

На правах рукописи

Батыров Артур Магомедович



**РАЗРАБОТКА ОПОРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НАДЗЕМНЫХ
МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ, СНИЖАЮЩИХ
ВЛИЯНИЕ МОРОЗНОГО ПУЧЕНИЯ ГРУНТА**

*Специальность 2.8.5. Строительство и эксплуатация
нефтегазопроводов, баз и хранилищ*

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2024

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент

Шаммазов Ильдар Айратович

Официальные оппоненты:

Кузьбожев Александр Сергеевич

доктор технических наук, профессор, филиал общества с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий – Газпром ВНИИГАЗ» в г. Ухта, отдел надежности и ресурса Северного коридора газотранспортной системы филиала ООО «Газпром ВНИИГАЗ» в г. Ухта, начальник отдела;

Шамилов Хирамагомед Шехмагомедович

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», кафедра «Гидрогазодинамика трубопроводных систем и гидромашины», доцент.

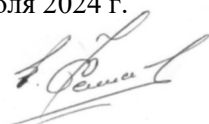
Ведущая организация – государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Альметьевский государственный технологический университет «Высшая школа нефти», г. Альметьевск.

Защита диссертации состоится **10 сентября 2024 г. в 12:00** на заседании диссертационного совета ГУ.11 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д. 2, **аудитория № 3321**.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 10 июля 2024 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ФЕТИСОВ
Вадим Георгиевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

На сегодняшний день значительная часть магистральных трубопроводов России проложена в осложненных природно-климатических условиях Севера страны, где большую зону занимают многолетнемерзлые грунты. В этих условиях более 80% трубопроводов сооружены на надземных опорах, ввиду сложности их прокладки под землей. При этом в условиях сезонного промерзания и оттаивания пород появляется проблема сохранения проектного положения трубопровода на опорах, в связи с этим возникают трудности обеспечить бесперебойную эксплуатацию при транспортировке углеводородов.

Наиболее распространенными опорами, применяемыми для устройства магистральных трубопроводов транспортировки углеводородов, являются опоры со сваями с дополнительными термостабилизаторами грунта. К недостаткам опор с термостабилизаторами следует отнести высокую стоимость и неустойчивость, обусловленные тем, что они дополнительно подмораживают грунт, увеличивают нагрузку от морозного пучения на сваи и затраты на обслуживание.

При возникновении морозного пучения сваи традиционных конструкций опор разнонаправлено смещаются и теряют устойчивость, в следствии чего повышается напряжение сечения трубопроводов, что ведет к нарушению проектного положения трубопроводов и влечет за собой экономические потери, вследствие простоя трубопровода, необходимость проведение ремонтных работ, а также экологический ущерб для окружающей среды в радиусе аварии трубопровода, который иногда не обходится без человеческих жертв. В этой связи, возникает необходимость разработки альтернативных конструкций опор для сооружения магистральных трубопроводов с разработкой соответствующего обоснованного технологического процесса строительства и эксплуатации трубопровода.

Поскольку большая часть магистральных трубопроводов России проложена в осложненных природно-климатических условиях, где в основном прокладка осуществляется на многолетнемерзлых

грунтах в условиях морозного пучения, поэтому поднимается важная задача, направленная на долговечность сооружения при эксплуатации.

Диссертационное исследование выполнено в рамках государственного задания FSRRW-2023-0002 «Фундаментальные междисциплинарные исследования недр Земли и процессов комплексного освоения георесурсов».

Степень разработанности темы исследования

Проблемы строительства и эксплуатации линейных участков надземных магистральных трубопроводов на многолетнемерзлых грунтах рассматривались в исследованиях Л.И. Быкова, Н.А. Гаррис, А.И. Горковенко, Р.М. Зарипова, Г.Е. Коробкова, С.Я. Кушнира, Ф.К. Хабибуллина, А.М. Шаммазова, А.К. Николаева, Allen Lawrence J, Ruixia He, Huijun Jin, Kouli Kim, S. Nishimura и др.

Отдельные рекомендации и правила проектирования по строительству и эксплуатации инженерных объектов в зонах распространения многолетнемерзлых грунтов в холодных климатогеографических условиях прокладки, в том числе для технически сложных линейных сооружений, к которым относятся магистральные трубопроводы для нефти и газа, содержатся в нормативно-технической документации: СП 36.13330.2012, СП 86.13330.2014, СП 25.13330.2020, СП 47.13330.2012, СП 22.13330.2016, СП 24.13330.2011, СП 21.13330.2012, ОНТП 51-1-85, ГОСТ 25100-95, СТО Газпром 2-2.1-249-2008, РД-24.040.00-КТН-062-14 и в других стандартах как корпоративного, так и отраслевого значения.

Предмет исследования – опоры надземного трубопровода в условиях морозного пучения грунта.

Объект исследования – процесс эксплуатации надземного магистрального трубопровода, сооруженного на опорах, в условиях многолетнемерзлых пород при воздействии сил морозного пучения грунта.

Цель работы – уменьшение отрицательного влияния морозного пучения грунта на надземный магистральный трубопровод.

Идея работы заключается в сохранении проектного положения надземного магистрального трубопровода за счет разрезания мерзлого вспученного грунта клином опоры.

Поставленная в диссертационной работе цель достигается посредством решения нижеуказанных **задач**:

1. Проанализировать и обобщить результаты теоретических и экспериментальных исследований по теме диссертации;

2. Обосновать возможность использования клина в качестве несущего элемента конструкции опоры при воздействии сил морозного пучения грунта;

3. Разработать алгоритм расчета опор надземных магистральных трубопроводов, учитывающий воздействия сил морозного пучения грунта;

4. Разработать конструкции опор надземных магистральных трубопроводов, уменьшающих воздействия сил морозного пучения грунта.

Научная новизна работы:

1) Установлена зависимость влияния геометрического соотношения клина разработанной конструкции опоры на снижение воздействия сил морозного пучения грунта на надземный магистральный трубопровод.

2) На основании экспериментальных исследований установлена зависимость осевого перемещения клина в мерзлый грунт от угла скоса клина конструкции опоры надземного магистрального трубопровода.

Содержание диссертации соответствует следующим областям исследования паспорта научной специальности 2.8.5. Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ по п 1.

Теоретическая и практическая значимость работы:

Разработан способ защиты несущей опорной конструкции надземного магистрального трубопровода от воздействий сил морозного пучения с сохранением проектного положения в условиях сезонного промерзания. Данный способ учитывает поэтапное строительство сооружения и включает использование новых конструкций опор, которые снижают воздействие морозного пучения грунта на магистральный трубопровод, проходящий через районы сплошного распространения многолетнемерзлых пород (Патент РФ № RU 2785329, Патент РФ № RU 2781733, Патент РФ № RU 216684, Патент РФ № RU 216414).

Разработана программа расчета опор надземных магистральных трубопроводов, проложенных на многолетнемерзлых грунтах в условиях морозного пучения, позволяющая подобрать опоры на стадии проектирования для уменьшения последствий от морозного пучения грунта (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023663247).

Результаты диссертационной работы рекомендованы к внедрению в ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург» (акт № ВБ/7524 от 13.04.2023) при проектировании магистральных газопроводов на участках трассы в условиях многолетнемерзлых пород.

Методология и методы исследования. Проведение исследований осуществлялось в соответствии с математическим моделированием процесса, экспериментальным исследованием, включающим обработку полученных данных с последующей интеграцией в разработанную модель.

На защиту выносятся следующие положения:

1) Разработанные конструкции опор надземных магистральных трубопроводов, отличающихся от традиционных опор наличием клина, позволяющие снизить перемещения опор в условиях морозного пучения грунта.

2) Разработанный алгоритм последовательности расчета опор надземных магистральных трубопроводов, учитывающий усилия от морозного пучения грунта, позволяющий определить параметры предлагаемых элементов конструкции опоры, обеспечивающих снижение напряжений на трубопроводе.

Степень достоверности результатов исследования обусловлена использованием стандартных методов моделирования. Достоверность результатов работы подтверждается сходимостью экспериментальных и расчетных данных, а также с результатами общепризнанных исследований в области трубопроводного транспорта углеводородов на многолетнемерзлых грунтах.

Апробация результатов. Основные положения и результаты работы докладывались на следующих семинарах и конференциях: Всероссийская научно-техническая конференция «Фундаментальный базис инновационных технологий нефтяной и газовой промышленно-

сти» (октябрь 2022, Москва); Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы геологии, разработки эксплуатации месторождений, транспорта и переработки трудноизвлекаемых запасов тяжелых нефтей» (декабрь 2021, Ухта); XVII Международная научно-практическая конференция «Трубопроводный транспорт - 2022» (октябрь 2022, Уфа); II Всероссийская молодежная научная конференция «Транспорт и хранение углеводородов - 2023» (апрель 2023, Санкт-Петербург); VI Всероссийская молодежная научная конференция «Актуальные проблемы нефти и газа» (октябрь 2023, Москва).

Личный вклад автора заключается в анализе зарубежной и отечественной научной литературы по теме исследования, разработке методики исследования, проведении экспериментальных исследований определения усилий вдавливания клина в мерзлый грунт при отрицательных температурах, разработке и научном обосновании конструкции опоры надземного магистрального трубопровода от воздействий сил морозного пучения грунта, разработке алгоритма расчета опор надземных магистральных трубопроводов, проложенных на многолетнемерзлых грунтах; участии в написании научных статей по теме диссертации.

Публикации. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 6 печатных, в том числе 2 статьи – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), 2 статьи в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получены 4 патента и 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 150 наименований, восемь приложений. Диссертация изложена на 128 страницах машинописного текста, содержит 58 рисунков и 14 таблиц.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность и искреннюю признательность научному руководителю Шаммазову

И.А., профессору Щипачеву А.М., доценту Сидоркину Д.И., сотрудникам кафедры транспорта и хранения нефти и газа Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II за помощь в работе над диссертацией.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель, задачи и научная новизна, раскрыты теоретическое и практическое значение исследования, а также изложены основные положения, представляемые на защиту.

В первой главе содержится аналитический обзор мирового опыта по применению опорных конструкций надземных магистральных трубопроводов, проложенных в условиях многолетнемерзлых пород, при воздействии процесса морозного пучения грунта. Выявлено, что существующие опоры не справляются с воздействиями сил морозного пучения грунта. Проведен анализ проблем, препятствующих широкому распространению прокладки магистральных трубопроводов при транспортировке углеводородов на таких грунтах. Исходя из этого, была выдвинута идея разработки альтернативных конструкций опор для сооружения магистральных трубопроводов на многолетнемерзлых грунтах, позволяющих сохранить проектное положение трубопроводов.

На основе проведенного анализа в конце первой главы сформулированы цель и задачи научного исследования.

Во второй главе представлены теоретические исследования особенностей прокладки магистральных трубопроводов на многолетнемерзлых грунтах. На основе разработанного алгоритма расчета опор надземных магистральных трубопроводов, проложенных на многолетнемерзлых грунтах при воздействии сил морозного пучения, обоснован расчет, обеспечивающий подбор предлагаемых конструкций опоры. Получены результаты численных исследований с помощью конечно-элементного моделирования в программном обеспечении ANSYS. Все расчеты представлены на примере надземных участков магистральных трубопроводов. Исследовано воздействие различных вариантов пучения грунтов на напряжения надземного участка трубопровода. Установлено уменьшение напряжений на трубопроводе за счет использования разработанных конструкций опор.

В третьей главе проведен анализ существующих и перспективных конструкций свайных оснований надземного главного трубопровода, проложенного в районах распространения многолетнемерзлых грунтов. Установлено, что применение перспективных конструкций опор позволит обеспечить надежную фиксацию оси на проектных отметках и уменьшить риски потери устойчивости и возникновения недопустимых деформаций трубопровода. Предложены новые конструкции опор для надземных участков магистральных трубопроводов в зонах распространения многолетнемерзлых грунтов. Рассчитана вертикальная сила выдергивания сваи с клином, которая будет на 1,25 раза меньше вертикальной силы выдергивания сваи без клина.

В четвертой главе проведены результаты испытаний разработанной конструкции опоры для надземного участка трубопровода в зонах распространения сплошной мерзлоты. Выполнено моделирование методом конечных элементов для усилий вдавливания клина в мерзлый грунт от нагрузки на конструкцию опор надземного магистрального трубопровода в программной среде PLAXIS. Доказано, что в случаях морозного пучения грунтов возможно сохранить устойчивое положение опор надземного трубопровода, за счет клина конструкции опоры. Проведен сравнительный анализ результатов натурального эксперимента и моделирования усилий вдавливания клина в мерзлые вспученные грунты. Выявлено, что при угле скоса клина 30 градусов затрачиваются меньшие усилия вдавливания грунта, чем при углах скоса 45 и 60 градусов, которые выражались в виде полученных вертикальных смещений клина. Выявлено, что при понижении температуры грунта увеличиваются критические напряжения, возникающие в моменте инициации резания мерзлого грунта клином опоры.

В заключении сформулированы основные научные и практические выводы по диссертационной работе.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1) Разработанные конструкции опор надземных магистральных трубопроводов, отличающихся от традиционных опор

наличием клина, позволяющие снизить перемещения опор в условиях морозного пучения грунта.

В рамках эксперимента по проверке работоспособности конструкций опор при низких температурах была проведена серия испытаний на разрушение в соответствии с нормами по ГОСТ 12248.4 - 2020. Для тестирования использовались нестандартные образцы по ГОСТ 11262-2017, изготовленные из железобетона механическим способом. Испытания проводились на разрывной машине MTS Insight Testing Systems - 200 kN при температуре, соответствующей многолетнемерзлomu грунту от - 4°C до - 10°C, а также образцы, замороженные в холодильнике, держались в течение 48 часов.

В качестве допущений клин отпускается в грунт за счет давления прессы на клин с определенной силой, разрезающий мерзлый грунт до максимального погружения клина. Для моделирования степени морозного пучения грунта применили обратную задачу за счет осевого перемещения клина в мерзлый грунт, что позволило определить процесс разрезания мерзлого вспученного грунта. В результате проведения эксперимента, моделирующего воздействие сил морозного пучения грунта, пресс оказывал давление на клин, вызывая ее осевое перемещение в сторону мерзлого грунта на 1 мм.

Экспериментальная установка (рисунок 1) моделирует нагрузки от воздействий сил морозного пучения грунта на конструкцию опоры, и подтверждает преимущество разработанных опор путем вдавливания клина в мерзлые грунты. Грунты, используемые в этом эксперименте, являются одними из основных минеральных компонентов в районах сплошного распространения многолетнемерзлых пород. Для проведения опытов были выбраны три вида грунта: суглинок (район г. Воркута), песок (район г. Новый Уренгой) и торф (район г. Новый Уренгой). Для проведения эксперимента по разрезанию материалов необходимо следовать определенной последовательности действий. Сначала производится насыщение водой суглинков, песка и торфа. Затем взвешивается масса грунта на электронных весах и далее грунты смешиваются с водой в соотношении 15% от общего объема грунта. В качестве емкости для грунтов в процессе эксперимента взят кусок стальной трубы. Затем емкость с образцом помещается в

холодильник для достижения необходимой температуры замерзания. После этого образец оставляют в холодильнике на 48 часов для замерзания.

Подобраны 3 вида клина с различными углами скоса. Подбор угла выше 60 градусов не представляется эффективным ввиду низкого эффекта резания. При этом несомненно уменьшения угла менее 30 градусов приведет к низкой несущей способности опоры. Поэтому были заданы конкретные граничные углы 30, 45 и 60 градусов. В результате оптимальный угол скоса клина равен 30 градусам, исходя из величин морозного пучения грунта, которые выражались в виде полученных вертикальных перемещений клина опоры.

Графики зависимостей усилий вдавливания мерзлого грунта от осевых перемещений клина при $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, представлены на рисунках 2 - 4.

Проведено компьютерное моделирование вдавливания клина в мерзлые грунты в программном комплексе PLAXIS по результатам сбора и анализа данных (рисунки 5-7).

Для проверки работоспособности математической модели для расчета усилий вдавливания клина в среде PLAXIS сравнивались результаты разработанной модели конечных элементов и данные экспериментальных измерений с фактическими перемещениями клина, задаваемыми с помощью ПК. Исходными данными для моделирования являются геометрические параметры клина, тип грунта и его температура, а также свойства материала клина. Угол клина был задан 30 градусам исходя из данных натурного эксперимента.

В ходе экспериментальных данных и численного моделирования определили оценку сходимости расчетных значений.

Из результатов поверочных расчетов видно, что предложенная конструкция опоры трубопровода, подтверждается высокой сходимостью модели с экспериментальными замерами (таблица 1).

Полученные данные позволяют сделать вывод, что погрешность между двумя измерениями минимальна и удовлетворяет усло-

виям достоверности полученных результатов. Расчеты для разработанной модели элемента опоры с мерзлым грунтом доказывают возможность использования в качестве основания разработанную конструкцию опор с клином.

Для исключения возможности смещения свай опоры и образования разрывов надземных магистральных трубопроводов при воздействии процессов морозного пучения предлагается разрезать мерзлый вспученный грунт путем установки железобетонной плиты, где ее нижняя часть выполнена в форме клина, заглубленной в грунт (рисунок 8).

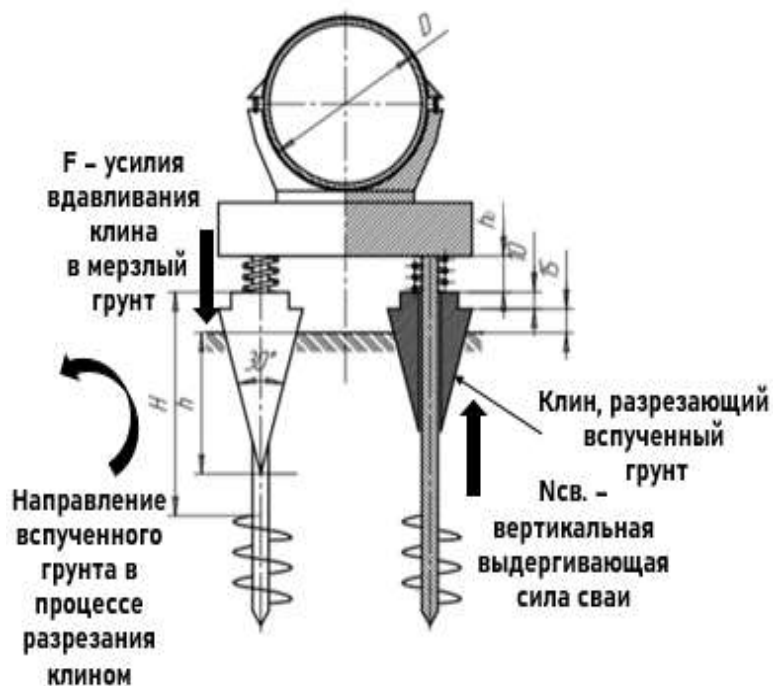


Рисунок 8 – Схема разработанной опоры в разрезе

Разработанная опора надземного магистрального трубопровода работает следующим образом. В процессе пучения грунта клин за счет своей геометрии и усилий вдавливания разрезает вспученный

мерзлый грунт. Таким образом уменьшается площадь соприкосновения вспученного грунта со сваей и снижается вертикальная выдергивающая сила сваи.

Также в ходе аналитических расчетов выявлено, что вертикальная выдергивающая сила сваи с клином будет меньше в 1,25 раз за счет того, что клин опоры разрезает вспученный грунт и уменьшает площадь соприкосновения сваи с сезонно-мёрзлым грунтом от внешних нагрузок, что позволит снизить опасные напряжения на магистральном трубопроводе в условиях морозного пучения грунта.

Таким образом, **первое положение**, вынесенное на защиту, **считается доказанным.**

2) Разработанный алгоритм последовательности расчета опор надземных магистральных трубопроводов, учитывающий усилия от морозного пучения грунта, позволяющий определить параметры предлагаемых элементов конструкции опоры, обеспечивающих снижение напряжений на трубопроводе.

При разработке алгоритма (рисунок 9) полагается, что конструкции опор при эксплуатации подвергаются дополнительным нагрузкам, вызванными процессами морозного пучения грунта. Для обеспечения безопасности транспортировки углеводородов разработана многофакторная математическая модель, определяющая напряжения линейных участков надземного магистрального трубопровода, проложенного на многолетнемерзлых грунтах в условиях морозного пучения, позволяющая подобрать необходимую конструкцию опоры трубопровода, учитывая воздействия непроектных нагрузок при возникновении морозного пучения грунта. Данный алгоритм заключается в последовательности расчета опор при воздействии сил морозного пучения грунта



Рисунок 9 – Алгоритм расчета опор надземных магистральных трубопроводов, учитывающий нагрузку от морозного пучения грунта

Величина нагрузки на пружину опоры, необходимая для расчета алгоритма, определяется по формуле (1):

$$F_{\text{пр}} = \gamma \times 0,5 \times (l_1 + l_2) + k \times Y, \quad (1)$$

где γ - удельный вес 1 м трубопровода с изоляцией в рабочем состоянии, кгс/м; l_1 и l_2 - длины горизонтальных пролетов слева и справа от опоры, м; Y - вес арматуры, кгс; k - доля веса арматуры, передаваемая на эту опору.

Величина напряжений на трубопроводе, необходимая для расчета алгоритма, определяется по формуле (2):

$$Q = (F_{\text{тр.}} - N_{\text{св}}) / 2, \quad (2)$$

где $N_{\text{св}}$ - вертикальная выдерживающая сила сваи, кН; $F_{\text{тр}}$ - нагрузка трубопровода на опору, кН.

Основные результаты вычислений по алгоритму представлены в виде графиков на рисунках 10 - 11.

Для расчета суммарных нагрузок, действующих в опасном участке на опорах газопровода, имеющего диаметр 1420 мм, и на нефтепроводе диаметром 1220 мм, были определены максимальные напряжения на трубопроводе в случае морозного пучения грунта в программном обеспечении ANSYS Workbench. Это было сделано с учетом выбранных опор, температур и типа грунта.

В ходе численных расчетов обнаружено, что напряжения в сечении трубопровода с традиционной опорой сильно возрастают, это обусловлено тем, что трубопровод жестко закрепленный на опорах начинает прогибаться из-за выдергиваний свай за счет процесса морозного пучения грунта, а также при вертикальном смещении опоры только на одном конце пролета трубы, поскольку морозное пучение процесс неравномерный.

На основе полученных данных рассчитано во сколько раз изменились напряжения в сечении трубопровода в зависимости от применяемых конструкций опор. Для газопровода при -10 °С: 1) частное напряжений для торфа $Q_{\text{трад}} / Q_{\text{разр}} = 150 \text{ МПа} / 15 \text{ МПа} = 10$; 2) частное напряжений для песка $Q_{\text{трад}} / Q_{\text{разр}} = 160 \text{ МПа} / 16 \text{ МПа} = 10$; 3) частное напряжений для суглинка $Q_{\text{трад}} / Q_{\text{разр}} = 174 \text{ МПа} / 17,4 \text{ МПа} = 10$. Для нефтепровода при -10 °С: 1) частное напряжений для торфа $Q_{\text{трад}} / Q_{\text{разр}} = 170,7 \text{ МПа} / 17,7 \text{ МПа} = 10$; 2) частное напряжений для песка $Q_{\text{трад}} / Q_{\text{разр}} = 180,3 \text{ МПа} / 18,3 \text{ МПа} = 10$; 3) частное напряжений для

суглинка $Q_{\text{град}} / Q_{\text{разр}} = 190,2 \text{ МПа} / 19,2 \text{ МПа} = 10$. Таким образом, выявлено снижение напряжений на трубопроводе за счет применения разработанных конструкций опор в 10 раз (рисунки 12-14).

Анализ напряжений на трубопроводе с учетом физических свойств мерзлого грунта показал существенное влияние на трубопровод от смещения опоры при морозном пучении, которое снизится за счет выбора разработанной конструкции опоры трубопровода. На основании данных расчета напряжений, отклонившегося от проектного положения линейного участка надземного трубопровода и смоделированных усилий вдавливания клина в грунт, а также критичные напряжения грунта возникшие в результате нагрузки на клин при условии морозного пучения, возникающих в точках клина опоры, выявлена необходимость в применении разработанных опорных конструкций.

Для оценки критических напряжений инициации резания мерзлого грунта построили конечно-элементную модель процесса резания в программном обеспечении ANSYS Workbench.

Для этого строим трехмерную модель нагруженного клина, разрезающий цельную структуру грунта. Расчет производился в модуле Static Structural. Данный модуль представляет собой математическую модель для решения задач механики деформируемого твердого тела в статической постановке. По результатам эксперимента использовали усредненные усилия вдавливания клина, параметры модели и характеристики грунтов для исходных данных моделирования клина опоры с мерзлым грунтом.

На основании алгоритма, а также значений, полученных в результате эксперимента, заданы условия для оценки напряжений надземного магистрального трубопровода в зависимости от применяемых опор методом конечных элементов используя программу ANSYS.

В ходе численных расчетов обнаружено, что при понижении температуры грунта в интервале от $-4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ увеличиваются критические напряжения инициации резания мерзлого торфа от 146 до 530 кПа, песка от 131 до 609 кПа, суглинка от 354 до 1694 кПа в процессе разрезания клином опоры (рисунки 15-17). Определена

оценка критических напряжений инициации резания мерзлого грунта клином опоры (таблица 2).

На основе проведенных расчетов и анализа напряжений в грунте, на трубопроводе и в клине, были разработаны и обоснованы различные варианты опор для поддержки надземного магистрального трубопровода, где клин использовался в качестве дополнительного режущего элемента опорной конструкции.

Таким образом, **второе положение**, вынесенное на защиту, **считается доказанным**.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации содержится решение актуальной задачи снижение отрицательного влияния морозного пучения грунта на надземные магистральные трубопроводы за счет использования клина опоры, что имеет существенное значение для развития нефтегазовой отрасли и безопасной транспортировки углеводородов.

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы:

1. Анализ и обобщение результатов теоретических и экспериментальных исследований показали, что не проработаны в достаточной мере вопросы эксплуатации надземных магистральных трубопроводов, механизмы разрушения опор и характер возникновения непроектных знакопеременных нагрузок при различных вариантах пучения участков грунтов;

2. Экспериментально доказана возможность использования опор с клином в условиях многолетнемерзлых грунтов. Выявлено уменьшение влияния морозного пучения грунта на опоры трубопровода, за счет использования железобетонного клина в качестве несущего элемента конструкции опоры при воздействии сил морозного пучения грунта. Определен угол клина опоры трубопровода, позволяющий затрачивать меньше усилий вдавливания в грунт. Выявлено, что при понижении температуры грунта увеличиваются критические напряжения, возникающие в момент инициации резания мерзлого грунта клином опоры;

3. На основании разработанного алгоритма расчета опор надземных магистральных трубопроводов, проложенных на многолетнемерзлых грунтах при воздействии сил морозного пучения, обоснован расчет, позволяющий подобрать предлагаемые конструкции опоры. Рассчитана вертикальная выдерживающая сила сваи с клином, которая будет меньше вертикальной выдерживающей силы сваи без клина;

4. Разработана и обоснована аналитическим - расчетным путем конструкция опоры и способ защиты несущей опорной конструкции надземного магистрального трубопровода от воздействий сил морозного пучения грунта. Выявлено снижение напряжений на трубопроводе за счет применения разработанных конструкций опор.

Возможности дальнейшего развития темы заключаются в усовершенствовании имеющихся и разработке новых альтернативных конструкций опор для надземных магистральных трубопроводов, проложенных на многолетнемерзлых грунтах, с целью уменьшения воздействия морозного пучения на грунт.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Шаммазов, И.А. Анализ существующих конструкций опор надземных магистральных трубопроводов в арктических условиях / И.А. Шаммазов, Д.И. Сидоркин, **А.М. Батыров** // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2022. – № 2 (136). – С. 103-117. DOI: 10.17122/ntj-oil-2022-2-103-117 (№ 1916 Перечня ВАК ред. 29.03.2022).

2. Шаммазов, И.А. Анализ существующих методик расчета фундаментов на морозное пучение грунта при подборе конструкции опор надземного магистрального трубопровода / И.А. Шаммазов, Д.И. Сидоркин, **А.М. Батыров** // Нефтегазовое дело (научно-технический журнал). – 2022. – № 4. – С. 210-217. DOI: 10.17122/ngdelo-2022-4-210-217 (№1694 Перечня ВАК ред. 29.03.2022).

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

3. Шаммазов, И.А. Обеспечение устойчивости надземных магистральных трубопроводов в районах сплошного распространения многолетнемерзлых пород / И.А. Шаммазов, Д.И. Сидоркин, **А.М. Батыров** // Известия Томского политехнического университета. – 2022. – № 12. DOI: 10.18799/24131830/2022/12/3832.

4. Shammazov, I.A. Study of the Effect of Cutting Frozen Soils on the Supports of Above-Ground Trunk Pipelines / I.A. Shammazov, D.I. Sidorkin, T. Van Nguyen, **A.M. Batyrov** // Applied Sciences (Switzerland). – 2023. – № 13. DOI: 10.3390/app13053139.

Публикации в прочих изданиях:

5. **Батыров, А. М.** Обеспечение устойчивости надземных магистральных трубопроводов в районах сплошного распространения многолетнемерзлых пород // Фундаментальный базис инновационных технологий нефтяной и газовой промышленности: Сборник трудов Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 35-летию ИПНГ РАН, Москва, 17–19 октября 2022 года. – Москва: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем нефти и газа Российской академии наук. – 2022. – С. 198-200.

6. **Батыров, А. М.** Обеспечение устойчивости надземных магистральных трубопроводов в районах сплошного распространения многолетнемерзлых пород // Тезисы докладов XVII Международной научно-практической конференции УГНТУ, Уфа, 17–18 ноября 2022 года. – Уфа: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет». – 2022. – С. 39-40.

Патенты/свидетельства на объекты интеллектуальной собственности:

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ РФ № RU 2023663247 Российская Федерация. Программа расчета опор надземных магистральных трубопроводов, проложенных на многолетнемерзлых грунтах в условиях морозного пучения. № 2023661892: заявл. 08.06.2023, дата регистрации: 21.06.2023 / **Батыров А. М.**, Сидоркин Д. И., Бойков А.В. заявитель: федеральное

государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». – 194 кб.

8. Патент РФ № RU 2781733 Российская Федерация, МПК F16L 3/10, F16L 3/205. Опора надземного магистрального трубопровода: № 2022109206: заявл. 07.04.2022: опубл. 17.10.2022 / И. А. Шаммазов, Д. И. Сидоркин, **А. М. Батыров**; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет". – 8 с.: ил.

9. Патент РФ № RU 2785329 Российская Федерация, МПК E02D 27/35. Способ защиты несущей опорной конструкции надземного магистрального трубопровода от воздействий сил морозного пучения грунта: № 2022124679: заявл. 20.09.2022: опубл. 06.12.2022 / И. А. Шаммазов, Д. И. Сидоркин, **А. М. Батыров**; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет". – 19 с.: ил.

10. Патент РФ № RU 216414 Российская Федерация, МПК F16L 3/205. Опора надземного магистрального трубопровода: № 2022134217: заявл. 26.12.2022: опубл. 02.02.2023 / И. А. Шаммазов, Д. И. Сидоркин, **А. М. Батыров**; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет". – 10 с.: ил.

11. Патент РФ № RU 216684 Российская Федерация, МПК F16L 3/205, F16L 3/10. Опора надземного магистрального трубопровода: № 2022134216: заявл. 26.12.2022: опубл. 20.02.2023 / И. А. Шаммазов, Д. И. Сидоркин, **А. М. Батыров**; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет". – 11 с.: ил.

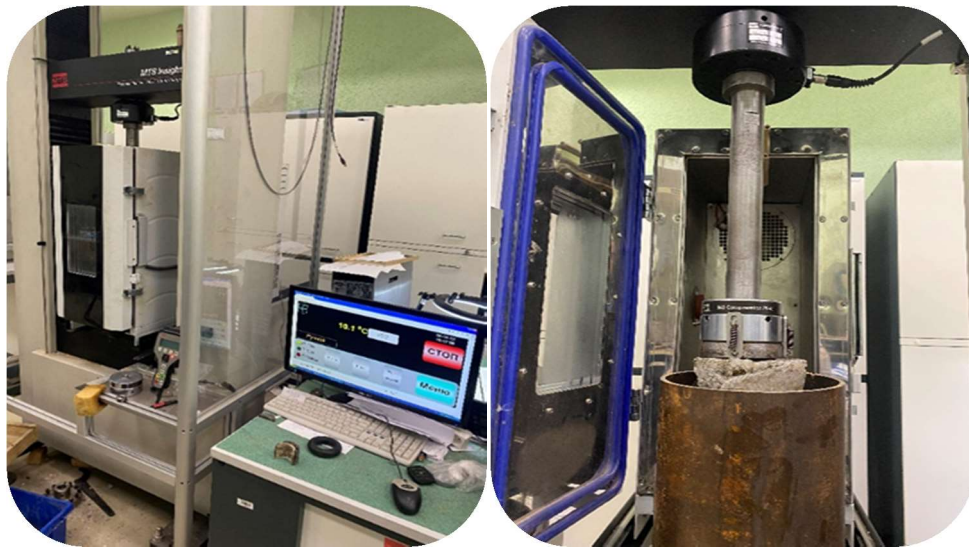


Рисунок 1 - Экспериментальный стенд для исследования зависимости величины усилия, необходимого для вдавливания клина опоры, от осевого перемещения клина в мерзлых грунтах

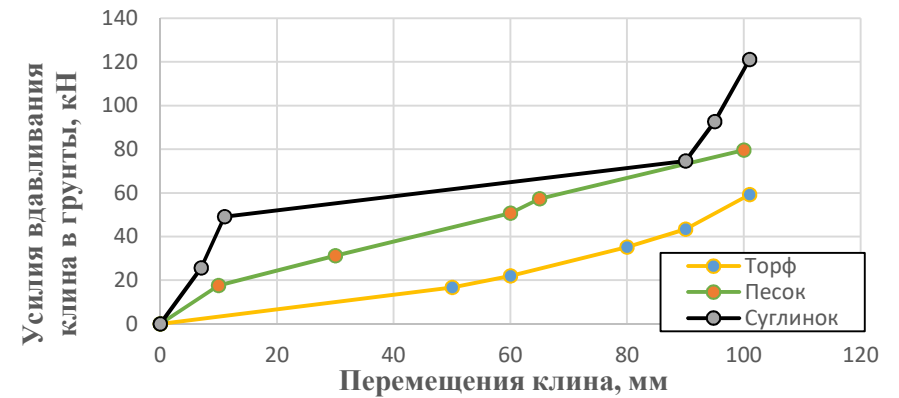


Рисунок 2 – Графики зависимости усилий вдавливания клина в грунты от осевого перемещения клина с углом склоа 30 градусов

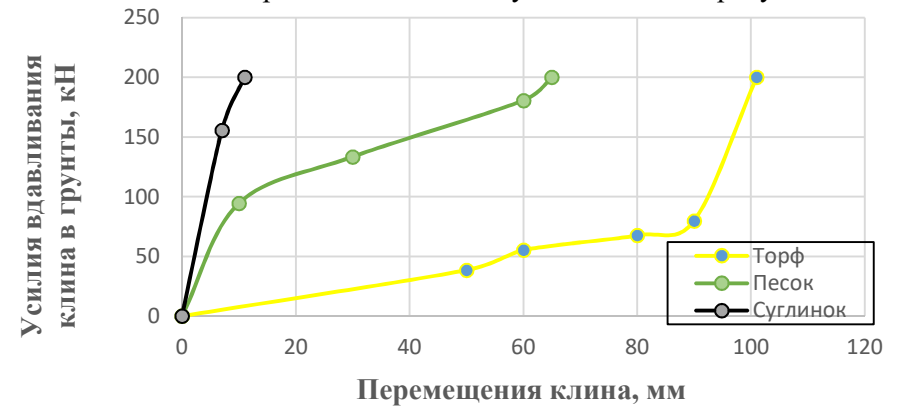


Рисунок 3 – Графики зависимости усилий вдавливания клина в грунты от осевого перемещения клина с углом склоа 45 градусов

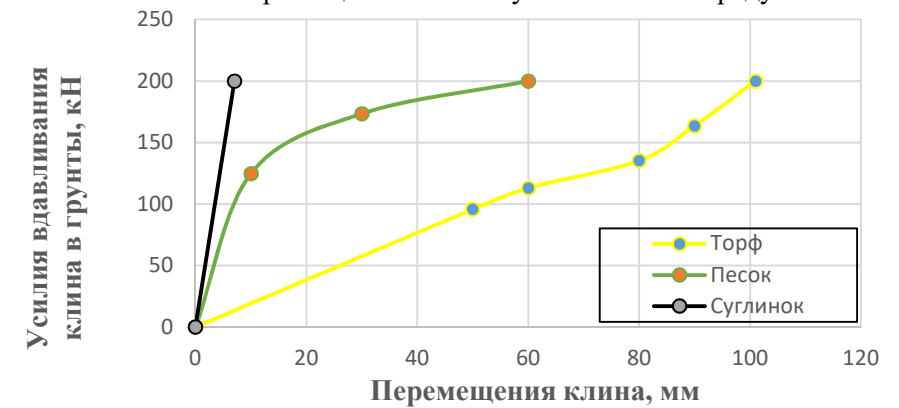


Рисунок 4 – Графики зависимости усилий вдавливания клина в грунты от осевого перемещения клина с углом склоа 60 градусов



Рисунок 5 – Усилия вдавливания клина в мерзлый суглинок при температуре грунта – 10° С



Рисунок 6 – Усилия вдавливания клина в мерзлый песок при температуре грунта – 10° С

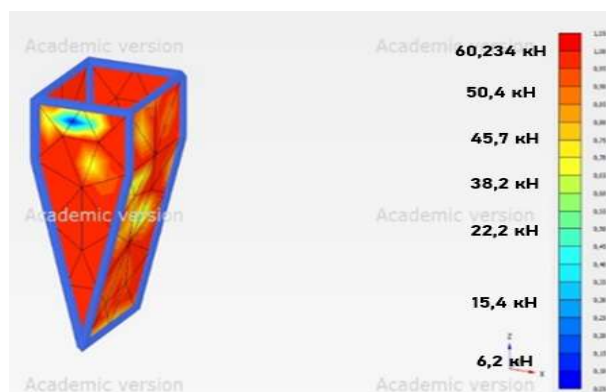


Рисунок 7 – Усилия вдавливания клина в мерзлый торф при температуре грунта – 10° С

Таблица 1 - Оценка сходимости расчетных значений с экспериментальными исследованиями

Температура мерзлого грунта, °С	Тип мерзлого грунта	Усилия вдавливания клина в мерзлый грунт, кН		Относительная погрешность, %
		Результаты экспериментальных измерений	Результаты расчета в конечно-элементной модели PLAXIS	
- 4	торф	16,055	16,695	7,8
	песок	17,084	17,584	8,9
	суглинок	25,091	25,991	7,2
- 5	торф	21,525	22,025	8,7
	суглинок	48,354	50,033	9,2
- 7	торф	34,753	35,522	8,5
	песок	49,885	51,473	9,3
	суглинок	73,975	75,665	8,7
- 8	торф	42,638	44,357	7,8
	песок	56,868	58,832	9,2
	суглинок	91,668	94,948	8,9
-10	торф	58,644	60,234	9,3
	песок	78,646	81,835	8,5
	суглинок	119,146	125,146	9,4

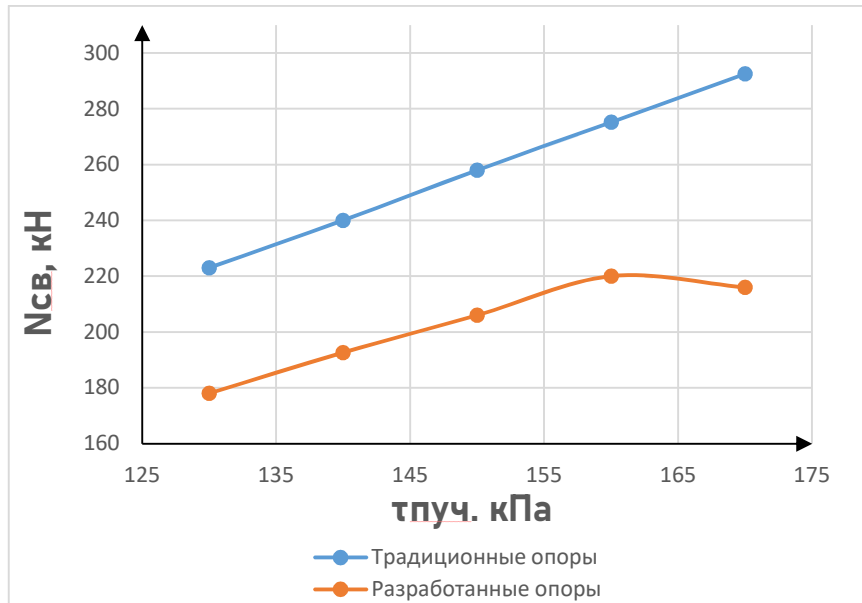


Рисунок 10 – Графики зависимостей вертикальных выдергивающих сил сваи от удельных касательных сил морозного пучения грунта

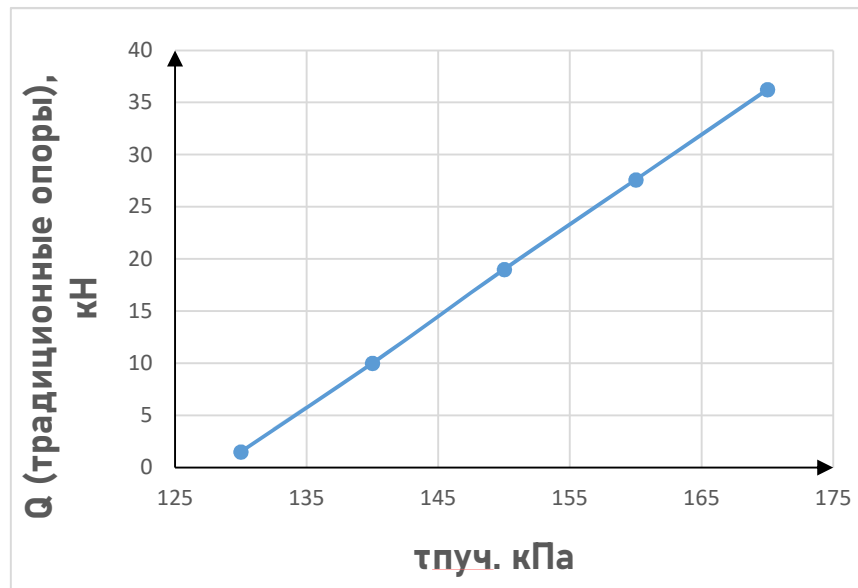


Рисунок 11 – График зависимости нагрузки на трубопроводе от удельной касательной силы морозного пучения грунта

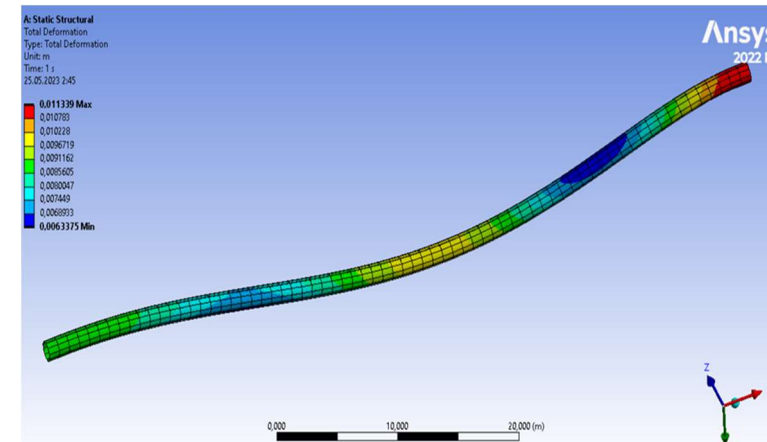


Рисунок 12 – Участок трубопровода, деформированный изгибом

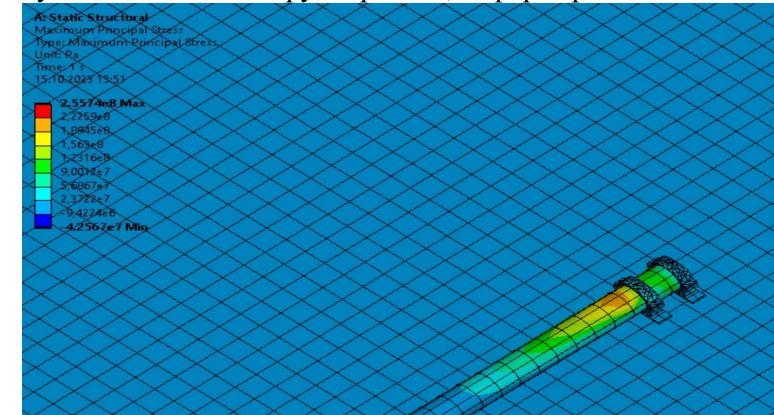


Рисунок 13 – Напряжения трубопровода с традиционной опорой

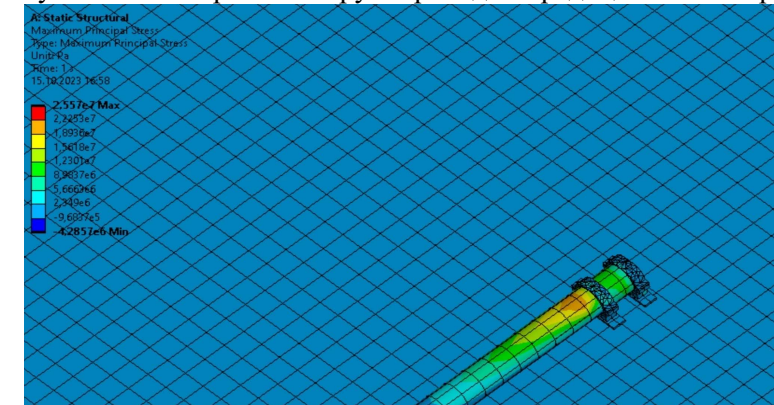


Рисунок 14 – Напряжения трубопровода с разработанной опорой

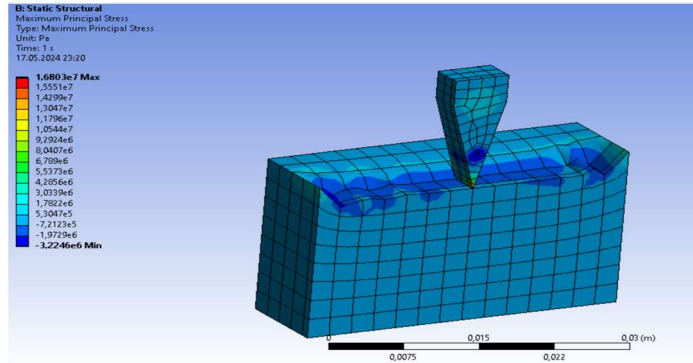


Рисунок 15 – Распределение критических напряжений инициации резания мерзлого торфа клином опоры при температуре -10 °С

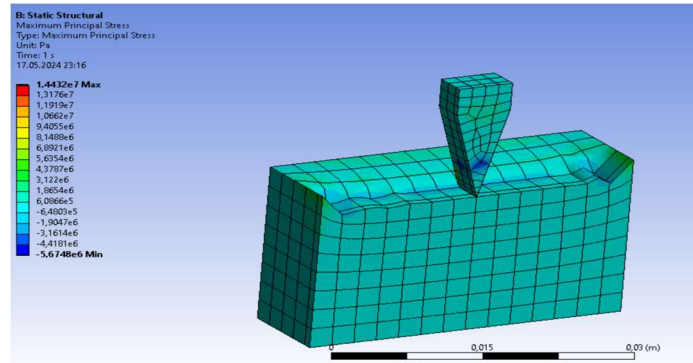


Рисунок 16 – Распределение критических напряжений инициации резания мерзлого песка клином опоры при температуре -10 °С

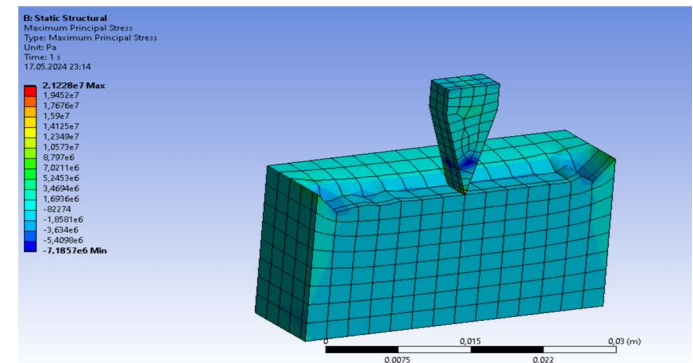


Рисунок 17 – Распределение критических напряжений инициации резания мерзлого суглинка клином опоры при температуре -10 °С

Таблица 2 – Оценка критических напряжений инициации резания мерзлого грунта клином опоры

Температура мерзлого грунта, °С	Тип мерзлого грунта	Усилия вдавливания клина в грунты, кН	Критические напряжения мерзлого грунта, кПа
- 4	торф	16	146
	песок	17	131
	суглинок	25	354
- 5	торф	21	194
	песок	31	236
	суглинок	49	682
- 7	торф	35	313
	песок	50	384
	суглинок	74	1038
- 8	торф	43	388
	песок	57	530
	суглинок	93	1294
-10	торф	59	530
	песок	80	609
	суглинок	122	1694