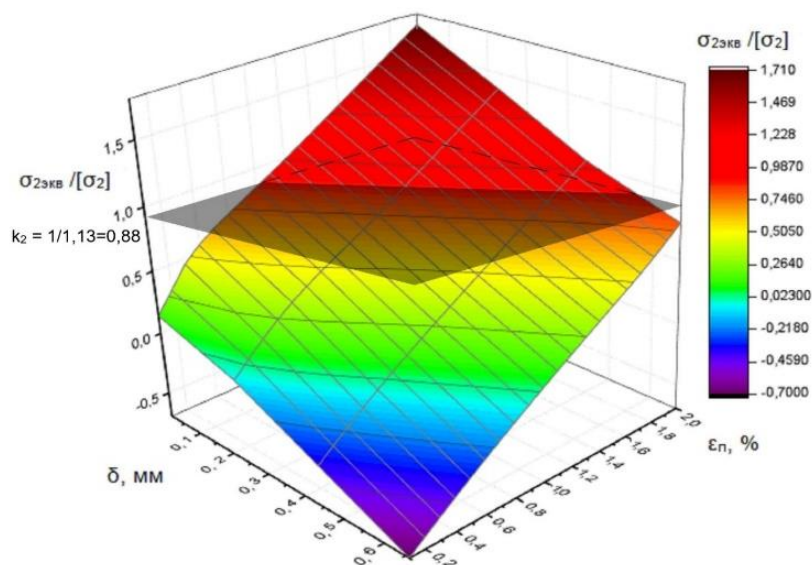


Рисунок 10а – Зависимость $k_2 = \sigma_{2экв}/[\sigma_2]$ от величин технологических параметров - ϵ_n , δ у муфты из никелида титана в области трубы. Здесь выполняется $k_2 < 1/1,13=0,88$

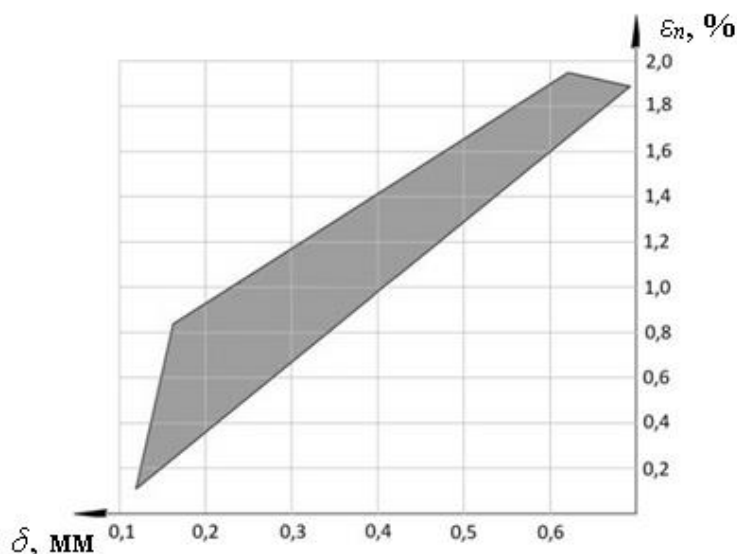


Рисунок 10б – Область задания допустимых проектировочных параметров $\delta - \epsilon_n$ удовлетворяющих условию прочности для ступенчатой муфты

Для учета всех необходимых факторов, влияющих на работу арматуры, проведено компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния неразъемного конструкционного соединения с ЭПФ в интерфейсе ANSYS.

Анализ напряженно-деформированного состояния муфт из материала с ЭПФ проводилась с учетом внутреннего и внешнего давлений, пространственных

привязок модели и напряжений, возникающих в зоне контакта муфты и тела трубопровода.

Моделированию и исследованию подверглись два конструктивных соединения, представляющие собой муфты из материала с ЭПФ: первая муфта имеет постоянный внутренний и внешний диаметр, вторая наиболее сложную форму – два разных значения внутреннего и внешнего диаметров. (рисунок 11)

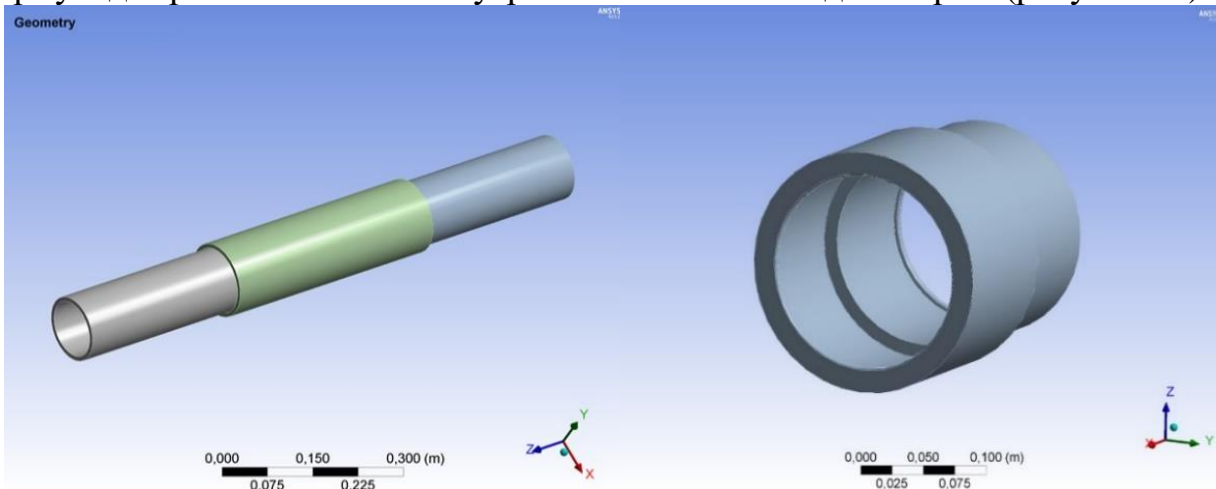


Рисунок 11 - Общий вид конструкций муфт

Решение задачи включает 4 этапа:

1. Основные допущения:

– выбор типа анализа и выбор контактной модели.

2. Преппроцессинг:

– построение формализованной физической 3D модели;

– задание свойств материалов;

– генерация конечно-элементной сетки, которая является

математическим представлением геометрической модели;

– нагружение и закрепление конструкции (рисунок 12);

– выбор расчётных параметров.

3. Расчёт.

4. Постпроцессинг:

– просмотр результатов и проверка достоверности решения.

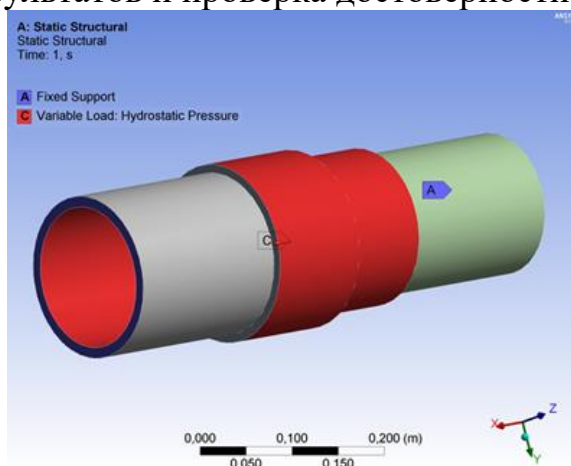


Рисунок 12 – Отображение граничных условий

Анализ полученных результатов

Общая вычислительная размерность расчетной модели цилиндрической муфты составила 31106 узлов, число элементов составило более 4700: муфта – 1482 элемента; трубы по 1564 элемента.

На рисунке 13 изображены эквивалентные напряжения конструкции в сборе для муфты, которая соединяет две трубы.

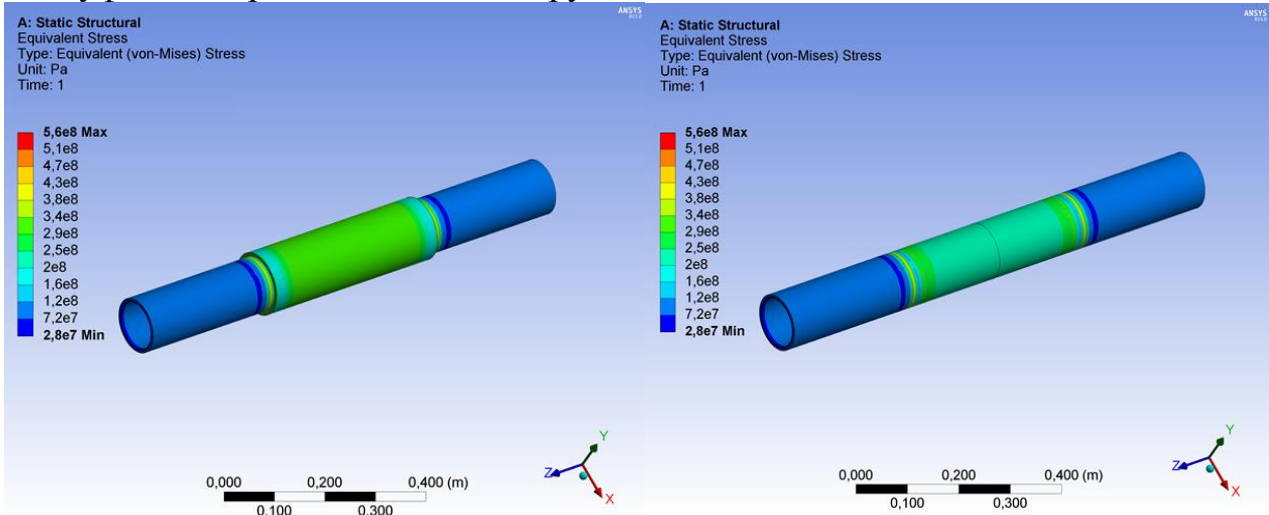


Рисунок 13 – Эквивалентные напряжения конструкции цилиндрической муфты

Общая вычислительная размерность расчетной модели муфты ступенчатого профиля составила 23180 узлов, число элементов составило более 11900: муфта – 4458 элементов; труба – 3776; задвижка – 3685.

Общий вид конструкции цилиндрической муфты ступенчатого профиля показан на рисунке 14.

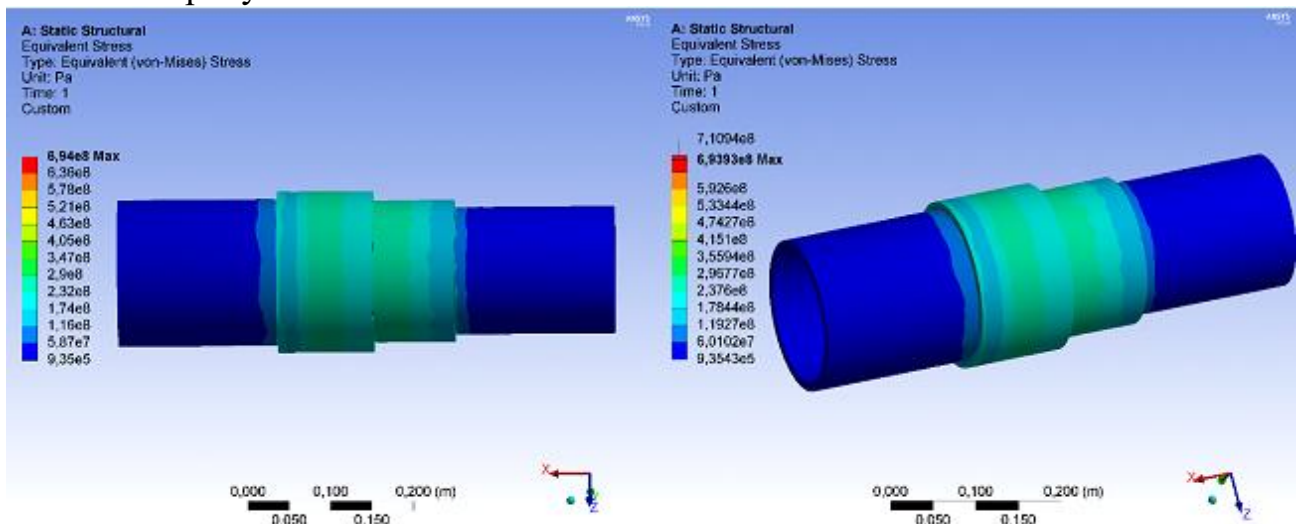


Рисунок 14 - Общий вид конструкции системы «задвижка – муфта – труба»

Напряжения, возникающие по телу муфты и соединяемыми частями, не превышают предела текучести материалов системы «задвижка – муфта – труба», что также обеспечивает целостность конструкции.

По результатам расчета двумя способами: расчетным и МКЭ была составлена таблица 3, в которой приведены численные значения эквивалентных напряжений, значения зазора и деформации памяти. Видно, что значения напряжений по обоим методам имеют схожие значения.

Таблица 3 – Сопоставление расчетных данных (эквивалентных напряжений) по методу решения задачи Ламе и ANSYS

Обозначение	Расчет аналитическим методом (Ламе), σ_3 , МПа	МКЭ ANSYS, σ_3 , МПа	Зазор, δ , мм	Деформация, вызываемая ЭПФ, ε_n , %
труба	120	110	0,4-0,8	1,0-1,8
муфта	240	230		
труба	107	104		
муфта	287	280		
задвижка	102	90		
муфта	270	255		
задвижка	97	87		
муфта	296	293		

В результате проведенного исследования, аналитических и компьютерных расчетов был определен **критерий обжимной жесткости** системы «муфта из материала с ЭПФ – стальная труба» - g .

$$g = \frac{E_A \cdot \varepsilon_n \cdot c}{E \cdot \delta} \quad (23)$$

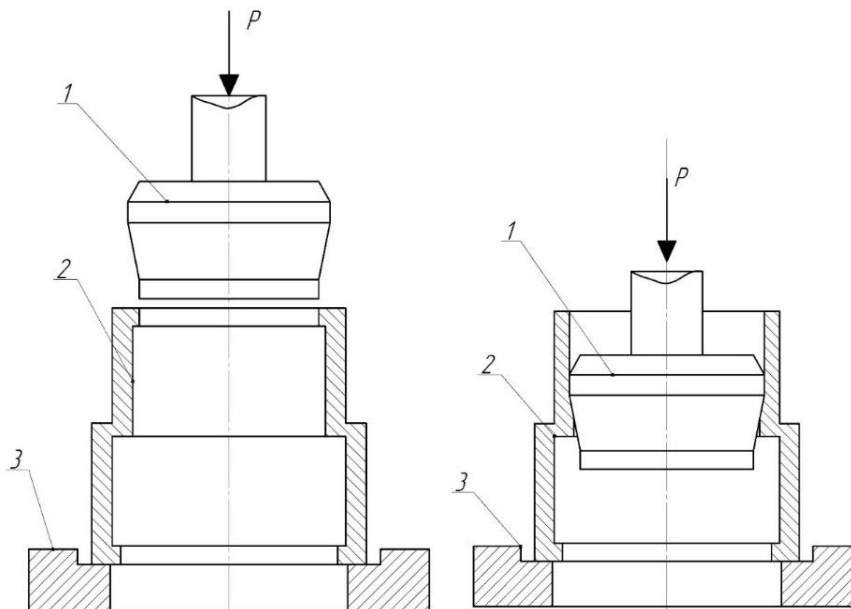
где E_A – модуль Юнга никелида титана, МПа;
 E – модуль Юнга стали, МПа;
 ε_n – деформация, вызванная ЭПФ, %;
 c – внутренний радиус муфты из никелида титана, мм;
 δ – зазор, между трубопроводом и муфтой, мм.

Данное уравнение отражает прямую зависимость параметра обжимной жесткости муфты от величины деформации памяти, и обратную зависимость от технологического зазора δ между муфтой и трубой. Вводимый параметр функционального состояния обжатия сможет обеспечить прочное и герметичное соединение муфты и трубы.

В четвертой главе «Предварительная деформация, сборка и эксплуатационная надежность муфт из никелида титана» описывается способ создания термомеханического соединения путем низкотемпературного деформирования и технология монтажа термомеханического соединения из NiTi.

Процесс дорнования происходит следующим образом (рисунок 15): втулка из NiTi, вместе с дорном охлаждается до температуры деформирования T_δ . В устройстве для дорнования муфт прошивка проталкивается до упора, а затем извлекается из муфты. Далее, в результате обратного мартенситного перехода, при последующем нагреве, материал втулки возвращается к исходному состоянию и заполняет проточки прошивки. Для того, чтобы материал муфты «запомнил» необходимый сформированный профиль, производится термомеханическая тренировка в несколько циклов.

Для удаления прошивки, втулка с прошивкой в приспособлении охлаждается до температуры деформирования и внешним усилием выталкивается в обратном направлении. Втулка подвергается визуальному контролю. Прошивки многократно используются для формирования втулок. В качестве хладагента целесообразно использовать диоксид углерода в твердом состоянии (сухой лед).



1 – рабочий инструмент; 2 – муфта; 3 – опора.

Рисунок 15 – Технологический чертёж радиальной раздачи муфты конической прошивкой

Процесс дорнования муфты ограничен и по скорости, и по времени. В результате деформации выделяется тепло, которое приводит к постепенному нагреву муфты и переходу материала в аустенит, что провоцирует частичное или полное восстановление её размеров сразу же после деформации.

Монтаж ТМС осуществляется следующим образом:

1. Подготовка оборудования и соединяемых трубопроводов для монтажа, разметка места установки ТМС, обеспечение радиального и осевого перемещение трубопроводов при сборке.

2. После разметки места установки муфты на один из трубопроводов устанавливается хомут-ограничитель. Он позволит произвести монтаж муфты наиболее точно.

3. За несколько циклов производится захолаживание концов трубопроводов трубоохладителями, до достижения минимальной температуры.

4. Полуvtулки монтажного ключа охлаждаются в хладагенте в течении нескольких минут параллельно процедуре захолаживания концов трубопроводов. По окончании захолаживания трубопроводов полуvtулки монтажного ключа раскрываются и в них помещается деформированная муфта. Ключ с муфтой остается в контейнере с хладагентом.

5. Концы труб освобождаются от охладителей. Труба без хомута-ограничителя оттягивается на необходимое расстояние для свободного перемещения монтажного ключа с муфтой.

6. Клещи переносятся из контейнера к оттянутой трубе, и муфта надевается на неё. Торцы труб совмещаются соосно, и муфта с помощью клещей перемещается до упора в ограничитель.

7. На другой трубе также устанавливается хомут ограничитель, для предотвращения осевого смещения, и муфта высвобождается из клещей. Далее муфта нагревается до температур обратного мартенситного превращения, происходит обжатие муфтой труб.

При соблюдении правил монтажа муфта обеспечит надёжное термомеханическое соединение с трубопроводом.

Основные выводы:

В диссертации, представляющей собой законченную научную работу, приведены разработанные автором теоретические и практические положения, совокупность которых можно квалифицировать как решение научной задачи разработки обоснованного технического решения по созданию технологичных и эффективных соединений для промышленных трубопроводов систем сбора и подготовки углеводородного сырья.

1. В результате анализа причин отказов на нефтепромысловых трубопроводных системах выявлено, что наиболее подвержены разрушениям места соединения трубопроводов и запорной арматуры ввиду существенного влияния эксплуатационных факторов и окружающей среды.

2. На основе проведённого экспериментального исследования по определению функциональной зависимости деформации, обусловленной ЭПФ от температуры, установлено, что термомеханические характеристики сплава ТН-1, близкого к эквиацетному (Ni50,75%Ti49,25%), являются оптимальными из исследованных образцов для обеспечения герметичного обжатия муфтой в интервале эксплуатационных температур.

3. На основе аналитических расчетов определены значения рациональных параметров муфтового соединения из никелида титана, обеспечивающие герметичность термомеханического соединения: деформация, обусловленная ЭПФ $\varepsilon_n = 1,0-1,8 \%$, технологический зазор $\delta = 0,4-0,8$ мм.

4. Методом конечных элементов реализована модель термомеханического соединения из никелида титана, показывающая распределение возникающих напряжений в муфте и соединяемых частях; полученные значения $\sigma_{эжв}$ находятся в диапазоне 87-296 МПа и не превышают предела прочности и текучести материала.

5. Разработана технология монтажа термомеханического соединения из никелида титана на промышленные трубопроводы путем низкотемпературного деформирования, определены технологические параметры для дорнования муфт: усилие деформирования 70,5 кН, температура внутренней поверхности муфты 223К при изменяющейся скорости прошивки.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

Публикации в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК РФ:

1. Андронов, И. Н. Использование соединения из материала с памятью в качестве функционального элемента водоводов высокого давления / И. Н. Андронов, Е. В. Семиткина // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2016. – №10. – С.45-49.

2. Андронов, И. Н. Применение муфты переменного диаметра из материала с памятью в качестве соединительного элемента на промышленных трубопроводах / Андронов И. Н., Семиткина Е. В. // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море - 2017 - № 11. - С. 20-25.

3. Андронов, И. Н. Компьютерное моделирование НДС неразъемного конструкционного соединения с эффектом памяти формы в интерфейсе Ansys / И. Н. Андронов, Е. В. Семиткина // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2018. – №6. – С.47-52.

Публикации в научно-технических сборниках и других изданиях:

4. Карнович (Семиткина), Е. В. Использование хомутов из материалов СПФ в нефтегазотранспортной отрасли / Карнович Е. В., Тюфякова М. В. // Международная научная конференция «Сплавы с эффектом памяти формы: свойства, технологии, перспективы» (26-30 мая 2014 г.) – Витебск, Беларусь: Институт технической акустики НАН Беларуси, 2014. – С. 28.

5. Семиткина, Е. В. Проектирование силовых конструкций с памятью формы с использованием эффекта низко-температурной сверхпластичности / Семиткина Е. В., Тюфякова М. В. // Международный семинар «Рассохинские чтения» (7-8 февраля 2015 г.): в 2 ч. ; ч.1. – Ухта :УГТУ, 2015. – С.114-120.

6. Андронов, И. Н. Технология неразъемного муфтового соединения водоводов высокого давления / Андронов И. Н., Семиткина Е. В. // Сборник материалов конференции: «Материалы для технических устройств и конструкций, применяемых в Арктике» (26 ноября 2015 года, г. Москва). – Москва: ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ, 2015. – №34. С. 340-350.

7. Семиткина, Е. В. Термомеханические соединения труб малых диаметров / Семиткина Е. В. // Международный семинар «Рассохинские чтения» (4-6 февраля 2016 г.): в 2 ч. ; ч.1. – Ухта :УГТУ, 2016. – С.110-113.

8. Семиткина, Е. В. Разработка конструкции неразъемного соединения для труб малых диаметров / Семиткина Е. В., Терентьева М. В. // XVII международная молодежная научная конференция «СЕВЕРГЕОЭКОТЕХ-2016» (23-25 марта 2016 г.). – Ухта : УГТУ, 2016. – С.97-99.

9. Семиткина, Е. В. Муфта переменного диаметра из никелида титана в качестве соединительного элемента для систем ППД / Семиткина Е. В. // XVII международная молодежная научная конференция «СЕВЕРГЕОЭКОТЕХ-2017» (12–14 апреля 2017 г.): в 5 ч. ; ч.1. – Ухта :УГТУ, 2017. – С.110-113.

10. Андронов, И. Н. Моделирование силового воздействия в сплавах с мартенситной неупругостью / И. Н. Андронов, Н. П. Богданов, Е. В. Семиткина // Физико-математическое моделирование систем. XVIII Международный семинар (30 июня 2017 г.). – Воронеж: ВГТУ, 2017. – С. 179-184.

11. Семиткина, Е. В. Проектирование муфты переменного диаметра для соединения трубопроводной арматуры / Семиткина Е. В. // II Международная научно-техническая конференция молодежи ПАО «Транснефть» в АО «Транснефть-Север». Этап 2. (22 - 25 ноября 2017 г.). - Ухта: УГТУ. 2017. – С.18.

12. Семиткина, Е. В. Определение НДС неразъемного конструкционного соединения с ЭПФ в интерфейсе Ansys / Семиткина Е. В. // XIX международная молодежная научная конференция «СЕВЕРГЕОЭКОТЕХ-2018» (21-23 марта 2018 г.): в 2 ч. ; ч.1. – Ухта :УГТУ, 2019. – С.191-195.

