

На правах рукописи



ТОЛМАЧЕВ АРТЕМ АЛЕКСЕЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
НИЗКОНАПОРНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ИЗ
ПОЛИМЕРНЫХ АРМИРОВАННЫХ ТРУБ**

Специальность 2.8.5. Строительство и эксплуатация
нефтегазопроводов, баз и хранилищ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тюмень – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тюменский индустриальный университет» на кафедре «Транспорт углеводородных ресурсов».

Научный руководитель: **Иванов Вадим Андреевич**,
доктор технических наук, профессор, профессор
кафедры «Транспорт углеводородных ресурсов»
ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный
университет».

Официальные оппоненты: **Сенцов Сергей Иванович**,
доктор технических наук, доцент, профессор
кафедры «Сооружение и ремонт
газонефтепроводов и хранилищ» ФГАОУ ВО
«Российский государственный университет нефти
и газа (национальный исследовательский
университет) имени И.М. Губкина»;

Виноградов Дмитрий Анатольевич,
кандидат технических наук, доцент, доцент
кафедры «Прикладные и естественнонаучные
дисциплины (ПЕД)» ФГБОУ ВО «Уфимский
государственный нефтяной технический
университет».

Ведущая организация: АО «Гипрониигаз», г. Москва.

Защита состоится «25» сентября 2025 года в 13 часов 30 минут на заседании диссертационного совета 24.2.419.03, созданного на базе ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», по адресу: 625000, г. Тюмень, ул. Мельникайте, 70, ауд. 312.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотечно-издательском комплексе ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет» и на сайте www.tyuiu.ru.

Автореферат разослан «04» августа 2025 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Пономарева Татьяна Георгиевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Приказом Минпромторга России № 2192 от 14.06. 2023 г. «Об утверждении плана мероприятий по импортозамещению в отрасли нефтегазового машиностроения Российской Федерации на период до 2024 года» Правительством РФ была утверждена стратегия по увеличению доли отечественных технологий в секторе добычи нефти и газа, в том числе в производстве полимерных труб. Также распоряжением Правительства РФ № 207-р от 13.02.2019 г. «Об утверждении Стратегии пространственного развития до 2025 года» были определены меры по повышению качества транспортной и энергетической инфраструктуры, в том числе за счет модернизации и расширения систем трубопроводного транспорта для добычи, сбора, подготовки, транспортировки и хранения углеводородов. Реализация этих мер требует особого внимания к новым технологиям разработки, добычи и транспортировки нефти и газа при направлении развития на импортозамещение иностранных технологий в российской промышленности.

Значительная часть объектов нефтегазовой отрасли РФ сосредоточена в Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции, где расположены перспективные залежи углеводородного сырья в многолетнемерзлых грунтах. Доставка энергоносителей от месторождений до потребителей планируется как по вновь строящимся трубопроводам, так и по существующим. Для транспортировки углеводородов от куста скважины до пункта сбора в большинстве своем используются стальные трубы с внутренней антикоррозионной защитой. Это связано с тем, что нефть с куста представляет собой смесь из множества индивидуальных веществ, большая часть которых – это жидкие углеводороды и гетероатомные органические соединения, преимущественно сернистые, азотистые и кислородные, а также металлоорганические соединения. Стальные трубы, используемые для транспортировки такой нефти, должны иметь повышенную химическую устойчивость.

Промысловые нефтегазопроводы представляют собой сложные и дорогостоящие сооружения, поэтому проблема обеспечения конструктивной надежности при их сооружении с использованием прогрессивных технологий и дальнейшей эксплуатации имеет важное народнохозяйственное значение. В настоящее время все большее распространение в строительстве промысловых нефтегазопроводов

получили трубы из полимерных, агрессивно-стойких материалов (полиэтилен, полипропилен, стеклопластик и др.), которые обладают рядом преимуществ в сравнении со стальными трубами. По состоянию на 2023 год, российский рынок полимерных труб, используемых в нефтегазовой отрасли, обеспечен отечественным производством чуть более чем на 30 %. Остальной объем поставок полимерных труб осуществляется за счет импорта из КНР.

Таким образом, особую актуальность приобретает задача по разработке новых отечественных технологий (новых конструкций полимерных труб), а также методов оценки напряженно-деформированного состояния таких труб с позиции строительной механики (как сооружений со случайным характером изменения нагрузок и прочностных характеристик материалов).

Степень разработанности темы исследования

Исследованиям по обеспечению надежности трубопроводных систем из полимерных труб, а также разработке теоретических и практических разделов при их сооружении посвящены многочисленные труды таких ученых, как А. Н. Аношкин, В. И. Берг, М. Н. Боктицкий, Г. Г. Васильев, С. А. Горелов, М. И. Гориловский, Ю. А. Горяинов, А. Н. Громов, Б. П. Елькин, Ю. Д. Земенков, В. А. Иванов, В. Ю. Каргин, Б. А. Киселев, А. М. Короленок, И. Г. Лавров, Б. В. Моисеев, А. Б. Поспелов, А. А. Разбойников, С. А. Рейтлингер, В. С. Ромейко, С. И. Сенцов, Д. А. Серебренников, А. А. Синюгин, А. А. Тарасенко, В. Е. Удовенко, М. Н. Чекардовский, А. Б. Шабаров, В. А. Шамин, А. А. Шевченко, С. В. Якубовская, Э. М. Ясин и др.

В настоящее время созданы конструкции и описаны технологии производства полимерных труб. Исследования и научно-технические разработки в этой области проводились научно-исследовательскими институтами.

ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ» с 2013 по 2019 гг. проводило опытно-промышленные испытания труб из альтернативных материалов в рамках эксплуатации промысловых нефтегазопроводов. ФГБУН ФИЦ «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» с 2012 по 2016 гг. изучал эксплуатационные свойства полиэтиленовых труб и их сварных соединений в условиях отрицательных температур. ООО «НИИ Транснефть» в период с 2010 по 2018 гг. занималось разработкой общих технических решений, обеспечивающих безопасную и надежную работу технологических нефтепроводов из полимерных

армированных труб для применения их при проектировании, строительстве и эксплуатации.

Как показал анализ специальной литературы и обзор научно-технических разработок, вопросы проектирования, строительства и эксплуатации нефтегазопроводов из полимерных труб при нормальных условиях достаточно полно изучены. Однако проблематика монтажа и эксплуатации полимерных труб при отрицательных температурах, а также отсутствие методов превентивного выявления и определения дефектных участков в ходе выполнения проектных и строительных работ требуют дополнительных исследований.

Цель диссертационной работы – разработка методики оценки напряженно-деформированного состояния нефтегазопроводов из многослойных полипропиленовых армированных труб (МПАТ) для своевременного выявления участков с недопустимыми упруго-пластическими деформациями при экстремально низких температурах.

Основные задачи исследования:

1. Установить зависимость изменения следующих физико-механических характеристик МПАТ при различных температурах: предел прочности, предел текучести, относительное удлинение при максимальной разрушающей нагрузке, модуль упругости;
2. Разработать математическую модель напряженно-деформированного состояния МПАТ при упруго-пластических деформациях в условиях отрицательных температур;
3. Определить минимально допустимые радиусы изгиба нефтегазопроводов из МПАТ при различных температурах;
4. Разработать методику, позволяющую своевременно выявлять участки нефтегазопроводов из МПАТ с недопустимыми упруго-пластическими деформациями при отрицательных температурах.

Объектом исследования являются промышленные нефтегазопроводы из МПАТ, эксплуатируемые в условиях пониженных температур окружающей среды.

Предметом исследования является динамика изменения прочностных характеристик МПАТ под действием различных температур.

Научная новизна работы:

1. Установлены аналитические зависимости физико-механических и деформационных характеристик МПАТ в диапазоне температур от $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$;
2. Разработанная математическая модель напряженно-деформированного состояния МПАТ описывает работу трубопроводов при упруго-пластических деформациях с учетом температурных перепадов от $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$;
3. Установлено, что минимальный допустимый радиус изгиба МПАТ при снижении температуры до $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ увеличивается на 11% по сравнению с минимальным допустимым радиусом изгиба при температуре $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$, что свидетельствует о снижении минимально допустимого диаметра изгиба для МПАТ при прокладке трубопроводов при отрицательных температурах;
4. Разработана методика оценки напряженно-деформированного состояния МПАТ при осевых и продольных нагрузках с учетом изгибающих воздействий, характерных для трубопроводов, эксплуатируемых в условиях отрицательных температур окружающей среды.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Полученные аналитические зависимости физико-механических и деформационных характеристик МПАТ в диапазоне температур от $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ позволят уточнить расчеты при выборе минимально допустимого диаметра изгиба для МПАТ при прокладке трубопроводов в условиях отрицательных температур;
2. Разработанная математическая модель напряженно-деформированного состояния МПАТ позволяет выявлять участки с недопустимыми напряжениями при температурных перепадах от $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ и в режиме реального времени оперативно определять появление аварийно-опасных критических зон, что в перспективе снизит эксплуатационные риски и повысит надёжность транспортной системы в целом;
3. Разработанная методика оценки напряженно-деформированного состояния промысловых трубопроводов из МПАТ позволяет дать превентивную оценку возможности эксплуатации нефтегазопроводов из полимерных армированных труб при отрицательных температурах, достигающих $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$;
4. На основании экспериментальных и теоретических исследований разработана МПАТ, позволяющая увеличить ресурс систем трубопроводного транспорта для сбора, подготовки, транспортировки и хранения углеводородов, распределения, газоснабжения и нефтепродуктообеспечения.

Методология и методы исследования

При выполнении диссертационного исследования применялся комплексный подход, который включал в себя научный анализ, планирование и проведение экспериментальных исследований и интерпретацию полученных результатов. В диссертации использовались концептуальные положения теории упругости, строительной механики и методы математического анализа, разработанные в научных трудах отечественных и зарубежных ученых.

Экспериментальные исследования проводились с помощью разрывной машины МТ-130К-О с низкотемпературной камерой, с рабочим диапазоном температур от +150 °С до -70 °С и точностью показаний 0,1 °С и пневмогидравлической насосной станцией ПГН-500К с максимальным давлением до 50 МПа. Экспериментальные данные интерпретировались с помощью встроенного микропроцессора на персональном компьютере.

Для решения задач исследования использовались современные средства численного моделирования, в том числе ПО MathCAD, Старт-Проф и ПАССАТ.

Положения, выносимые на защиту:

1. Значения деформации от напряжения образцов МПАТ при различных температурах позволяют характеризовать механические, прочностные и эксплуатационные характеристики промышленных трубопроводов из МПАТ;
2. Теория криволинейных стержней и кривых тонкостенных труб является основой математической модели напряженно-деформированного состояния МПАТ, в том числе для промышленных трубопроводов из полимерных армированных труб;
3. Применение метода конечных разностей для оценки параметров напряженно-деформированного состояния МПАТ повышает точность определения напряжений, возникающих в промышленных трубопроводах из МПАТ.

Личный вклад автора заключается в формировании методического подхода к проведению экспериментов и обработке их результатов; формулировании положений научной новизны, теоретической и практической значимости. Соискатель принял непосредственное участие в разработке математической модели, патентовании и внедрении результатов исследования.

Степень достоверности результатов работы обеспечена применением известных достижений строительной механики, теории криволинейных стержней и кривых тонкостенных труб, численного решения дифференциальных уравнений и

подтверждается высоким коэффициентом множественной корреляции с данными расчетных экспериментов, выполненных с применением общепризнанных универсальных методов. Экспериментальные исследования проведены с использованием современных технологий на стандартизированном оборудовании в соответствии с требованиями нормативно-технических регламентов РФ. Апробация и верификация математической модели выполнена с применением теории планирования многофакторного эксперимента.

Апробации результатов

Основные результаты работы и отдельные положения диссертации докладывались и обсуждались: на Международной научно-технической конференции «Арктика: Современные подходы к производственной и экологической безопасности в нефтегазовом секторе» (г. Тюмень, 2020); на Всероссийской научно-технической конференции «Комплексное изучение и освоение недр Европейского Севера России» (г. Ухта, 2021); на VI Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы научного знания. Новые технологии ТЭК-2022» (г. Тюмень, 2022); на Всероссийской (национальной) научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Проблемы функционирования систем транспорта» (г. Тюмень, 2022); на Международной научно-технической конференции «Транспортные и транспортно-технологические системы» (г. Тюмень, 2023); на Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Транспорт и хранение углеводородного сырья» (г. Тюмень, 2023).

Публикации

Основные положения и результаты исследований отражены в 14 публикациях, в том числе 4 статьях в журналах, рекомендованных ВАК РФ. Также получен 1 патент РФ на полезную модель изобретения.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности Рассматриваемая область исследования соответствует паспорту специальности 2.8.5. Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ по п. 1: «Технологические процессы и технические средства для проектирования, сооружения, эксплуатации, теоретические и практические основы взаимодействия объектов трубопроводного транспорта с окружающей средой с целью создания высокоэффективных, энерго- и ресурсосберегающих, надежных, механически и

экологически безопасных сухопутных и морских систем трубопроводного транспорта для добычи, сбора, подготовки, транспортировки и хранения углеводородов, распределения, газоснабжения и нефтепродуктообеспечения, а также других газовых, жидкостных и многофазных сред, гидро- и пневмоконтейнерного транспорта» и п. 4: «Методы и средства информационных технологий, моделирования, мониторинга, прогнозирования, интеллектуального инжиниринга и управления, автоматизации и роботизации, стандартизации и цифровизации технологических процессов проектирования, сооружения, эксплуатации, диагностики, ремонта сухопутных и морских систем трубопроводного транспорта для добычи, сбора, подготовки, транспортировки и хранения углеводородов, распределения, газоснабжения и нефтепродуктообеспечения, а также других газовых, жидкостных и многофазных сред, гидро- и пневмоконтейнерного транспорта с целью повышения эффективности, надежности и безопасности использования отраслевого потенциала и ресурса трубопроводных конструкций».

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, включающего 151 источник, в том числе 6 иностранных, и 4 приложений. Диссертация изложена на 132 страницах, содержит 43 рисунка и 11 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе выполнен обзор специальных источников и научно-технических разработок, посвященных методикам обеспечения надежности трубопроводных систем из полимерных и полимерных армированных труб, исследованиям теоретических и практических разделов при их сооружении, а также обстоятельно рассмотрена продукция инновационно-ориентированных предприятий, освоивших опытное или серийное производство полимерных армированных труб.

Для повышения надёжности полимерных армированных труб при прокладке и ремонте трубопроводов необходимо учитывать их напряженное состояние. Методам анализа показателей напряженно-деформированного состояния криволинейных стержней, испытывающих воздействие изгиба, кручения, сдвига и осевых сил, посвящены работы ученых С. А. Горелова, А. К. Касумова, А. В. Крайнова, Л. С. Ляховича, А. Ю. Одиноква, А. Р. Ржаницына, В. И. Савинова, С. В. Якубовской и др. Ими разработаны расчетные зависимости,

проведены натурные эксперименты. Работы В. В. Антонова, Г. М. Бартенева, А. И. Безухова, В. И. Герасимова, О. В. Лужина посвящены исследованиям по расчету стержней из композитных материалов. Важно отметить, что разработками методик для оценки остаточного ресурса полиэтиленовых и полипропиленовых нефтегазопроводов в РФ занимались такие компании, как ООО «Газпром ВНИИГАЗ», ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ» и ООО «НИИ Транснефть».

Высоко оценивая исследования специалистов, заметим, что вопросы исследования напряженно-деформированного состояния полимерных и полимерных армированных труб при воздействии различных температур не рассматривались.

Несмотря на высокую себестоимость продукции и небольшой объем производства, рынок полимерных труб можно считать вполне сформированным. В качестве примера на Рисунках 1 и 2 представлена структура потребления труб в нефтегазовой отрасли РФ по состоянию на 2021 год и доля РФ на мировом рынке полимерно-армированных труб в 2023 году соответственно.

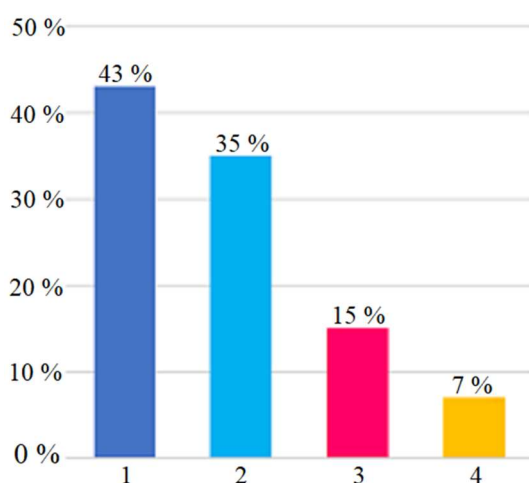


Рисунок 1 – Структура потребления труб в нефтегазовой отрасли РФ по состоянию на 2021 год: 1 – стальные трубы; 2 – металлопластиковые трубы; 3 – трубы из сшитого полиэтилена; 4 – трубы из термостабилизированного полипропилена

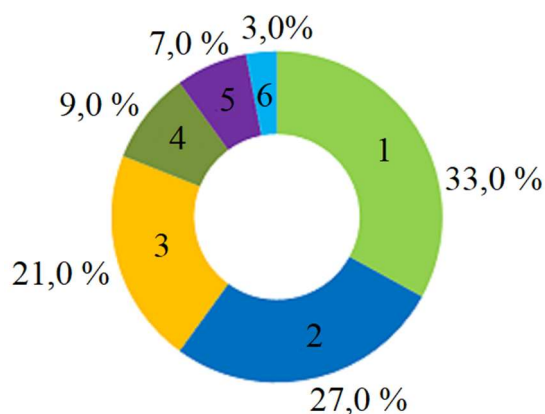


Рисунок 2 – Доля РФ на мировом рынке полимерно-армированных труб в 2023 году: 1 – США; 2 – Европа; 3 – Азиатско-Тихоокеанский регион; 4 – Ближний Восток и Африка; 5 – Латинская Америка; 6 – РФ

Анализ рынка полимерных труб РФ показал, что по состоянию на 2022 год, лишь несколько инновационно-ориентированных предприятий освоили опытное или серийное производство полимерных труб, которые могут быть использованы для сооружения нефтегазопроводов в районах Крайнего Севера, для которых характерны экстремально низкие температуры. Низкий процент использования полимерных труб в ТЭК РФ можно объяснить невозможностью преодоления конку-

ренции широкодоступных и сравнительно дешевых стальных труб и консервативным подходом нефтегазовых компаний к проектированию и строительству.

В работе выполнен обзор известных трубных продуктов компаний ООО «Балтикфлекс», ООО «ПОЛИМАК», ООО «Реммаш-Сервис» и др. Сравнительный анализ физико-механических характеристик составных частей полимерных армированных труб показал, что для повышения устойчивости к действию внешних и внутренних напряжений и деформаций используются многослойные конструкции труб. Стоит отметить, что характеристики полимерных материалов нестабильны, их следует рассматривать как ориентировочные, каждый раз необходимо проверять их численные значения для запланированной области применения.

Таким образом, определена необходимость в разработке методики, которая определяла бы напряженно-деформированное состояние многослойных полимерных армированных труб, работающих в зоне упруго-пластических деформаций при одновременном действии изгиба и растяжения, при воздействии экстремально низких температур, характерных для районов Крайнего Севера.

Для разработки методики требуется комплексная математическая модель, описывающая поведение подземного трубопровода из МПАТ при экстремально низких температурах, характерных для районов Крайнего Севера, а также полные графики зависимости прочности от деформации МПАТ.

В первой главе сформулированы цель, задачи и основные положения, выносимые на защиту.

Во второй главе представлены результаты экспериментальных исследований по определению механических и прочностных характеристик МПАТ. Информация об исследованиях трубопроводов из МПАТ при упруго-пластических деформациях от одновременного действия изгиба и растяжения, в условиях воздействия экстремально низких температур не представлена в открытой печати. Необходимо провести эксперименты с целью исследования физико-механических свойств МПАТ.

На имеющемся оборудовании, прошедшем аттестационную проверку, проведены испытания в 2 этапа – на растяжение и на избыточное давление. Для получения воспроизводимых результатов экспериментальных исследований в каждой точке проводились дополнительные контрольные испытания.

На этапе 1 для определения механических свойств МПАТ проведены испытания на одноосное растяжение с помощью разрывной машины МТ-130К-0 с низкотемпературной камерой, с диапазоном от +150 °С до -70 °С. В качестве примера

на Рисунке 3 представлены образцы-лопатки, которые изготовлены в соответствии с требованиями ГОСТ 11262-2017. Тип образцов-лопаток – 2, толщина – 18,7 мм, общая длина – 200 мм (из которых 170 мм – длина рабочей части). При испытании на растяжение образцы-лопатки растягивались вдоль их главной продольной оси с постоянной скоростью 25 мм/мин. В процессе растяжения проводились замеры нагрузки, выдерживаемой образцами. Температуры испытаний были заданы +20 °С, 0 °С, -15 °С, -30 °С, -45 °С и -60 °С соответственно. В процессе проведения испытаний измерялась температура, максимальная прочность при растяжении образцов-лопаток, их относительное удлинение при максимальной нагрузке и относительное удлинение при разрушении, модуль упругости.

На этапе 2 для определения механических свойств МПАТ проведены испытания на избыточное давление образцов-катушек трубы с использованием пневмогидравлической насосной станции ПГН-500К с максимальным развиваемым давлением до 50 МПа. В качестве примера на Рисунке 4 представлен образец-катушка, который изготовлен в соответствии с требованиями ГОСТ Р 58121.2-2018. Параметры образцов-катушек: длина – 1500 мм, толщина стенки – 18,7 мм, наружный диаметр – 315 мм. В процессе испытаний внутри образцов-катушек создавалось давление с использованием воды, которое постепенно увеличивалось через равные промежутки времени от 0 МПа до 30,1 МПа. Контроль давления, при котором происходило разрушение образцов-катушек, осуществлялся с помощью образцового манометра с классом точности не менее 1,5.



Рисунок 3 – Образцы-лопатки МПАТ



Рисунок 4 – Образец-катушка МПАТ
с концевыми заглушками

В результате испытаний на этапе 1 для каждой группы образцов получены усредненные значения максимальной прочности при растяжении, модуля упругости, относительного удлинения при максимальной нагрузке и относительного удлинения при разрушении образцов-лопаток. При испытаниях значения макси-

мальной прочности при растяжении менялись от 17,6 МПа до 46,4 МПа, модуля упругости – от 718,3 МПа до 1689,7 МПа. Значения относительного удлинения при максимальной нагрузке изменялись в диапазоне от 11,4 % до 5,2 %, а значения относительного удлинения при разрушении – от 59,4 % до 15,9 %. В Таблице 1 представлены усредненные значения для каждой группы образцов-лопаток.

Таблица 1 – Результаты испытаний на растяжение образцов-лопаток

$T, ^\circ\text{C}$	Группа образцов	$\sigma_{cp}, \text{МПа}$	$\varepsilon_{Tcp}, \%$	$\varepsilon_{Pcp}, \%$	$E_{cp}, \text{МПа}$
+20	1	17,6	11,4	59,4	718,3
0	2	24,1	8,2	32,5	968,3
-15	3	30,7	7,1	25,5	1263,5
-30	4	35,6	5,9	23,5	1355,5
-45	5	40,2	5,7	21,4	1527,4
-60	6	46,4	5,2	15,9	1689,7

где T – температура испытания, $^\circ\text{C}$; σ_{cp} – среднее значение максимальной прочности при растяжении, МПа; ε_{Tcp} – среднее значение относительного удлинения при максимальной нагрузке, %; ε_{Pcp} – среднее значение относительного удлинения при разрушении образца-лопатки, %; E_{cp} – среднее значение модуля упругости, МПа.

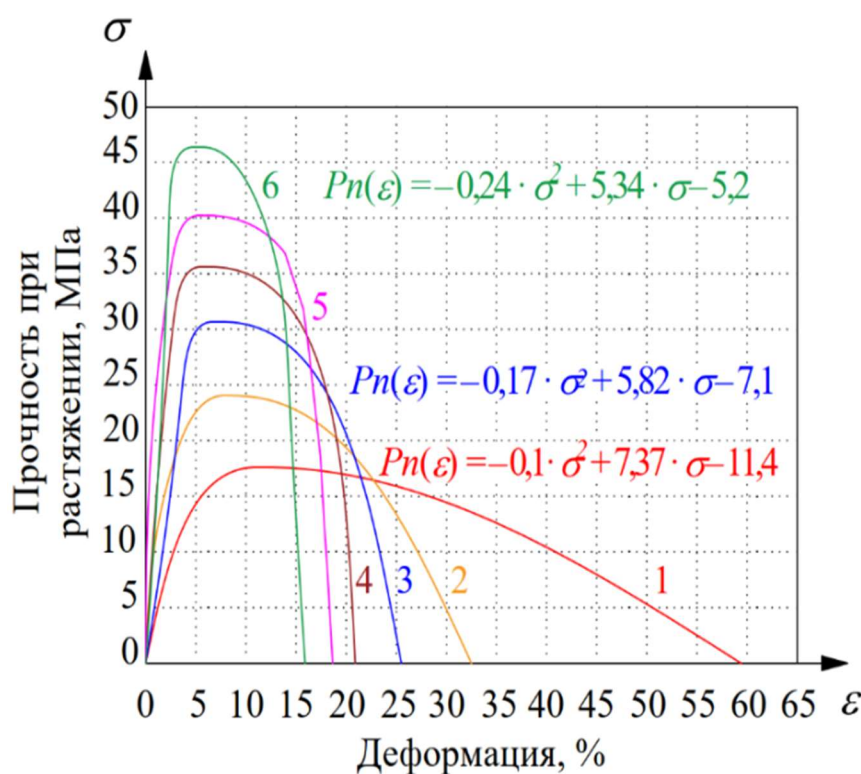


Рисунок 5 – Диаграмма деформирования образцов-лопаток при растяжении

где 1 – группа образцов с температурой испытаний $+20\text{ }^\circ\text{C}$;
 2 – группа образцов с температурой испытаний $0\text{ }^\circ\text{C}$;
 3 – группа образцов с температурой испытаний $-15\text{ }^\circ\text{C}$;
 4 – группа образцов с температурой испытаний $-30\text{ }^\circ\text{C}$;
 5 – группа образцов с температурой испытаний $-45\text{ }^\circ\text{C}$;
 6 – группа образцов с температурой испытаний $-60\text{ }^\circ\text{C}$;
 σ – прочность при растяжении, МПа;
 ε – деформация, %;
 $Pn(\varepsilon)$ – полином Ньютона.

На Рисунке 5 представлена диаграмма деформирования групп образцов-лопаток в температурном диапазоне от +20 °С до -60 °С, построенная на основании усредненных данных Таблицы 1.

Из представленной деформационно-прочностной диаграммы (Рисунок 5) видно, что разрушение образцов-лопаток определяется снижением сопротивляемости материала пластическим деформациям в вершине трещины при понижении температуры испытаний на растяжение. Таким образом, в квазистатических испытаниях на кратковременную прочность при растяжении образцов-лопаток получены полные графики зависимости прочности от деформации, определены механические и прочностные характеристики образцов.

В результате испытаний на этапе 2 все образцы-катушки разрушились под действием избыточного давления. Усредненное значение разрушающего давления при +20 °С составляет 27,4 МПа, что превышает усредненное значение предела текучести образца-лопатки (17,6 МПа при +20 °С) МПАТ более чем в 1,5 раза. Полученные в результате эксперимента величины позволяют корректно произвести выбор рабочего давления при эксплуатации промышленных трубопроводов из МПАТ.

Величина погрешности экспериментальных исследований прочностных и механических свойств образцов МПАТ вычислена по критерию Стьюдента. Показатель надёжности проведения опытов задан 0,95. Определены значения погрешностей и получено среднее арифметическое погрешности механических характеристик материалов, среднее квадратичное отклонение, среднее квадратическое отклонение среднего арифметического, доверительный интервал экспериментов. Множественный коэффициент корреляции составляет 0,85.

По итогам экспериментальных исследований получены величины механических и прочностных характеристик образцов-лопаток и образцов-катушек МПАТ, зафиксировано изменение данных характеристик в температурном диапазоне от +20 °С до -60 °С. Следует отметить, что значения максимальной прочности при растяжении, значения относительного удлинения при максимальной нагрузке и удлинения при разрушении, а также значения модуля упругости учтены при разработке комплексной математической модели.

В третьей главе разработана математическая модель напряженно-деформированного состояния МПАТ с учетом изменения температуры. Матема-

тическая модель напряженно-деформированного состояния МПАТ основана на теории криволинейных стержней и кривых тонкостенных труб, т. к. длина МПАТ превышает ее диаметр. В качестве примера на Рисунках 6 и 7 представлены расчетные схемы поперечного сечения и криволинейного участка для визуализации деформаций и напряжений, действующих на МПАТ.

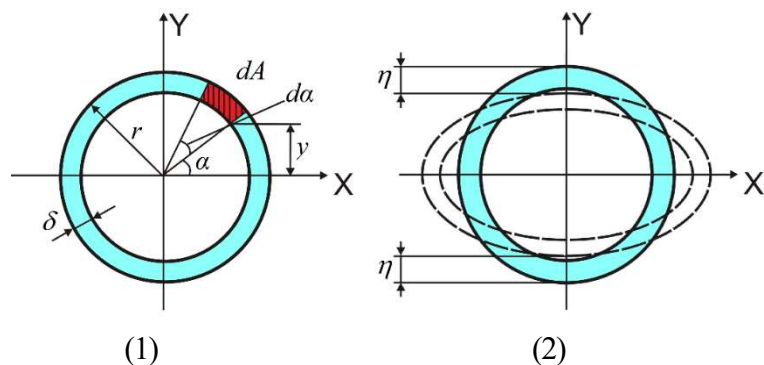


Рисунок 6 – Расчетная схема поперечного сечения МПАТ:
(1) – без нагрузки;
(2) – при вертикальной нагрузке

где η – изменение радиуса поперечного сечения трубы, м; r – наружный радиус трубы, м; A – площадь поперечного сечения стенки трубы, м²; y – высота угла от оси поперечного сечения трубы до дифференциала этого же угла, м; δ – толщина стенки трубы, м; α – угол наклона поверхности движения к горизонту, градусы.

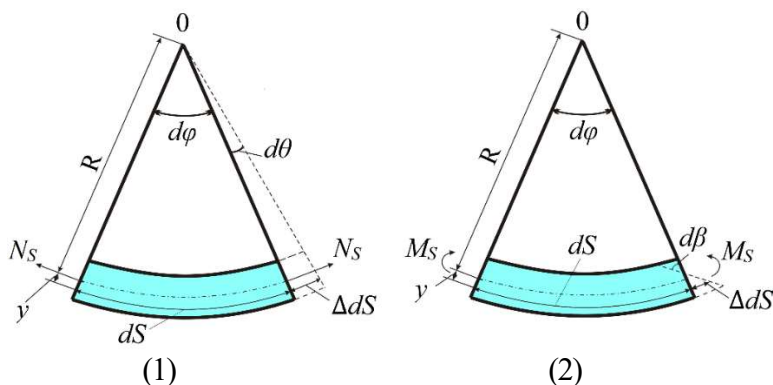


Рисунок 7 – Расчетная схема кривого стержня: (1) – при действии растягивающего усилия;
(2) – при действии изгибающего момента

где N_S – продольное усилие, возникающее при изгибе трубы, Н; M_S – изгибающий момент вдоль оси S , Н·м; y – высота угла от оси поперечного сечения трубы до дифференциала этого же угла, м; R – радиус изгиба трубы, м; φ – угол поворота, градусы; θ – угол поворота при растяжении, градусы; β – угол поворота при изгибе, градусы.

После составления расчетных схем поперечного сечения МПАТ и криволинейного участка МПАТ расписана относительная деформация:

$$\varepsilon = \varepsilon_r + \varepsilon_s + \varepsilon_\eta, \quad (1)$$

где ε – относительная деформация в трубе; ε_r – относительная деформация от искривления МПАТ при прохождении угла поворота трассы трубопровода, ε_η – относительная деформация от изменения поперечного сечения трубы, ε_s – суммарное значение относительной деформации от действия изгибающего момента M и относительной деформации от действия растягивающего усилия N .

Для учета влияния температуры на напряжения, возникающие в МПАТ, ввели переменный модуль. В результате введения переменного модуля уравнение напряжений, возникающих в трубе, стало иметь следующий вид:

$$\sigma = E_c \cdot (\varepsilon_r + \varepsilon_s + \varepsilon_\eta), \quad (2)$$

где σ – напряжение, возникающее в трубе, МПа; E_c – переменный модуль, МПа; ε_r – относительная деформация от искривления МПАТ при прохождении угла поворота трассы трубопровода, ε_η – относительная деформация от изменения поперечного сечения трубы, ε_s – суммарное значение относительной деформации от действия изгибающего момента M и относительной деформации от действия растягивающего усилия N .

После введения переменного модуля в уравнение напряжений расписали уравнение зависимости модуля упругости МПАТ от температуры и уравнение предела текучести МПАТ от температуры, а также уравнение определения коэффициента, определяющего изменение переменного модуля от величины деформации с учетом температуры:

$$E_t = E_t' \cdot (-0,6 \cdot (T_t/T_t') + 1,6), \quad (3)$$

$$\sigma_t = \sigma_t' \cdot (-0,3 \cdot (T_t/T_t') + 1,3), \quad (4)$$

$$b_t = 0,5 \cdot b_t' \cdot (3 - (T_t/T_t')), \quad (5)$$

где E_t – мгновенный модуль упругости материала с учетом температуры, МПа; E_t' – мгновенный модуль упругости материала при заданной температуре, МПа; b_t, b_t' – коэффициенты, определяющие изменение переменного модуля от величины деформации с учетом температуры, МПа⁻²; T_t, T_t' – температура окружающего воздуха, °С; σ_t, σ_t' – пределы текучести материала трубы при заданной температуре, МПа.

Напряжение, возникающее в МПАТ под действием изгибающего момента и растягивающего усилия с добавлением переменного модуля, имеет следующий вид:

$$\sigma_s = E_c \cdot [(d\theta/d\varphi) + ((d\beta/d\varphi) \cdot (y/(R+y)))], \quad (6)$$

где σ_s – напряжение, возникающее в трубе под действием изгибающего момента M и растягивающего усилия N , МПа; E_c – переменный модуль, МПа; R – радиус изгиба трубы, м; φ – угол поворота, градусы; θ – угол поворота при растя-

жении, градусы; β – угол поворота при изгибе, градусы; y – высота угла от оси поперечного сечения трубы до дифференциала этого же угла, м.

Внутренние усилия, возникающие в поперечном сечении МПАТ, также определены через напряжения в произвольной точке путем интегрирования напряжений по площади поперечного сечения стенки трубы:

$$N_S = \int_A \sigma_s dA, \quad (7)$$

$$M_S = \int_A \sigma_s y dA, \quad (8)$$

где σ_s – напряжение, возникающее в трубе под действием изгибающего момента M и растягивающего усилия N , МПа; N_S – продольное усилие, возникающее при изгибе трубы, Н; M_S – изгибающий момент вдоль оси S , Н·м; A – площадь поперечного сечения стенки трубы, м²; y – высота угла от оси поперечного сечения трубы до дифференциала этого же угла, м.

Поскольку материал МПАТ проявляет нелинейные эффекты, связанные с работой конструкций в области пластических деформаций, введены характеристики жёсткости растяжения и изгиба, которые учитывают нелинейные свойства материала:

$$B_N = \delta \cdot r \int_0^{2\pi} E_c d\alpha, \quad (9)$$

$$D_N = \delta \cdot r^2 \int_0^{2\pi} E_c \sin \alpha \cdot d\alpha, \quad (10)$$

$$B_M = \delta \cdot r^2 \int_0^{2\pi} E_c (\sin \alpha / (R + r \cdot \sin \alpha)) \cdot d\alpha, \quad (11)$$

$$D_M = \delta \cdot r^3 \int_0^{2\pi} E_c (\sin^2 \alpha / (R + r \cdot \sin \alpha)) \cdot d\alpha, \quad (12)$$

где B_N, B_M – характеристики жёсткости растяжения с учетом нелинейных свойств материала трубы; D_N, D_M – характеристики жёсткости изгиба с учетом нелинейных свойств материала трубы; E_c – переменный модуль, МПа; R – радиус изгиба трубы, м; r – наружный радиус трубы, м; α – угол наклона поверхности движения к горизонту, градусы.

Методом конечных разностей решена система уравнений дискретной модели МПАТ в виде единой для всей области решения задачи сеточной функции (дифференциальные уравнения заменены на алгебраические, при этом использованы приближенные выражения для производных искомой функции).

В дискретном виде система равновесия (граничные условия) записана как:

$$\begin{cases} (1/R) \cdot B_N \cdot ((\theta_{n-1} - 2\theta_n + \theta_{n+1})/\Delta\varphi^2) + (1/R^2) \cdot DM \cdot ((\beta_{n-1} - 2\beta_n + \beta_{n+1})/\Delta\varphi^2) = 0, \\ (1/R^2) \cdot D_M \cdot (-\beta_{n-2} + 2\beta_{n-1} - 2\beta_{n+1} + \beta_{n+2}) - (1/R) \cdot B_N \cdot ((\theta_{n+1} - \theta_{n-1})/2\Delta\varphi) = q, \end{cases} \quad (13)$$

где q – распределенная внешняя нагрузка, Н/м; R – радиус кривизны оси стержня, м; B_N – характеристика жёсткости растяжения с учетом нелинейных свойств материала трубы; D_M – характеристика жёсткости изгиба с учетом нелинейных свойств материала трубы; φ – угол поворота, градусы; θ – угол поворота при растяжении, градусы; β – угол поворота при изгибе, градусы.

После записи дифференциальных уравнений в алгебраической форме были созданы матрицы, стоящие при неизвестных β и θ . При этом также задавались граничные условия.

Достоверность разработанной численной модели установлена путем сопоставления результатов вычислений напряжений в МПАТ, полученных точным методом (в форме уравнения Навье-Стокса) и методом конечных разностей при различных температурах. Сравнительный анализ вычислений показал, что сходимость результатов расчетов напряжений, полученных по точному методу и методу конечных разностей, составляет 97 %.

Таким образом, можно утверждать, что полученная математическая модель при заданном количестве узлов 100 обеспечивает достаточную степень достоверности результатов. Следует отметить, что применение метода конечных разностей для оценки параметров напряженно-деформированного состояния МПАТ позволит повысить точность определения напряжений.

В четвертой главе решена задача допустимых радиусов изгиба МПАТ различного диаметра при различных температурах, и разработана методика оценки зависимости напряженно-деформированного состояния от изгибающих воздействий с учетом температурных перепадов от +20 °С до -60 °С.

Для характеристики напряжений, возникающих при изгибе МПАТ различного диаметра при различных температурах, исследована функция:

$$\sigma = f(R, D), \quad (14)$$

где σ – напряжение, возникающее в трубе, МПа; R – радиус кривизны оси трубы, мм; D – внешний диаметр трубы, мм.

Процедура аппроксимации функции проведена в программном комплексе MathCAD. В результате аналитических вычислений получены графические зависимости напряжений от диаметра МПАТ и от радиуса криволинейного участка трубопровода при температурах +20 °С, 0 °С, -15 °С, -30 °С, -45 °С и -60 °С. Анализ аппроксимированных поверхностей показал, что напряжения, возникающие в МПАТ при ее изгибе, при понижении температуры окружающего воздуха увеличиваются. Аппроксимация функции (14) проводилась методом наименьших квадратов, т. е. вычислялся вектор коэффициентов регрессионного полинома i -го порядка. Для экспресс-анализа предложен упрощенный метод выбора радиуса изгиба в зависимости от диаметра МПАТ. В качестве примера на Рисунке 8 представлено графическое отображение аппроксимированных поверхностей, интерпретированных с помощью программного комплекса MathCAD при +20 °С и -15 °С.

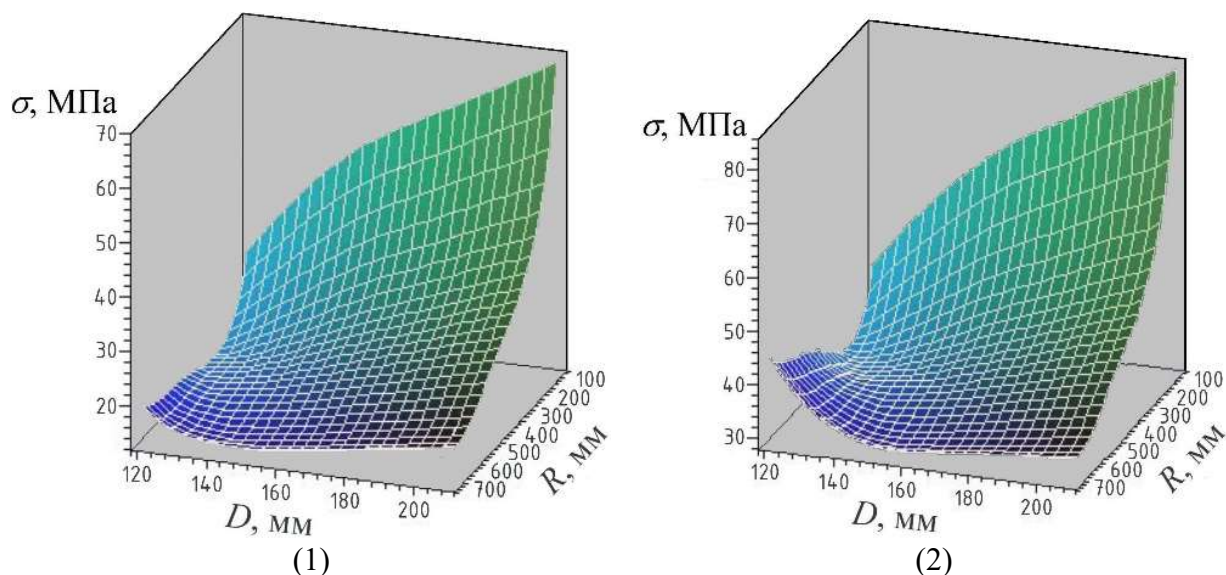


Рисунок 8 – Зависимость напряжений от диаметра трубы и от радиуса изгиба трубы при температуре +20 °С (1) и -15 °С (2): σ – напряжение, возникающее в трубе, МПа; R – радиус кривизны оси трубы, мм; D – внешний диаметр трубы, мм.

При выборе минимального допустимого радиуса изгиба трубы необходимо руководствоваться следующим неравенством:

$$\sigma < \sigma_T, \quad (15)$$

где σ – напряжение, возникающее в трубопроводе, МПа; σ_T – предел текучести материала МПАТ при заданной температуре, МПа.

Анализ данных, полученных при аппроксимации функции (14) в программном комплексе MathCAD, позволил выявить, что минимальный допустимый радиус изгиба МПАТ при снижении температуры увеличивается. Так, при пониже-

нии температуры до $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ минимальный допустимый радиус изгиба трубы увеличивается на 11 % по сравнению с минимальным допустимым радиусом изгиба при температуре $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Это можно объяснить тем, что при понижении температуры окружающей среды и увеличении значений напряжений, возникающих в трубе при изгибе, повышается и предел текучести материала МПАТ.

В диссертации разработан алгоритм определения напряженно-деформированного состояния МПАТ с учетом ее работы в зоне упруго-пластических деформаций. В качестве примера на Рисунке 9 представлен алгоритм для математической модели изгиба криволинейного стержня. Программа для



Рисунок 9 – Алгоритм для математической модели изгиба криволинейного стержня

ЭВМ, составленная по данному алгоритму, легко реализуется при использовании стандартного компьютерного программного обеспечения персонального компьютера. Данная программа может интегрироваться в существующие системы АСУ ТП профильных предприятий. При паспортизации трубопроводных объектов и их цифровизации (использовании технологии информационного моделирования), а также при накоплении достаточной базы данных о всех случаях возникновения недопустимых упруго-

пластических деформаций на участках трубопроводов из МПАТ возможна реализация сложного программного комплекса с использованием искусственного интеллекта. Реализация данного программного комплекса позволит автоматизировать расчеты напряженно-деформированного состояния полимерных армированных трубопроводов, проложенных надземным способом, при экстремально низких температурах.

Таким образом, на основании выполненных исследований разработана методика, особенность которой заключается в том, что она учитывает нелинейное поведение МПАТ при упруго-пластических деформациях при различных температурах окружающего воздуха и может быть использована для прогнозирования поведения других полимерных армированных труб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Установлены аналитические зависимости физико-механических и деформационных характеристик МПАТ при температурных перепадах от $+20^{\circ}\text{C}$ до -60°C , характерных для условий эксплуатации трубопроводов в районах Крайнего Севера. Полученные данные позволят разработать мероприятия по изменению показателей надежности полимерных армированных трубопроводов и транспортной системы в целом.

2. Разработанная математическая модель напряженно-деформированного состояния МПАТ описывает состояние трубопроводов при упруго-пластических деформациях в условиях экстремально низких температур и позволяет выявлять участки с недопустимыми напряжениями.

3. Разработанная методика оценки напряженно-деформированного состояния промысловых трубопроводов из МПАТ позволяет дать превентивную оценку возможности эксплуатации нефтегазопроводов из полимерных армированных труб при экстремальных отрицательных температурах.

4. Разработанный алгоритм составлен для математической модели изгиба криволинейного стержня в форме системы дифференциальных уравнений и соответствующих граничных условий. Внедрение данного алгоритма в системы объектно-ориентированного визуального программирования позволит создавать на начальном этапе простые программы с использованием стандартного компьютерного программного обеспечения персонального компьютера. При накоплении достаточных баз данных и паспортизации трубопроводных объектов МПАТ следу-

ющим этапом станет разработка программ на основе процедурных языков программирования со сложным графическим интерфейсом.

5. Разработанная методика принята к использованию в АО «Газпромнефть – МНПЗ» (акт об использовании результатов от 02.03.2023) и ООО «Газпром морские проекты» (акт о внедрении от 01.11.2023).

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

Статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ

1. Толмачев, А. А. Перспективы использования стеклопластиковых и полимерно-металлических труб в нефтегазовой отрасли / А. А. Толмачев, В. А. Иванов // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2019. – № 6(138). – С. 132-139.

2. Толмачев, А. А. К вопросу о применении труб термопластовых армированных для сооружения нефтегазопроводов в Арктике / А. А. Толмачев, В. А. Иванов, Т. Г. Пономарева // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2020. – № 4(142). – С. 88-99.

3. Толмачев, А. А. Применение полипропиленовых утепленных армированных труб для сооружения нефтепроводов в Арктике / А. А. Толмачев, В. А. Иванов, А. В. Майер // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2022. – № 4(130). – С. 46-51.

4. Толмачев, А.А. Разработка математической модели напряженно-деформированного состояния многослойной полипропиленовой армированной трубы / А.А. Толмачев, А.А. Толмачев // Научный журнал Российского газового общества. – 2024. – №1(43). – С. 36-42.

Публикации в прочих научных изданиях:

5. Tolmachev, A. A. Alternatives to Steel Pipes in the Oil and Gas Industry / A. A. Tolmachev, S. V. Tolmacheva // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: International Science and Technology Conference "EarthScience", Russky Island, 10–12 декабря 2019 года. Vol. 459, 3, Chapter 2. – Russky Island: Institute of Physics Publishing, 2020. – P. 032060. – DOI 10.1088/1755-1315/459/3/032060.

6. Толмачев, А. А. Проблема надежности магистральных газопроводов в Арктике / А. А. Толмачев, В. А. Иванов // Арктика: современные подходы к производственной и экологической безопасности в нефтегазовом секторе: материалы

Международной научно-практической конференции (Тюмень, 27 ноября 2019 года) Том I. – Тюмень: ТИУ, 2020. – С. 162-165.

7. Толмачев, А. А. Обнаружение дефектов сварных соединений как способ повышения эксплуатационной надежности газопроводов / А. А. Толмачев, В. А. Иванов // Нефтегазовый терминал: материалы Международной научно-технической конференции «Транспорт и хранение углеводородного сырья» (Тюмень, 28–29 мая 2020 года) / под ред. С. Ю. Подорожникова. Том Выпуск 19. – Тюмень: ТИУ, 2021. – С. 399-403.

8. Толмачев, А. А. Эксплуатационные проблемы промысловых нефтегазопроводов на основе термопластовых труб / А. А. Толмачев, Л. А. Толмачева, В. А. Иванов // Комплексное изучение и освоение недр Европейского Севера России: материалы Всероссийской научно-технической конференции (Ухта, 16–17 сентября 2021 года) – Ухта: Ухтинский государственный технический университет, 2021. – С. 113-115.

9. Толмачев, А. А. Проблематика эксплуатации термопластовых нефтегазопроводов / А. А. Толмачев, В. А. Иванов // Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе: материалы Национальной с международным участием научно-практической конференции студентов, аспирантов, учёных и специалистов, посвященной 65-летию Тюменского индустриального университета (Тюмень, 27–29 октября 2021 года) / отв. ред. А.Н. Халин. – Тюмень: ТИУ, 2021. – С. 137-139.

10. Толмачев, А. А. Оценка качества сварочно-монтажных работ при сооружении трубопроводов из полимерных труб / А. А. Толмачев, В. А. Иванов // Транспортные и транспортно-технологические системы: Материалы Международной научно-технической конференции (Тюмень, 13–14 апреля 2023 года) / отв. ред. П.В. Евтин. – Тюмень: ТИУ, 2023. – С. 137-140.

11. Толмачев, А. А. Оптимизация затрат при обустройстве нефтегазовых месторождений / А. А. Толмачев, В. А. Иванов // Транспортные и транспортно-технологические системы: материалы Международной научно-технической конференции: (в 2 томах). (Тюмень, 21 апреля 2022 года) Том II. – Тюмень: ТИУ, 2022. – С. 255-258.

12. Толмачев, А. А. Эффективная эксплуатация скважин путем исследования реологических свойств нефти / А. А. Толмачев, В. А. Иванов // Актуальные

проблемы научного знания. Новые технологии ТЭК-2022: материалы VI Международной научно-практической конференции (Тюмень, 22 апреля 2022 года) / отв. ред. С.Н. Нагаева. – Тюмень: ТИУ, 2022. – С. 203-205.

13. Толмачев, А. А. Оценка геокриологических рисков при проектировании подземных трубопроводов, пролегающих в многолетнемерзлых грунтах / А. А. Толмачев, О. В. Толмачева, В. А. Иванов // Проблемы функционирования систем транспорта: материалы Всероссийской (национальной) научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (Тюмень, 08–09 декабря 2022 года) / отв. ред. П. В. Евтин. – Тюмень: ТИУ, 2023. – С. 55-58.

14. Толмачев, А. А. Создание устойчивых оснований на слабонесущих грунтах при сооружении и эксплуатации трубопроводов на территории Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции Российской Федерации / А. А. Толмачев // Нефтегазовый терминал: материалы Международной научно-технической конференции (Тюмень, 01–02 июня 2023 года) – Тюмень: ТИУ, 2023. – С. 367-370.

Патент на изобретение

15. Патент № 2793376 С1 Российская Федерация, МПК F16L 9/12. Многослойная полипропиленовая армированная труба: № 2022130670: заявл. 24.11.2022: опубл. 31.03.2023 / В. А. Иванов, А. А. Толмачев; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Тюменский индустриальный университет".

Подписано в печать 02.07.2025. Формат 60х90 1/16. Усл. авт. л. 1,05.

Тираж 100 экз. Заказ № 3075.

Библиотечно-издательский комплекс
федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Тюменский индустриальный университет».
625000, Тюмень, ул. Володарского, 38.

Типография библиотечно-издательского комплекса.
625039, Тюмень, ул. Киевская, 52.