

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Уфимский государственный нефтяной технический университет»

На правах рукописи



СУЛТАНМАГОМЕДОВ ТИМУР СУЛТАНМАГОМЕДОВИЧ

**ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ МЕРЗЛОГО ГРУНТА НА ПРОДОЛЬНЫЕ
ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПОДЗЕМНОГО ТРУБОПРОВОДА**

Специальность: 2.8.5. – Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и
хранилищ (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Уфа 2023

Работа выполнена на кафедре «Проектирование и строительство объектов нефтяной и газовой промышленности» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет».

Научный руководитель: Доктор физико-математических наук, профессор
Бахтизин Рамиль Назифович

Официальные оппоненты: **Неганов Дмитрий Александрович**
доктор технических наук
Общество с ограниченной ответственностью
«НИИ Транснефть» / первый заместитель генерального директора / г. Москва

Голубин Станислав Игоревич
кандидат технических наук
Общество с ограниченной ответственностью
«Газпром ВНИИГАЗ», Корпоративный научно-технический центр освоения морских нефтегазовых ресурсов / начальник / г. Москва

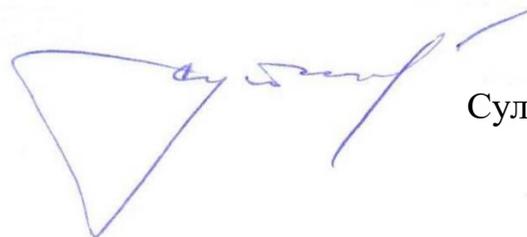
Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский индустриальный университет» (г. Тюмень)

Защита диссертации состоится « 7 » декабря 2023 года в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.2.428.03 при ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» по адресу: 450064, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» и на сайте <http://www.rusoil.net>.

Автореферат разослан « _____ » _____ 2023 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Султанов Шамиль Ханифович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В последнее время все большее значение приобретают проблемы строительства сооружений в сложных природно-климатических и инженерно-геологических условиях. Многолетнемерзлые грунты (ММГ) составляют более 50 % территории месторождений Западно-Сибирского нефтегазового комплекса. Значительная часть таких грунтов теряют несущую способность при оттаивании. Для строительства трубопроводов в условиях ММГ приходится решать сложные инженерные задачи.

Актуальность исследования обусловлена большим влиянием температуры и влажности на механические характеристики многолетнемерзлых грунтов. В процессе эксплуатации трубопровод может менять свои температурные режимы, что может привести к образованию ореолов растепления и изменению напряженно-деформированного состояния (НДС) трубопровода. Эти процессы способствуют потере проектного положения трубопровода. Наличие таких явлений послужило причиной для разработки новых конструкторских решений для поддержания трубопровода в проектном положении, систем мониторинга проектного положения и НДС трубопровода, а также выбора наиболее эффективных методов прокладки с целью надежной работы трубопроводов, проложенных в условиях ММГ. Для эффективного использования систем мониторинга и применения конструктивных решений необходимо иметь цифровую модель, описывающей с достаточной точностью поведение конструкции на оттаивающих грунтах.

На данный момент проблема моделирования взаимодействия трубопровода с грунтом решаются такими программными комплексами, основанными на методе конечных элементов как CPIPE, Frost 3D, ANSYS и многие другие. Однако зависимости, которые используются в данных ПО, не отображают картину взаимодействия трубопровода с мерзлым грунтом в полной мере при изменении температуры и влажности грунта.

В работе проводится механическое моделирование взаимодействия трубопровода с многолетнемерзлым грунтом с учетом изменения механических свойств грунта при изменении температуры. Поскольку разнообразие и распространение грунтов очень сильно варьируется, практически невозможно найти два одинаковых грунта со схожими свойствами, а имеющиеся базы данных грунтов ранжируют зна-

чения механических величин в очень широком диапазоне, в работе рассматриваются дисперсные грунты с различными значениями модуля деформации. Вводится взаимосвязь для механической и тепловой моделей трубопровод-грунт, также учитывается влажность грунтов. Разработанная методика позволит пересчитывать модели трубопровод-грунт в процессе эксплуатации трубопровода при изменении условий и физических свойств модели.

Данное исследование повысит достоверность моделирования, что позволит повысить эксплуатационную надежность трубопроводов, проложенных на многолетнемерзлых грунтах, путем уменьшения напряжений в металле трубы.

Степень разработанности темы исследования

Проблеме напряженно-деформированного состояния трубопроводов в условиях многолетнемерзлых грунтов посвящено большое количество трудов. Наиболее близкими к проведенным исследованиям являются работы П.П. Бородавкина, С.С. Вялова, П.И. Тугунова, Н.А. Цытовича, Н.А. Гаррис, Ю.В. Лисина, Ю.А. Велли, И.А. Гишкелюка, А.К. Дерцкаяна, Н.Н. Карнаухова, П.А. Пульникова, О.В. Трифонова, В.И. Черникина, Х.А. Азметова, А.Б. Айнбиндера, С.М. Соколова, Г.Е. Коробкова, Р.М. Зарипова, И.А. Шаммазова, С.И. Голубина и др.

Соответствие паспорту заявленной специальности

Тематика и содержание диссертационной работы соответствуют паспорту научной специальности 2.8.5. – Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ, а именно пункту 2 – «Научные основы системного комплексного (мультидисциплинарного) проектирования конструкций, прочностных, гидромеханических, газодинамических и теплофизических расчетов сухопутных и морских систем трубопроводного транспорта для добычи, сбора, подготовки, транспортировки и хранения углеводородов, распределения, газоснабжения и нефтепродуктообеспечения, подземных и наземных газонефтехранилищ, терминалов, инженерной защиты и защиты от коррозии, организационно-технологических процессов их сооружения, эксплуатации, диагностики, обеспечения системной надежности, механической и экологической безопасности».

Целью диссертационной работы является оценка влияния температуры трубопровода на несущую способность вмещающего мерзлого грунта и продольные перемещения подземного трубопровода.

Основные задачи исследования:

1. Анализ известных моделей взаимодействия трубопроводов с ММГ с целью выявления факторов, влияющих на НДС трубопровода и разработка экспериментального метода определения зависимости коэффициента постели (коэффициент жесткости грунта) от температуры и влажности грунта при смерзании трубопровода с многолетнемерзлым грунтом.

2. Исследование продольных перемещений подземного трубопровода по поверхности контакта с промороженным грунтом при изменении механических свойств, вызванных изменением температуры и влажности.

3. Усовершенствование расчетной методики определения прогиба и напряженно-деформированного состояния участков трубопроводов с учетом изменения коэффициентов постели и механических характеристик грунта при растеплении участка мерзлого грунта.

4. Разработка конечно-элементной модели напряженно-деформированного состояния участка трубопровода, на границе участка с различными значениями модуля деформации дисперсных грунтов, для расчета оптимальных параметров конструкций трубопровода.

Научная новизна

1. Получена зависимость коэффициента постели от температуры и влажности грунта при взаимодействии трубопровода конечной длины с многолетнемерзлым грунтом (супесь). Максимальные значения коэффициента постели на сдвиг достигаются при влажности 10%, и температуре грунта $-10..-5$ °С. Максимальные прочностные свойства при сжатии грунт показывает при влажности 5%, и при температурах $-10..-6$ °С.

2. Выявлена зависимость продольных перемещений свободного конца полубесконечного трубопровода с грунтом при изменении механических свойств, вызванных изменением температуры. При изменении температуры грунта от минус 10 °С до минус 1 °С перемещения увеличиваются в 5 раз, длина зоны с пластическими деформациями грунта по поверхности контакта увеличивается в 6 раз, предельные касательные напряжения по контакту труба-грунт уменьшаются в 4,5 раза.

3. Получен критерий, позволяющий уточнить НДС трубопровода до 10%, при учете зависимости жесткости грунта от температуры и влажности.

Теоретическая значимость

Разработан алгоритм расчета НДС трубопровода при его просадках в условиях изменения механических свойств вмещающего грунта при растеплении. Разработан алгоритм определения продольных деформаций при изменении механических свойств грунта в условиях повышения температуры грунта.

Разработана конечно-элементная модель для определения НДС трубопровода при растеплении грунта. Модель позволяет оценивать НДС трубопровода при изменении механических характеристик слабодеформируемого и среднедеформируемых грунтов в зависимости от температуры.

Практическая ценность работы

Разработаны рекомендации по моделированию напряженно-деформированного состояния участков с просадочными пластичномерзлыми грунтами с учетом возможного интервала температур эксплуатации на стадии проектирования. Учет температуры и влажности грунта позволяет уточнить расчет эквивалентных напряжений до 10%, а также учитывать эти напряжения при разработке новых конструктивных решений при проектировании.

Разработан лабораторный стенд НДС подземных трубопроводов при подвижках грунтов (патент на изобретение RU2766839 С1).

Разработан лабораторно-экспериментальный стенд моделирования деформаций подземного трубопровода в замороженных грунтах, который используется при проведении исследований в ФГБОУ ВО УГНТУ и при проведении лабораторных занятий по дисциплине «Сооружение и ремонт газонефтепроводов», а также при подготовке выпускных квалификационных работ бакалаврами направления подготовки 21.03.01 «Нефтегазовое дело».

По материалам исследований разработано методическое пособие «Прочностной анализ в ANSYS Workbench» и одноименные онлайн-курсы, применяемые в учебном процессе в ФГБОУ ВО УГНТУ.

Методология и методы научного исследования

В исследовании применяются методы строительной механики и механики грунтов. При расчете НДС протяженного трубопровода используется метод конечных элементов (МКЭ). Механические свойства представленных грунтов определялись согласно ГОСТ. Цифровая модель механического взаимодействия трубопрово-

да с грунтом спроектирована в программном комплексе ANSYS. Обработка экспериментальных данных произведена с помощью программ «Статистика», Python.

Положения, выносимые на защиту

1. Влияние изменения температуры и влажности грунтов на механические характеристики системы трубопровода конечной длины с многоленемерзлым грунтом.

2. Зависимость коэффициентов постели и предельных касательных напряжений по контакту труба-грунт от температуры и влажности грунтов. Усовершенствованная расчетная методика определения НДС трубопровода при оттаивании участка грунта.

3. Влияние температуры и влажности грунта на степень прогиба и НДС трубопровода, проложенного в условиях ММГ, вследствие изменения коэффициентов постели грунта.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов исследований подтверждена данными экспериментального и численного моделирования. Результаты экспериментальных исследований были получены на поверенном оборудовании в соответствии с методиками, указанными в нормативной документации, а также основываясь на геометрическом и физическом подобии. Результаты экспериментальных стендовых исследований, были подтверждены данными компьютерного моделирования в лицензированном программном обеспечении. Результаты исследований не противоречат результатам аналогичных и близких к тематике научных работ, опубликованных в научной литературе.

Апробация. Основные положения диссертационной работы докладывались на следующих мероприятиях: Международные учебно-научно-практические конференции «Трубопроводный транспорт» (г. Уфа, 2019, 2020, 2021, 2022 гг.), Международные молодежные научные конференции «Нефть и газ» (г. Москва, 2021, 2022 гг.)

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 30 работ, в том числе 13 статей в ведущих рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК, из них 11 в журналах SCOPUS и Web of Science, 2 патента на изобретение, 1 патент на полезную модель и тезисы 15 докладов на научно-технических конференциях различного уровня.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, содержит 147 страниц машинописного текста, в том числе 15 таблиц, 50 рисунков и 5 приложений, библиографический список из 119 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложена основная суть исследования, обоснована актуальность диссертационной работы, поставлена цель, сформулирована идея, поставлены основные задачи исследования, выдвинуты защищаемые положения, а также выявлены научная новизна и практическая значимость.

Первая глава диссертации посвящена анализу основных аналитических и экспериментальных моделей взаимодействия трубопровода с грунтом. На сегодняшний день разделяют три модели взаимодействия трубопровода с мерзлым грунтом: тепловая, гидравлическая и механическая модели (Рисунок 1).

Большее количество программных комплексов делает акцент на теплогидродинамической модели взаимодействия трубы с грунтом (Frost 3D, Abaqus) или сосредоточены только на механической модели (ANSYS, C-Pipe, Старт-проф, APM FEM, Fidesys). Механическая модель позволяет моделировать взаимодействие трубопровода с грунтом при помощи пружин различной жесткости (Рисунок 2). В данном случае жесткость пружины будет являться аналогом модуля деформации. В работе предлагается изменять жесткость пружины в расчетных точках согласно распределению температур. Пересчет в режиме реального времени даст возможность интегрировать и гидродинамические модели.



Рисунок 1 – Взаимодействие моделей мерзлого грунта между собой

Такой подход будет справедлив для протяженных объектов, для которых применение стандартных расчетных комплексов, позволяющих моделировать массив грунта, нецелесообразно. Однако, в дальнейшем, в интересующих нас точках (опас-

ных участках) необходимо проводить подmodellирование с экспериментальным определением механических характеристик грунта, в том числе изменение этих характеристик от изменения температуры грунта.



Рисунок 2 – Механическая модель труба-грунт

Во второй главе подробно описана тепловая и механическая экспериментальные модели. Там, где предполагается использование основания по II принципу (основания используются в предварительно оттаявшем состоянии) предусматриваются конструктивные решения для поддержания проектного положения трубопровода. Однако, при увеличении производительности или температуры перекачиваемого продукта, температура грунтов вокруг трубопроводов, эксплуатируемых по I принципу (основания используются в мерзлом состоянии) может повыситься. Этот сценарий опасен потерей несущей способности грунта и может привести к потере продольной устойчивости или потере проектного положения трубопровода. Схема распределения температур в зоне теплового влияния показана на Рисунке 3. Чтобы предотвратить потерю проектного положения трубопровода при повышении температуры грунта, необходимо иметь прогнозную расчетную модель.

При изменении температуры трубопровода по длине в процессе эксплуатации по поверхности контакта трубопровода с грунтом возникают касательные напряжения. При увеличении деформации первый участок грунта (очень сильно деформируемый грунт) работает сначала в упругой зоне, затем переходит в пластичное состояние. Далее начинает деформироваться второй участок трубопровода в зоне распространения грунта с отличными от первого участка свойствами, который так же сначала работает в упругой зоне, далее достигается его предельной состояние, и начальная длина деформированного трубопровода увеличивается с ростом продольного усилия P . Модель перемещений свободного конца трубопровода при изменении механических свойств грунта показана на Рисунке 4.

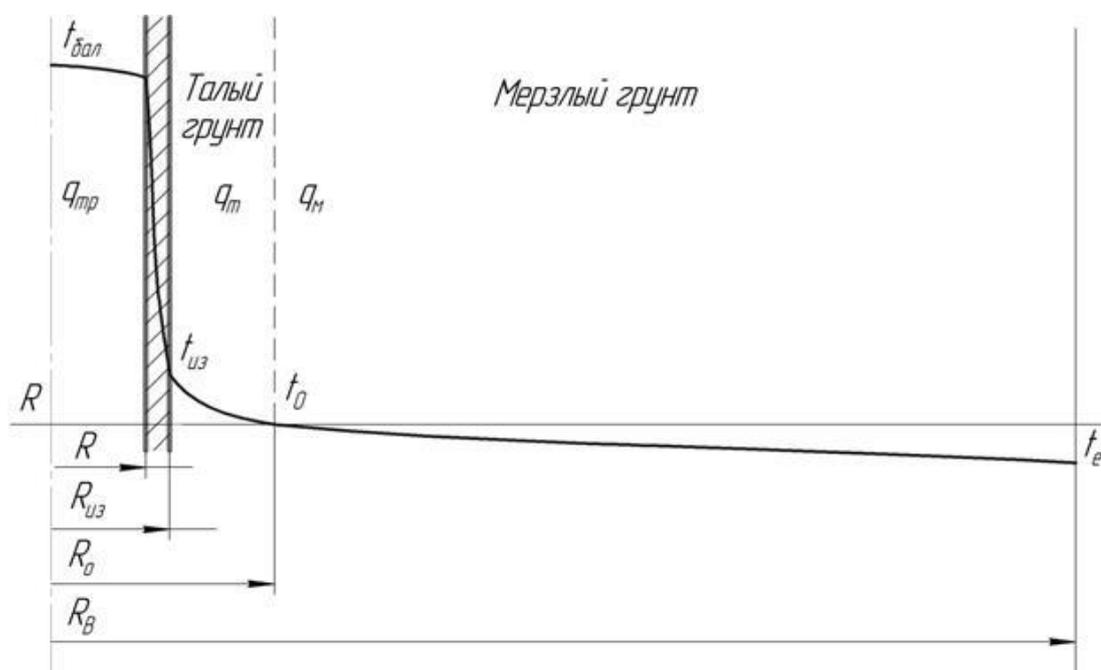


Рисунок 3 – Схема распределения температур в зоне теплового влияния трубопровода при растеплении

Для изучения характера зависимости коэффициента постели грунта на сдвиг от его температуры и влажности разработан экспериментальный стенд. Экспериментальная модель для определения свойств механических свойств конечного элемента системы «Трубопровод – грунт» представлена на Рисунке 5. На данном стенде проводилось изучение зависимости перемещений от прикладываемых усилий в различных направлениях при изменении температуры и влажности грунта. Полученные характеристики исследуемого грунта можно использовать как жесткость конечного элемента, используемого в компьютерном моделировании.

Экспериментальная установка (Рисунок 5) представляет собой теплоизолированный металлический лоток с отверстиями по торцам, в которые помещается трубопровод, лоток заполняется исследуемым грунтом. Усилия в канате измеряются динамометром, установленным между трубой и грузом (1). Перемещения трубопровода измеряются с помощью индикатора часового типа (2). Усилия к трубе прикладываются с помощью грузов, перекинутых через шкив (3). Трубопровод оборудован инфракрасным регулируемым нагревательным элементом, установленным внутри трубопровода. Помимо деформаций измеряются радиусы ореолов растепления участка грунта. Для этого используются терморезисторы, установленные сверху (датчики 1,4,7,10), сбоку (датчики 2, 5, 8, 11) и снизу трубы (датчики 3, 6, 9, 12). Сверху лоток закрывается теплоизолированной крышкой, моделируя отрицательную температуру воздуха, или остается открытым, моделируя положительную тем-

пературу воздуха. На крышку сверху устанавливаются грузы для моделирования глубины заложения. Датчики температур расположены на расстояниях $r = D_{\text{тр}}$, $r = 1,2D_{\text{тр}}$, $r = 1,5D_{\text{тр}}$, $r = 2D_{\text{тр}}$, еще три датчика устанавливались на случайной глубине и отдалении от трубопровода.

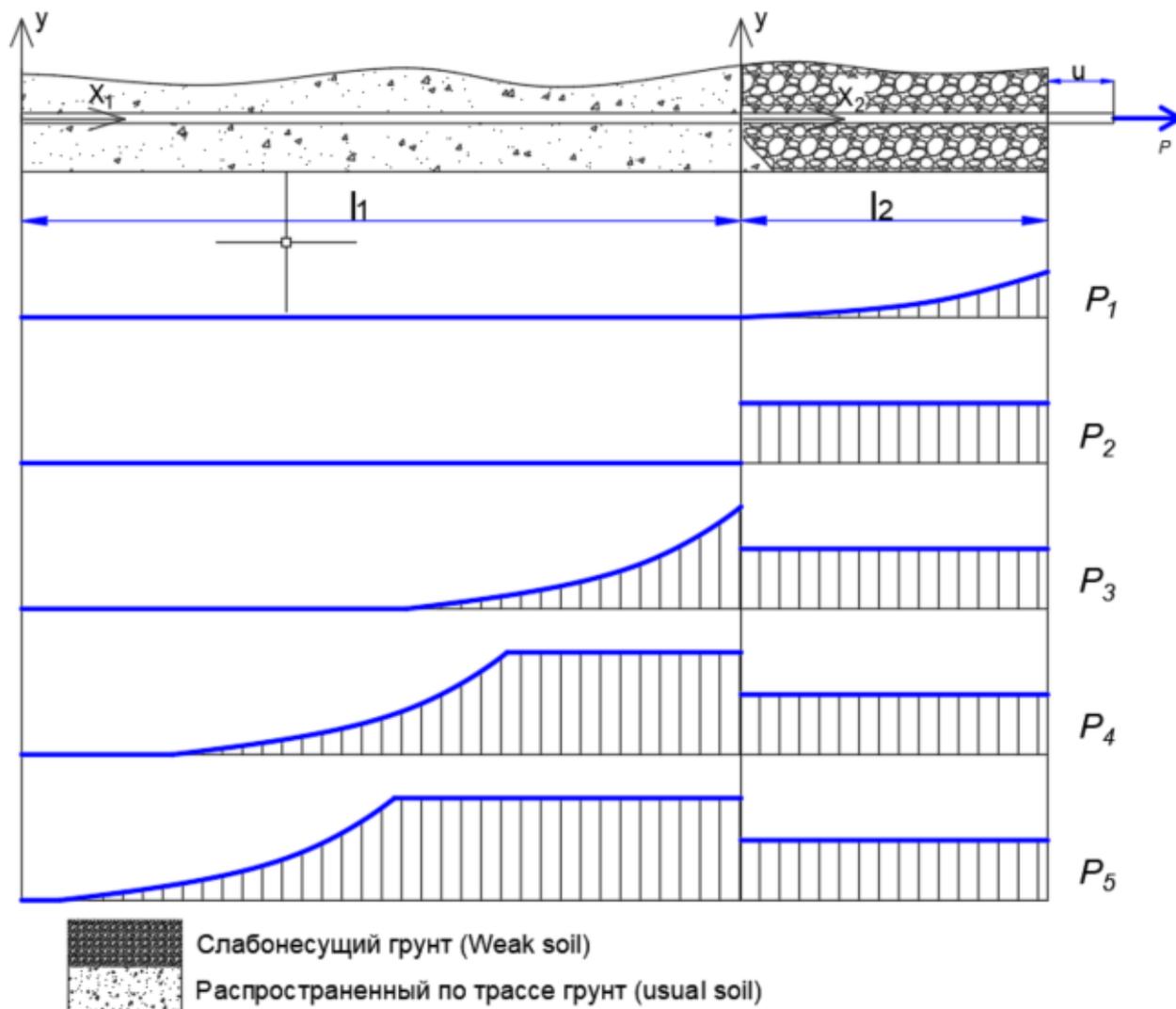
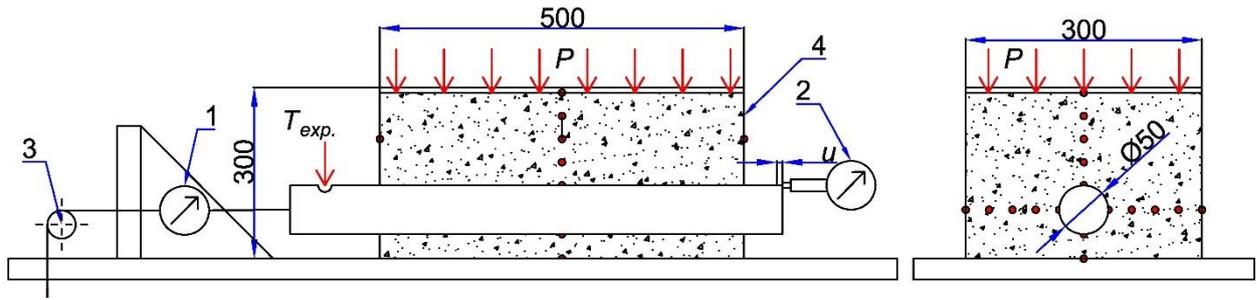


Рисунок 4 – Распределения касательных напряжений в процессе перемещения свободного конца трубопровода, $P_1 < P_2 < P_3 < P_4 < P_5$

Результаты эксперимента по определению радиусов и времени перехода в равновесие ореолов растепления вокруг трубопроводов показаны на Рисунке 6.



1 – Динамометр, 2 – Индикатор часового типа, 3 – Талреп для приложения продольных усилий, 4 – металлический неподвижный лоток

Рисунок 5 – Схема экспериментального стенда для исследования влияния ореола растепления на механические свойства системы

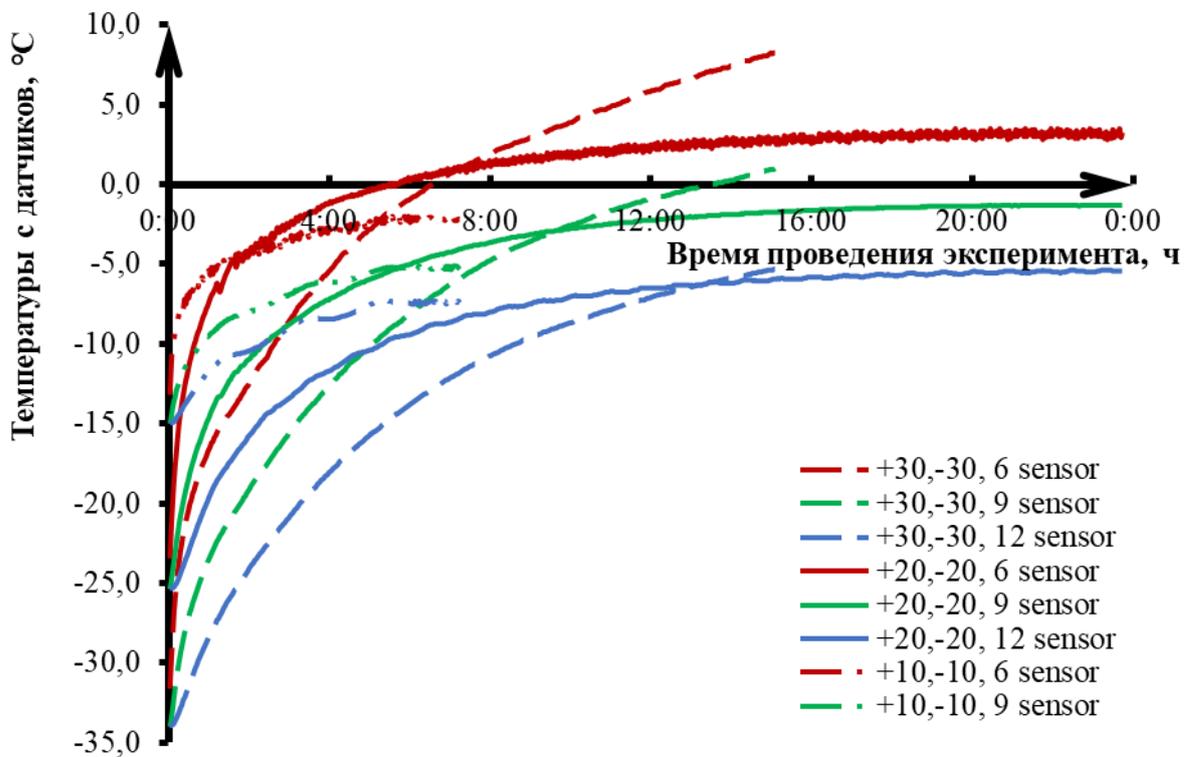


Рисунок 6 – Зависимость температуры грунта вокруг трубопровода от времени (эксперимент)

Разработана компьютерная модель стенда для определения температурных полей во всех точках конструкции и деформаций при приложении сил. Как видно из модели, величина радиуса ореола разная в зависимости от направления, что подтверждается результатами экспериментального исследования. На Рисунке 7 показано тепловое поле вокруг трубопровода за разный период времени. Как видно по графическому изображению температур, разница выступа трубопровода из грунта влияет на результат температурного поля по верхней грани. Поэтому с экспериментальными значениями сравниваются значения, отстоящие на 10 см от торца лотка.

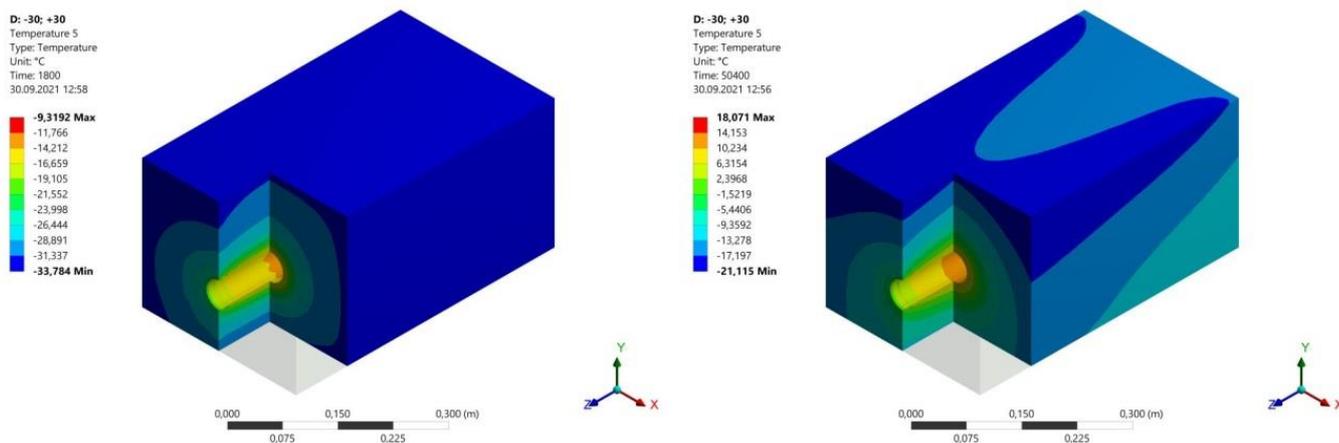


Рисунок 7 – Зависимость температуры грунта вокруг трубопровода от времени (компьютерная модель)

Сделано сравнение эксперимента и конечно-элементной модели для механической и теплофизической постановки, результаты показаны на Рисунке 8.

Разница между экспериментом и моделированием связана с тем, что начальная температура окружающей среды при проведении эксперимента отличается от расчетной начальной температуры в модели. Отклонение графиков можно объяснить тем, что в программном комплексе невозможно смоделировать постепенное оттаивание грунта: в реальности не весь лед сразу превращается в воду, а лишь его часть.

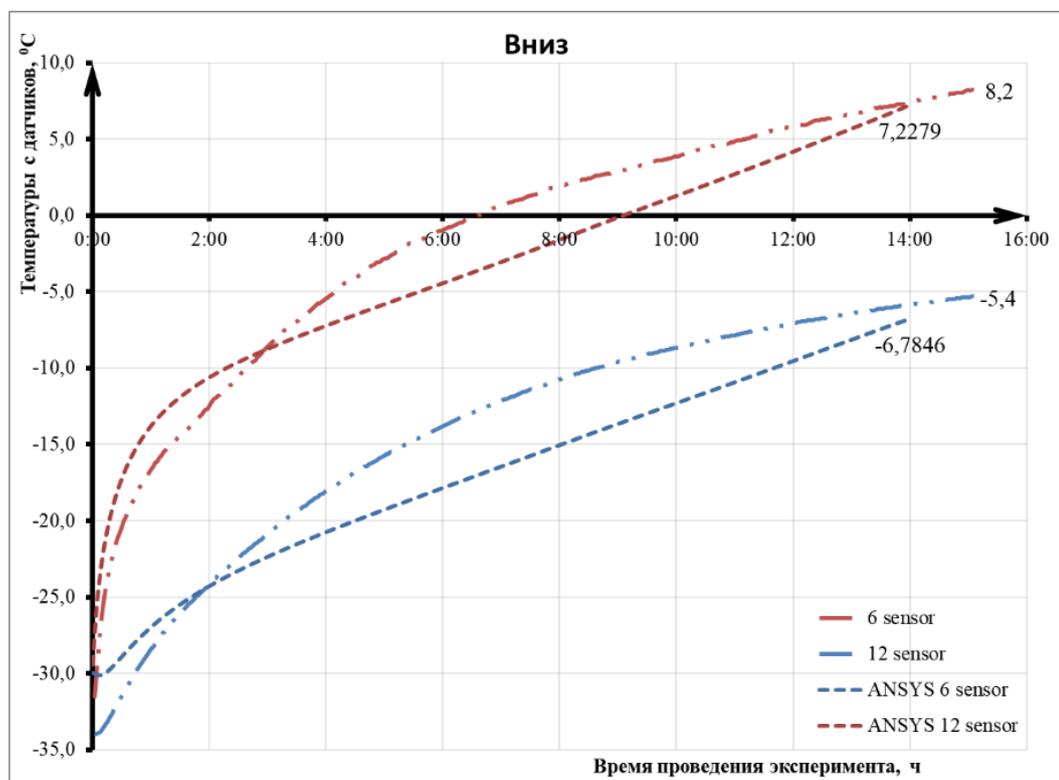


Рисунок 8 – Сравнение результатов компьютерного моделирования с экспериментов

Проведен эксперимент по определению зависимости коэффициента постели грунта на сжатие (Рисунок 9) и на сдвиг (Рисунок 10) от температуры и влажности на экспериментальном стенде и в экспериментальных условиях. На основании полученных результатов можно сделать вывод, что наибольшее сопротивление перемещениям грунт будет оказывать при влажности грунта $w = 10\%$ и температуре грунта $t = -10\text{ }^\circ\text{C}$.

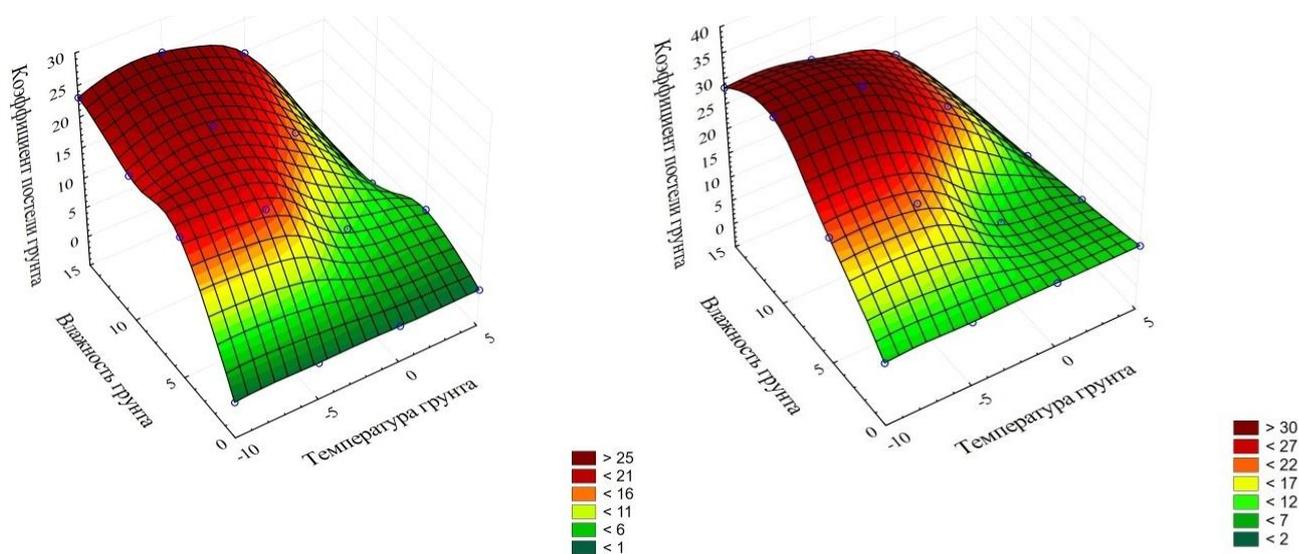


Рисунок 9 – График зависимости коэффициента постели на сдвиг от влажности и температуры грунта при глубине заложения $h_{cp}/d = 2,0$ и $h_{cp}/d = 4,8$

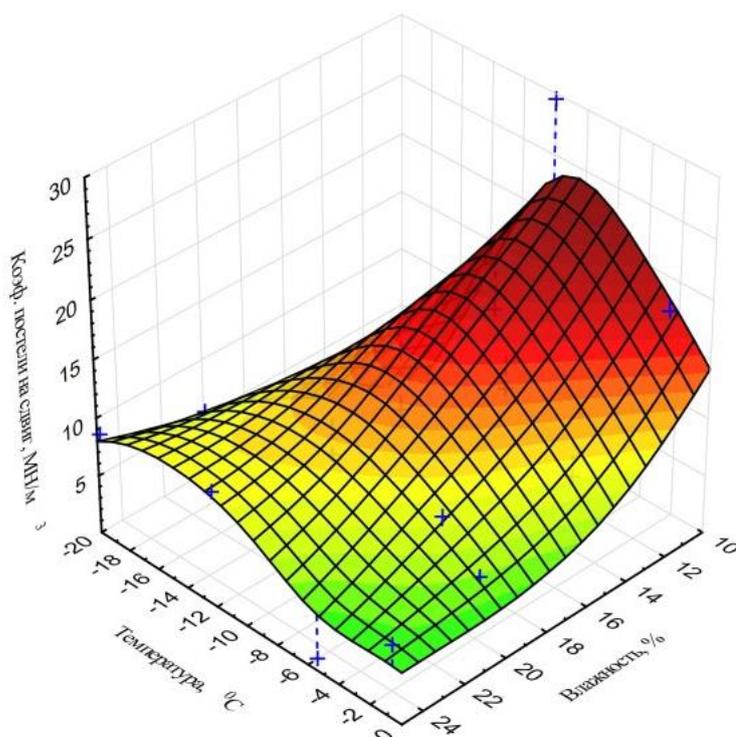


Рисунок 10 – График зависимости коэффициента постели на сжатие от влажности и температуры грунта

В третьей главе представлены результаты расчетов по определению НДС трубопровода при повышении температуры грунта. Расчетная схема продольных перемещений полубесконечного трубопровода показана на Рисунке 11.

Результаты расчета по определению перемещений свободного конца полубесконечного трубопровода и касательных напряжений по контакту труба-грунт при увеличении температуры трубопровода приведены на Рисунке 12.

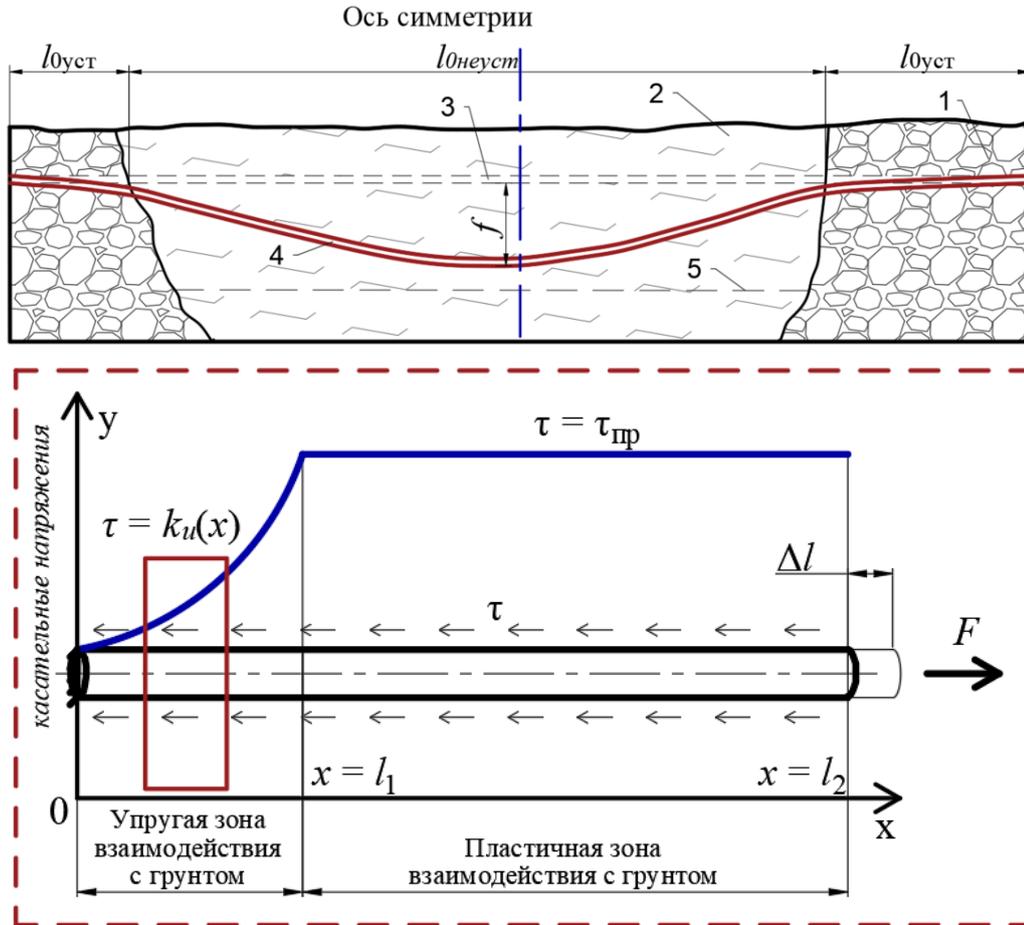


Рисунок 11 – Расчетная схема продольных перемещений полубесконечного трубопровода при повышении температуры и просадке участка трубопровода

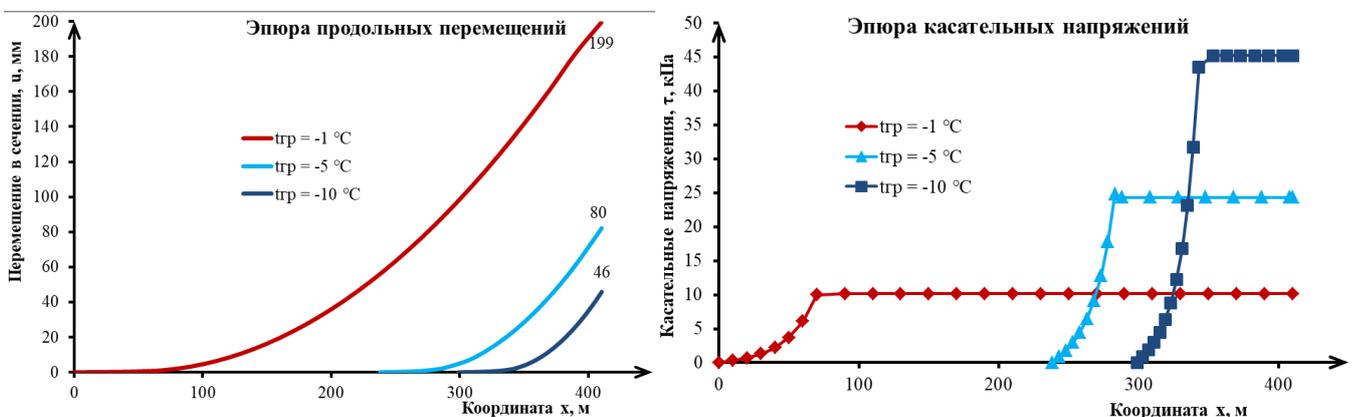


Рисунок 12 – Расчетные перемещения и касательные напряжения трубопровода при повышении температуры грунта с минус 10°C до минус 1°C

Для определения прогибов при повышении температуры грунта участка трубопровода решено уравнение прогиба с учетом экспериментальной зависимости $k_u = f(t, w)$, $k_0 = f(t, w)$, изображенных на Рисунках 9 и 10.

$$EI \frac{d^2 y}{dx^2} = M_0 + P(y - \omega) - x \int_0^l \frac{q(x, v_0) dx}{2} + \int_0^x q(\xi, v_0)(x - \xi) d\xi \quad (1)$$

x, y – координаты рассматриваемого сечения оси трубопровода;

w – прогиб трубопровода в сечениях на границе двух грунтов;

EI – жесткость трубопровода;

$q(x, v_0), q(\xi, v_0)$ – интенсивность нагрузки в сечениях x, ξ ;

M_0 – момент, возникающий на границе оттаявшего и мерзлого грунтов;

P – растягивающее усилие, возникающее от веса оттаявшего участка, а также от температурного перепада и давления в трубопроводе.

Решая данное неоднородное дифференциальное уравнение, получили:

$$y = C_1 ch(kx) + C_2 sh(kx) - \frac{q}{P} \left(\frac{M_0}{q} - \frac{P\omega_0}{q} + \frac{x^2}{2} - \frac{lx}{2} \right) - \frac{q}{k^2 P}; \quad (2)$$

$$y' = C_1 ksh(kx) + C_2 kch(kx) - \frac{q}{P} \left(x - \frac{l}{2} \right); \quad (3)$$

$$y'' = C_1 k^2 ch(kx) + C_2 k^2 sh(kx) - \frac{q}{P} = \frac{M(x)}{EI}. \quad (4)$$

Константы C_1 и C_2 на основании граничных условий $x = 0, y = w_0; x = l, y = w_0$:

$$C_1 = \frac{M_0}{P} + \frac{q}{k^2 P}; C_2 = - \left(\frac{M_0}{P} + \frac{q}{k^2 P} \right) th \left(\frac{kl}{2} \right). \quad (5)$$

Подобное описание прогибов и изгибающих напряжений в трубопроводе позволяет составить механическую модель трубопровода, где основными изменяющимися величинами будут коэффициенты постели грунта на сжатие и на сдвиг, которые в свою очередь зависят от температуры и влажности грунта. Решение выполняется графическим методом.

На Рисунке 13 показана зависимость продольных усилий и прогиба при различных коэффициентах постели оттаявшего участка грунта. Были проанализированы случаи прогибов и усилий при изменении коэффициента постели при сжатии в интервале $k_0 = 0,5 \dots 20$ МН/м³. Как видно по рисунку, наиболее резкое изменение растягивающего усилия и максимального прогиба будет в пределах $k_u = 0 \dots 6$ МН/м³.

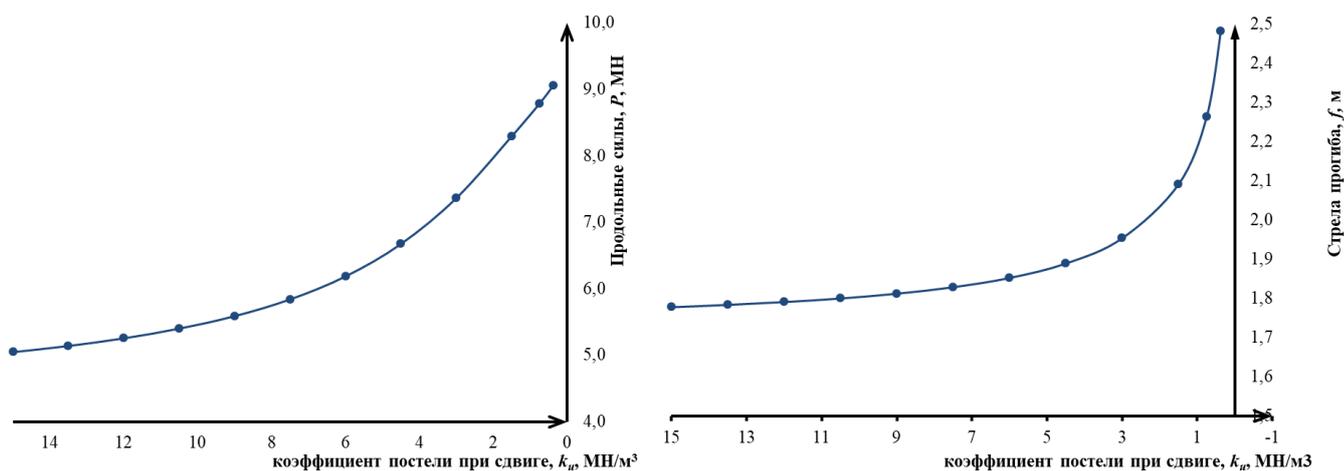


Рисунок 13 – График изменения продольных сил в трубопроводе и стрелы прогиба при изменении коэффициента постели на сдвиг

В четвертой главе диссертации предложена конечно-элементная модель на основе имеющихся экспериментальных данных и на основании масштабных коэффициентов для возможности проведения последующего натурного эксперимента. Модель позволяет определять наиболее нагруженные сечения, а также анализировать критичность дефектов при помощи подмоделирования.

В качестве расчетной схемы выбран трубопровод, диаметром $D = 1020$ мм и толщиной стенки $\delta = 20$ мм. Глубина заложения трубопровода принята равной 1,2 м. Рассчитывается массив грунта длиной 40 м, высотой 5 м и шириной 8 м. На Рисунке 14 показана четверть симметричной модели, разрез сделан вдоль трубопровода и в поперечном сечении трубопровода по дальней стенке массива грунта. Рассматриваются 2 задачи, в первой рассчитывается трубопровод с длиной зоны просадки $l \rightarrow \infty$, во второй задаче зона просадки $l = 40$ м.

Расчет трубопровода приводится с внутренним рабочим давлением $p = 0,1$ МПа для визуализации изгибающих напряжений и сравнивается с расчетом трубопровода, находящегося под рабочим давлением $p = 6,4$ МПа. Расчет происходит в 10 шагов, массив просадочного грунта перемещается с шагом в 100 мм по оси Y, шаг 1 – $\Delta 1 = 100$ мм, шаг 2 – $\Delta 2 = 200$ мм и т. д, шаг 10 – $\Delta 3 = 1000$ мм. Угол сдвига непросадочного грунтового массива, определяется его углом внутреннего трения. В представленной модели модуль деформации среднедеформируемого грунта составляет $E_{уст} = 20$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,35$, угол внутреннего трения непросадочного грунта равен $\varphi = 60$ град, сцепление $c = 20$ кПа. Плотность среднедеформируемого грунта принимается $\rho = 1800$ кг/м³. Прочность на одноосное

сжатие $R_{сж} = 10$ МПа, прочность на одноосное растяжение $R_{раст} = 1,8$ МПа и прочность при двухосном сжатии $R_2 = 12$ МПа. Модуль упругости очень сильнодеформируемого грунта составляет $E_{неуст} = 1$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,35$, угол внутреннего трения просадочного грунта равен $\varphi = 20$ град, сцепление $c = 1$ кПа. Плотность просадочного грунта принимается $\rho = 1550$ кг/м³. Прочность на одноосное сжатие $R_{сж} = 4,5$ МПа, прочность на одноосное растяжение $R_{раст} = 0,8$ МПа и прочность при двухосном сжатии $R_2 = 5,4$ МПа.

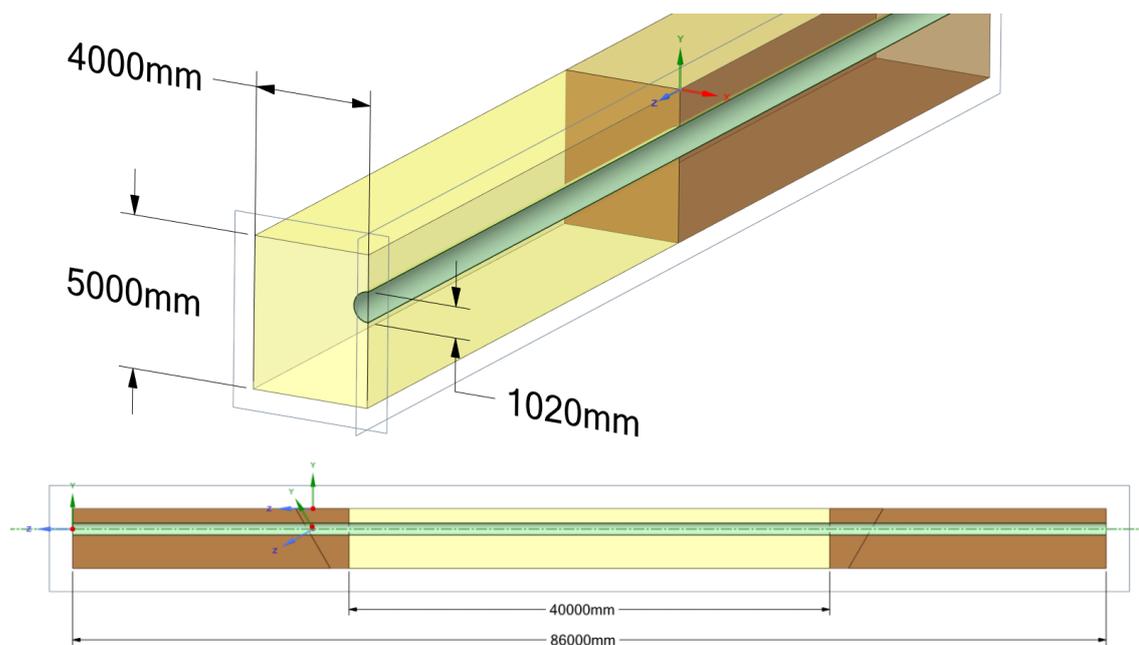


Рисунок 14 – Геометрические размеры расчетной модели

По результатам моделирования получены четыре характерных сечения:

1) $x \approx 2$ м: сечение с наибольшими эквивалентными напряжениями: в этом сечении раньше всего достигается предел текучести стали, данное сечение является самым опасным с точки зрения надежной эксплуатации магистрального трубопровода (Рисунок 15);

2) $x \approx -3...-2$ м: сечение с минимальными эквивалентными напряжениями: в данном сечении присутствует перегиб, изгибающие напряжения меняют свой знак;

3) $x \approx -12...-5$ м: сечение с наибольшими эквивалентными напряжениями, которое находится в зоне очень сильнодеформируемого грунта. В данном сечении наиболее опасными являются нижние волокна, в них достигаются максимальные напряжения;

4) $x \approx -20$ м: сечение с максимальным прогибом. Сечение интересно только при рассмотрении симметричной расчетной схемы.

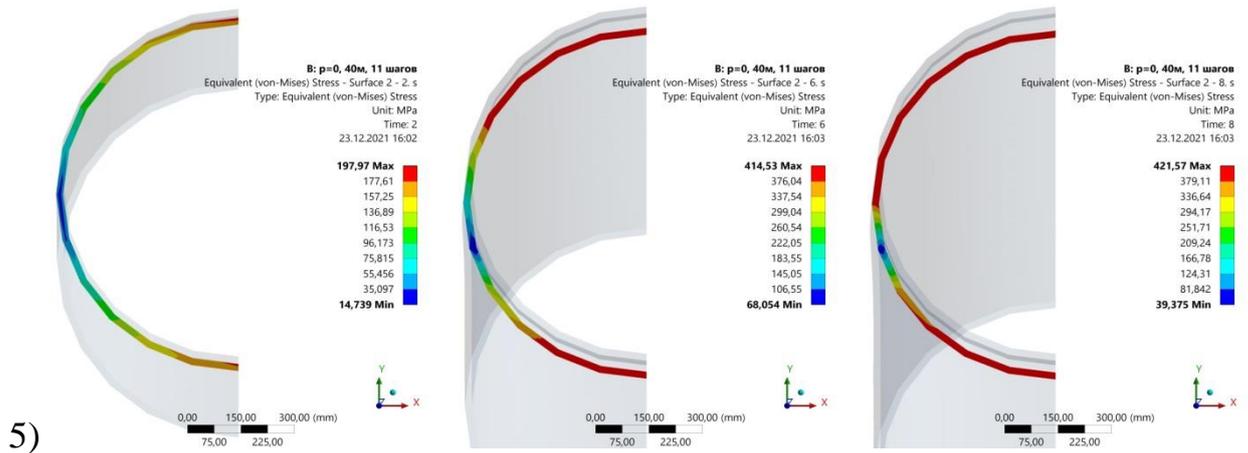


Рисунок 15 – Распределение напряжений в самом напряженном сечении при перемещении от 0 до 1000 мм ($\Delta_1 = 200$ мм, $\Delta_2 = 600$ мм, $\Delta_3 = 800$ мм)

Результаты расчета эквивалентных напряжений трубопровода по всей длине показаны на Рисунке 16. При прогибе $\Delta = 200$ мм возникают упругие напряжения 198 МПа, а при прогибе $\Delta = 600$ мм возникают напряжения 443 МПа, что выше предела текучести, рассматриваемой стали. Определены максимально-допустимые величины смещения двух массивов грунта относительно друг друга до возникновения пластических деформаций в металле трубы.

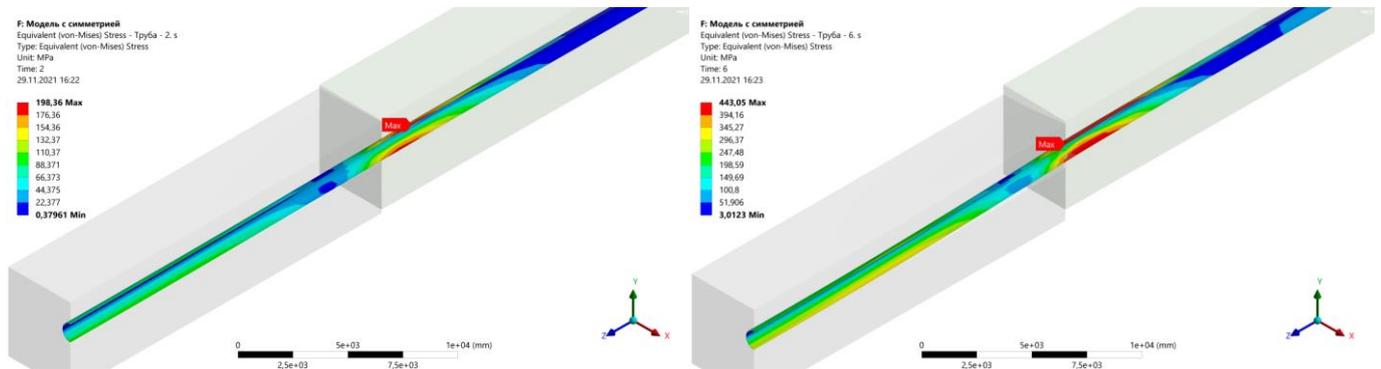


Рисунок 16 – Результаты расчета НДС трубопровода при просадке грунта ($\Delta = 200$ мм, $\Delta = 600$ мм)

На Рисунке 17 показан график зависимости эквивалентных напряжений от длины трубопровода в зависимости от граничных условий. Интерес представляют местоположение опасных сечений. Во всех четырех случаях необходимо принимать во внимание тот факт, что максимальные напряжения необходимо брать как сумму модулей изгибающих и продольных напряжений, на графиках же изображены напряжения только по верхней образующей трубопровода. Для того, чтобы отобразить эквивалентные напряжения для образующих трубопровода рассмотрено опасное сечение $x = 2$ м. На Рисунке 18 показана зависимость для перемещения

$\Delta = 400$ мм, $E_{\text{неуст}} = 1$ МПа, при увеличении модуля деформации $E_{\text{уст}}$ наблюдается максимум напряжений для трубопровода, работающего без внутреннего давления при $E_{\text{уст}} = 30$ МПа.

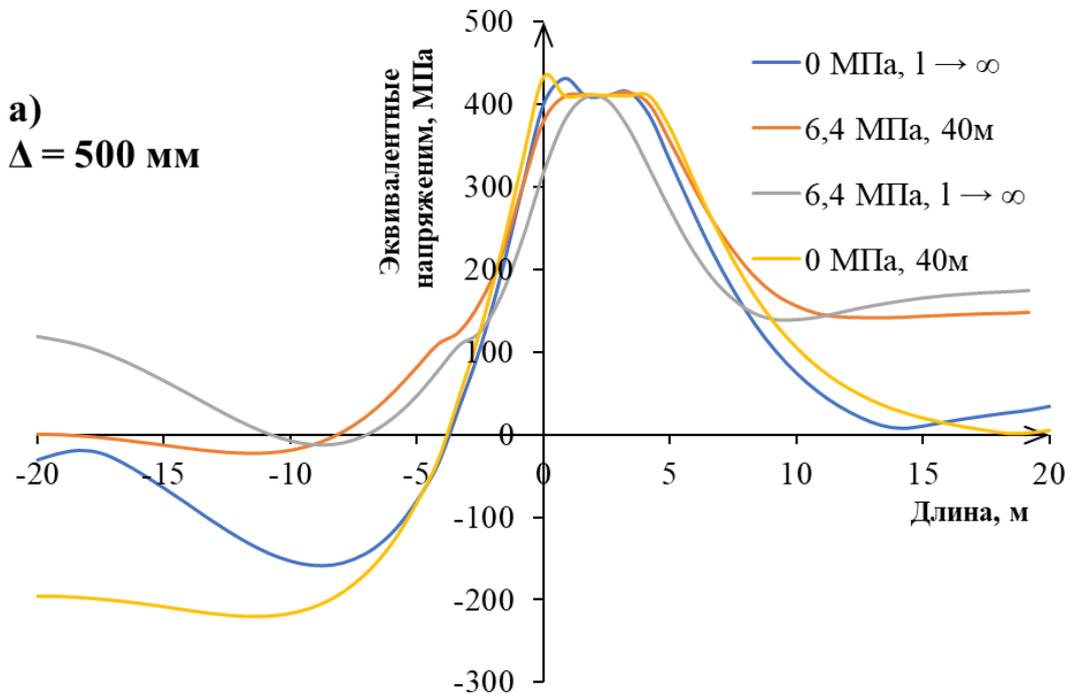


Рисунок 17 – Распределение напряжений по длине трубопровода при просадке

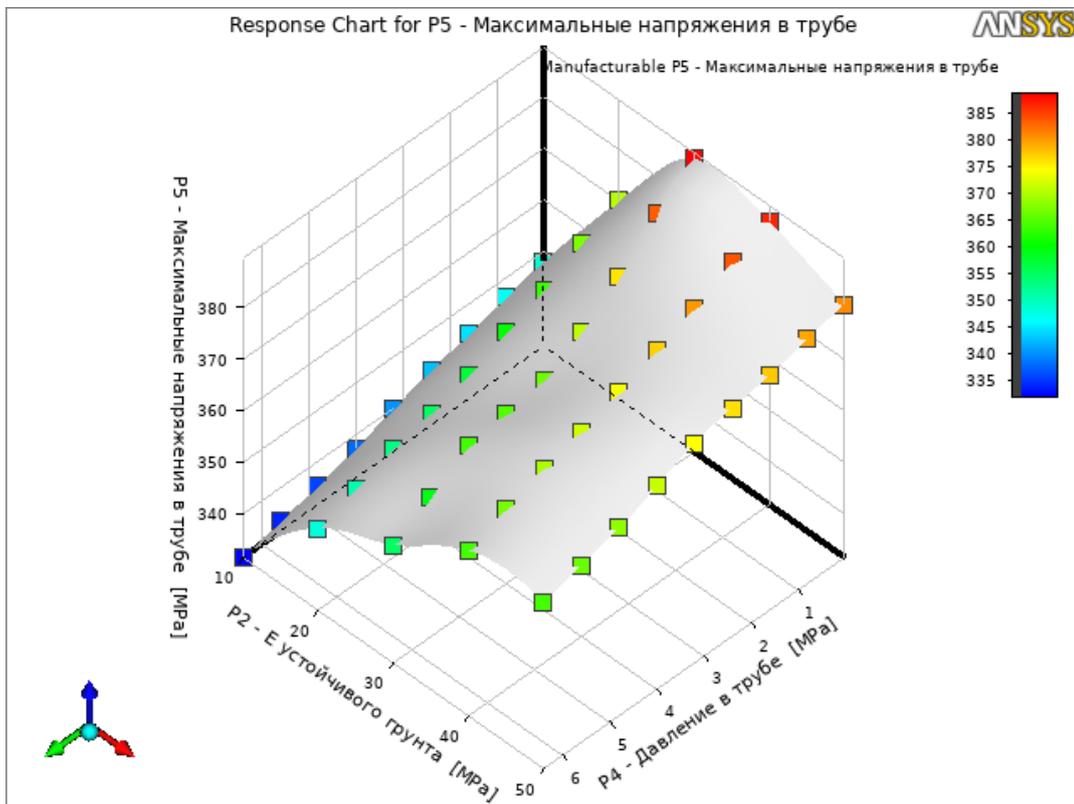


Рисунок 18 – Характер зависимости максимальных напряжений в трубопроводе в зависимости от $E_{\text{уст}}$, внутреннего давления p . $E_{\text{неуст}} = 1$ МПа, $\Delta = 400$ мм

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Анализ технической и научной литературы показал необходимость разработки универсальной тепломеханической модели трубопровода в многолетнемерзлых грунтах. Анализ тепловых, механических и тепломеханических моделей показал, что для моделирования НДС трубопровода в условиях многолетнемерзлых грунтов необходимо оценить влияние температуры и влажности на механические характеристики грунта. Для моделирования НДС грунта выбраны модели Винклера и Мора-Кулона.

2. Учитывая преимущества метода конечных элементов – масштабируемость, и экспериментального метода – достоверность и подконтрольность условий, разработаны экспериментальный стенд и его цифровая модель для моделирования напряженно-деформированного состояния трубопровода от температуры грунта. На стенде получены зависимости, позволяющие оценить продольные перемещения трубопровода и контактные касательные напряжения по поверхности контакта трубопровода, при отношении глубины заложения к диаметру h_{cp}/d от 2,0 до 4,8, температуре от минус 15 °С до 0 °С и влажности от 0 до 15%. Максимальные значения коэффициента постели на сдвиг достигаются при влажности 10% и температуре грунта (супесь) от минус 10 °С до минус 5 °С. Максимальные значения коэффициента постели на сжатие достигаются при влажности 5% и температуре грунта от минус 10 °С до минус 6 °С. Расхождение пиковых значений эксперимента в цифровой и стендовой моделях составило от 5 до 14%.

3. Выявлена зависимость продольных перемещений свободного конца полубесконечного трубопровода при изменении механических свойств грунта, вызванных изменением температуры. При увеличении температуры вмещающего грунта подземного трубопровода диаметром 1020 мм от минус 10 °С до минус 5 °С, продольные деформации свободного конца трубопровода увеличиваются до двух раз (с 46 до 80 мм); при повышении температуры от минус 5 °С до минус 1 °С до 2,5 раз (с 80 до 199 мм). Снижение коэффициента постели на сжатие из-за повышения температуры грунта трубопровода приводит к росту прогиба до 70%. Учет этих обстоятельств позволяет уточнить расчет эквивалентных напряжений до 10%.

4. Разработана нелинейная конечно-элементная модель для определения НДС трубопровода на переходе через границу между мерзлыми грунтами различных ка-

тегорий просадочности, позволяющая варьировать механические свойства грунтов, продольные деформации трубопровода, внутреннее давление в трубопроводе, вес трубопровода и продукта, глубину заложения, длину просадочного участка, сечение трубопровода. Модель позволяет рассчитать условия безопасной эксплуатации оттаявших участков трубопровода. Например, при расчете просадки участка трубопровода 1020 мм, длиной оттаявшего участка 40 метров, и при уменьшении модуля деформации оттаявшего грунта с 25 МПа до 1 МПа, прогиб меняется с 31 мм до 202 мм, а изгибающие напряжения увеличиваются с 21 до 142 МПа без учета внутреннего давления и перепада температур.

Основные положения диссертации и наиболее значимые результаты исследований отражены в следующих научных статьях, опубликованных в ведущих научных изданиях, индексируемых в Web of Science и Scopus:

1. Султанмагомедов, Т. С. Исследование ореолов оттаивания подземного трубопровода в многолетнемерзлых грунтах / Т. С. Султанмагомедов, Р. Н. Бахтизин, С. М. Султанмагомедов [и др.] // Научные труды НИПИ Нефтегаз ГНКАР. – 2021. – № s1. – С. 21-30. – DOI 10.5510/OGP2021SI200594

2. Султанмагомедов, Т. С. Влияние продольных перемещений трубопровода на напряженно-деформированное состояние при оттаивании участка многолетнемерзлого грунта / Т. С. Султанмагомедов // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2022. – Т. 12, № 4. – С. 331-339. – DOI 10.28999/2541-9595-2022-12-4-331-339.

3. Напряженно-деформированное состояние трубопровода, проложенного на участках распространения пучинистых грунтов / Э. В. Файзуллина, М. А. Паршикова, Д. А. Гулин [и др.] // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333, № 9. – С. 168-177. – DOI 10.18799/24131830/2022/9/3595.

4. Тарасов, В. А. Изучение проблемы потери устойчивости поперечного сечения магистральных газопроводов в защитных футлярах под автомобильными и железными дорогами в результате увеличения объема замерзающей воды в межтрубном пространстве / В. А. Тарасов, Т. С. Султанмагомедов, С. М. Султанмагомедов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333, № 4. – С. 93-104. – DOI 10.18799/24131830/2022/4/344993.

5. Шамилов, Х. Ш. Разработка конструкции опоры для подземного крепления трубопровода в зонах распространения островной и прерывистой мерзлоты / Х. Ш. Шамилов, Т. С. Султанмагомедов, С. М. Султанмагомедов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332, № 1. – С. 31-40. – DOI 10.18799/24131830/2021/1/2997.

6. Султанмагомедов, Т. С. Исследование перемещений трубопровода в многолетнемерзлых грунтах / Т. С. Султанмагомедов, Р. Н. Бахтизин, С. М. Султанмагомедов // Научные труды НИПИ Нефтегаз ГНКАР. – 2020. – № 4. – С. 75-83. – DOI 10.5510/OGP20200400468. (Scopus, WoS)

7. Моделирование продольных перемещений трубопровода в многолетнемерзлых грунтах / Т. С. Султанмагомедов, Р. Н. Бахтизин, С. М. Султанмагомедов, А. Р.

Урманова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332, № 4. – С. 87-96.

8. Экспериментальные исследования сопротивления мерзлого грунта продольным перемещениям трубопровода при изменении температуры и влажности / Р. Н. Бахтизин, С. М. Султанмагомедов, Т. С. Султанмагомедов [и др.] // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2020. – Т. 10, № 3. – С. 243-251. – DOI 10.28999/2541-9595-2020-10-3-243-251.

Рекомендованных ВАК РФ:

9. Султанмагомедов, Т. С. Разработка цифровой модели трубопровода в многолетнемерзлых грунтах / Т.С. Султанмагомедов, Т.М. Халиков // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2023. – Т. 144, № 4. – С. 54–70. – doi.10.17122/ntj-oil-2023-4-54–70

10. Айткулов, М. Т. Новый метод по защите склонов от оползневых процессов / М. Т. Айткулов, Т. С. Султанмагомедов, А. С. Глазков // Деловой журнал Neftegaz.RU. – 2021. – № 6(114). – С. 94-99.

По результатам исследований получены патенты на следующие РИД:

1. Патент № 2643914 С1 Российская Федерация, МПК F16L 1/06, E02D 27/46. Устройство для обеспечения проектного положения подземного трубопровода при прокладке в условиях многолетнемерзлых грунтов : № 2016147297 : заявл. 01.12.2016 : опубл. 06.02.2018 / Х. Ш. Шамилов, С. М. Султанмагомедов, Р. Р. Хасанов [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Уфимский государственный нефтяной технический университет".

2. Патент на полезную модель № 173696 U1 Российская Федерация, МПК F16L 3/14. Устройство для обеспечения проектного положения подземного трубопровода при прокладке в слабонесущих грунтах : № 2016147312 : заявл. 01.12.2016 : опубл. 06.09.2017 / Х. Ш. Шамилов, С. М. Султанмагомедов, Р. Р. Хасанов [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Уфимский государственный нефтяной технический университет".

3. Патент № 2766839 С1 Российская Федерация, МПК G01M 5/00, G01N 3/12. Стенд моделирования напряженно-деформированного состояния трубопроводов : № 2021107209 : заявл. 19.03.2021 : опубл. 16.03.2022.