

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Шаммазов И.А.

Санкт-Петербург – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ТЕКУЩЕГО СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА СТРОИТЕЛЬСТВА ТРУБОПРОВОДОВ В МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ	11
1.1 Анализ нормативно-технического обеспечения и практического опыта строительства трубопроводов на многолетнемерзлых породах	11
1.2 Разновидности мерзлых грунтов и районы их распространения.....	13
1.3 Особенности проектирования и строительства магистральных трубопроводов в условиях многолетнемерзлых грунтов	17
1.4 Опыт реализации проектов трубопроводов при транспортировке нефти и газа в зонах распространения многолетнемерзлых грунтов	18
1.5 Инженерно-технические решения по защите линейной части магистральных трубопроводов, проложенных на мерзлых грунтах	22
1.6 Выводы по главе 1	25
ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЛИНЕЙНОГО УЧАСТКА НАДЗЕМНОГО МАГИСТРАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СИЛ МОРОЗНОГО ПУЧЕНИЯ ГРУНТА.....	26
2.1 Расчет участка надземного магистрального трубопровода.....	26
2.2 Анализ существующих методик расчета фундаментов на морозное пучение грунта при подборе конструкции опор надземного магистрального трубопровода	35
2.3 Сравнительная оценка напряжений на линейном участке надземного трубопровода при нагрузках от морозного пучения с использованием метода конечных элементов	40
2.4 Алгоритм расчета опор надземных магистральных трубопроводов, проложенных на многолетнемерзлых грунтах в условиях морозного пучения	47
2.5 Выводы по главе 2	56

ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИЙ ОПОР И СПОСОБА ЗАЩИТЫ НАДЗЕМНОГО МАГИСТРАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДА ОТ МОРОЗНОГО ПУЧЕНИЯ ГРУНТА	57
3.1 Анализ существующих инженерно-технических способов повышения устойчивости линейного участка надземного трубопровода от воздействий сил морозного пучения грунта	57
3.2 Разработка конструкций опор надземного трубопровода и способа защиты от морозного пучения грунта, проложенных в районах сплошного распространения мерзлоты	65
3.4 Выводы по главе 3	77
ГЛАВА 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ ОПОРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ.....	78
4.1 Экспериментальная апробация разработанных конструкций для подтверждения эксплуатации опор в многолетнемерзлых грунтах при воздействии сил морозного пучения.....	78
4.2 Определение сходимости результатов расчета на основе предложенной экспериментальной модели с результатами конечно-элементного моделирования процесса резания вспученного грунта.	87
4.3 Оценка критических напряжений инициации резания мерзлого грунта клином опоры на основе экспериментальной модели	93
4.4 Выводы по главе 4	95
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	97
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	101
ПРИЛОЖЕНИЕ А Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023663247 «Программа расчета опор надземных магистральных трубопроводов, проложенных на многолетнемерзлых грунтах в условиях морозного пучения».....	120
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Патент на изобретение № 2781733 «Опора надземного магистрального трубопровода»	121

ПРИЛОЖЕНИЕ В Патент на изобретение № 2785329 «Способ защиты несущей опорной конструкции надземного магистрального трубопровода от воздействий сил морозного пучения грунта».....	122
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Патент на изобретение № 216684 «Опора надземного магистрального трубопровода»	123
ПРИЛОЖЕНИЕ Д Патент на изобретение № 216414 «Опора надземного магистрального трубопровода»	124
ПРИЛОЖЕНИЕ Е Акт внедрения результатов диссертации в деятельности ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург»	125
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж Алгоритм расчетной модели	127
ПРИЛОЖЕНИЕ З Чертеж конструкции опоры	128

ВВЕДЕНИЕ

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.

Пучение грунта при замерзании – это способность грунта увеличивать свой объем при замерзании почвы. В многолетнемерзлых грунтах морозное пучение часто возникает на практике, несмотря на предварительные расчеты, направленные на предотвращение этого процесса. Прокладка магистральных трубопроводов под землей нецелесообразна в местах пучения из-за возможного смещения трубопровода при изменении объема грунта, что может привести к разрыву. Из-за локальной природы проблемы не всегда эффективно использовать подземный способ прокладки, поэтому предпочтительным считается надземный способ, который уменьшает риск возникновения опасных процессов, таких как оттаивание грунта вокруг трубопровода и последующее морозное пучение. При надземной прокладке также возникают сложности с сохранением проектного положения трубопровода на опорах, что затрудняет эффективную эксплуатацию.

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, Koui 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.

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 (Приложения Б, В, Г, Д).

Обнаружено уменьшение последствий от морозного пучения для магистральных трубопроводов путем разрезания мерзлого вспученного грунта режущим клином по результатам выдержки образцов грунта и клина в среде отрицательных температур в течение одних суток и проведения эксперимента в среде близким к реальным условиям морозного пучения, что расширяет возможности применения указанного материала.

Разработана программа расчета опор надземных магистральных трубопроводов, проложенных на многолетнемерзлых грунтах в условиях морозного пучения, позволяющая подобрать опоры на стадии проектирования для уменьшений последствий от морозного пучения грунта (Приложение А).

Результаты диссертационной работы рекомендованы к внедрению в ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург» (акт № ВБ/7524 от 13.04.2023, Приложение Е) 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 исследований обусловлена использованием стандартных методов математического и имитационного моделирования. Достоверность результатов работы подтверждается сходимостью экспериментальных и расчетных данных, а также с результатами общепризнанных исследований в области трубопроводного транспорта 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 промышленности» (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 напряжения

разрушения мерзлого грунта при отрицательных температурах, разработке и научном обосновании способа защиты ряда конструкций опор надземного магистрального трубопровода от воздействий сил морозного пучения грунта, разработке алгоритма подбора конструкций опор надземных магистральных трубопроводов, проложенных на многолетнемерзлых грунтах; участии в написании научных статей по теме диссертации.

Публикации в достаточной степени освещены в 6 печатных работах (пункты списка литературы № 18, 19, 105, 106, 107, 143), 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 (Приложения А, Б, В, Г, Д).

Структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 150 наименования, 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.

ГЛАВА 1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ТЕКУЩЕГО СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА СТРОИТЕЛЬСТВА ТРУБОПРОВОДОВ В МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ

1.1 Анализ нормативно-технического обеспечения и практического опыта строительства трубопроводов на многолетнемерзлых породах

Большая часть запасов нефти и газа в России расположена в Западной Сибири, а трассы магистральных трубопроводов проходят через районы сплошного распространения многолетней мерзлоты. Подземная прокладка трубопроводов в таких районах является сложной задачей из-за различных факторов [1, 35-38].

Многолетний опыт транспортировки углеводородов через трубопроводы, таких как Трансальясинский нефтепровод в США и проекты Восточная-Сибирь, Сила-Сибирь, Заполярье-Пурпе, Ванкор-Пурпе в России, не создал полноценной нормативной базы. Необходимо обосновать проект качественно как для изысканий, так и для экономического эффекта. Поскольку технико-экономическое обоснование проектов дорогостоящее и затянутое, а прогнозирование рисков осложнено, то необходимо учитывать возможные негативные последствия эксплуатации на этапе проектирования. Необходимо учесть различные варианты аварийных ситуаций, вызванных геокриологическими процессами многолетнемерзлого грунта (ММГ).

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.

Так на практике эксплуатации Трансальясинского нефтепровода строительство термостабилизирующих опор привело к авариям надземных магистральных трубопроводов.

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 проведения ремонтных работ, а также экологический ущерб для окружающей среды в радиусе аварии трубопровода, а иногда не обходится без человеческих жертв. Практика эксплуатации северных трубопроводов показала, что участки надземной прокладки находятся в аварийном состоянии, несмотря комплексное изучение проектирования и строительства термостабилизирующих опор. В этой связи, возникает необходимость разработки альтернативных конструкций опор для сооружения магистральных трубопроводов.

Проектирование участков магистральных трубопроводов в зонах распространения (ММГ) осуществляется с учетом нормативных требований и отдельных рекомендаций 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 др.

Вопросами строительства и эксплуатации линейных участков надземных магистральных трубопроводов на ММГ 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, Koui Kim, S. Nishimura и др.

На сегодняшний день необходимость разработки альтернативных конструкций опор для сооружения магистральных трубопроводов с разработкой соответствующего обоснованного технологического процесса строительства и эксплуатации трубопровода, проложенных на ММГ в районах сплошного распространения остается важной и особо актуальной [10, 19, 48, 50, 51, 53, 77, 119, 131].

1.2 Разновидности мерзлых грунтов и районы их распространения

Многолетнемерзлые грунты характеризуются отрицательной температурой, в составе присутствуют частицы льда, которые связывают минеральные частицы грунта либо находятся в трещинах и порах. При условиях пониженной влажности породы частицы льда отсутствуют, в связи с этим грунты промерзают не полностью, как следствие происходит образование бугров, вызванных морозным пучением грунта [14, 29, 30, 55 - 57].

В основном районы многолетнемерзлых грунтов встречаются в Западной Сибири. В зависимости от характера и степени пучинистости мерзлых грунтов, различают зоны со сплошным и островным распространением мерзлоты (Рисунок 1.1).

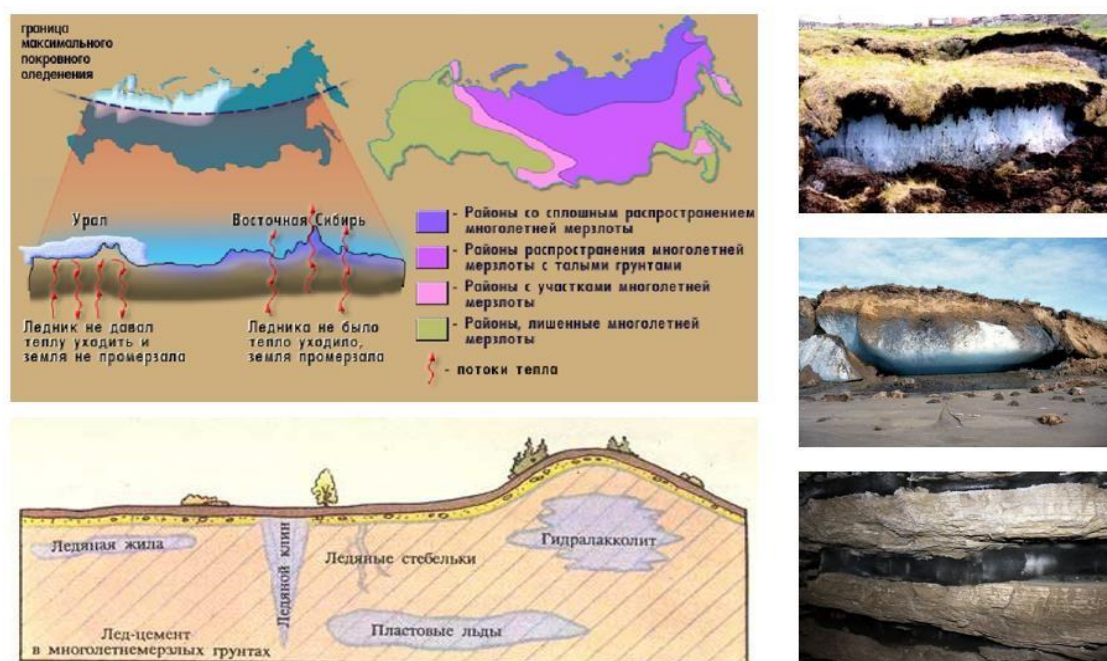


Рисунок 1.1 – Разновидности мерзлых грунтов и районы их распространения [101]

На Рисунке 1.1 представлено распространение многолетнемерзлых грунтов, которые способны достигать десятков метров. Многолетнемерзлые грунты делятся на сыпучие, твердые, пластичные [81].

Твердые грунты характерны низкой сжимаемостью под нагрузками от сооружений, поскольку такие грунты сцементированы толщиной льда, с коэффициентом сжимаемости $0,05 \text{ см}^2/\text{кг}$ [149].

Пластичномерзлые грунты характерны тем, что они со одной стороны сцементированы льдом, а с другой стороны обладают вязкими свойствами, поскольку такие грунты содержат большое количество воды с положительной температурой, их сжимаемость под нагрузкой равняется $10^2\text{-}10^3 \text{ см}^2/\text{кг}$ [150].

Сыпучемерзлые грунты в отличие от пластичномерзлых характерны уже несцементированным льдом, имеют свойство не изменяться под действиями температуры [148].

Прокладка надземных трубопроводов на сложно прогнозируемых участках со сплошным распространением мерзлоты, представляет опасность при эксплуатации этих сооружений. На рисунке 1.2 показаны различные варианты залегания ледяных линз. Таким залеганиям свойственно менять свои габариты и расположения из-за влияния на них теплоты климата, это затрудняет задачу устойчивости конструкции опор.

Бугры морозного пучения – внешнее увеличение породы в объеме под влиянием подземной воды в сторону промерзания, где расположены ледяные линзы [123-132].

Самыми опасными грунтами являются породы, содержащие глину, поскольку плотность у глин высока, то при образовании геокреологического процесса при морозном пучении глина начинает еще больше увеличивать свою плотность за счет замерзания воды и тем самым увеличивается вероятность выдавливания даже самых устойчивых опор надземных трубопроводов, что предъявляет жесткие требования для опорных конструкций надземных магистральных трубопроводов [116-121].

Последствия от воздействия сил морозного давления, в процессе образования утолщений от морозного пучения на значительной площади, приводят к смещению опор, которые теряют свою устойчивость, в результате чего трубопровод подвергается опасным изгибным напряжениям и происходит разрушение стенки трубопровода [21-22, 24].



Рисунок 1.2 – Варианты залегания ледяных линз в мерзлом грунте [101]

В связи с тем, что мерзлые грунты могут оттаивать, увеличивается вероятность образования морозного пучения, что очень характерно в районах со сплошным распространением. Трассы магистральных трубопроводов в таких районах представляют собой опасность в виде выхода из работы трубопровода, что чаще всего не предусмотрено на начальной стадии проектирования [39-42, 98]. На рисунке 1.3 представлены бугры пучения и виды распространения многолетнемерзлых грунтов.

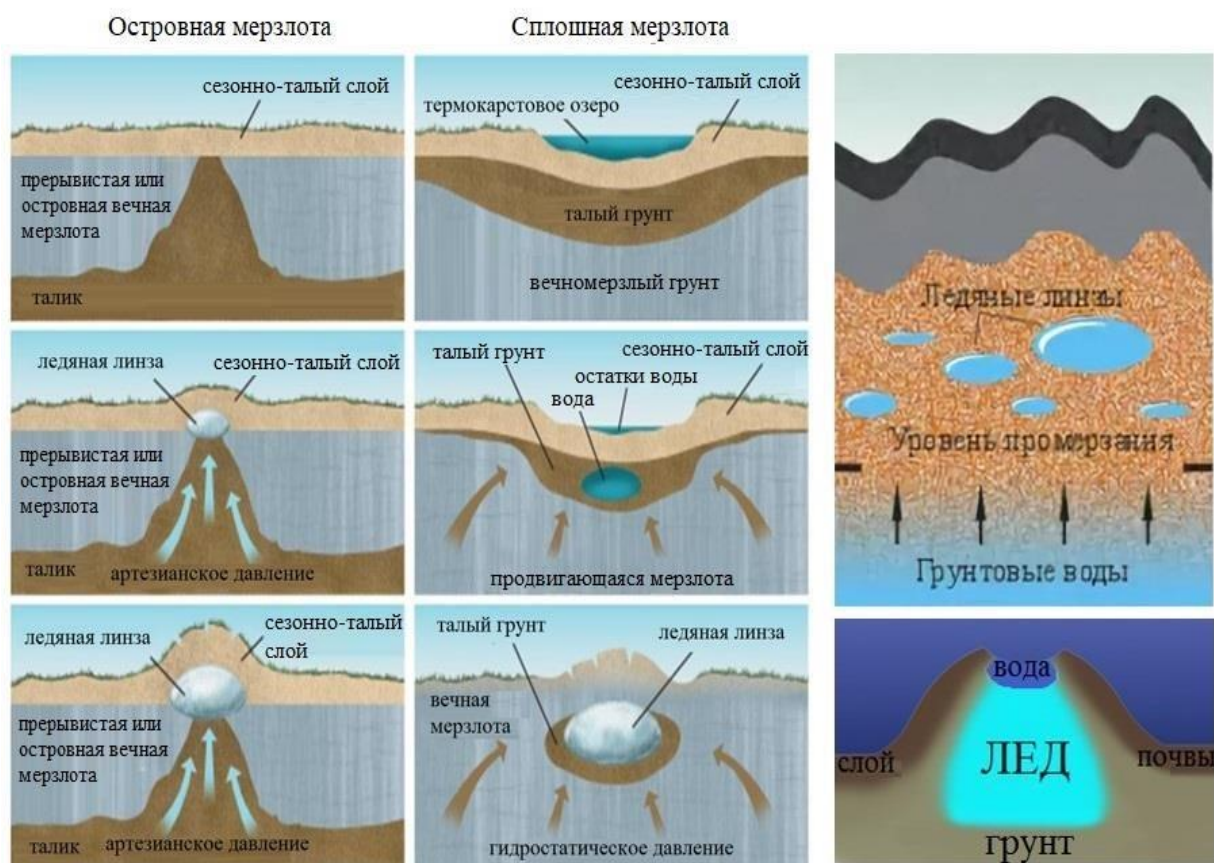


Рисунок 1.3 – Бугры пучения и виды распространения многолетнемерзлых грунтов [101]

Процессы морозного пучения и образования бугров является труднопрогнозируемой задачей, поскольку чтобы предсказать или смоделировать данный процесс необходимо достаточно большой объем информации, которую на данный момент не удастся получить современными методами сбора данных геофизиками и геомеханиками. Также стоит добавить, что процесс образования бугров морозного пучения может достигать десятки лет.

Спрогнозировать данные процессы является непростой задачей, в связи с этим возникают трудности, не учитывающие поведение и нагрузки действий сил морозного пучения на стадии проектирования, которые могут быть решены за счет разработки и применения универсальных конструкций опор, позволяющих защитить трубопровод от изгиба в грунтах при образовании бугров морозного пучения [3-4].

1.3 Особенности проектирования и строительства магистральных трубопроводов в условиях многолетнемерзлых грунтов

В арктических регионах построено более 80% магистральных трубопроводов, которые сооружаются в большинстве случаев в надземном исполнении. На основании нормативных документов в связи с практичностью эксплуатации [15-17, 77].

При строительстве магистральных трубопроводов руководствуются двум условиям применения мерзлых грунтов в качестве оснований: I – сохранить мерзлое состояние грунта в процессе эксплуатации трубопроводов; II принцип – обеспечить устойчивость конструкций опор в условиях морозного пучения грунта [23, 87].

В связи с тем, что морозное пучение грунта практически не избежать, то выбирают II условие, при котором целесообразно строительство надземных трубопроводов. Из-за действий дополнительных нагрузок, чтобы избежать возможный изгиб трубопровода важно проводить расчеты на устойчивость и прочность трубопроводов [47].

Для уменьшения риска образования деформаций от действий сил морозного пучения на надземные трубопроводы и конструкции опор применяют следующие методы: замену грунта, используют противопучинистые средства и устройства, способные сохранить проектные положения трубопроводов [48, 78-79].

При угрозе сильного прогиба трубопровода предусматривают мероприятия для снижения напряжений на его стенках, применяя искусственное промерзание грунта или специальные конструкции опор компенсирующие смещения грунта. При выборе эффективного проектного решения по прокладке магистрального трубопровода в условиях сплошного распространения многолетнемерзлых грунтов ММГ рассматриваются различные проекты с определением сметной стоимости по каждому варианту. На сегодняшний день актуальность набирают решения по эффективной эксплуатации трубопроводов на ММГ [49-51].

Давление от воздействий вспученного грунта приводит к изменению проектного положения наземного магистрального трубопровода [13, 21]. При оттаивании мерзлых пород над опорами трубопровода происходит смещение его оси, а при больших значениях этого процесса – прогиб и разрыв трубопровода. В настоящее время сооружение магистральных трубопроводов затруднено климатическими условиями, также в процессе эксплуатации возникают проблемы, вызванные морозным пучением грунта, что предъявляет дополнительные требования при проектировании наземных магистральных трубопроводов. Для успешного решения задачи при возведении магистральных трубопроводов необходимо учитывать морозное пучение грунта, то есть все расчеты проводить с учетом воздействия сил морозного пучения на опоры и его влияние на трубопровод. Таким образом, необходимо учитывать нагрузку на трубопровод, передаваемую от опорных конструкций, которые подвергаются нагрузкам из-за вспученного грунта [135-142].

1.4 Опыт реализации проектов трубопроводов при транспортировке нефти и газа в зонах распространения многолетнемерзлых грунтов

В Западной Сибири ежегодно происходит около 8 тысяч отказов и аварий на нефте- и газопроводах из-за выдавливания опор вызванных морозным пучением грунта. На нефтяных месторождениях Ханты-Мансийского АО происходит около 1900 аварий в год. На данный момент известно, что у газопровода Ямбург – Ныда насчитывается около 6% аварий от общей протяженности магистрального трубопровода. Также из-за потери устойчивости опор газопровода Мессояха-Норильска количество аварий только за первые годы эксплуатации составило 130 [27-31].

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. Так на практике эксплуатации Трансаляскинского нефтепровода строительство термостабилизирующих опор привело к авариям надземных магистральных трубопроводов [122].

При использовании сооружений значительное воздействие на их устойчивость оказывают изменения геокриологических условий грунтов, на которых они построены [21-22]. Взаимодействие системы "атмосфера - сооружение - ММГ" приводит к незначительным изменениям в тепловом балансе из-за морозного пучения. Например, на месторождении "Медвежье" среднегодовая температура грунтов варьируется от минус 10°C до минус 3°C. Для эффективного проектирования устойчивых опор в сложных климатических условиях необходимо изучать аварийные ситуации, вызванные разрушением магистрального трубопровода. Например, температура окружающей среды с ноября по апрель достигает 50°C в течение 55% дней при постоянном ветре со скоростью 8-15 м/с [43]. Статистика показывает, что такие условия в течение 10 лет приводят к аварийным ситуациям на магистральных трубопроводах. [44]. Морозное пучение, вызванное изменением температуры окружающей среды, существенно влияет на работоспособность конструкции. Стенки трубопровода подвергаются серьезным дефектам из-за смещений опор в мерзлом грунте при воздействии сил морозного пучения грунта.

Рассмотрим нефтепровод в Аляске представленный на рисунке 1.4, протяженностью 1288 километров, проложенный на севере региона, а также трубопроводы на территории РФ, представленные на рисунке 1.5 [45].



Рисунок 1.4 – Опоры трансаяскинского трубопровода [101]

На примере участка трансаяскинского трубопровода было обнаружено, что с высокой скоростью увеличиваются бугры пучения. По данным [43] на участках с очень интенсивным проявлением сил морозного пучения за 10 лет выпучивание достигло 1 метра [111, 95-96].

Трансаяскинский трубопровод



Нефтепровод «Заполярье – Пурпе»



Нефтепровод «ВСТО»



Нефтепровод «Ванкор – Пурпе»



Рисунок 1.5 – Магистральные трубопроводы, проложенные на многолетнемерзлых грунтах [101]

Значительный вклад в разработку трубопроводов внес инженер русского происхождения Егор Павлович Попов [111]. Его принципы строительства

магистральных трубопроводов, проложенные на многолетнемерзлых грунтах, применяются в проектах РФ [95-96].

Конструкции специальных опор для поддержки надземных трубопроводов в проекте "Заполярье-Пурпе" разделяются на несколько типов: неподвижные, продольно-подвижные и свободно-подвижные. Они изготовлены из хладостойкой стали 09Г2С 14-й категории. В зависимости от типа опоры имеют массу от 2 до 4,9 тонн, а длина сварных швов варьируется от 8 до 30 метров [5, 98]. Неподвижные опоры обычно располагаются вдоль дороги, а между ними устанавливаются промежуточные свободно-подвижные и продольно-подвижные опоры. Эти опоры позволяют трубопроводу перемещаться в осевом и поперечном направлении под воздействием внутренних и внешних сил. Они устанавливаются на свайные основания в зависимости от свойств грунта и климатических условий [84-85, 90]. На рисунке 1.6 представлены неподвижные и продольно-подвижные опоры.



Рисунок 1.6 – Опоры неподвижная и продольно-подвижная [101]

Для предотвращения износа шарнирного узла в опоре и обеспечения многолетней эксплуатации, в этом узле установлены антифрикционные втулки из высокопрочного полимерного материала.

Свайные основания данных опор диаметром 426 мм погружаются в грунт на глубину до 18 м. Применены различные способы погружения свай – бурозабивной, буроопускной, погружной и завинчивание [97].

В районах многолетней мерзлоты распространена прокладка трубопроводов надземным способом (Рисунок 1.7).



Рисунок 1.7 – Трубопроводы на опорах в северных районах [101]

Вышеперечисленные недостатки говорят лишь о практичности выбора прокладки надземным способом. Главным достоинством такой прокладки является снижение рисков аварий, что значительно скажется на экономической и экологической составляющей проекта.

В связи с тем, что интенсивно осваивается Сибирь и уже запроектирован магистральный газопровод «Сила Сибири», поэтому вопросы повышения эффективности эксплуатации трубопроводов стоят остро и требуют незамедлительных решений.

1.5 Инженерно-технические решения по защите линейной части магистральных трубопроводов, проложенных на мерзлых грунтах

Сохранение проектного положение трубопровода осуществляется разнообразными инженерно-техническими способами, зависящими от метода укладки, материалов трубы и свойств перекачиваемого продукта, а также информации о почве [19, 48, 50, 52, 53, 60, 77].

Необходимо также учитывать природные условия мерзлых грунтов при прокладке участков трубопровода, чтобы избежать нарушения естественного

положения. Принятие таких решений требует проведения тщательного анализа [89].

Строительство трубопровода надземным способом возможно только на специальных опорах. В некоторых случаях требуется строительство опор с сезонно охлаждающими устройствами (СОУ) (Рисунок 1.8) [82].



Рисунок 1.8 – Прокладка трубопровода на сваях в многолетнемерзлых грунтах «Заполярье-Пурпе» [101]

Существующие методы сохранения проектного положения трубопровода в районах со сплошным распространением мерзлоты, несмотря на многолетний опыт их применения, насчитывают много недостатков. К примеру, существующие опоры на сваях смещаются из-за нагрузки от грунта, вызванное морозным пучением, что влечет за собой прогиб трубопровода или его падение, таким образом применяемые методы остаются недоработанными. [80].

Одной из отличительной особенностью надземной прокладки является невозможность теплового воздействия трубопровода с мерзлым грунтом [52, 88, 91, 60 - 64].

При проектировании трубопровода на участках трассы, где возможно появление криогенных геологических процессов, необходимо провести

комплексное изыскание для прогнозирования негативных явлений в соответствии с требованиями СП 47.13330.2012. В зависимости от метода прокладки, выбираются проектные решения, учитывая геокриологические условия и риски меняющихся свойств грунтов по СП 24.13330.2011.

В процессе использования трубопровода запрещается полное промерзание грунтов при перевозке газа с низкой температурой, а при укладке труб на оседающих грунтах предпринимаются меры по уменьшению теплового воздействия на грунты. Оптимальная высота надземных трубопроводов зависит от геологических условий местности и воздействия трубопровода, но не должна быть менее 0,5 метра.

На рисунке 1.9 рассмотрены конструкции опор и подвесок трубопроводов различного применения.



Рисунок 1.9 – Классификация опор и подвесок [101]

Вопрос прокладки трубопроводов над землей с использованием различных типов опор и долгосрочный опыт эксплуатации в условиях сильного морозного пучения до сих пор остается открытым и требует разработки более эффективных технологических решений [46, 83, 112].

1.6 Выводы по главе 1

1. Строительство магистральных трубопроводов, проложенных на участках многолетнемерзлых грунтов, закладываемых на стадии проектирования, требует использования необходимых технологических решений, повышающих устойчивость проектного положения трубопроводов при воздействии сил морозного пучения грунтов и стабилизировать их температурный режим.

2. Полученный на данный момент большой опыт строительства трубопроводов, проложенных в арктических регионах, выявил проблему нехватки общих нормативов для выбора оптимальных с точки зрения эффективности устойчивого положения, способные снизить ситуации, связанные с нарушением прочности под влиянием геокриологических процессов почвы.

3. Проанализированный обзор текущего состояния нефтегазовой отрасли показал, что сохранение проектного положения магистральных трубопроводов в районах, где распространены многолетнемерзлые грунты, является ключевым аспектом при строительстве на потенциально опасных участках. В результате исследования разработан план, включающий численное моделирование и натурные эксперименты, направленные на снижение влияния от морозного пучения грунта на надземный магистральный трубопровод за счет разработки альтернативных конструкций опор.

**ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ НАПРЯЖЕННО-
ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЛИНЕЙНОГО УЧАСТКА
НАДЗЕМНОГО МАГИСТРАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДА ПРИ
ВОЗДЕЙСТВИИ СИЛ МОРОЗНОГО ПУЧЕНИЯ ГРУНТА**

2.1 Расчет участка надземного магистрального трубопровода

Расчеты будем проводить в табличной форме по формулам из СП 36.13330.2012 (таблица 2.1-2.4), исходная схема, приложенные силы и эпюры представлены на рисунках 2.1-2.4 [93].

Таблица 2.1 – Значения исходных параметров магистрального нефтепровода

Исходные параметры	Значения
Прочность	К56
Класс	1
Категория	3
D_n - условный диаметр трубопровода, мм	1220
p - рабочее (нормативное) давление транспортируемой среды, МПа	7
n - коэффициент надежности по нагрузке - внутреннему рабочему давлению в трубопроводе	1,15
R_1^H – нормативное временное сопротивление труб, МПа	550
R_2^H – нормативное сопротивление, равное минимальному значению пределу текучести, МПа	390
m – коэффициент условия работы трубопровода	0,9
k_1 - коэффициент надежности по материалу	1,4
k_n – коэффициент надежности по назначению трубопровода	1,155
k_2 – коэффициент надежности по материалу	1,15
$\rho_{ст}$ – плотность железобетонной опорной плиты, кг/м ³	4000
ρ_n - плотность транспортируемого продукта, кг/м ³	0,878
$t_{экспл}$ - температура рабочего продукта, °С	60

Таблица 2.2 – Результаты аналитических расчетов для магистрального нефтепровода

Параметры	Значения
δ - толщина стенки трубопровода, мм	16
$R1$ – расчётное сопротивление растяжению (сжатию) металла труб и сварных соединений, МПа	306
$R2$ – расчетное сопротивление растяжению (сжатию) по пределу текучести, МПа	217
D_n - внутренний диаметр, мм	1188
$S_{ст}$ - площадь поперечного сечения трубопровода, м ²	0,06
J - осевой момент инерции поперечного сечения трубопровода при изгибе, м ⁴	0,01
W_s - момент сопротивления сечения трубопровода обозначается, м ³	0,02
$q_{тр}$ - нагрузка от собственного веса металла трубы, Н/м	5313
$q_{изол}$ - нагрузка от собственного веса изоляции, Н/м	531,5
$q_{пр}$ - нагрузка от веса продукта находящегося в трубопроводе, Н/м	8500
$q_{сн}$ - полное нормативное значение снеговой нагрузки, Н/м	1020
c^c – коэффициент перехода от веса снегового покрова	0,4
pc – коэффициент надежности по нагрузке для снеговой нагрузки	1,4
B_r – ширина горизонтальной проекции надземного трубопровода, м	0,95
pc^H – нормативное значение веса снегового покрова Н/м	960
pc_n^H – нормативное значение веса снегового покрова, Н/м	2400
$p_{лед}$ - нагрузка от обледенения	325
K_l – коэффициент, учитывающий изменение толщины стенки гололеда	0,8
$q_{лед}$ - нагрузка от обледенения, Н/м	324
$q_{вет}$ - ветровая нагрузка, Н/м	200
q_c^H – нормативное значение статической составляющей, Н/м	92.72
qq^H – нормативное значение динамической составляющей, Н/м	
W_0 – нормативное значение средней составляющей ветрового давления на вертикальную плоскость	380
Re - коэффициент лобового сопротивления трубопровода, 10 ⁵	21
qq^B - нормативное значение ветрового давления, Н/м	125
$\nu(ln)$ – коэффициент пространственной корреляции	0,62

Продолжение таблицы 2.2

Параметры	Значения
q_n - расчет нормативного значения интенсивности поперечной весовой нагрузки, Н/м	15700
q_p - расчетное значение интенсивности поперечной весовой нагрузки, Н/м	16705
L_{max} - длина перекрываемого пролета, м	44
$\sigma_{пр.р}$ – расчетное продольное напряжения от действия внутреннего давления, МПа	90
параметры \bar{M}_1	1,55
параметры \bar{M}_0	0,725
параметры \bar{f}_1	1,67
параметры \bar{f}_0	0,18
M_1^H - изгибающий момент для середины пролета от нормативной интенсивности поперечной весовой нагрузки q_n , МН · м	1958835
M_1^P - изгибающий момент для середины пролета от т расчетной интенсивности поперечной весовой нагрузки q_p , МН · м	2000000
M_0^H - изгибающий момент в опорных сечениях от нормативной интенсивности поперечной весовой нагрузки q_n , МН · м	1832458,3
M_0^P - изгибающий момент для середины пролета от расчетной интенсивности поперечной весовой нагрузки q_p , МН · м	1953694
f_1^H - прогиб посредине пролета от нормативной интенсивности поперечной весовой нагрузки q_n , м	0,12
f_1^P - прогиб посредине пролета от расчетной интенсивности поперечной весовой нагрузки q_p , м	0.13
f_0^H - прогиб посредине пролета от нормативной интенсивности поперечной весовой нагрузки q_n , м	0,027
f_0^P - прогиб посредине пролета от расчетной интенсивности поперечной весовой нагрузки q_p , м	0.028
P_n - продольное усилие от внутреннего давления, МН	3,12
P_p - продольное усилие от внутреннего давления, МН	3,59
P_t - продольное усилие от изменения температуры стенок труб, МН	5,5

Продолжение таблицы 2.2

Параметры	Значения
$f_{p.t.q}$ - прогиб посередине пролета от поперечной нагрузки, внутреннего давления и температурных деформаций участка	0,027
ξ – коэффициент, зависящий от значения продольной силы	0,3
M_1^H - максимальное значение изгибающего момента, МН · м	0,57
M_1^P - максимальное значение изгибающего момента, МН · м	0,59
$\sigma_{кц}$ - кольцевые нагрузки от внутреннего давления, МПа	299
$\sigma_{кц}^H$ - кольцевые нагрузки от нормативного давления, МПа	260
$\sigma_{пр.N}$ - продольное осевое нагрузки от расчетных нагрузок, МПа	90
$\sigma_{пр.M}$ - рассчитываем абсолютную величину максимальных изгибных напряжений от расчетных нагрузок, МПа	29,5
$\sigma_{пр}^H$ – максимальные (фибровые) суммарные продольные напряжения в трубопроводе от нормативных нагрузок и воздействий в растянутых зонах, МПа	107
$\sigma_{пр}^H$ – максимальные (фибровые) суммарные продольные напряжения в трубопроводе от нормативных нагрузок и воздействий в сжатых зонах перехода, МПа	50
Проверка на прочность балочного перехода от расчетных нагрузок и воздействий	$107 \leq 140$
Проверка на прочность балочного перехода от нормативных нагрузок и воздействий	$50 \leq 122$
ψ_3 – коэффициент, учитывающий двухосное напряженное состояние металла труб	0,36
F_V – нагрузка на опору трубопровода, кН	690
$m_{осн}$ - расчет массы основания опоры, кг	4400
$m_{оп}$ – масса опоры, кг	4600
q - распределенная нагрузка, Н/м	
Уравнения перерезывающей силы и плоского изгиба	$M_1 = 0$ $M_2 = 0$ $M_3 = 0$
W_z - момент сопротивления поперечного сечения, см ³	103
Допускаемая величина перегруза (недогруза), %	$4,5 \leq 5$

Таблица 2.3 – Значения исходных параметров магистрального газопровода

Исходные параметры	Значения
Прочность	К60
Класс	1
Категория	3
D_n - условный диаметр трубопровода, мм	1420
p - рабочее (нормативное) давление транспортируемой среды, МПа	7,5
n - коэффициент надежности по нагрузке - внутреннему рабочему давлению в трубопроводе	1,1
R_1^H – нормативное временное сопротивление труб, МПа	590
R_2^H – нормативное сопротивление, равное минимальному значению пределу текучести, МПа	460
m – коэффициент условия работы трубопровода	0,9
k_1 - коэффициент надежности по материалу	1,4
k_n – коэффициент надежности по назначению трубопровода	1,21
k_2 – коэффициент надежности по материалу	1,15
$\rho_{ст}$ – плотность железобетонной опорной плиты, кг/м ³	4000
ρ_n - плотность транспортируемого продукта, кг/м ³	0,749
$t_{экспл}$ - температура рабочего продукта, °С	30

Таблица 2.4 – Результаты аналитических расчетов для магистрального газопровода

Параметры	Значения
δ - толщина стенки трубопровода, мм	19
R_1 – расчётное сопротивления растяжению (сжатию) металла труб и сварных соединений, МПа	314
R_2 – расчетное сопротивление растяжению (сжатию) по пределу текучести, МПа	245
D_n - внутренний диаметр, мм	1382
$S_{ст}$ - площадь поперечного сечения трубопровода, м ²	0,08

Продолжение таблицы 2.4

Параметры	Значения
J - осевой момент инерции поперечного сечения трубопровода при изгибе, м^4	0,02
W_s - момент сопротивления сечения трубопровода обозначается, м^3	0,03
$q_{\text{тр}}$ - нагрузка от собственного веса металла трубы, Н/м	6777
$q_{\text{изол}}$ - нагрузка от собственного веса изоляции, Н/м	678
$q_{\text{пр}}$ - нагрузка от веса продукта находящегося в трубопроводе, Н/м	11
$q_{\text{сн}}$ - полное нормативное значение снеговой нагрузки, Н/м	1557
c^c – коэффициент перехода от веса снегового покрова	0,4
n_c – коэффициент надежности по нагрузке для снеговой нагрузки	1,4
B_r – ширина горизонтальной проекции надземного трубопровода, м	1,09
$\rho_{\text{сн}}^{\text{н}}$ – нормативное значение веса снегового покрова, м^2	960
$\rho_{\text{п}}^{\text{н}}$ – нормативное значение веса снегового покрова, м^2	2400
$K_{\text{л}}$ – коэффициент, учитывающий изменение толщины стенки гололеда	0,8
$q_{\text{лед}}$ - нагрузка от обледенения, Н/м	377
$q_{\text{вет}}$ - ветровая нагрузка, Н/м	343
$q_{\text{с}}^{\text{н}}$ – нормативное значение статической составляющей, Н/м	131
$q_{\text{д}}^{\text{н}}$ – нормативное значение динамической составляющей, Н/м	161
W_0 – нормативное значение средней составляющей ветрового давления на вертикальную плоскость	1
Re - коэффициент лобового сопротивления трубопровода, 10^5	32
$q_{\text{д}}^{\text{в}}$ - нормативное значение динамической составляющей ветрового давления	132
$\nu(\ln)$ – коэффициент пространственной корреляции	0,72
$q_{\text{н}}$ - расчет нормативного значения интенсивности поперечной весовой нагрузки	9400
$q_{\text{р}}$ - расчетное значение интенсивности поперечной весовой нагрузки	11000
L_{max} - длина перекрываемого пролета, м	63
$\sigma_{\text{пр.р}}$ – расчетное продольное напряжения от действия внутреннего давления	90
параметры \bar{M}_1	1,87
параметры \bar{M}_0	0,923
параметры \bar{f}_1	1,77
параметры \bar{f}_0	0,64

Продолжение таблицы 2.4

Параметры	Значения
M^H_1 - изгибающий момент для середины пролета от нормативной интенсивности поперечной весовой нагрузки q_n , МН · м	2409155
M^P_1 - изгибающий момент для середины пролета от т расчетной интенсивности поперечной весовой нагрузки q_p , МН · м	2000000
M^H_0 - изгибающий момент в опорных сечениях от нормативной интенсивности поперечной весовой нагрузки q_n , МН · м	2253726
M^P_0 - изгибающий момент для середины пролета от расчетной интенсивности поперечной весовой нагрузки q_p , МН · м	2592650
f^H_1 - прогиб посредине пролета от нормативной интенсивности поперечной весовой нагрузки q_n , м	0,16
f^P_1 - прогиб посредине пролета от расчетной интенсивности поперечной весовой нагрузки q_p , м	0.17
f^H_0 - прогиб посредине пролета от нормативной интенсивности поперечной весовой нагрузки q_n , м	0,034
f^P_0 - прогиб посредине пролета от расчетной интенсивности поперечной весовой нагрузки q_p , м	0.0387
P_n - продольное усилие от внутреннего давления, МН	4,38
P_p - продольное усилие от внутреннего давления, МН	4,82
P_t - продольное усилие от изменения температуры стенок труб, МН	7,5
$f_{p,t,q}$ - прогиб посредине пролета от поперечной нагрузки, внутреннего давления и температурных деформаций участка	0,034
ξ – коэффициент, зависящий от значения продольной силы	0,4
M^H_1 - максимальные значение изгибающего момента, МН · м	0,35
M^P_1 - максимальные значение изгибающего момента, МН · м	0,39
$\sigma_{кц}$ - кольцевые напряжения от расчетного внутреннего давления, МПа	300
$\sigma_{кц}^H$ - кольцевые напряжения от внутреннего давления, МПа	373
$\sigma_{пр,N}$ - продольное напряжение от нагрузок, МПа	90
$\sigma_{пр,M}$ - рассчитываем абсолютную величину максимальных изгибных напряжений от расчетных нагрузок, МПа	13

Продолжение таблицы 2.4

Параметры	Значения
$\sigma_{\text{пр}}^{\text{H}}$ – максимальные (фибровые) суммарные продольные напряжения в трубопроводе от нормативных нагрузок и воздействий в растянутых зонах, МПа	94
$\sigma_{\text{пр}}^{\text{H}}$ – максимальные (фибровые) суммарные продольные напряжения в трубопроводе от нормативных нагрузок и воздействий в сжатых зонах перехода, МПа	70
Проверка на прочность балочного перехода от расчетных нагрузок и воздействий	$94 \leq 117$
Проверка на прочность балочного перехода от нормативных нагрузок и воздействий	$70 \leq 160$
ψ_3 – коэффициент, учитывающий двухосное напряженное состояние металла труб	0,42
F_v – нагрузка, которая возлагается на опору трубопровода, кН	590
$m_{\text{осн}}$ - расчет массы основания опоры, кг	4400
$m_{\text{оп}}$ – масса опоры, кг	4600
q - распределенная нагрузка, Н/м	
Уравнения перерезывающей силы и плоского изгиба	первого сечения $M_1 = 0$ второго сечения $M_2 = 0$ третьего сечения $M_3 = 0$
W_z - момент сопротивления поперечного сечения, см ³	103
Допускаемая величина перегруза (недогруза), %	$3,5 \leq 5$

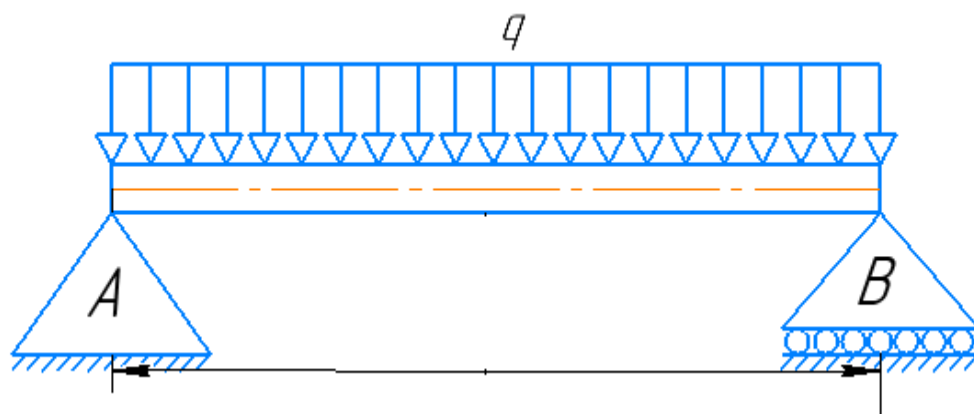


Рисунок 2.1 – Исходная схема

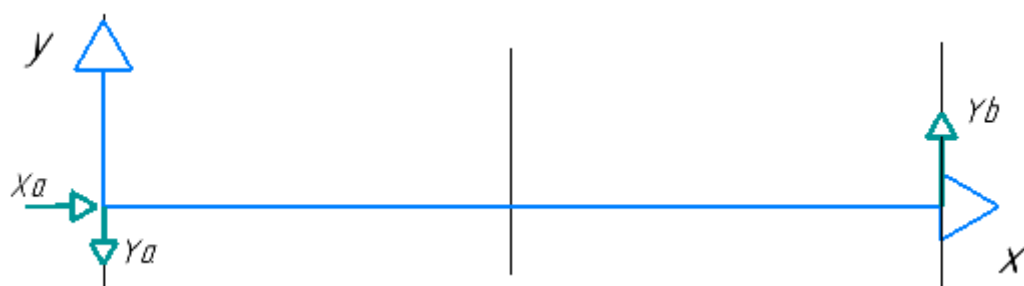


Рисунок 2.2 – Приложенные силы

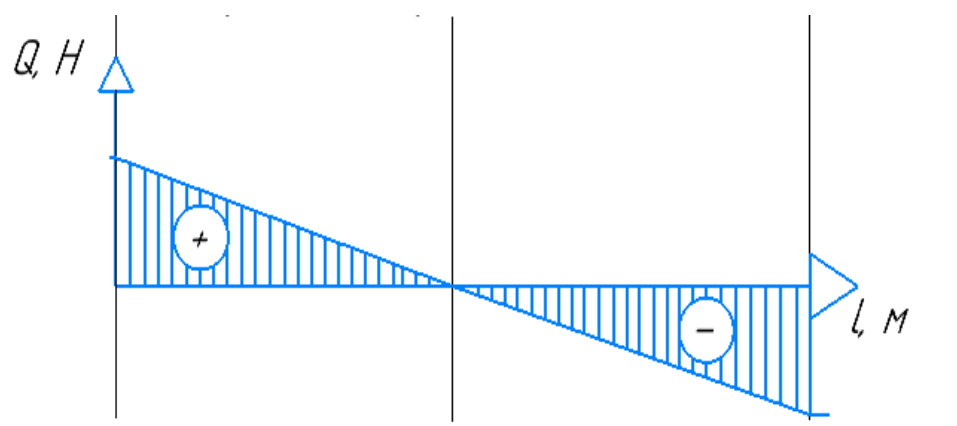


Рисунок 2.3 – Эпюра поперечных сил Q

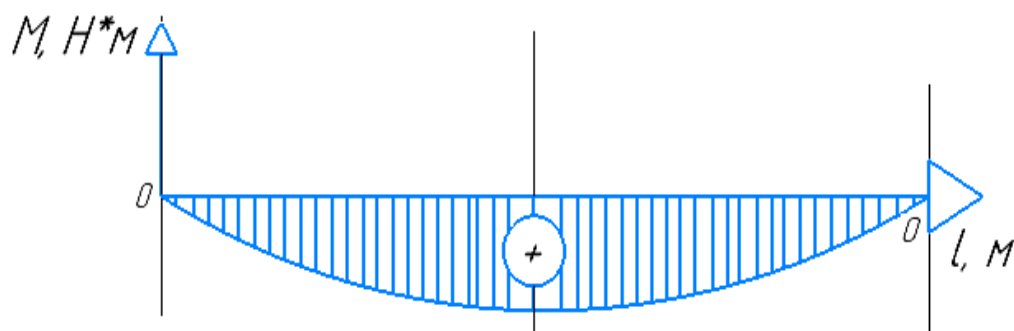


Рисунок 2.4 – Эпюра изгибающего момента M

2.2 Анализ существующих методик расчета фундаментов на морозное пучение грунта при подборе конструкции опор надземного магистрального трубопровода

При необходимости обеспечения устойчивости и надежности трубопроводов, особенно надземных, при строительстве опор необходимо учитывать характеристики грунта для выбора подходящего типа опор [13]. Технические и экономические расчеты также играют решающую роль при выборе опор. При проектировании опор для высоких трубопроводов важно учитывать силы морозного пучения, поскольку они могут оказать негативное воздействие на работу сооружения и привести к серьезным проблемам в процессе эксплуатации [108-110]. Надежность проекта надземного трубопровода напрямую зависит от качества выбора опорных структур [19-21]. Расчет нагрузки на опоры, вызванной воздействием сил морозного пучения, является неотъемлемой частью обеспечения устойчивости и надежности трубопроводов [22-25].

При выполнении расчета на воздействие сил морозного пучения возникает множество факторов и спорных моментов. Силы пучения, действующие на опорную плиту, зависят от положения фундамента относительно глубины промерзания грунта.

На рисунке 2.5 демонстрируется деформация опоры надземного трубопровода из-за морозного давления.



Рисунок 2.5 – морозное выпучивание опор надземного трубопровода [105]

Для определения опор требуется провести расчет параметров опорной плиты и свай, учитывая известные значения сил вспучивания грунта. При анализе воздействия сил морозного пучения на опорную плиту необходимо учитывать положение фундамента относительно глубины промерзания грунта [105]. Если опорная плита без свай заглублена неглубоко, на нее будут воздействовать только лобовые силы пучения, как показано на рисунке 2.6.

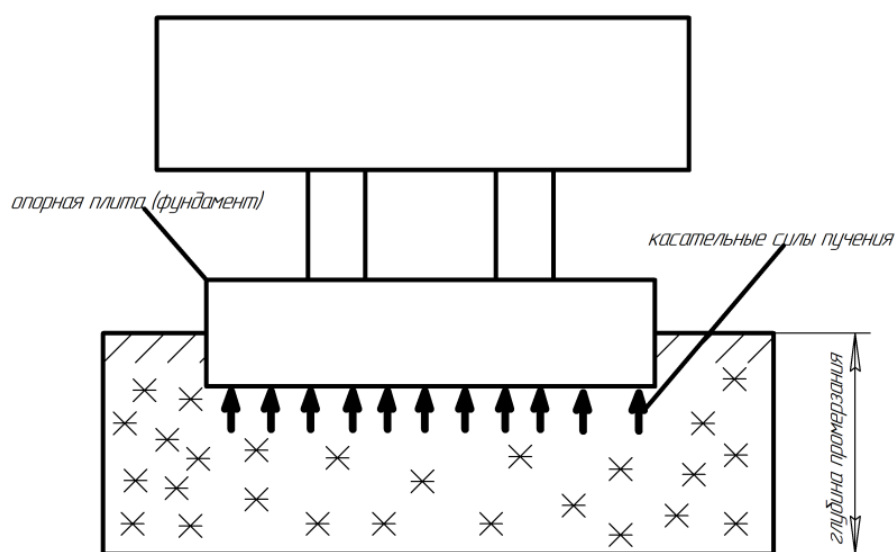


Рисунок 2.6 – Воздействия лобовых сил морозного пучения на опорную плиту [106]

Для того, чтобы рассмотреть воздействия сил морозного пучения на сваи опор магистрального трубопровода, необходимо рассмотреть отдельно касательные силы морозного пучения, поскольку как раз эти силы выталкивают сваи за счет вертикальной выдергивающей силы.

Если опорная плита заложена в глубину промерзания, а сваи ниже глубины промерзания, тогда возникают лобовые и касательные силы морозного пучения, как показано на рисунке 2.7.

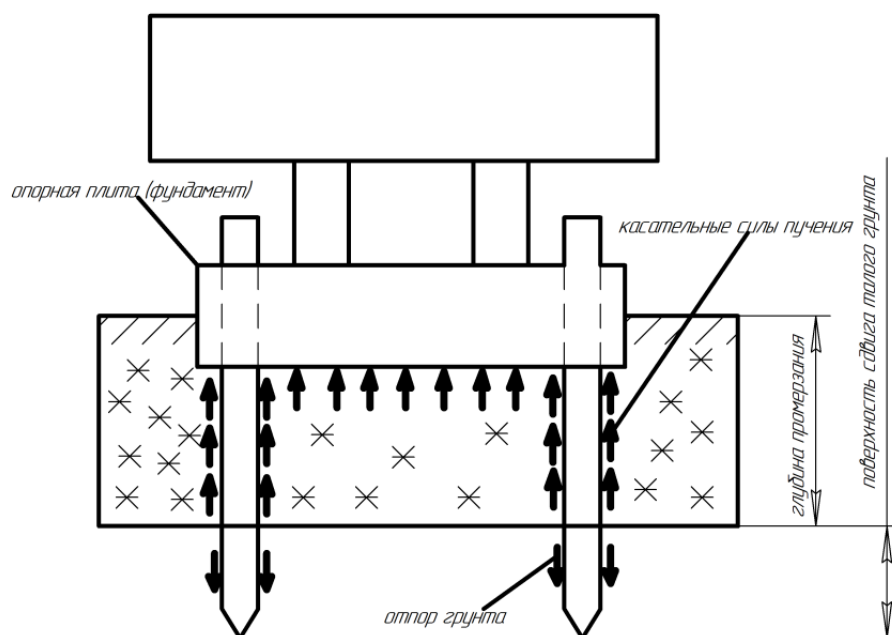


Рисунок 2.7 – Воздействия лобовых и касательных сил морозного пучения на опорную плиту [106]

Рассмотрим источники, в которых приводятся расчеты на морозное пучение грунта [60, 82, 89, 90]:

- 1) «Руководство по проектированию оснований и фундаментов на пучинистых грунтах» 1979 г.;
- 2) СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений»;
- 3) СП 25.13330.2012 «Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах».
- 4) «Методическое пособие по проектированию оснований фундаментов на пучинистых грунтах» АО "НИЦ Строительство» НИИОСП им. Н.М. Герсеванова. Москва 2019 г.;

Воздействия сил морозного пучения определяются из условия (1) [82]:

$$n_1 \times N_h > n \times F_\phi \times h_1 \times \sigma_{h1}, \quad (1)$$

где: n_1 – коэффициент перегрузки, равный 0,9;

n – коэффициент перегрузки, равный 1,1;

N_h – нормативная нагрузка на основание в уровне подошвы фундамента;

F_ϕ – площадь подошвы фундамента, см²;

h_1 – глубина промерзания грунта, считая от подошвы фундамента, см.;

σ_n – нормативное значение морозного пучения грунта, кгс/см³.

При использовании формулы 1 можно сделать вывод: при увеличении толщины слоя промерзающего грунта и уменьшении площади поверхности опорной плиты лобовое пучение значительно увеличивается. Однако данная зависимость не всегда имеет место, поскольку увеличение геометрических размеров фундамента не всегда приводит к увеличению лобового пучения. Существующие методики расчета не содержат достаточного количества экспериментальных данных для подтверждения данной зависимости.

Для анализа воздействия морозного пучения необходимо в первую очередь определить расчетную глубину промерзания грунта. Для этого используются климатические данные холодного периода года, установленные в нормативных документах Российской Федерации.

Расчет на касательные силы пучения, приведенный в разделе 6.8 СП 22.13330.2016, определяются из условия (2) [90]:

$$\tau_{fh} \times A_{fh} - F \leq (y_c / y_n) , \quad (2)$$

где: y_c — коэффициент условия работы, принимаемый 0,6;

y_n — коэффициент надежности, принимаемый 1,4;

τ_{fh} — удельная касательная сила пучения;

A_{fh} — площадь сдвига по мерзлым грунтам;

F — расчетная постоянная нагрузка, действующая на фундамент;

F_{fh} — расчетное значение силы, удерживающей фундамент от выпучивания, в следствии трения его боковой поверхностью о талый грунт, лежащий ниже расчетной глубины промерзания.

Расчет для фундаментов, имеющих вертикальные грани, определяют по формуле (3) [89]:

$$F_{rf} = \sum_{i=0}^n R_{fi} \times A_{fi} , \quad (3)$$

где: $A_{\text{ф}}$ — площадь сдвига талых грунтов (площадь поверхности контакта талый грунт-фундамент ниже расчетной глубины промерзания);

$R_{\text{ф}}$ – расчетное сопротивление талых грунтов сдвигу по боковой поверхности фундамента.

Формула расчета на пучение, приведенная в разделе 7.4 в методике СП 25.13330.2012 «Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах» определяется такая же, как и в СП 22.13330.2016, с единственным отличием, удельная касательная сила пучения существенно больше.

Расчет значения подъема основания от пучения, приведенный в разделе 7.12 в методике «Методическое пособие по проектированию оснований фундаментов на пучинистых грунтах АО НИЦ Строительство» НИИОСП им. Н.М. Герсеева. Москва 2019 г., определяется по формуле (4) [60]:

$$h = e \times d, \quad (4)$$

где: e - относительная деформация пучения грунта;

d - глубина промерзания грунта в основании фундаментов.

Формула расчета на пучение, выполняется по пунктам 4.18-4.21 в методике «Руководство по проектированию оснований и фундаментов на пучинистых грунтах 1979г»

Расчет по методике «Руководства по проектированию оснований и фундаментов на пучинистых грунтах 1979 г.» отличается тем, что $\tau_{\text{ф}}$ — удельная касательная сила пучения принимается как фиксированное значение этого параметра.

Для определения рационального расчета из существующих методик и выбора более подходящего метода определения условий при воздействии сил морозного пучения грунта на конструкции опор трубопровода необходимо сравнить результаты расчетов на пучение (Таблица 2.5).

Таблица 2.5 – Результаты сравнения методик расчета на воздействие морозного пучения для малозаглубленных фундаментов

Методика	Удерживающая сила, Тс	Выпучивающая сила, Тс
СП 22.13330.2016	6,1	14,2
СП 25.13330.2012	11,3	15,5
Руководство по проектированию оснований и фундаментов на вспученных грунтах	9,2	11,3

Существующие методики расчета фундаментов на морозное пучение грунта чаще всего рассматривают применение в архитектурном строительстве. Выявлено, что для строительства опор в условиях морозного пучения грунта отсутствует нормативная база, позволяющая глубоко рассмотреть влияния давлений пучения на сваи опор и на проектное положение трубопровода.

В этой связи возникла необходимость изучение вопроса сооружения опор, а также предложение рекомендаций по строительству опорных конструкций для магистральных трубопроводов, учитывая нагрузки от воздействий сил морозного пучения грунта.

2.3 Сравнительная оценка напряжений на линейном участке надземного трубопровода при нагрузках от морозного пучения с использованием метода конечных элементов

В рамках программного пакета Autodesk Inventor была спроектирована модель существующей конструкции опоры, используемой при строительстве надземных трубопроводов на длительно мерзлых грунтах, а также модель новой опорной конструкции для надземного магистрального трубопровода, предлагаемой для эксплуатации в условиях морозного пучения грунта (Рисунок 2.8 - 2.9) [7-9, 18-19].

На рисунке 2.8 изображена модель существующей конструкции опоры.

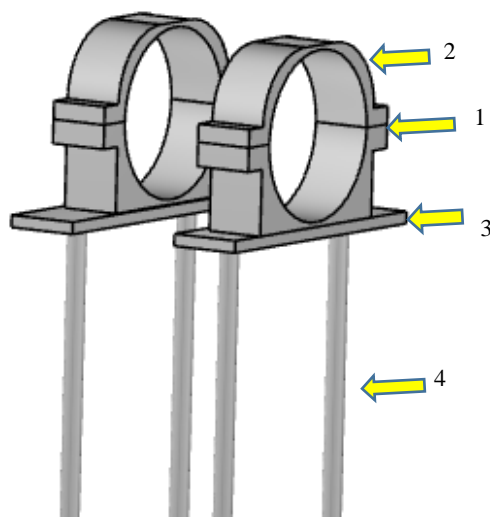


Рисунок 2.8 – Модель традиционной опоры надземного магистрального трубопровода: 1 – ложемент; 2 – полухомут; 3 – стол-ростверк; 4 – свая [143]

В рамках научного исследования разработано устройство, сохраняющее проектное положение надземного магистрального трубопровода в период эксплуатации [106], при условии морозного пучения грунта.

На рисунке 2.9 изображена модель разработанной конструкции опоры.

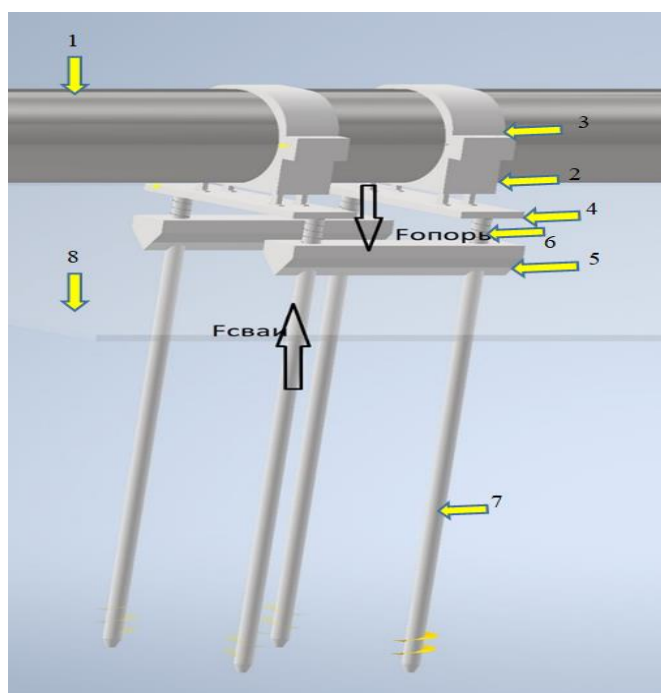


Рисунок 2.9 – Модель разработанной конструкции опоры надземного магистрального трубопровода: 1 – трубопровод; 2 – ложемент; 3 – полухомут; 4 – стол-ростверк металлический; 5 – плита железобетонная; 6 – демпфер пружинный; 7 – свая; 8 – мерзлый грунт [143]

Опора надземного магистрального трубопровода работает следующим образом. Наиболее важным элементом конструкции опоры, который позволяет защитить надземный трубопровод от воздействий сил морозного пучения, является опорная железобетонная плита с острой кромкой. В процессе пучения грунта опорная плита за счет клина разрезает вспученный мерзлый грунт, вызванный силами морозного пучения.

Предложенная конструкция опоры способствует увеличению надежности эксплуатации, исключению процесса остаточного деформирования опор под трубопроводами и уменьшению частоты инспекций надземных переходов магистральных трубопроводов в процессе использования. Техническим результатом является уменьшение напряжений на трубопроводе.

Определены максимальные напряжения на газопроводе диаметром 1420 мм и нефтепроводе диаметром 1220 мм, смещенного от проектного положения при воздействии сил морозного пучения грунта (Рисунок 2.10 - 2.12), в зависимости от температуры, характеристик грунта и используемых опор.

Трубопроводы, проложенные в арктических регионах, подвергаются негативным воздействиям из-за процесса морозного пучения грунта, основная часть этих трубопроводов, проложена в зонах сплошного распространения ММГ. Как известно породы в этих зонах в основном представлены такими горными породами как песок, торф и суглинок, также известно, что при низких температурах такие породы сильно вспучиваются, тем самым образуя бугры пучения и оказывают негативное влияние на сооружения магистральных трубопроводов. В этой связи, для расчета были выбраны именно эти типы грунты.

Моделирование напряжений газопровода с традиционной опорой.

Основные условия моделирования: $D = 1420\text{мм}$, $\delta = 19\text{мм}$, $l = 60\text{м}$, $F_{\text{тр.}} = 590\text{кН}$.

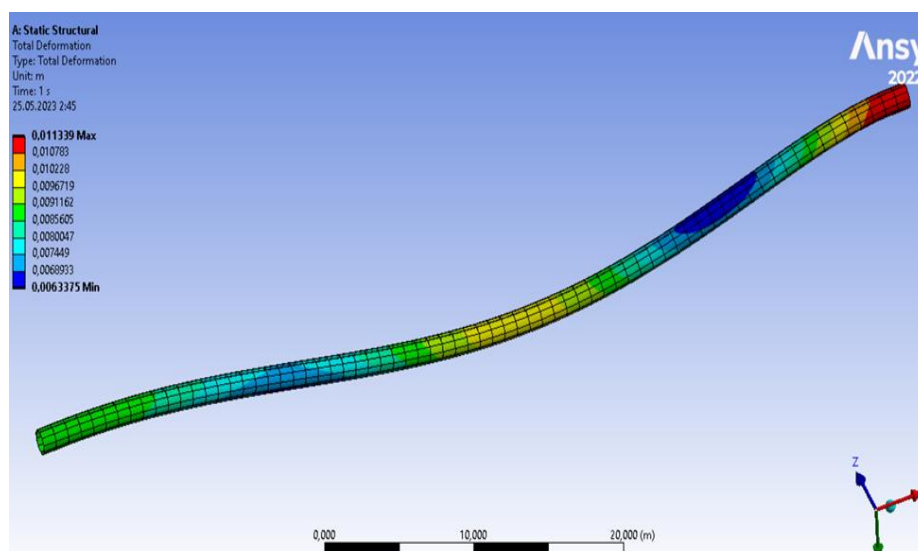


Рисунок 2.10 – Результат прогиба трубопровода с традиционными опорами, при температуре грунта $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ [143]

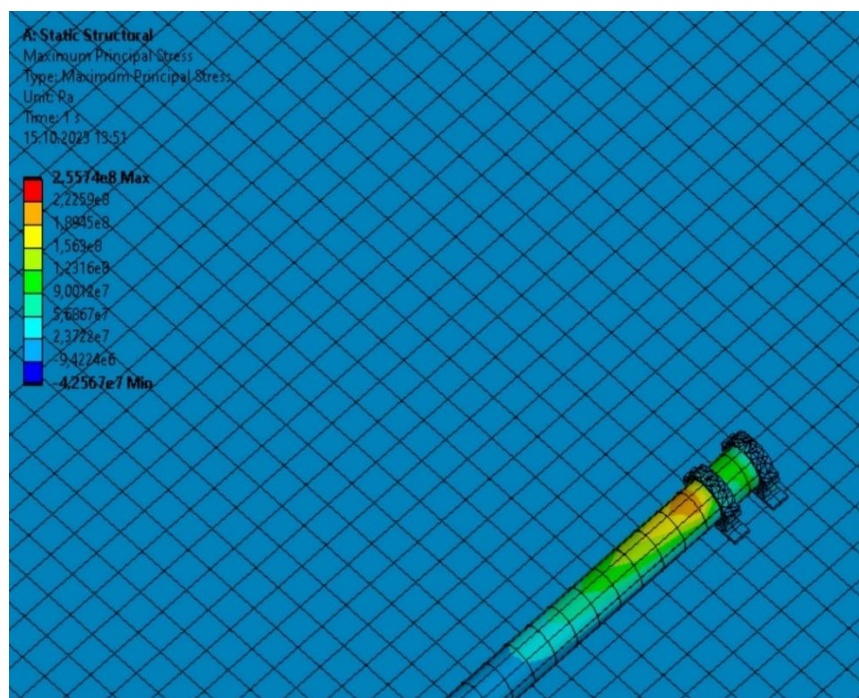


Рисунок 2.11 – Распределение напряжений с традиционной опорой трубопровода, при морозном пучении грунта $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ [143]

В Таблицах 2.6 - 2.9 показаны результаты расчета напряжений на газопроводе и нефтепроводе.

Таблица 2.6 – Результаты расчета напряжений на газопроводе с традиционными опорами.

Температура, °С	Торф, кПа	Песок, кПа	Суглинок, кПа
-4	110	118	135
-5	122	133	144
-7	131	140	155
-8	143	151	167
-10	150	160	174

Моделирование напряжений газопровода с разработанной опорой.

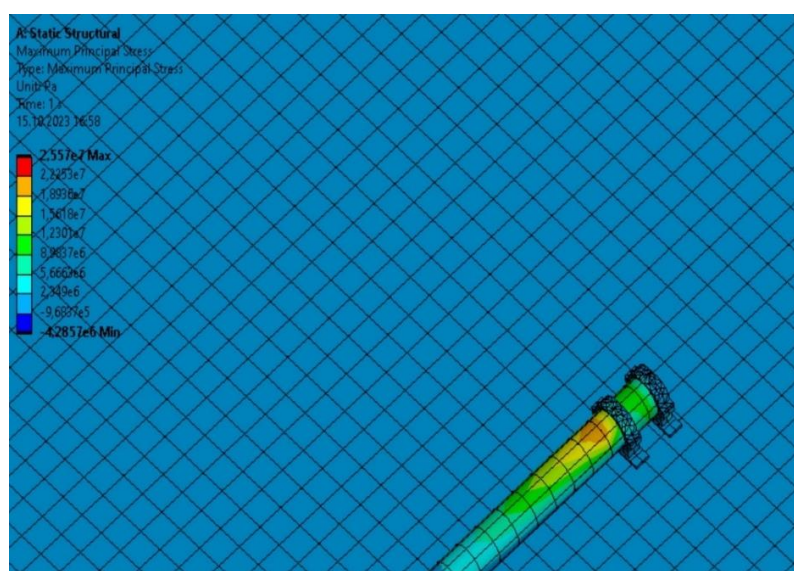


Рисунок 2.12 – Распределение напряжений в конструкции опоры трубопровода, при морозном пучении грунта -10 °С [143]

Таблица 2.7 – Результаты расчета напряжений газопровода с разработанными опорами

Температура, °С	Торф, кПа	Песок, кПа	Суглинок, кПа
-4	11,3	11,8	13,5
-5	12,1	13,3	14,4
-7	13,23	14	15,5
-8	14,3	15,1	16,7
-10	15	16	17,4

Также получены результаты расчета напряжений на нефтепроводе.

Основные условия моделирования: $D = 1220\text{мм}$, $\delta = 16\text{мм}$, $l = 44\text{м}$, $F_{\text{тр.}} = 690$ кН.

Таблица 2.8 – Результаты расчета изгибных напряжений на нефтепроводе с традиционной опорой

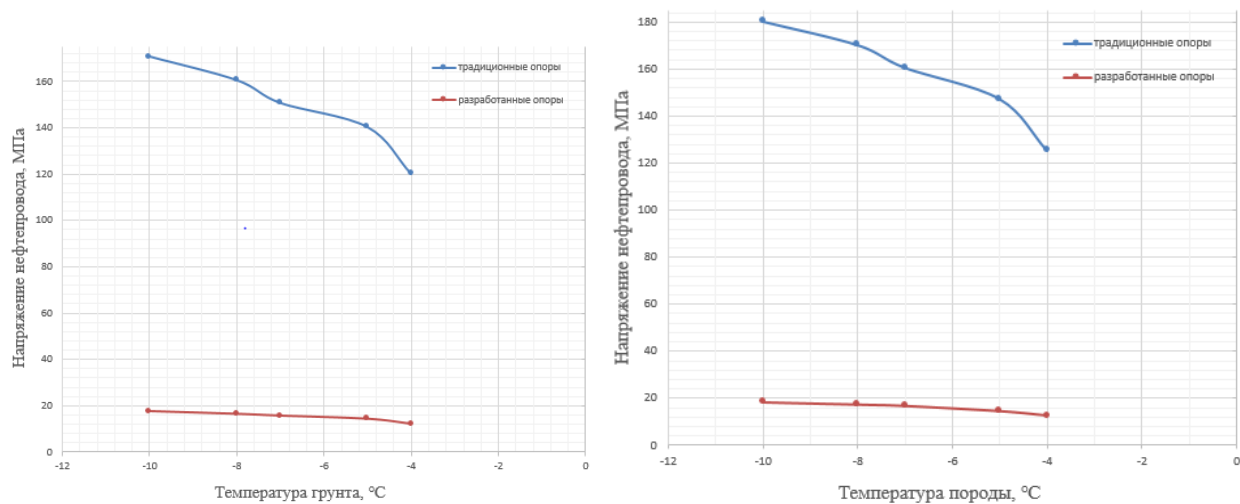
Температура, °С	Торф, кПа	Песок, кПа	Суглинок, кПа
-4	120,1	125,5	130,3
-5	140,3	147,4	150,7
-7	150,7	160,7	170,4
-8	160,5	170,3	180,3
-10	170,7	180,3	190,2

Таблица 2.9 – Результаты расчета изгибных напряжений на нефтепроводе с разработанной опорой

Температура, °С	Торф, кПа	Песок, кПа	Суглинок, кПа
-4	12,1	12,5	13,3
-5	14,3	14,4	15,7
-7	15,7	16,7	17,4
-8	16,5	17,3	18,3
-10	17,7	18,3	19,2

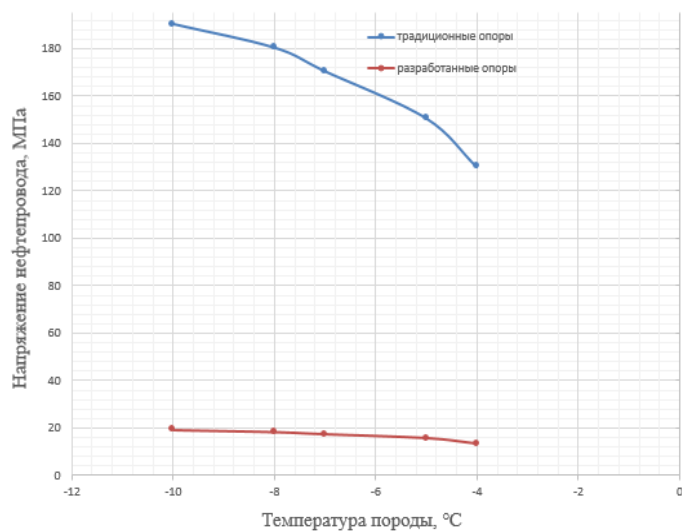
В ходе численных расчетов обнаружено, что напряжения на трубопроводе с традиционной опорой значительно повышаются, это обусловлено тем, что трубопровод жестко закрепленный на опорах начинает прогибаться за счет того, что вспученный грунт поднимается только под одной опоры, поскольку морозное пучение процесс неравномерный. Также обнаружено, что что напряжения на трубопроводе с разработанной опорой значительно ниже относительно напряжений с традиционной опорой, это обусловлено тем, что вспученный грунт разрезается

клином опоры и сохраняется устойчивость опоры. Построим зависимости напряжений на нефтепроводе и газопроводе от температур мерзлых вспученных грунтов, относительно того какие опоры применяются при различных характеристиках грунта (Рисунок 13).



а)

б)



в)

Рисунок 2.13 – Графики зависимостей напряжений на нефтепроводе от температур грунта: а) опоры на торфе; б) опоры на песке; в) опоры на суглинке

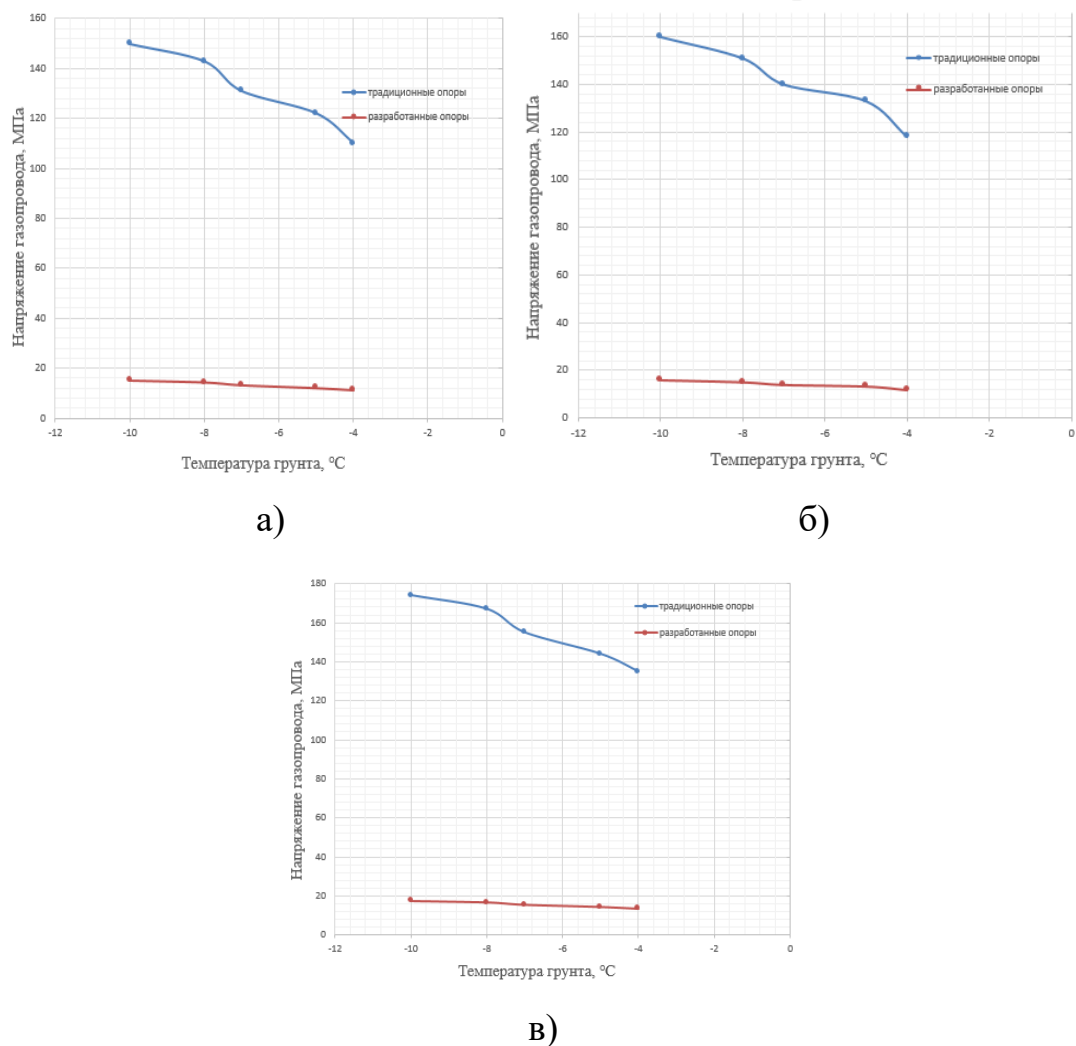


Рисунок 2.14 – Графики зависимостей напряжений на газопроводе от температур грунта: а) опоры на торфе; б) опоры на песке; в) опоры на суглинке

По результатам численного моделирования выявлено: за счет применения разработанных опорных конструкций разница изгибающих напряжений на трубопроводе в 10 раз меньше, чем с традиционными опорами.

Результаты разработанной конечно-элементной модели трубопровода показали положительный эффект от применения разработанной конструкции опоры, за счет клина опоры новой конструкции.

2.4 Алгоритм расчета опор надземных магистральных трубопроводов, проложенных на многолетнемерзлых грунтах в условиях морозного пучения

Алгоритм заключается в последовательности расчета опор при воздействии сил морозного пучения грунта (Приложение Ж).

1. Определим нагрузку на опору со стороны трубопровода по формуле (5) [93]:

$$F_{\text{тр.}} = q_{\text{тр}} + q_{\text{пр}} + q_{\text{сн}} + q_{\text{лед}} + q_{\text{изол}} = 440 \text{ кН} \quad (5)$$

2. Определим силу морозного пучения по СП 22.13330.2016 [90]:

$$\tau_{\text{фн}} = 170 \text{ кПа}$$

3. Применяя клин с углом скоса 30 градусов вычислим по формуле (6) силу резания грунтов [44]:

$$F_p = 10 \times C \times h^{1,35} \times (1 + 2,6 \times \ell) \times (1 + 0,0075 \times \alpha) \times (1 + 0,03 \times b) \times v \times \mu, \quad (6)$$

где C – коэффициент крепости; h – глубина резания, см; ℓ – длина периметра, м; α – угол резания, град; b – толщина боковых стенок, см; v – величина, учитывающая угол заострения боковых стенок; μ – коэффициент, учитывающий влияние способа резания; $\mu = 1$ – заблокированное резание; $\mu = 0,64 - 0,91$ – полублокированное резание; $\mu = 0,34 - 0,8$ – свободное резание. Коэффициент крепости C при -10°C : $C_{\text{торф}} = 0,5$; $C_{\text{сугл.}} = 1$; $C_{\text{пес.}} = 0,8$.

Торф

$$F_p = 10 \times 0,5 \times 501,35 \times (1 + 2,6 \times 2) \times (1 + 0,0075 \times 30) \times (1 + 0,03 \times 60) \times 0,8 \times 0,9 = 15 \text{ кН}$$

Песок

$$F_p = 10 \times 0,8 \times 501,35 \times (1 + 2,6 \times 2) \times (1 + 0,0075 \times 30) \times (1 + 0,03 \times 60) \times 0,8 \times 0,9 = 24 \text{ кН}$$

Суглинок

$$F_p = 10 \times 501,35 \times (1 + 2,6 \times 2) \times (1 + 0,0075 \times 30) \times (1 + 0,03 \times 60) \times 0,8 \times 0,9 = 30 \text{ кН}$$

Рассчитанные усилия резания грунта позволяют подобрать минимальную нагрузку трубопровода.

4. Удерживающую способность сваи вычислим по формуле (7) [91]:

$$F = G + F_{\text{тр.св.}} - Q, \quad (7)$$

где: G – вес сваи;

$F_{\text{тр.св.}}$ – сила трения грунта о сваю;

Q – подъемная сила грунтовых вод.

Диаметр сваи $D_n = 219$ мм; толщина стенки $\delta = 4$ мм; длина сваи $h = 4000$ мм; удельный вес металла сваи $\gamma_m = 78,5$ кН/м. Рассмотрим характеристики грунта:

- удельный вес $\gamma_{\text{гр}} = 17,0$ кН/м³;
- сцепление $c = 13$ кПа;
- угол внутреннего трения $\varphi = 20$ град.

Вес сваи вычисляем по формуле (8):

$$G = 0,25 \times \pi \times (0,219^2 - 0,211^2) \times 4 \times 78500 = 850 \text{ Н} \quad (8)$$

Силы трения о сваю вычисляем по формулам (9) – (10):

$$\tau_{\text{акт}} = [17000 \times (4-0,2) \times \text{tg}2 \times (45^\circ + 20/2) + 2 \times 13000 \times \text{tg} \times (45^\circ + 20^\circ/2)] \times \text{tg}20^\circ = 65000 \text{ Па} \quad (9)$$

$$F_{\text{тр.св.}} = \pi \times 0,219 \times (4 - 1) \times 65000 = 135 \quad (10)$$

Выталкивающая сила воды вычисляется по формуле (11):

$$Q = 1000 \times \pi \times 9,81 \times 4 \times (0,219^2 - 0,211^2) / 4 = 106 \text{ Н} \quad (11)$$

Удерживающая способность сваи воды вычисляется по формуле (12):

$$F = 850 + 135 \times 103 - 106 = 135,7 \text{ кН}$$

5. Расчет значения основания от пучения, вычислим по формуле (12) [33]:

$$h = e \times d = 0,1 \times 2,5 = 0,25 \text{ м}, \quad (12)$$

где: e - относительная деформация пучения грунта;

d - глубина промерзания грунта в основании фундаментов.

6. Вычислим нагрузку на пружины по формуле (13) [81]:

$$F_{\text{ПР}} = y \times 0,5 \times (l_1 + l_2) + k \times Y, \quad (13)$$

где: y - удельный вес 1 м трубопровода, кгс/м;

l_1 и l_2 - пролеты опоры, м;

Y – вес ростверка, кгс;

k - доля веса арматуры, передаваемая на эту опору.

$$F_{\text{ПР}} = (475/1,14) \times 0,5 \times (63 + 63) + 50 = 22 \text{ кН}$$

7. Определим жесткость пружин по формуле (14) [143]:

$$K = F_{\text{тр}} / (L - h), \quad (14)$$

где: h – поднятие клина, м;

L – длина демпфера, м;

$F_{\text{тр}}$. – нагрузка на демпфер от трубопровода, Н.

$$K = 220 / (1 - 0,05) = 231,5 \text{ кН/м}$$

8. Вычислим вертикальные выдергивающие силы сваи при условии морозного пучения грунта по формулам (15) – (16) [63]:

$$N_{\text{св.}} = \tau_{\text{пуч.}} \times 2 \times \pi \times r \times H_{\text{св1}} - \text{без клина} \quad (15)$$

$$N_{\text{св.}} = \tau_{\text{пуч.}} \times 2 \times \pi \times r \times H_{\text{св2}} - \text{с клином} \quad (16)$$

где: r - радиус сваи = 0,1095 м; $H_{\text{св1}}$ - длина сваи в сезонно-мёрзлом слое грунта = 2,5 м; $H_{\text{св2}}$ - длина сваи без перекрытой части клином в сезонно-мёрзлом слое грунта = 2 м (при высоте клина в сезонно-мёрзлом слое грунта = 0,5 м); $\tau_{\text{пуч.}}$ - давление (сосредоточенной силы пучения) грунта = 130 – 170 кПа (сильнопучинистые грунты).

При давлении (сосредоточенной силы пучения) грунта 130 кПа.

Вертикальная выдергивающая сила сваи без клина:

$$N_{\text{св.}} = \tau_{\text{пуч.}} \times 2 \times \pi \times r \times H_{\text{св1}} = 130 \times 2 \times \pi \times 0,1095 \times 2,5 = 223 \text{ кН}$$

Вертикальная выдергивающая сила сваи с клином:

$$N_{\text{св.}} = \tau_{\text{пуч.}} \times 2 \times \pi \times r \times H_{\text{св2}} = 130 \times 2 \times \pi \times 0,1095 \times 2 = 178 \text{ кН}$$

При давлении (сосредоточенной силы пучения) грунта 140 кПа.

Вертикальная выдергивающая сила сваи без клина:

$$N_{\text{св.}} = \tau_{\text{пуч.}} \times 2 \times \pi \times r \times H_{\text{св1}} = 140 \times 2 \times \pi \times 0,1095 \times 2,5 = 240 \text{ кН}$$

Вертикальная выдергивающая сила сваи с клином:

$$N_{\text{св.}} = \tau_{\text{пуч.}} \times 2 \times \pi \times r \times H_{\text{св2}} = 140 \times 2 \times \pi \times 0,1095 \times 2 = 192,6 \text{ кН.}$$

При давлении (сосредоточенной силы пучения) грунта 150 кПа.

Вертикальная выдергивающая сила сваи без клина:

$$N_{\text{св.}} = \tau_{\text{пуч.}} \times 2 \times \pi \times r \times H_{\text{св1}} = 150 \times 2 \times \pi \times 0,1095 \times 2,5 = 258 \text{ кН}$$

Вертикальная выдергивающая сила сваи с клином:

$$N_{\text{св.}} = \tau_{\text{пуч.}} \times 2 \times \pi \times r \times H_{\text{св2}} = 150 \times 2 \times \pi \times 0,1095 \times 2 = 206 \text{ кН}$$

При давлении (сосредоточенной силы пучения) грунта 160 кПа.

Вертикальная выдергивающая сила сваи без клина:

$$N_{\text{св.}} = \tau_{\text{пуч.}} \times 2 \times \pi \times r \times H_{\text{св1}} = 160 \times 2 \times \pi \times 0,1095 \times 2,5 = 275,2 \text{ кН}$$

Вертикальная выдергивающая сила сваи с клином:

$$N_{\text{св.}} = \tau_{\text{пуч.}} \times 2 \times \pi \times r \times H_{\text{св2}} = 160 \times 2 \times \pi \times 0,1095 \times 2 = 220 \text{ кН}$$

При давлении (сосредоточенной силы пучения) грунта 170 кПа.

Вертикальная выдергивающая сила сваи без клина:

$$N_{\text{св.}} = \tau_{\text{пуч.}} \times 2 \times \pi \times r \times H_{\text{св1}} = 170 \times 2 \times \pi \times 0,1095 \times 2,5 = 292,5 \text{ кН}$$

Вертикальная выдергивающая сила сваи с клином:

$$N_{\text{св.}} = \tau_{\text{пуч.}} \times 2 \times \pi \times r \times H_{\text{св2}} = 170 \times 2 \times \pi \times 0,1095 \times 1,85 = 216 \text{ кН}$$

В результате вертикальная выдергивающая сила сваи с клином будет меньше вертикальной выдергивающей силы сваи без клина в 1,25 раза.

9. Вычислим нагрузки на линейном участке надземного магистрального трубопровода при условии морозного пучения грунта (на рисунке 2.15) по формуле (17) – (19) [93]:

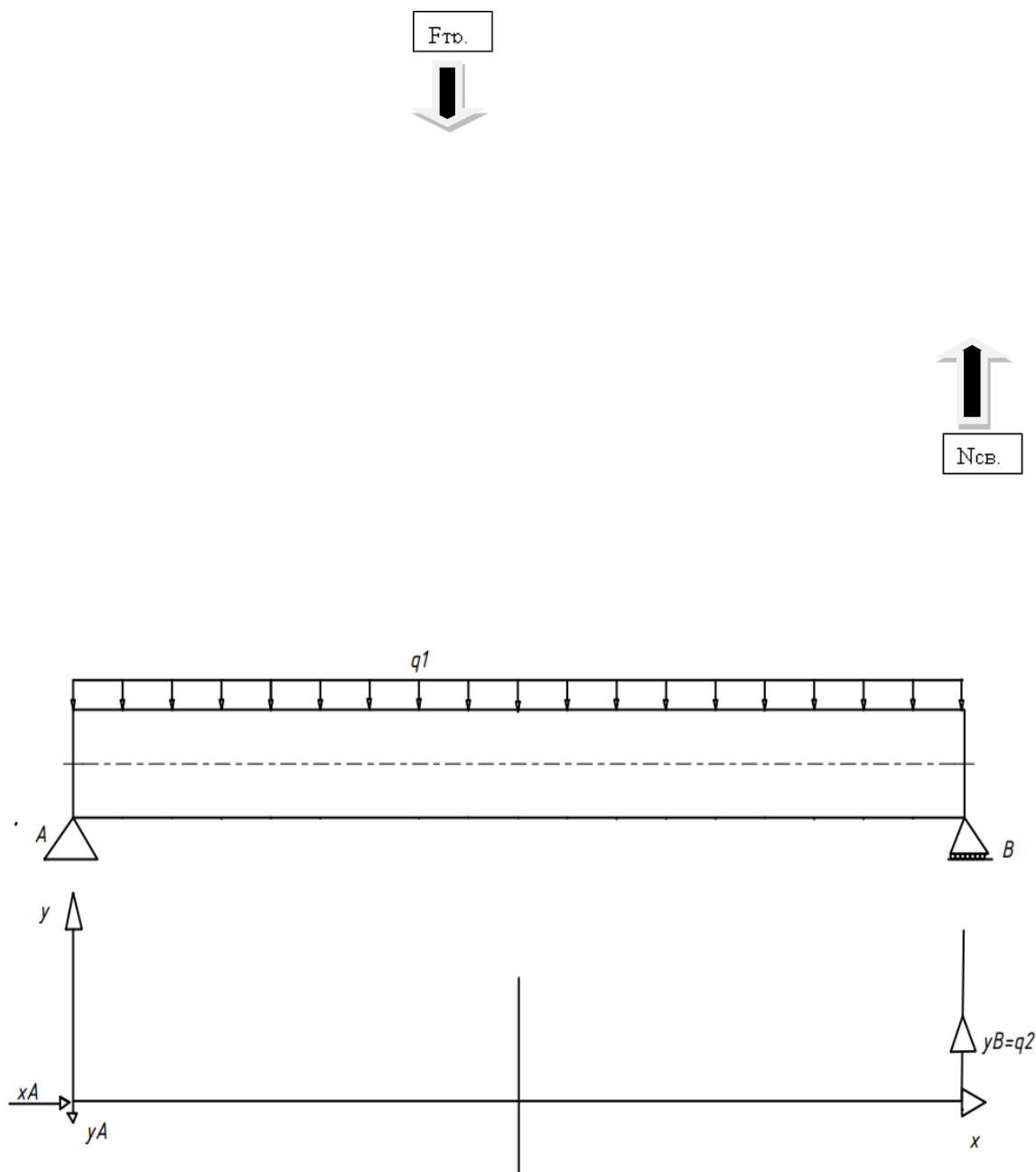


Рисунок 2.15 – Нагрузки на трубопроводе при условии морозного пучения грунта

Определим y_b через момент силы

$$\Sigma M_a = - q_1 \times l \times l/2 + y_b \times l + q_2 \times l \times l/2 \quad (17)$$

$$y_b = (q_1 \times l/2 - q_2 \times l/2)$$

где: q_1 и q_2 – распределенная нагрузка, действующая со стороны трубы и со стороны грунта, Н/м.

Перепишем это уравнение следующим образом:

Так как

$$Q = q * l \quad (18)$$

Уравнение примет следующий вид:

$$y_b = (Q_1/2 - Q_2 / 2) \quad (19)$$

где: Q_1 и Q_2 – сосредоточенная нагрузка, действующая со стороны трубы и со стороны грунта, Н.

$y_b = (Q_1/2 - Q_2 / 2)$ – значение нагрузки на трубопроводе при условии сосредоточенной нагрузки трубопровода Q_1 и сосредоточенной нагрузки со стороны опоры Q_2 , вызванное морозным пучением грунта. Для расчета нагрузки на трубопроводе заменим Q_1 на $F_{тр.}$, а вместо Q_2 подставим $N_{св.}$ и получим следующую формулу (20):

$$Q = (F_{тр.} - N_{св.}) / 2 \quad (20)$$

где: $N_{св.}$ – вертикальная выдергивающая сила сваи равнозначная удельной нагрузки Q_2 ;

$F_{тр.}$ – нагрузка трубопровода равнозначная удельной нагрузки Q_1 ;

При давлении (сосредоточенной силы пучения) грунта 130 кПа нагрузка на трубопроводе равна:

$$Q = (220 - 223) / 2 = - 1,5 \text{ кН} \text{ – для традиционных опор}$$

$$Q = (220 - 178) / 2 = 21 \text{ кН} \text{ – для разработанных опор}$$

При давлении (сосредоточенной силы пучения) грунта 140 кПа нагрузка на трубопроводе равна:

$$Q = (220 - 240) / 2 = - 10 \text{ кН} \text{ – для традиционных опор}$$

$$Q = (220 - 192,6) / 2 = 13,7 \text{ кН} \text{ – для разработанных опор}$$

При давлении (сосредоточенной силы пучения) грунта 150 кПа нагрузка на трубопроводе равна:

$$Q = (220 - 258) / 2 = - 19 \text{ кН} - \text{для традиционных опор}$$

$$Q = (220 - 206) / 2 = 7 \text{ кН} - \text{для разработанных опор}$$

При давлении (сосредоточенной силы пучения) грунта 160 кПа нагрузка на трубопроводе равна:

$$Q = (220 - 275,2) / 2 = - 27,6 \text{ кН} - \text{для традиционных опор}$$

$$Q = (220 - 220) / 2 = 0 \text{ кН} - \text{для разработанных опор}$$

При давлении (сосредоточенной силы пучения) грунта 170 кПа нагрузка на трубопроводе равна:

$$Q = (220 - 292,5) / 2 = - 36,25 \text{ кН} - \text{для традиционных опор}$$

$$Q = (220 - 216) / 2 = 2 \text{ кН} - \text{для разработанных опор с клином}$$

При расчете нагрузки на трубопроводе знак «-» означает возникновение изгибающих напряжений стенки, которые приводят к деформации трубопровода.

Результаты вычислений п.8 и п.9 разработанного алгоритма представлен в таблице 2.10 и на рисунках 2.16 – 2.17.

Таблица 2.10 Результаты нагрузок на линейном участке надземного магистрального трубопровода при условии морозного пучения грунта

тпуч.	Нсв. (традиционные опоры), кН	Нсв. (разработанные опоры), кН	Q (традиционные опоры), кН	Q (разработанные опоры), кН
130	223	178	- 1,5	21
140	240	192,6	- 10	13,7
150	258	206	- 19	7
160	275,2	220	- 27,6	0
170	292,5	216	- 36,25	2

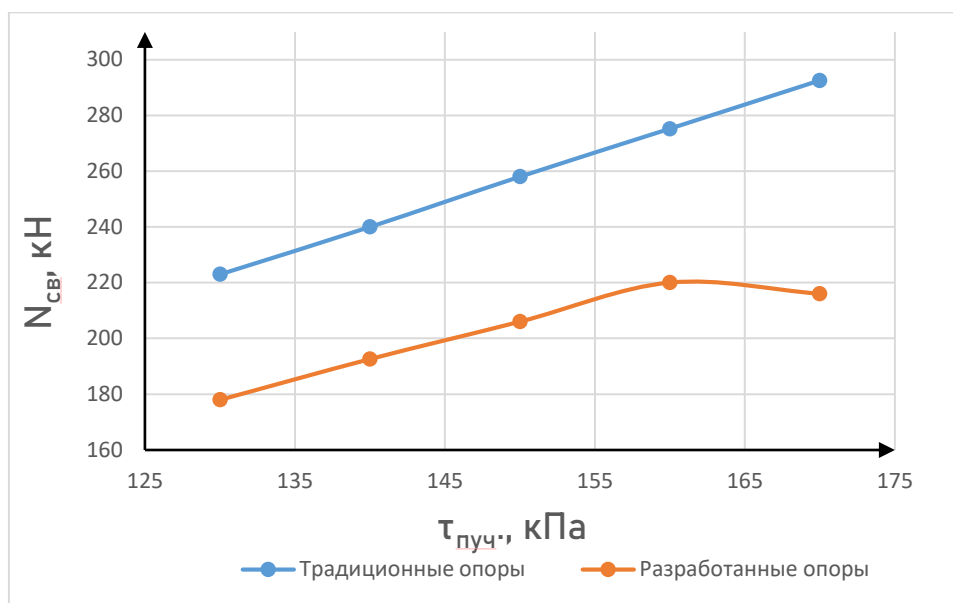


Рисунок 2.16 – Графики зависимостей вертикальных выдергивающих сил сваи от удельных касательных сил морозного пучения грунта

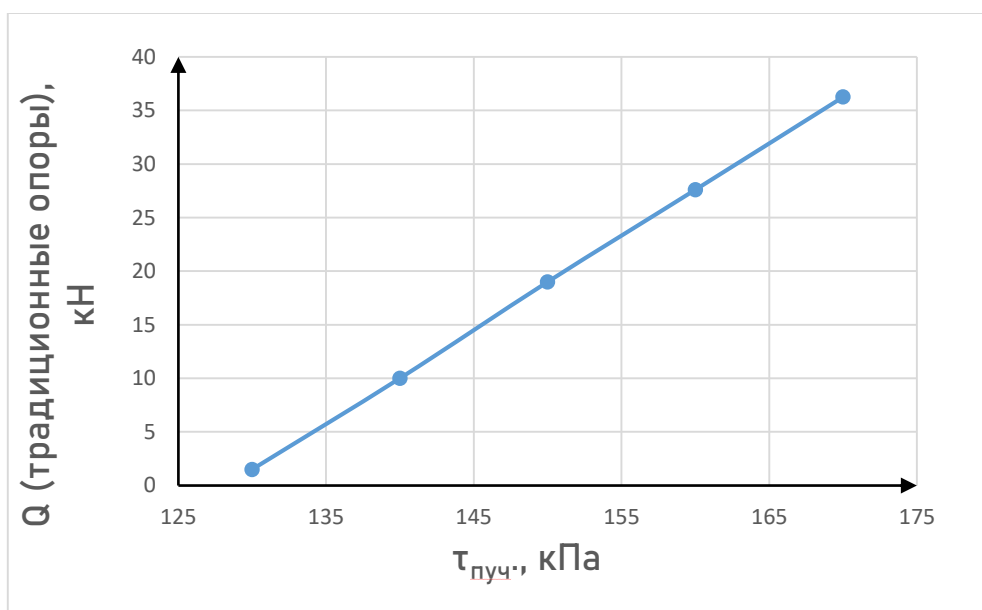


Рисунок 2.17 – График зависимости нагрузки на трубопроводе от удельной касательной силы морозного пучения грунта

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.

2.5 Выводы по главе 2

1. Разработана численная модель для определения нагрузки на линейных участках надземных магистральных трубопроводов, проложенных на многолетнемерзлых грунтах в условиях морозного пучения.

2. Проведено сравнение опор надземного трубопровода методом конечных элементов с применением ANSYS. При дополнительных нагрузках на традиционные опоры трубопровода при воздействии сил морозного пучения, напряжения на газопроводе составили: торф $150/15 = 10$; песок $160/16 = 10$; суглинок $174/17,4 = 10$. Для нефтепровода изгибные напряжения при -10°C составили: торф $170,7/ 17,7 = 10$; песок $180,3/ 18,3 = 10$; суглинок $190,2/ 19,2 = 10$.

3. Проведен анализ напряженно-деформированного состояния трубопровода с учетом механических напряжений грунта. Выявлено существенное смещение опоры при морозном пучении грунта, которое уменьшится за счет выбора предлагаемой разработанной конструкции опоры трубопровода.

4. Исходя из результатов анализа напряжений, отклонившегося от проектного положения участка надземного трубопровода и моделирования нагрузок в точках крепления опоры, было выявлено требование к применению специально разработанных опор.

ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИЙ ОПОР И СПОСОБА ЗАЩИТЫ НАДЗЕМНОГО МАГИСТРАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДА ОТ МОРОЗНОГО ПУЧЕНИЯ ГРУНТА

3.1 Анализ существующих инженерно-технических способов повышения устойчивости линейного участка надземного трубопровода от воздействий сил морозного пучения грунта

В первой главе рассматривался опыт в сфере обеспечения устойчивости надземного участка трубопровода. Анализируя данный опыт пришли к определенным выводам.

Способ защиты трубопровода, применяя свайные опоры и термостабилизаторы грунтов (ТСГ), является достаточно затратным, поскольку необходимо проводить работы в период эксплуатации ТСГ. ТСГ должны проходить техническое обслуживание, заключающееся в ежегодной проверке их работоспособности и визуальном осмотре, а также, при необходимости, в восстановлении лакокрасочного покрытия и перезаправке хладагентом. Из-за очень низкой отрицательной температуры окружающего воздуха ТСГ дополнительно охлаждает грунт, что способствует увеличению морозного пучения грунта и увеличивает риск смещения опор. Практически все стабилизаторы в зимний период времени намораживают грунт, а в летний период, когда температура наружного воздуха прогревается до положительных температур, ТСГ продолжает работать и вместо заморозки грунта, выполнять его прогрев. В случае фиксирования факта выхода из строя ТСГ и обнаружения грубых механических повреждений корпуса ремонту не подлежат [122].

Сваи под опоры на участках трассы с грунтами, подверженными сильным сезонным деформациям морозного пучения состоят из железобетонных конструкций и винтовых свай, которые не эффективно защищают трубопровод от действий сил морозного пучения.

При зигзагообразной прокладке применяют подвесные опоры (Рисунок 3.1). Скользяще-подвесные опоры необходимо использовать на участках с уклоном 10

градусов. На участках трассы, где возможен процесс морозного пучения грунта, применение прокладки трубопровода подземным способом приводит к образованию опасного дефекта стенки и разрыву трубопровода.

Таким образом самым практичным является применение винтовых свай для надземной прокладки при сплошном характере мерзлоты. Однако существующие опоры с винтовыми сваями не справляются с сильным морозным пучением [65, 71-72].



Рисунок 3.1 – Подвесная опора трубопроводов [142]

Увеличение надежности главного трубопровода в толстых слоях мерзлых грунтов путем применения специальных анкерных конструкций (рисунок 3.2) [26].



Рисунок 3.2 – Закрепление трубопроводов анкерными устройствами [142]

Конструкция анкерного устройства представлена на рисунке 3.3.

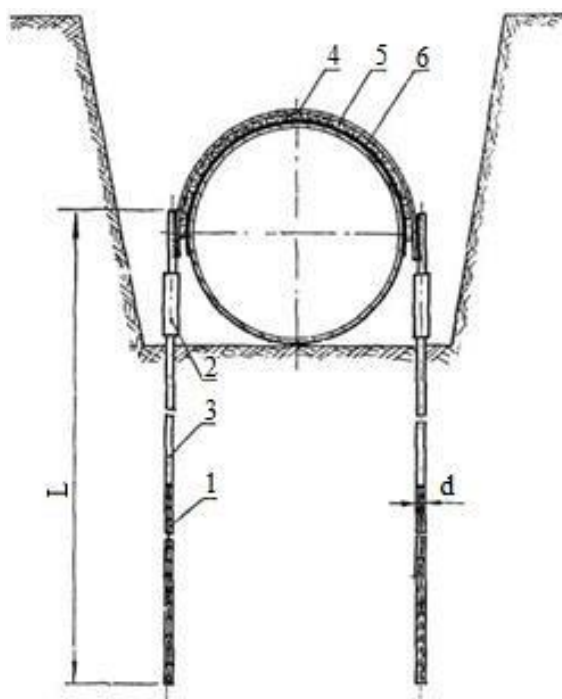


Рисунок 3.3 – Стержневое анкерное устройство: 1 - стержневой анкер; 2 - компенсатор; 3 - штанги, соединяющие каждый стержневой анкер с компенсаторами 2; 4 - силовой пояс; 5 - футеровочный мат; 6 – прокладки [142]

Эффективным методом повышения устойчивости надземного магистрального трубопровода в ММГ, является применение винтовых свай (Рисунок 3.4) [101-104].

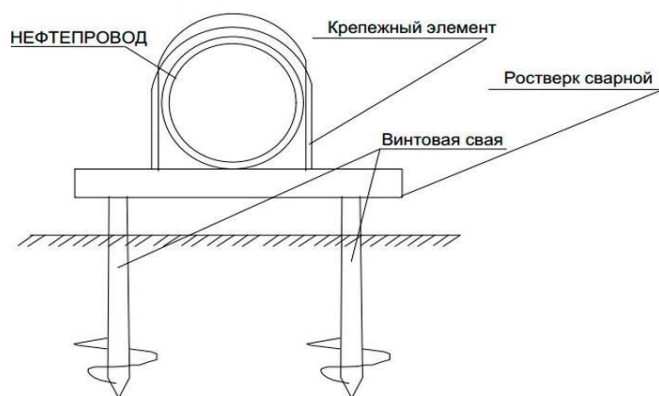


Рисунок 3.4 – Схема опоры с винтовыми сваями [142]

Преимущества винтовых свай (Рисунок 3.5) заключаются в следующем:

- 1) Быстрый монтаж.
- 2) Быстрая готовность к эксплуатации. После монтажа свай нет усадки.
- 3) Минимальная усадка винтовых свай после установки, что позволяет приступить к монтажу трубопровода немедленно. Трубопровод можно устанавливать в кратчайшие сроки.
- 4) Простота строительства. Использование вращателей позволяет избежать необходимости частой подвозки дополнительных материалов и бетона.



Рисунок 3.5 – Трубопровод на сваях [142]

Из-за того, что несущая способность сильно зависит от характеристик почвы, появляется необходимость получения информации о грунте.

Также существует конструкция гибкой опоры (рисунок 3.6). для повышения устойчивости надземного магистрального трубопровода на ММГ [97].

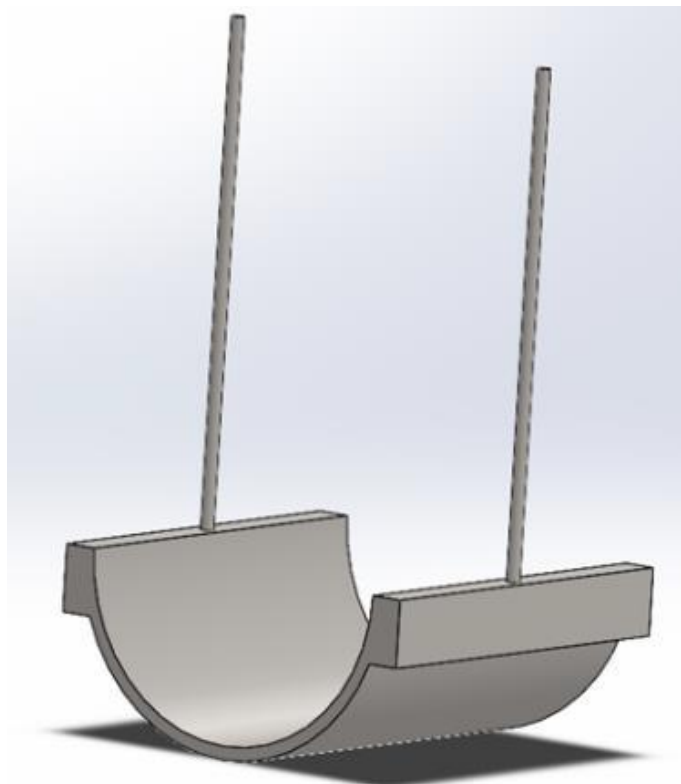


Рисунок 3.6 – Конструкция гибкой опоры [142]

Принцип работы данной опоры заключается в том, что при смещениях грунта опоры прогибается, тем самым конструкция с гибкой опорой, с возможностью перемещения в сторону смещения трубы, уменьшает возникающие напряжения на верхней образующей трубы.

В настоящее время недостаточно исследований, подтверждающих эффективность данной опоры. Сомнения вызывает полученный эффект при воздействии сил морозного пучения, так как конструкция не способна справиться с выталкивающей нагрузкой грунта, что приведет к разрыву трубопровода.

Наиболее перспективным из имеющихся конструкций опор, обеспечивающих устойчивость и сохранение проектного положения надземного магистрального трубопровода на ММГ, является использование опор с пружинами (Рисунок 3.7).

Пружинный блок опор трубопровода может включать одну цилиндрическую пружину или их комплект.

Винтовая цилиндрическая пружина сжатия является одним из составных элементов пружинных блоков для трубопровода. С помощью них происходит фиксация трубы, компенсация её смещения по оси и вертикали, виброизоляция конструкции.

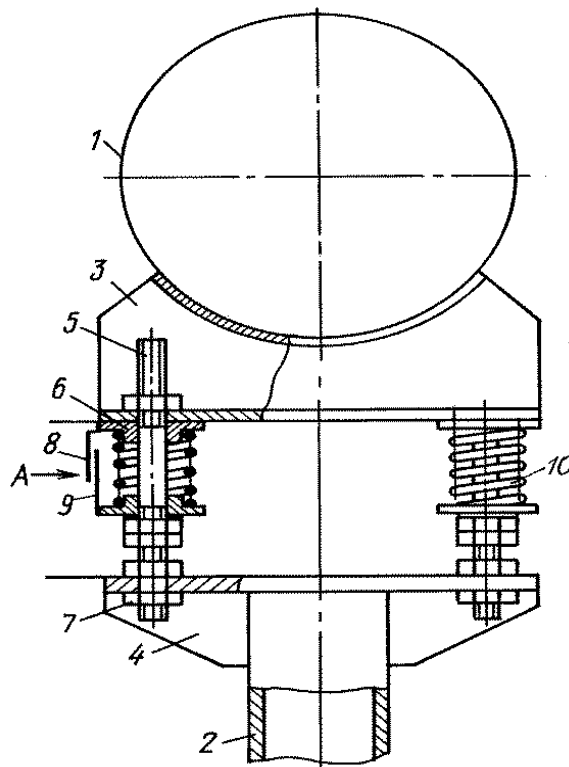


Рисунок 3.7 – Схема опоры с пружинами: 1 – трубопровод; 2 – свайная опора; 3 – ложемент; 4 – платформа; 5 – шпилька; 6 – втулка; 7 – гайка; 8 – визир; 9 - мерная планка; 10 – пружина [65]

Недавними работами по разработке опор с пружинами занимался А.К. Николаева [66-70]. Некоторые из них представлены на рисунке 2-3

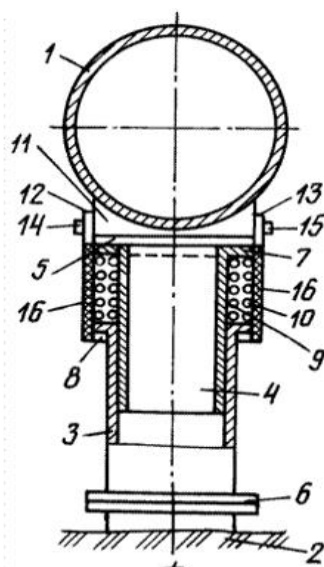


Рисунок 3.8 – Схема опоры с пружинами: 1 - трубопровод; 2- грунте; 3- полое основание; 4-стойку; 5 и 6 - опорно-поворотные узлы, 7 и 8- фланцы; 9 и 10 - спиральные пружины сжатия; 11- опорный элемент; 12 и 13 - подвески; 14 и 15 - крепежные приспособления; 16 - защитный кожух [67]

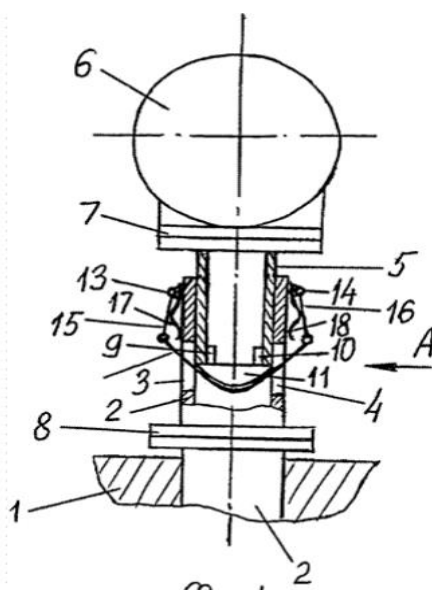


Рисунок 3.9 – Схема опоры с пружинами: 1 - грунт; 2- полое основание; 3 и 4 - продольные пазы; 5 - стойка; 6 - трубопровод; 2 - полость основания; 7 и 8 - опорно-поворотные узлы, 9 и 10 - кронштейны 11- дугообразный элемент; 12 - гибкий элемент; 13 и 14 - шарниры 15 и 16 - рычаги; 17 и 18 – пружины

[71]

Преимущества применения опор с пружинами (Рисунок 3.7) является то что, пружины гасят колебания, которые могут возникать при транспортировке содержимого, температурных перепадах, грунтовых подвижках и сейсмической активности, при линейных изменениях, при запуске и остановке работы трубопровода.

На рисунке 3.10 представлен трубопровод на опорах с пружинами



Рисунок 3.10 – Трубопровод на опорах с пружинами [143]

Основным недостатком такого типа опоры является то, что из-за воздействия сильных морозов она не способна своевременно амортизировать колебания. Шпильки, принимая на себя остаточные деформации, начинают изгибаться за пределами упругости из-за воздействия мороза.

Более того, несвязанные жестко сваи могут вызвать искривление свай, обрушение опор во время сейсмических действий и воздействие трубопровода на амортизационную опору, закрепленную на свае.

Преимущество использования опор с пружинами перед винтовыми анкерами и железобетонными утяжелителями увеличивается при действии сил морозного пучения и увеличении нагрузки на опору. Однако стоит отметить, что каждая пружина требует больше рабочей силы по сравнению с другими типами опор.

3.2 Разработка конструкций опор надземного трубопровода и способа защиты от морозного пучения грунта, проложенных в районах сплошного распространения мерзлоты

В соответствии с упомянутыми условиями были проведены работы по созданию конструкций опор для наземного магистрального трубопровода, проложенного на грунте с мерзлотой, и способов защиты его от морозного пучения. По результатам разработки этих конструкций и способов получены патенты на изобретения и полезные модели [73-76].

Разработка способа обеспечения защиты несущей опорной конструкции надземного магистрального трубопровода от воздействий сил морозного пучения грунта (Рисунок 3.11).

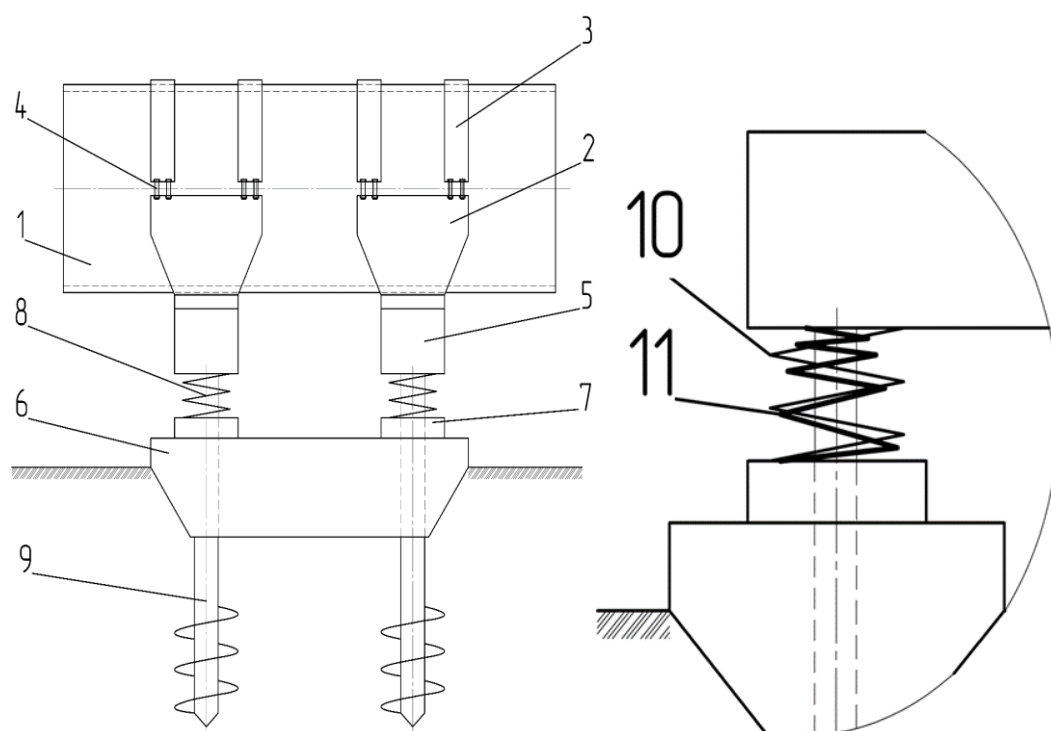


Рисунок 3.11 – Способ защиты несущей опорной конструкции надземного магистрального трубопровода от воздействий сил морозного пучения грунта, где: 1 – трубопровод; 2 – ложемент; 3 – полухомут; 4 – болтовое соединение; 5 – стол-ростверк; 6 – опорная плита; 7 – шайба; 8 – демпфер; 9 – винтовая свая; 10 – внешняя пружина; 11 – внутренняя пружина [74]

Для возведения опорной конструкции осуществляется выемка под размеры опорной плиты 6. Затем устанавливаются винтовые сваи 9 с помощью бурильной машины, не менее 4 штук, до достижения необходимой глубины, исключая зону морозного пучения. Экскаватором делается траншея под опорную плиту 6, которая при помощи кранов устанавливается не менее чем 2 штуки. В отверстия опорной плиты прокладываются верхние части винтовых свай 9. Нижняя часть опорной плиты, направленная острым краем вниз, помещается в траншею.

В ходе эксплуатации главного трубопровода сохраняется его первоначальное положение за счет того, что клин опорной плиты выполняет функцию разделения замерзшего распушенного грунта и предотвращает смещение трубопровода, в то время как демпферный элемент компенсирует смещение опорной плиты.

Разработка опоры надземного магистрального трубопровода (рисунок 3.12). Отличительной чертой разработанного устройства от существующих опор заключается в наличии четырех винтовых свай, железобетонного клина и пружинного демпфера. Опора надземного магистрального трубопровода 1 состоит из ложементов 2 выполненных в форме полуцилиндра, сверху к нему закрепляют с возможностью съема не менее двух полухомутов 3, которые выполнены в форме плоских полуколец. Полухомуты 3 и закреплены с ложементом 2 креплением 4. Ширина полухомута 3 зависит от диаметра трубопровода 1 и расчетной нагрузки. Стол - ростверк 5 выполнен в форме прямоугольника, на него жестко закреплен ложемент 2. Демпфер 8 установлен между столом-ростверком 5 и опорной плитой 6. Нижний конец демпфера 8 закреплен неподвижно в платформе опорной плиты 6, где в качестве фиксирующего элемента шайба 7, а верхний конец закреплен с возможностью подбора витков пружины по высоте в столе-ростверке 5. Демпфер 8 состоит из внешней пружины 10, которая выполнена в форме цилиндра, а внутри неё установлена внутренняя пружина 11 в форме конуса, диаметр которой, увеличивается в нижней части. Нижняя часть опорной плиты 6 выполнена в форме острой кромки. Винтовые сваи 9 выполнены в форме цилиндра, а нижняя часть в

форме конуса. В опорной плите 6 выполнены отверстия, куда установлены винтовые сваи 9, сквозь демпфер 8 и упираются в стол-ростверк.

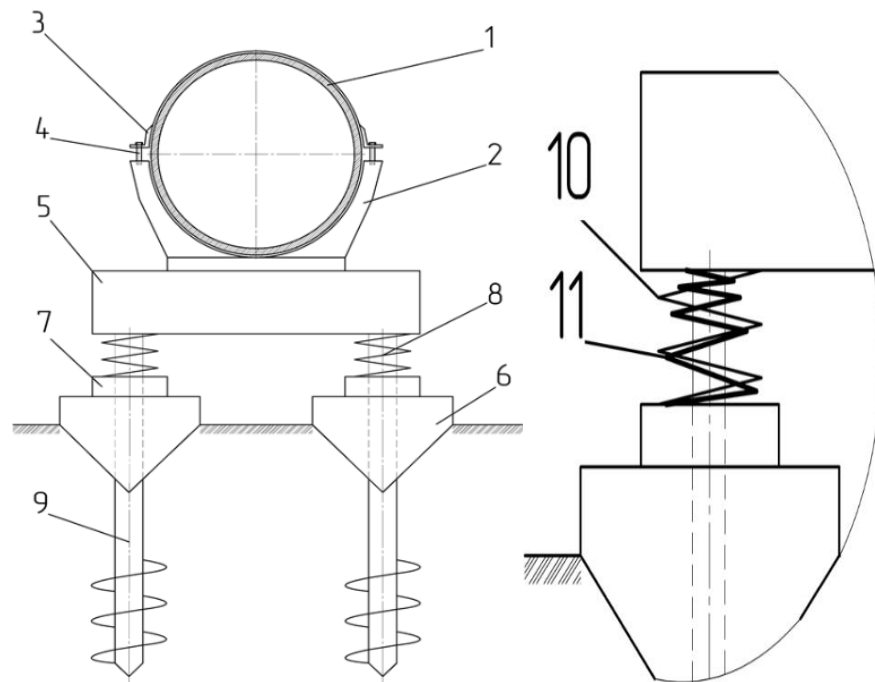


Рисунок 3.12 – Схема конструкции опоры надземного магистрального трубопровода, где: 1 – трубопровод; 2 – ложемент; 3 – полухомут; 4 – болтовое соединение; 5 – стол-ростверк; 6 – опорная плита; 7 – шайба; 8 – демпфер; 9 – винтовая свая; 10 – внешняя пружина; 11 – внутренняя пружина [73]

В мерзлый грунт устанавливают винтовые сваи 9, которые при пучении грунта поднимаются вверх при этом демпфер 8 начинает сжиматься на величину поднятия винтовой сваи 9, при таянии грунта винтовая свая 9 возвращается в исходное положение и демпфер 8 разжимается. В процессе пучения грунта опорная плита 6 смещается и за счет клина разрезает грунт в противоположную сторону от высоты морозного пучения грунта, а в процессе оттаивания грунта, расстояние на которое смещается опорная плита 6, за счет своей формы возвращается в исходное положение.

Применение специального устройства для амортизации нагрузки от трубопровода и морозного пучения. Прямая связь винтовых свай с ростверком предотвращает вертикальные и горизонтальные смещения опорной плиты. Опорная плита в форме клина способствует разрезанию грунта и предотвращению смещения

опоры в заданных режимах. Опора для надземного магистрального трубопровода с демпферной системой предотвращает напряжения и компенсирует дрейф опоры с помощью клина.

Для повышения устойчивости опор надземного трубопровода и сохранения проектного положения трубопровода, была предложена конструкция надземной опоры [94], представленная на Рисунке 3.13.

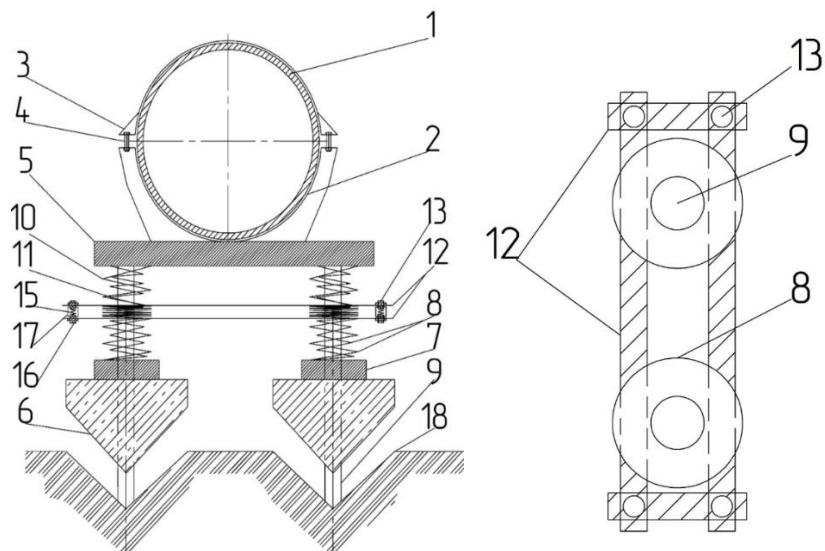


Рисунок 3.13 – Устройство опорной конструкции надземного магистрального трубопровода, где: 1 – трубопровод; 2 – ложемент; 3 – полухомут; 4 – крепление; 5 – стол-ростверк; 6 – опорная плита; 7 – шайба; 8 – демпфер; 9 – винтовая свая; 10 – внешняя пружина; 11 – внутренняя пружина; 12 – пластины фиксаторы; 13 – крепление пластин; 14 – фиксирующие элементы; 15 – пружина крепления; 16 – стопор; 17 – фиксатор положения; 18 – траншея [75]

Опора надземного магистрального трубопровода 1 состоит из ложемента 2 выполненного в форме полуцилиндра, сверху к нему закрепляют с возможностью съема не менее двух полухомутов 3, которые выполнены в форме плоских полуколец. Полухомуты 3 и закреплены с ложементом 2 креплением 4. Ширина полухомута 3 зависит от диаметра трубопровода 1 и расчетной нагрузки. Стол - ростверк 5 выполнен в форме прямоугольника, на него жестко закреплен ложемент 2. Демпфер 8 установлен между столом-ростверком 5 и опорной плитой 6. Нижний конец демпфера 8 закреплен неподвижно в платформе опорной плиты 6, где в

качестве фиксирующего элемента шайба 7, а верхний конец закреплен с возможностью подбора витков пружины по высоте в столе-ростверке 5 Демпфер 8 состоит из внешней пружины 10, которая выполнена в форме цилиндра, а внутри неё установлена внутренняя пружина 11 в форме конуса, диаметр которой, увеличивается в нижней части. На пружинах демпфера 8 установлены с возможностью съема пластины фиксаторы 12. Пластина фиксатора 12 состоят из двух удлинённых пластин, которые устанавливаются параллельно друг другу и двух укороченных соединительных пластин, которые устанавливаются перпендикулярно на удлинённые пластины. Удлинённые пластины и укороченные соединительные пластины выполнены в форме прямоугольника, например, из металла. На концах удлинённых пластин и укороченных соединительных пластин выполнены отверстия, в которые установлены с возможностью съема крепление пластин 13. Верхние пластины фиксатор 12 закрепляются на демпфер 8 с верхней стороны, а нижняя пластина фиксатор 12 крепится на демпфер 8 с нижней стороны, при этом винтовая свая 9 располагались внутри пластины фиксатора 12 и не соприкасается с её стенками. Крепление пластины 13 состоит из фиксирующих элементов 14, в центре которых выполнены отверстия, в которое установлен с возможностью вращения стопор 16. Стопор 16 состоит из двух частей, которые выполнены в форме цилиндра, а на их поверхности выполнена резьба. На внутренних поверхностях стопора 16 жестко закреплена пружинной крепление 15. На стопор 16 установлен фиксатор положения 17, выполненный в форме полого цилиндра с возможностью перемещения по оси стопора 16 и с возможностью фиксирования двух частей стопора 16. Нижняя часть опорной плиты 6 выполнена в форме острой кромки, которая установлена в траншею 18. Винтовые сваи 9 выполнены в форме цилиндра, на внутренней поверхности которого нанесена резьба, а нижняя часть в форме конуса. В опорной плите 6 выполнены отверстия, куда установлены винтовые сваи 9, сквозь демпфер 8 и упираются в стол-ростверк.

Опора надземного магистрального трубопровода работает следующим образом. В мерзлый грунт устанавливают винтовые сваи 9, которые при пучении

грунта поднимаются вверх при этом демпфер 8 начинает сжиматься на величину поднятия винтовой сваи 9, при таянии грунта винтовая свая 9 возвращается в исходное положение и демпфер 8 разжимается. В процессе пучения грунта опорная плита 6 смещается и за счет клина разрезает грунт в противоположную сторону от высоты морозного пучения грунта, а в процессе оттаивания грунта поднимают опорную плиту на расчетное расстояние в зависимости от глубины промерзания грунта. При оттаивании грунта в летний период, пружины демпфера сжимают пластинами фиксаторами 12 до нужного расстояния затягиванием креплениями пластин 13 и фиксатора положения 14 на стопор 16 с двух противоположных сторон пружин демпфера 8 и поднимают опорную плиту 6. Для поднятия опорной плиты 6 затягивают фиксирующий элемент 14, а фиксатор положения 17 устанавливают в центральное положение, при этом пружины крепления 15 сжимаются внутри фиксатора положения 17. После поднятия опорной плиты, проверяют плиту на наличие дефектов. Сжатый демпфер 8 и пластины фиксаторы 12 с креплением пластин 13 обрабатывают противокоррозионными смазками EFELE MG-214 или Molykote PTFE-N-UV для защиты от окисления при взаимодействии с кислородом и защиты от влаги в сезон дождей и росы оседающих на внешней пружине 10 и внутренней пружине 11. В зимний период перед спуском опорной плиты 6 в траншею 17 при необходимости покрывают железобетонную опорную плиту 6 несколькими слоями пластических смазок, например, БАМ-3 и БАМ-4, и кремнийорганическими эмалями, например, КО-174, КО-1164. После проверки опорной плиты 6 на наличие дефектов выравнивают выемку траншеи 18, если за летний период из-за оттаивания нарушилась целостность выемки траншеи 18, отпускают опорную плиту 6 за счет раскручивания фиксирующих элементов 14 и фиксатора положения 17, происходит разжатие пружины крепления 15, и она свободно двигается в зависимости от положения пружин демпфера 8.

Железобетонная опорная плита 6 нагревается в летний период за счет солнечного излучения, что увеличивает объем ореола оттаивания грунта и повышает неравномерность морозного пучения грунта, что приведет к неправильной работе

конструкции опоры, и снижению эффективности разрезания грунта, и в результате действий, возникающих при сезонном вспучивании грунта, опора не справится полностью со своей задачей и повысится риск аварий на магистральном трубопроводе 1 при воздействии сил морозного пучения. Чтобы избежать большой площади растепления окружающего грунта, рекомендуется поднимать опорную плиту в летний период, с использованием металлических пластин фиксаторов 12 с креплением пластин 13.

Установка фиксаторов с пластинами на опоре магистрального трубопровода сезонно-вспучиваемых грунтов помогает избежать напряжений, осмотреть на дефекты после криогенного пучения, обработать опорную плиту противоположными растворами, что продлевает срок эксплуатации.

Также предложена опорная конструкция уменьшающая ореол оттаивания в основании свай опоры, которая также позволяет сохранить трубопровод в целостности представленная на рисунке 3.14.

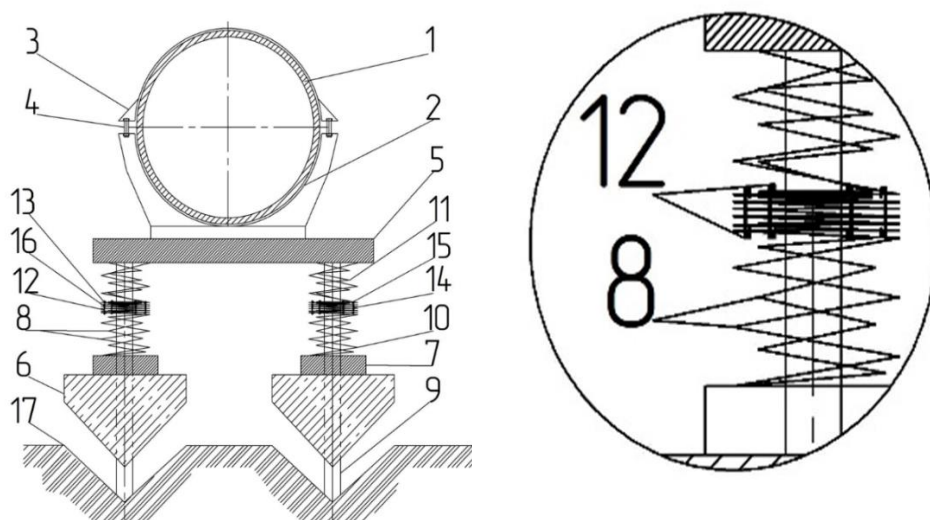


Рисунок 3.14 – Устройство опорной конструкции надземного магистрального трубопровода, где 1 – трубопровод; 2 – ложемент; 3 – полухомут; 4 – крепление; 5 – стол-ростверк; 6 – опорная плита; 7 – шайба; 8 – демпфер; 9 – винтовая свая; 10 – внешняя пружина; 11 – внутренняя пружина; 12 – крепление пружины; 13 – фиксирующий элемент; 14 – пружина крепления; 15 – стопор; 16 – фиксатор положения; 17 – траншея [76]

Опора надземного магистрального трубопровода 1 состоит из ложементов 2 выполненных в форме полуцилиндра, сверху к нему закрепляют с возможностью съема не менее двух полухомутов 3, которые выполнены в форме плоских полуколец. Полухомуты 3 и закреплены с ложементом 2 креплением 4. Ширина полухомута 3 зависит от диаметра трубопровода 1 и расчетной нагрузки. Стол - ростверк 5 выполнен в форме прямоугольника, на него жестко закреплен ложемент 2. Демпфер 8 установлен между столом-ростверком 5 и опорной плитой 6. Нижний конец демпфера 8 закреплен неподвижно в платформе опорной плиты 6, где в качестве фиксирующего элемента шайба 7, а верхний конец закреплен с возможностью подбора витков пружины по высоте в столе-ростверке 5. Демпфер 8 состоит из внешней пружины 10, которая выполнена в форме цилиндра, а внутри неё установлена внутренняя пружина 11 в форме конуса, диаметр которой, увеличивается в нижней части. На пружинах демпфера 8 установлено с возможностью съема крепление пружины 12. Крепление пружин 12 за счет крючков фиксирующих элементов 13 надевается на центральную часть демпфера 8, с возможностью сжатия демпфера 8 в его центральной части. На внутреннюю пружину 11 надевается от двух и более креплений пружин 12, где верхние крючки фиксирующего элемента 13 крепятся на пружину с верхней стороны, а нижние крючки фиксирующего элемента 13 крепятся на пружину с нижней стороны. На внешнюю пружину 10 надевается от двух и более креплений пружин 12 где верхние крючки фиксирующего элемента 13 крепятся на пружину с верхней стороны, а нижние крючки фиксирующего элемента 13 крепятся на пружину с нижней стороны. Крепление пружин 12 состоит из двух фиксирующих элементов 13 с возможностью съема, выполненных в форме крючков с внутренней резьбой, которые накручиваются на стопор 15 с двух сторон. Стопор 15 выполнен в форме двух цилиндрических болтов с двух сторон с резьбой и закреплен между собой жестко пружиной крепления 14. На стопор 15 накручивается фиксатор положения 16,

выполненный в форме полого цилиндра с возможностью перемещения по резьбе оси стопора 15, с возможностью фиксирования двух цилиндрических болтов стопора 15. Нижняя часть опорной плиты 6 выполнена в форме острой кромки, которая установлена в траншею 17. Винтовые сваи 9 выполнены в форме цилиндра, а нижняя часть в форме конуса. В опорной плите 6 выполнены отверстия, куда установлены винтовые сваи 9, сквозь демпфер 8 и упираются в стол-ростверк.

Опора надземного магистрального трубопровода работает следующим образом. В мерзлый грунт устанавливают винтовые сваи 9, которые при пучении грунта поднимаются вверх при этом демпфер 8 начинает сжиматься на величину поднятия винтовой сваи 9, при таянии грунта винтовая свая 9 возвращается в исходное положение и демпфер 8 разжимается. В процессе пучения грунта опорная плита 6 смещается и за счет острой кромки разрезает грунт в противоположную сторону от высоты морозного пучения грунта, а в процессе оттаивания грунта поднимают опорную плиту на расчетное расстояние в зависимости от глубины промерзания грунта. При оттаивании грунта в летний период, пружины демпфера 8 сжимают специальными креплениями пружин 12 до нужного расстояния затягиванием фиксирующего элемент 13 и фиксатора положения 16 на стопор 15 с двух противоположных сторон пружин демпфера 8 и поднимают опорную плиту 6. Для поднятия опорной плиты 6 затягивают фиксирующий элемент 13, а фиксатор положения 16 затягивают так чтобы пружины крепления 14 сжимались, и находились внутри фиксатора положения 16. После поднятия опорной плиты, проверяют плиту на наличие дефектов. Сжатый демпфер 8 и крепления пружин 12 обрабатывают противокоррозионными смазками EFELE MG-214 или Molykote RTFE-N-UV для защиты от окисления при взаимодействии с кислородом и защиты от влаги в сезон дождей и росы оседающих на пружинах 10 и 11. В зимний период перед спуском опорной плиты 6 в траншею 17 при необходимости покрывают железобетонную опорную плиту 6 несколькими слоями пластических смазок,

например, БАМ-3 и БАМ-4, и кремнийорганическими эмалями, например, КО-174, КО-1164 и опускают опорную плиту 6 в траншею до летнего периода. После проверки опорной плиты 6 на наличие дефектов выравнивают выемку траншеи 17, если за летний период из-за оттаивания нарушилась целостность выемки траншеи 17 отпускают опорную плиту 6 с помощью раскручивания фиксирующего элемента 13 и фиксатора положения 16 и пружины крепления 14 разжимаются так, что пружины крепления 14 свободно двигаются в зависимости от положения пружин демпфера 8.

Применение креплений пружин 12, позволяет сжимать до нужного расстояния внешнюю пружину 10 и внутреннюю пружину 11 демпфера 8 при оттаивании грунта в летний период, что позволяет проверять опорную плиту 6 на наличие дефектов, также появляется возможность перед спуском опорной плиты 6 в траншею 15 в зимний период обработать опорную плиту 6 противопучинистыми смазками и эмалями, если за зимний период смазки и эмали удалились грунтом.

Железобетонная опорная плита 6 нагревается в летний период за счет солнечного излучения, что увеличивает объем ореола оттаивания грунта и повышает неравномерность морозного пучения грунта, что приведет к неправильной работе конструкции опоры, и снижению эффективности разрезания грунта, и в результате действий, возникающих при сезонном вспучивании грунта, опора не справится полностью со своей задачей и повысится риск аварий на магистральном трубопроводе 1 при воздействии сил морозного пучения. Чтобы избежать большой площади растепления окружающего грунта, рекомендуется поднимать опорную плиту в летний период, с использованием специальных креплений пружин 12.

Конструкция опоры надземного магистрального трубопровода в условиях, осложненных сезонно-вспучиваемыми грунтами позволяет в большей степени уменьшить напряжения на трубопроводе за счет креплений пружин и дополнительного осмотра на наличие дефектов, вызванных последствием процесса криогенного пучения после зимнего периода, также позволяет обработать опорную

плиту противопучинистыми растворами и смазывать сжатый демпфер и крепления пружин противокоррозионными смазками, что значительно увеличит эффективность работы конструкции опоры надземного магистрального трубопровода.

Схемы опор надземных магистральных трубопроводов, сооружаемых на многолетнемерзлых грунтах, представлены на рисунках 3.15 - 3.17. Чертеж разработанной конструкции опоры в разрезе с позициями данной конструкции представлен в приложении 3)

На Рисунке 3.15 отображена схема свай без клина опоры надземного магистрального трубопровода в многолетнемерзлых грунтах.

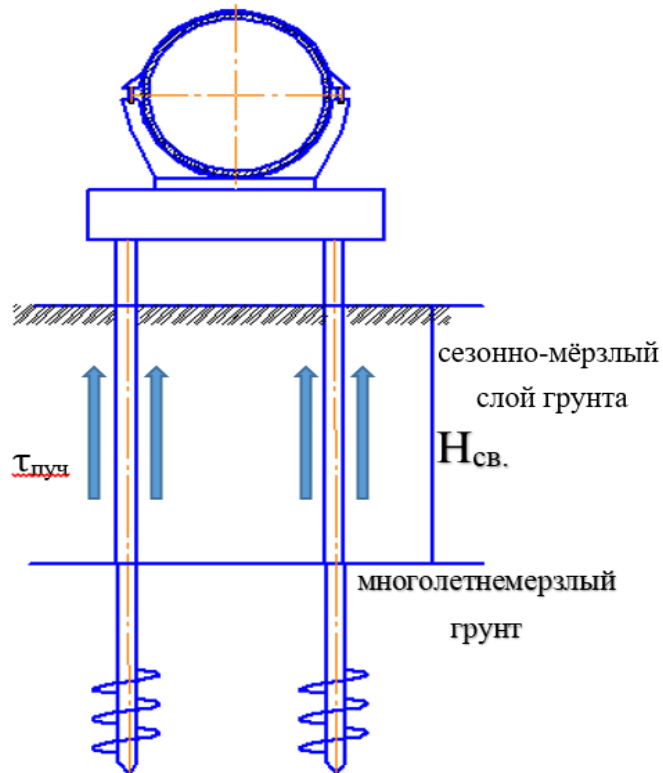


Рисунок 3.15 – Схема традиционной конструкции опоры надземного магистрального трубопровода, сооруженных в многолетнемерзлых грунтах

Разработанная конструкция опоры, представленная ниже не имеет аналогов в мировой практике, поскольку данная конструкция позволяет избежать любые воздействия морозного пучения грунта на магистральный трубопровод.

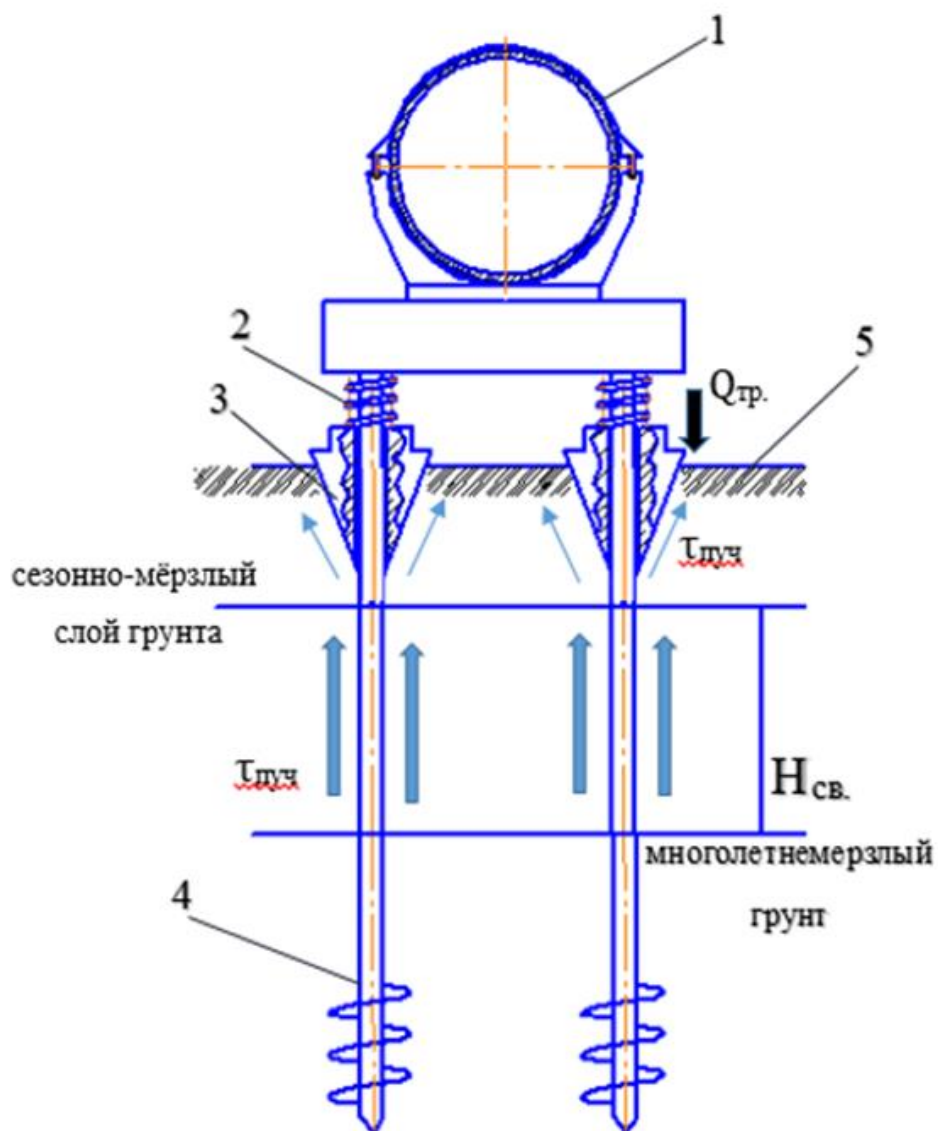


Рисунок 3.16 – Схема разработанной конструкции для обеспечения проектного положения трубопровода, сооруженного в многолетнемерзлых грунтах: 1 – трубопровод; 2 – демпфер; 3 – клин опоры; 4 – винтовая свая; 5 – пучинистый грунт

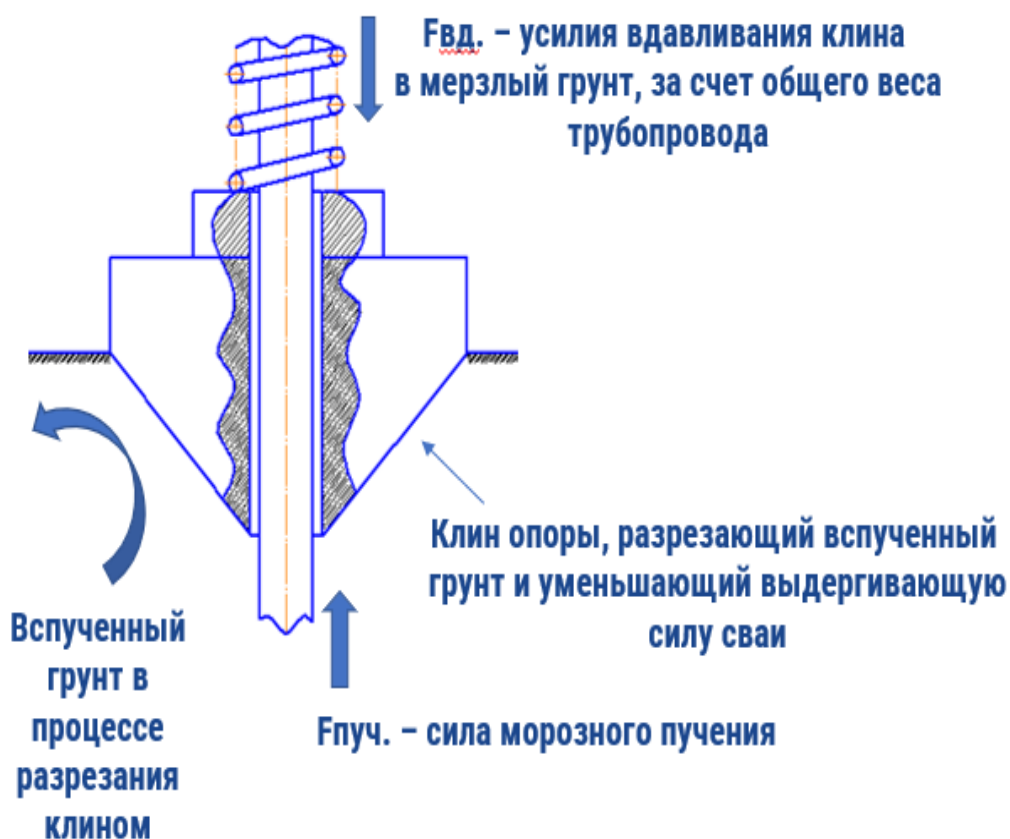


Рисунок 3.17 – Схема элементов конструкции опоры в разрезе

3.4 Выводы по главе 3

1. Проведен анализ традиционных опорных конструкций, используемых при эксплуатации надземных магистральных трубопроводов, построенных на долговременных мерзлых грунтах в областях обширного распространения. Также рассмотрены перспективные опоры, способные сократить риск возникновения деформаций трубопровода.

2. Предлагается изучить новые разработанные опорные конструкции надземных магистральных трубопроводов, включающие в себя несущую опорную плиту из железобетона с клином и пружинами, передающими нагрузку от ростверка к клину для обеспечения процесса разрушения вздутого мерзлого грунта.

ГЛАВА 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ ОПОРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

4.1 Экспериментальная апробация разработанных конструкций для подтверждения эксплуатации опор в многолетнемерзлых грунтах при воздействии сил морозного пучения

В рамках исследования устойчивости разработанных конструкций опор при отрицательных температурах была проведена серия испытаний на разрезание согласно ГОСТ 12248.4 - 2020 и ударную вязкость по методу компрессионного сжатия в соответствии с ГОСТ 12248.4 - 2020. В качестве образцов для испытаний на разрушения были изготовлены нестандартные испытательные образцы по ГОСТ 13015-2012, изготовленные из железобетона механическим способом. Испытания проводились на разрывной машине MTS Insight Testing Systems - 200 kN при температуре образца, равной температуре многолетнемерзлого грунта со сплошным распространением от - 4°С до - 10°С, а также образцы, выдержанные в холодильнике, охлаждались в течение двух суток [2, 33-34, 35-36].

Экспериментальная установка (рисунок 4.1) моделирует нагрузки от воздействий сил морозного пучения грунта на конструкцию опоры, и подтверждает преимущество разработанных опор путем разрезания мерзлого грунта клином. 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), торф (район г. Новый Уренгой). Содержание глины в суглинке составило 20 % [113-115, 143,133-134].

Для проведения эксперимента по разрезанию материалов необходимо следовать определенной последовательности действий. Сначала производится насыщение водой суглинков, песка и торфа [144]. Затем взвешивается масса грунта на электронных весах и далее грунты смешиваются с водой в соотношении 15% от общего объема грунта (Рисунок 4.1) [145-147]. В качестве емкости для грунтов в

процессе эксперимента взят кусок трубы. Образцы грунтов помещаются в стальную трубу диаметром 350 мм при толщине 350 мм и длиной 700 мм. Затем емкость с образцом помещается в холодильник для достижения необходимой температуры замерзания. После этого образец оставляют в холодильнике на 48 часов для замерзания. Сообщалось, что в зонах сплошного распространения многолетнемерзлых пород температура грунта колеблется от $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, и при такой температуре почва в поле будет вспучиваться быстрее всего естественным путем. Поэтому в качестве экспериментальных температур был выбран диапазон: $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Характеристики грунта представлены в таблице 4.1 при температуре грунта $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. После процесса замерзания определяли характеристики образцов. Для определения характеристик грунта использовали (рисунок 4.2) установку для компрессионных испытаний грунта, где определяется параметр деформации грунтов; стабилومتر для стабилметрических испытаний, применяемый для исследования механических свойств грунта в условиях трёхосного сжатия; установку для испытания мерзлого грунта методом одноплоскостного среза по поверхности смерзания, который позволяет определить прочность и показатель деформируемости; колба с мензуркой и весами для определения физических свойств грунта. Затем образец помещали в холодильную камеру пресса (Рисунок 4.3) и устанавливали необходимую температуру для поддержания чистоты эксперимента. Далее пресс давил на клин, поскольку данный процесс можно условно считать статическим из-за того, что вспучивание происходит достаточно медленно, поэтому нагрузка подавалась равномерно с перемещениями в 1 мм. Данное перемещение моделирует реальные условия степени процесса пучения грунта.

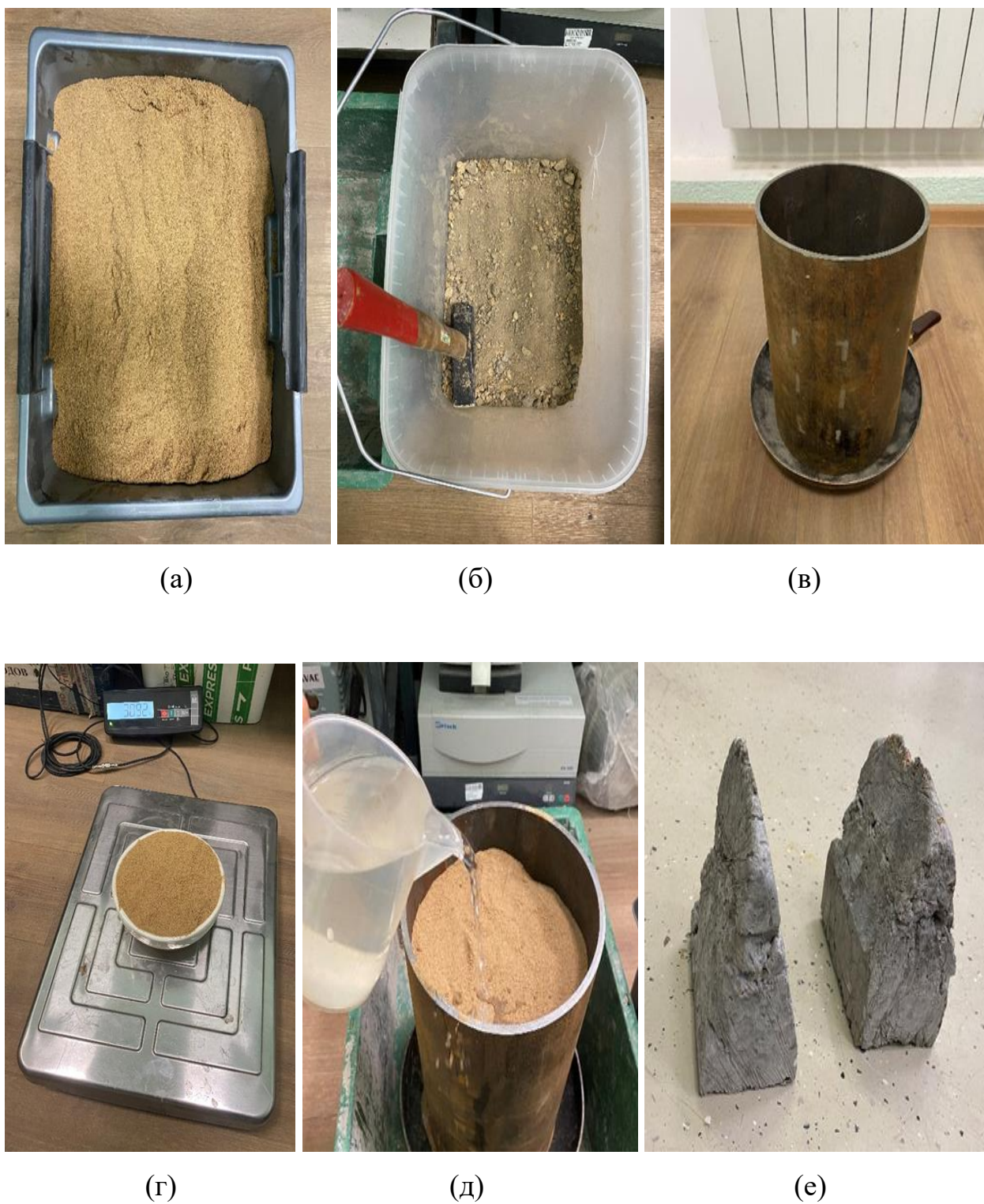


Рисунок 4.1 – Образцы и материалы для испытаний: а — песок; б — суглинок; в — кусок трубы; г — электронные весы; д — грунт с водой; е — железобетонные клинья с различными углами скоса.

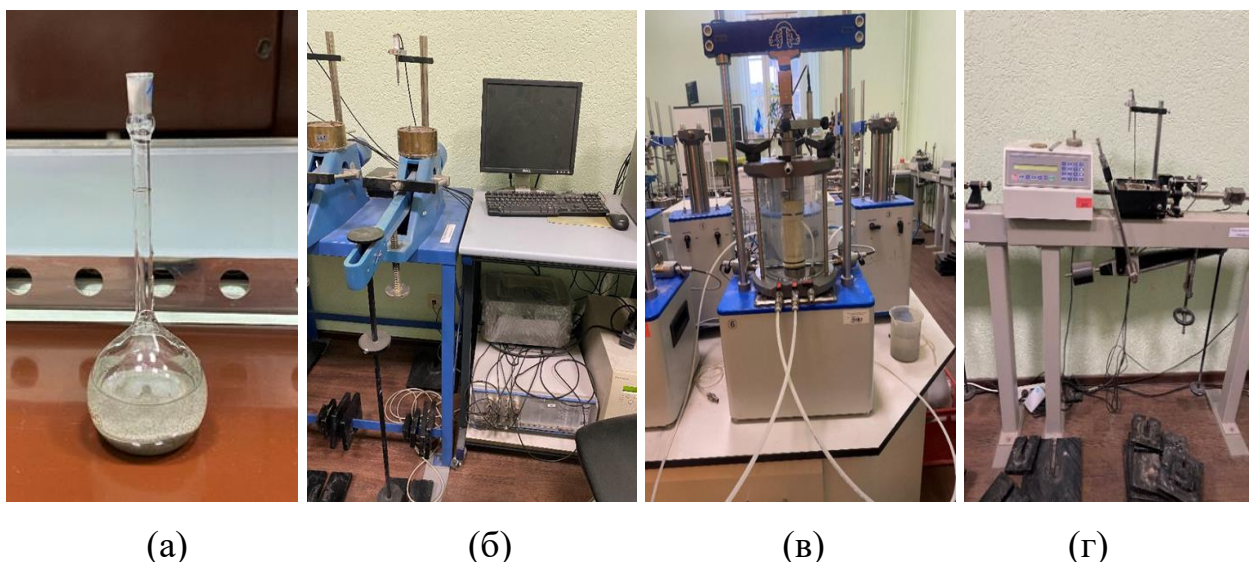


Рисунок 4.2 – Контрольно-измерительные приборы для определения характеристик мерзлого грунта: а — колба; б — установка для испытания мерзлого грунта методом одноплоскостного среза по поверхности смерзания; в — стабилометр; г — установка для компрессионных испытаний грунта.

Таблица 4.1 Характеристики мерзлого вспученного грунта при температуре - 10 °С

Характеристики мерзлого грунта	Модуль деформации, МПа	Коэффициент Пуассона	Сцепление, кПа	Угол внутреннего трения	Удельный вес грунта, кН/м ³	Коэффициент пористости, д.ед.
Торф	10	0,38	30	19	26.09	0,65
Суглинок	12	0,32	45	15	26.87	0,65
Песок	9	0,21	24	13	26.48	0,65



(a)



(б)



(в)



(г)

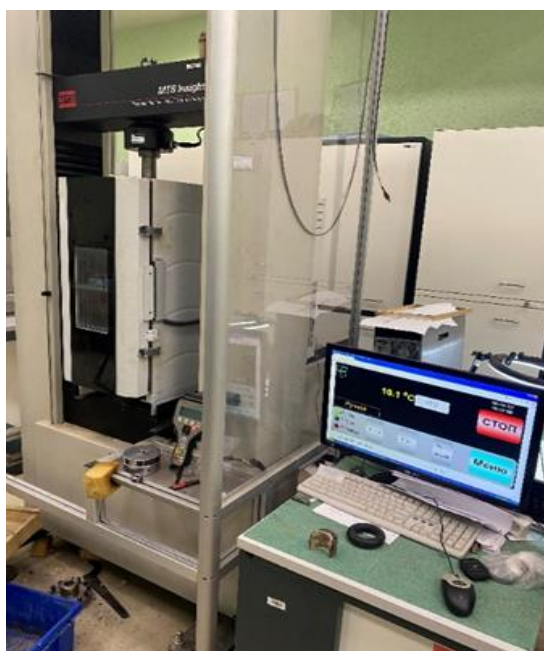
Рисунок 4.3 – Холодильники для замораживания грунта: а — холодильник для менее низких температур; б — холодильник для более низких температур; в — значение температуры для опытов при $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$; б — значение температуры для опытов от $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Для проверки эффективности конструкции опоры был создан специальный экспериментальный стенд. Этот стенд имитирует нагрузку на опорную плиту, закрепленную в грунте, для поддержания трубопровода. Стенд состоит из подвижного пресса с холодильной камерой, давящего на плиту, для моделирования нагрузки от трубопровода. Рядом с прессом установлен стационарный персональный компьютер (ПК), чтобы задавать необходимое значение напряжения разрушения и температуру разрушающего грунта. Под нагружающим прессом установлена опорная плита с клином. Опорная плита уменьшенных размеров имитирует реальную опорную плиту. Значение ее перемещения контролируется с помощью ПК. Клин опорной плиты соприкасается с мерзлым грунтом.

Основной целью стендовых испытаний является подтверждение уменьшения нагрузки морозного пучения грунта на опору трубопровода, которая снизит негативное влияние на трубопровод.

Для проведения эксперимента использовалась опорная плита из железобетона с клином с различными углами скоса 30, 45 и 60 градусов, площадью 150×80 мм и длиной 170 мм. Бетон марки М500, поскольку считается наиболее прочным при строительстве железобетонных конструкций. Также был задействован стальной пресс с холодильной камерой, два холодильника для замораживания, включая грунты различного типа (торф, глина, суглинок) и металлический кусок трубы диаметром 350 мм и длиной 500 мм. В качестве допущений клин отпускается в грунт за счет давления пресса 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 опорную плиту с клином, вызывая ее вертикальное перемещение в сторону мерзлого грунта на 1 мм.

Также во время эксперимента был выявлен оптимальный угол железобетонного клина. 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 смещений клина опоры. Экспериментальная установка (Рисунок 4.4) моделирует нагрузки от воздействий сил морозного пучения грунта на конструкцию опоры, и подтверждение работы конструкции путем разрезания клином опоры мерзлого вспученного грунта.



(a)



(б)

Рисунок 4.4 – Экспериментальная установка с встроенной холодильной камерой: а — пресс с закрытой холодильной камерой; б — пресс с открытой холодильной камерой

На рисунке 4.5 представлены разрушенные мерзлые грунты.

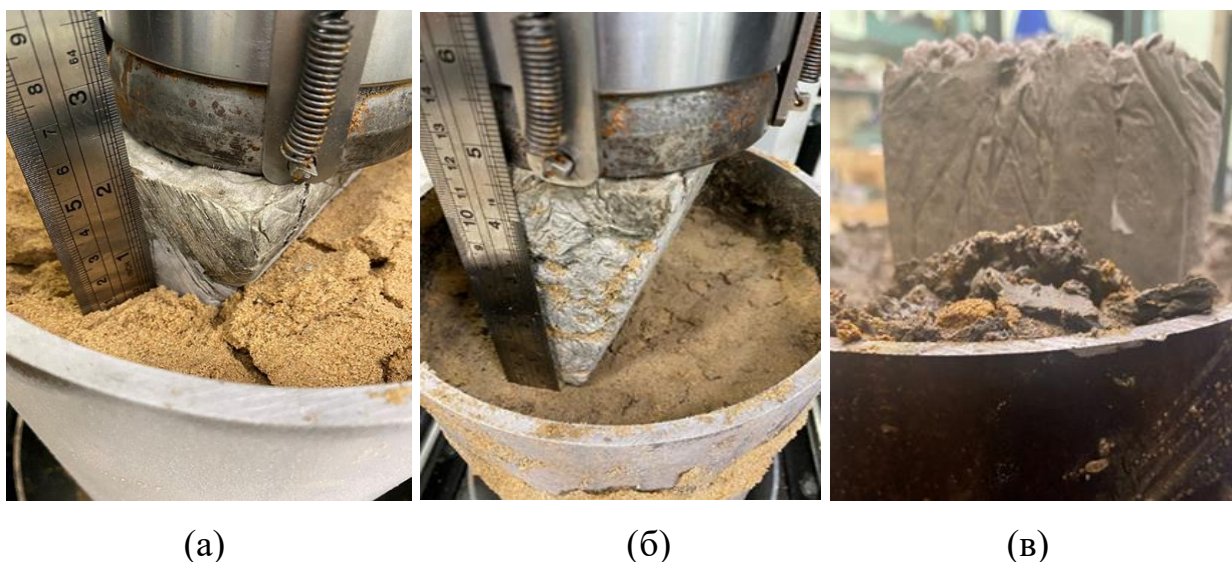


Рисунок 4.5 – Мерзлые грунты в состоянии напряжения разрушения: а — мерзлый песок; б — мерзлый суглинок; в — мерзлый торф

Результаты каждого измерения выводились на дисплей компьютера в виде графиков и значений. Графики зависимостей усилий вдавливания клина в мерзлые грунты от перемещений клина при максимальной низкой температуре $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, представлены на рисунке 4.6.

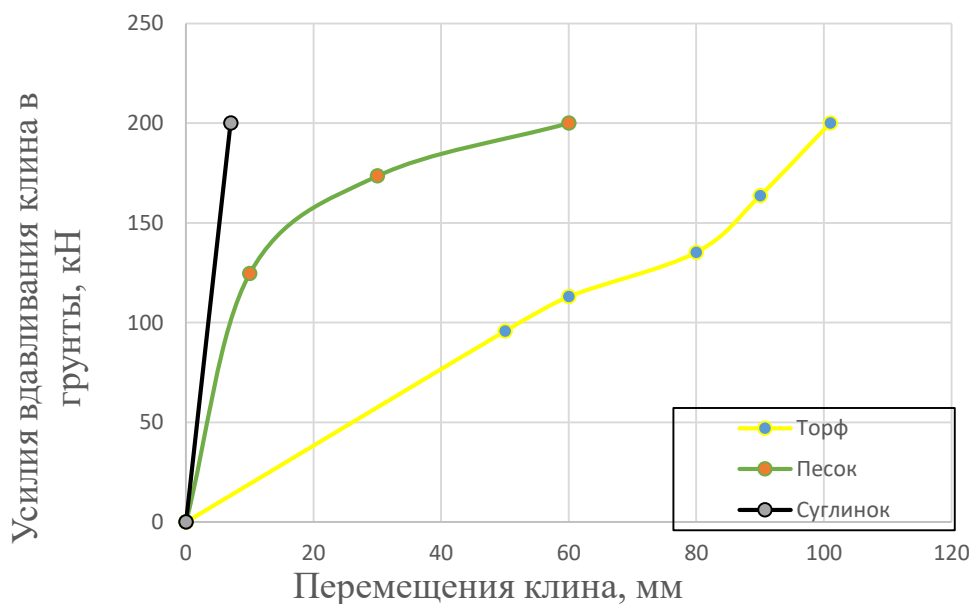


Рисунок 4.6 – Графики зависимостей усилий вдавливания клина в грунты от вертикального перемещения клина с углом скоса 60 градусов

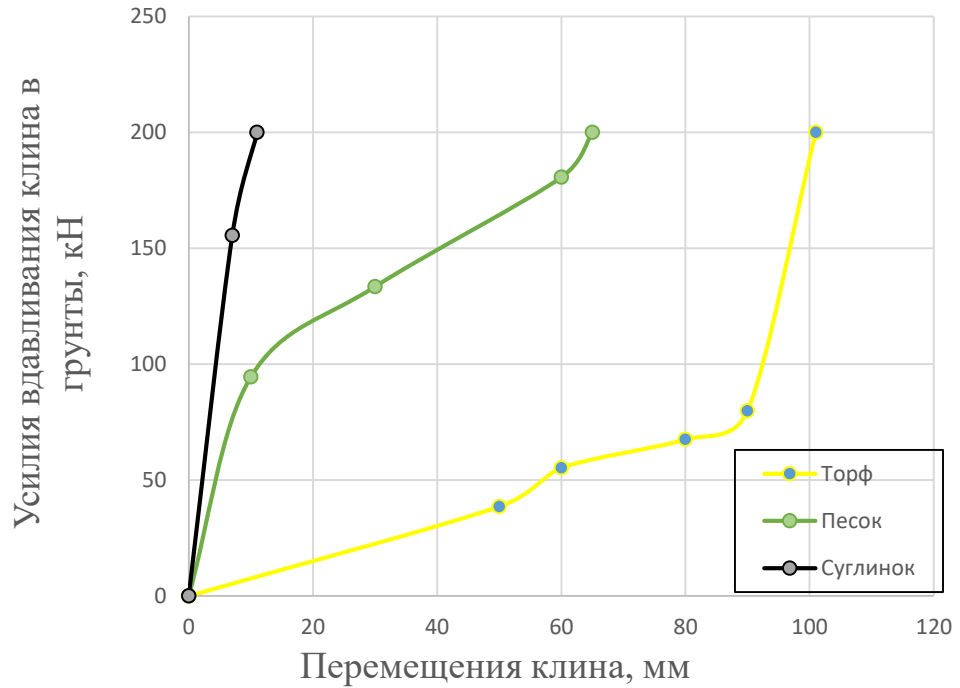


Рисунок 4.7 – Графики зависимостей усилий вдавливания клина в грунты от вертикального перемещения клина с углом скоса 45 градусов

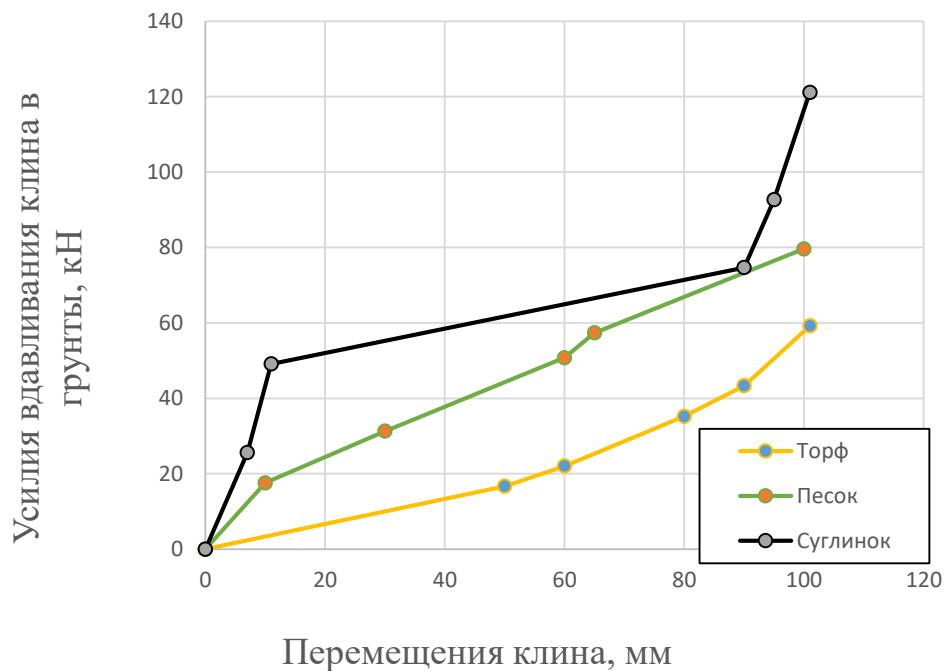


Рисунок 4.8 – Графики зависимостей усилий вдавливания клина в грунты от вертикального перемещения клина с углом скоса 30 градусов

Для расчета нагрузок, действующих на опору надземного трубопровода, определены усилия клина, при котором происходит разрезание вспученного грунта при воздействии сил морозного пучения.

4.2 Определение сходимости результатов расчета на основе предложенной экспериментальной модели с результатами конечно-элементного моделирования процесса резания вспученного грунта.

В этом разделе представлена конечно-элементная модель процесса резания мерзлого грунта в программном обеспечении PLAXIS.

Для данной цели мы разрабатываем трехмерную модель основы с нагрузкой, пересекающей надувной замерзший грунт. Вычисления проводились в модуле Мора-Кулона. Этот модуль представляет собой математическую модель, описывающую реакцию хрупких материалов, таких как бетон, на сдвиговое напряжение и нормальное напряжение. По результатам естественного опыта использовали свойства грунтов для первоначальных данных моделирования основы с замерзшим грунтом (рисунок 4.7) [105].

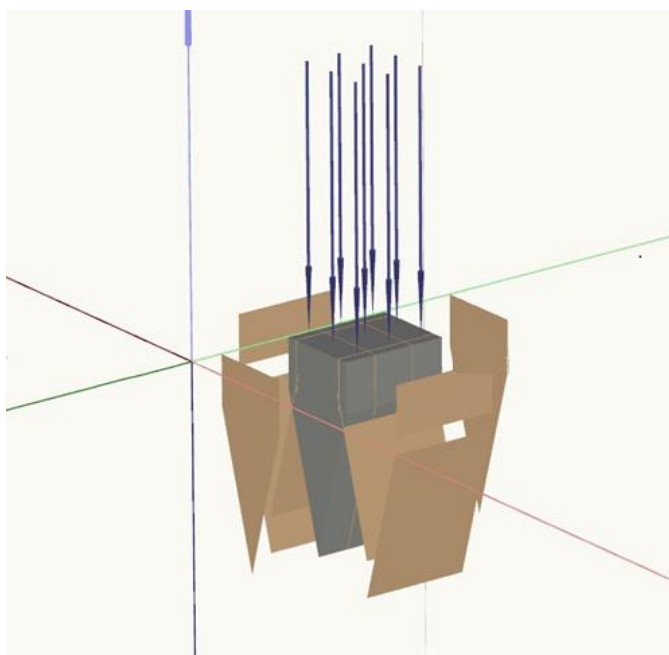


Рисунок 4.9 – Модель нагруженной опорной плиты, разрезающей вспученный мерзлый грунт. Параметры модели: длина -150 мм, ширина – 80 мм, высота – 170 мм, угол клина - 30 градусов

Разрушение грунта - это изменение его структуры под воздействием относительного сдвигового напряжения, достигающего 1 (обозначено красным цветом) по всем боковым граням, что приводит к разрыву грунта, как это показано на иллюстрациях 10-12.

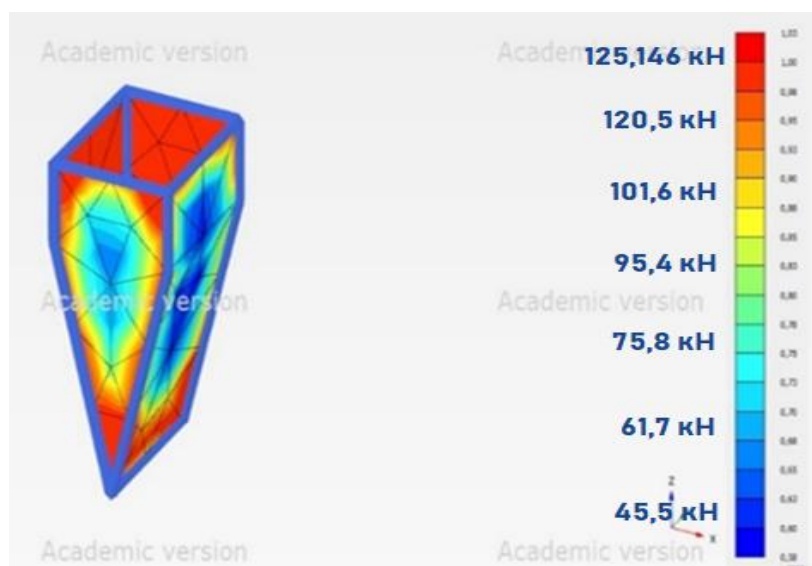


Рисунок 4.10 – Распределение эквивалентных напряжений клина при наиболее вероятном случае резания вспученного мерзлого суглинка при воздействии сил морозного пучения грунта при температуре $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$

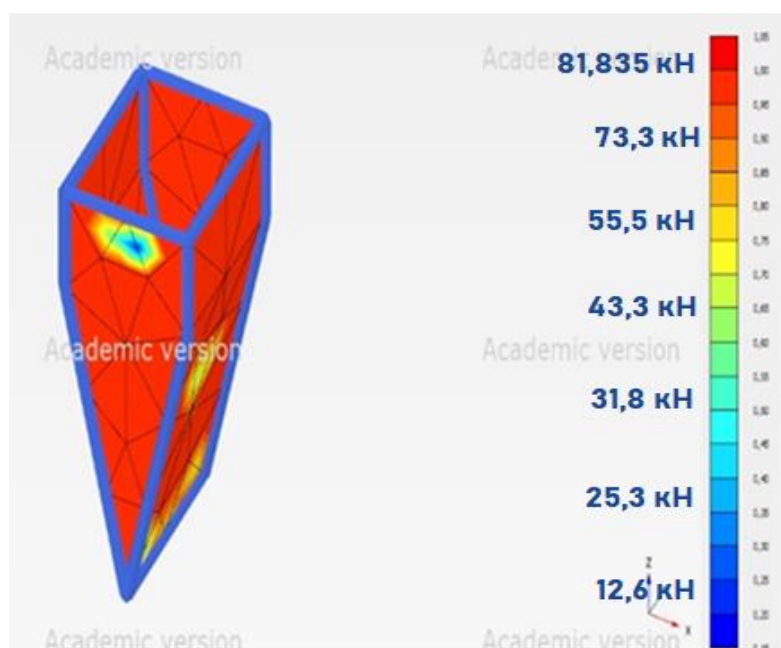


Рисунок 4.11 – Распределение эквивалентных напряжений клина при наиболее вероятном случае резания вспученного мерзлого песка при воздействии сил морозного пучения грунта при температуре $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$

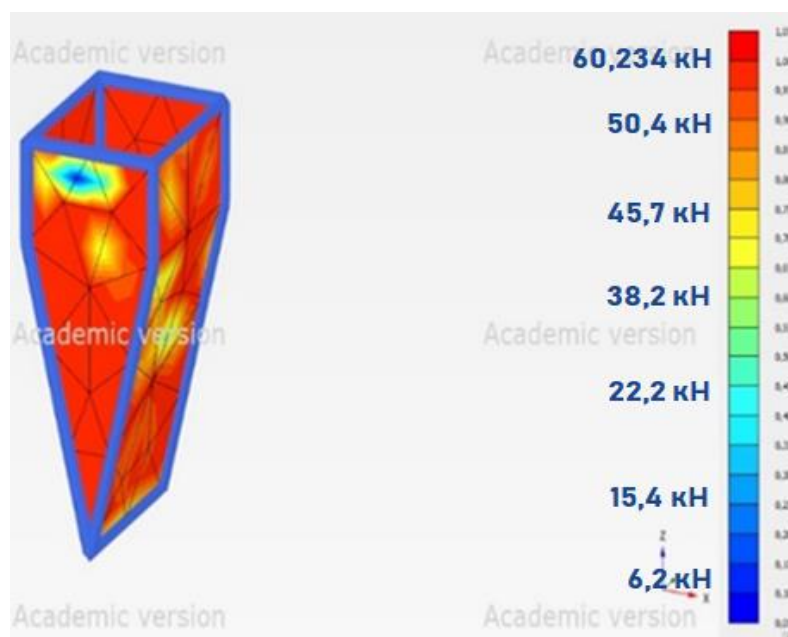


Рисунок 4.12 – Распределение эквивалентных напряжений клина при наиболее вероятном случае резания вспученного мерзлого торфа при воздействии сил морозного пучения грунта при температуре $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$

Для проверки функциональности математической модели, используемой для расчета опорной плиты в программе Plaxis, производилось сопоставление результатов разработанной модели конечных элементов с данными экспериментальных измерений по фактическим перемещениям опорной плиты, заданным с помощью ПК (см. таблицу 4.2).

Таблица 4.2 – Результаты проверки работоспособности расчетной модели

№ опыта	Температура мерзлого грунта, $^{\circ}\text{C}$	Тип мерзлого грунта	Силы разрушения грунта, кН	Перемещения прессы с клином, м
Результаты экспериментальных измерений (исходные данные – заданные фактические перемещения клина)				
1	- 4	торф	16,055	0,1014
		песок	17,084	0,1013
		суглинок	25,091	0,1019
2	- 5	торф	21,525	0,1016
		песок	30,768	0,1012
		суглинок	48,354	0,1022

Продолжение таблицы 4.2

№ опыта	Температура мерзлого грунта, °С	№ опыта	Температура мерзлого грунта, °С	№ опыта
Результаты экспериментальных измерений (исходные данные – заданные фактические перемещения клина)				
3	- 7	торф	34,753	0,1013
		песок	49,885	0,1014
		суглинок	73,975	0,1029
4	- 8	торф	42,638	0,1012
		песок	56,868	0,1015
		суглинок	91,668	0,1033
5	-10	торф	58,644	0,1011
		песок	78,646	0,1012
		суглинок	119,146	0,1051
Результаты расчета в конечно-элементной модели PLAXIS (исходные данные – заданные фактические перемещения клина)				
1	- 4	торф	16,695	0,1014
		песок	17,584	0,1013
		суглинок	25,991	0,1019
2	- 5	торф	22,025	0,1016
		песок	31,568	0,1012
		суглинок	50,033	0,1022
3	- 7	торф	35,522	0,1013
		песок	51,473	0,1014
		суглинок	75,665	0,1029
4	- 8	торф	44,357	0,1012
		песок	58,832	0,1015
		суглинок	94,948	0,1033
5	-10	торф	60,234	0,1011
		песок	81,835	0,1012
		суглинок	125,146	0,1051

Из результатов верификационных расчетов следует, что надежность предложенной конструкции надземной опоры трубопровода (опорной плиты с клином) подтверждается высокой схожестью модели с экспериментальными измерениями. Условия выбраны таким образом, чтобы исключить возможность смещения конструкции опоры, что способствует повышению безопасности эксплуатации надземного магистрального трубопровода и потенциально увеличивает срок службы трубопроводов за счет снижения напряжений в местах крепления трубопровода опорой (таблица 4.3).

Таблица 4.3 – Оценка сходимости моделирования с натурным экспериментом

Температура мерзлого грунта, °С	Тип мерзлого грунта	Усилия вдавливания клина в 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
	песок	30,768	31,568	8,2
	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

По полученным данным можно сделать вывод, что погрешность между двумя измерениями минимальна и удовлетворяет условиям достоверности полученных результатов.

В ходе экспериментальных и численных расчетов обнаружено, что напряжение разрушения грунта начинает возрастать при понижении температуры грунта.

Таким образом, для обеспечения стабильной устойчивости трубопроводов при надземной прокладке в тех случаях, когда происходит морозное пучение, конструкция опоры должна разрезать мерзлый вспученный грунт.

Расчеты для созданной модели опорной плиты с мерзлым грунтом показывают возможность использования в качестве основания надземной опоры железобетонной плиты с острой кромкой (при наличии долговечных мерзлых грунтов). Для предотвращения смещения опоры и образования разрывов надземных магистральных трубопроводов во время морозного увеличения объема предлагается разрубить мерзлый вспученный грунт путем установки клинообразной нижней части новой конструкции опоры, утопленной в грунт при ее возведении.

Взаимодействие различных факторов, включая температуру, морозное растяжение, тип грунта и прогнозируемые изменения в грунте в зависимости от климатических условий региона, может привести к образованию вспучиваний, смещению опоры и повреждению надземной магистральной трубопроводной системы и конструкции опоры.

Необходимо учитывать разнообразные типы грунтов с различными степенями морозного увеличения объема при выборе нагрузки на опорную плиту, чтобы достичь эффекта резания вспученного грунта. Для этого требуется определить расчетную нагрузку на клин опорной плиты.

4.3 Оценка критических напряжений инициации резания мерзлого грунта клином опоры на основе экспериментальной модели

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 (рисунок 4.13 - 4.15).

Критические напряжения инициации резания мерзлого грунта представлены с положительным знаком на модели по всей площади деформации грунта (таблица 4.4).

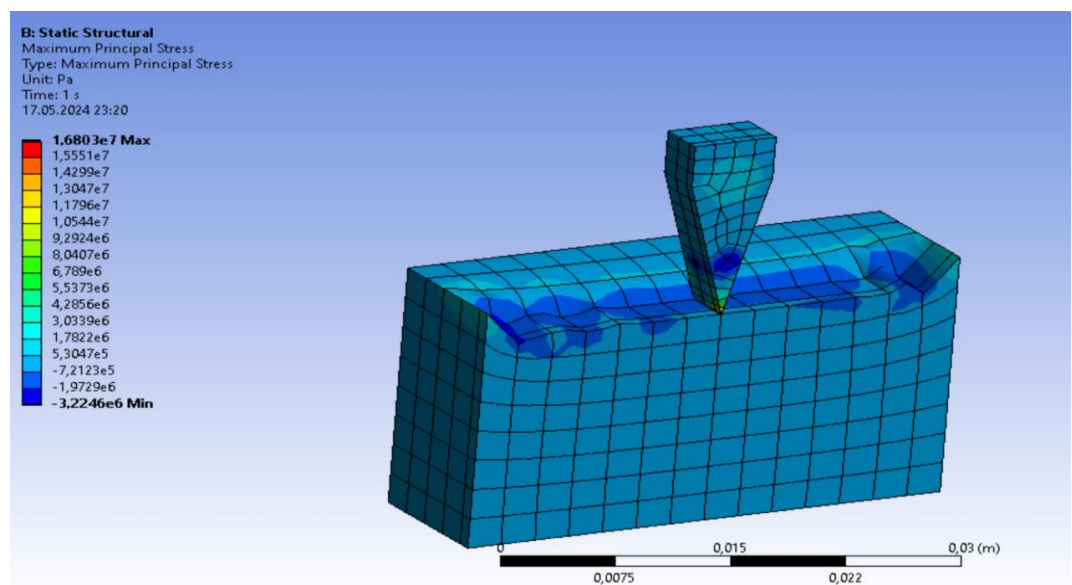


Рисунок 4.13 – Распределение критических напряжений инициации резания мерзлого торфа клином опоры при температуре $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$

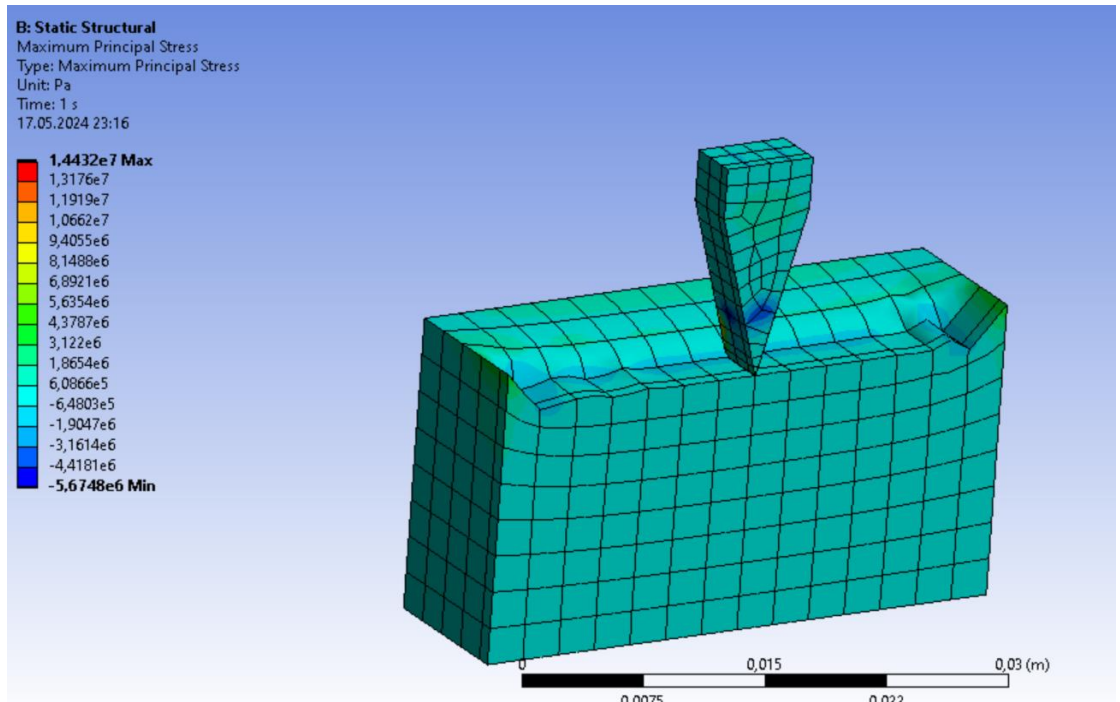


Рисунок 4.14 – Распределение критических напряжений инициации резания мерзлого песка клином опоры при температуре $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$

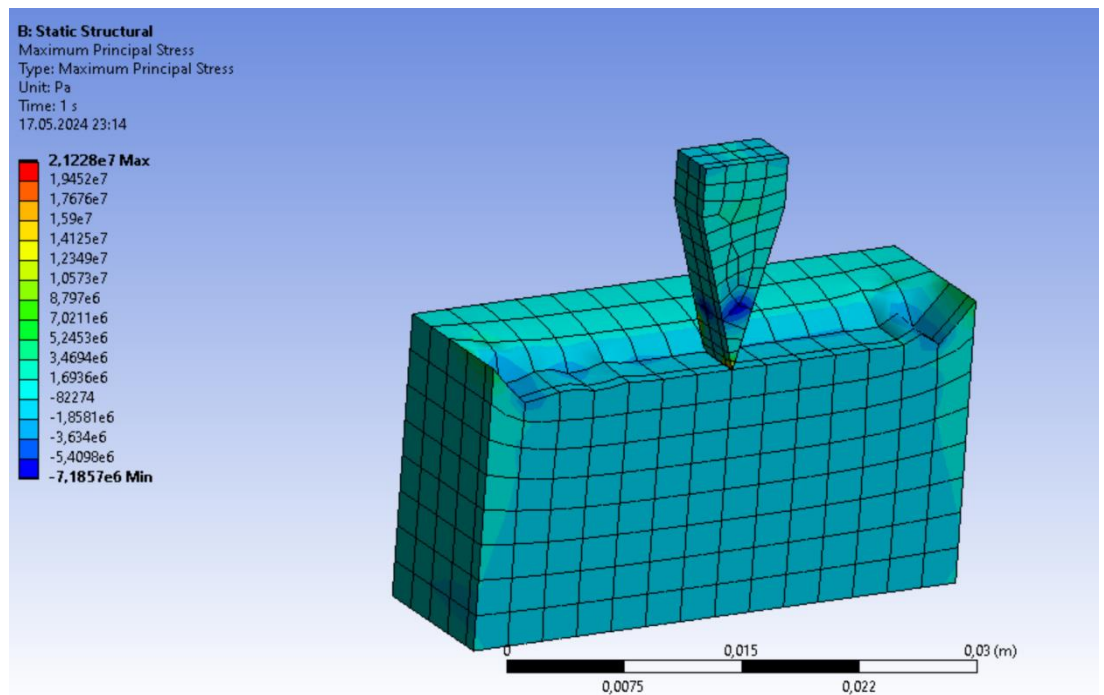


Рисунок 4.15 – Распределение критических напряжений инициации резания мерзлого суглинка клином опоры при температуре $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$

Таблица 4.4 – 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

По полученным данным можно сделать вывод, что при понижении температуры грунта в интервале от – 4 °С до – 10 °С 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.

4.4 Выводы по главе 4

1. Расчеты для разработанной модели клина опоры мерзлым грунтом были проведены на основе экспериментальных данных, определяющих зависимость от нагрузки мерзлого грунта. Выявлено, что при понижении температуры грунта в интервале от – 4 °С до – 10 °С увеличиваются напряжение усилия вдавливания клина в грунт. Поэтому для эффективного резания грунта

клином опоры необходимо повышать нагрузку от трубопровода при понижении температуры грунта.

2. В результате экспериментальных данных при угле скоса клина 30 градусов затрачиваются меньшие усилия вдавливания в грунт, чем при углах скоса 45 и 60 градусов, которые выражались в виде полученных осевых перемещений клина.

3. Результаты проведенного моделирования и эксперимента показали хорошую сходимость, что подтверждает потенциал для успешного применения разработанной конструкции опоры надземного магистрального трубопровода в целях сохранения проектного положения при воздействии сил морозного пучения грунта.

4. Результаты численного моделирования инициации резания мерзлого грунта клином опоры позволяют оценить критические напряжения в грунте. Выявлено, что при понижении температуры грунта увеличиваются критические напряжения, возникающие в моменте инициации резания мерзлого грунта клином опоры.

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 проведенного исследования были разработаны новые конструкции опор и способ защиты несущей опорной конструкции надземного магистрального трубопровода от воздействий сил морозного пучения грунта, включающий в себя предварительное строительство опор исходя из данных характеристик грунта и климатических условий, а также изготовленного из железобетона клина и пружинного демпфера опоры, где условия выбираются таким образом, что позволяют исключить возможность смещения конструкции опоры, что способствует повышению безопасности эксплуатации надземного магистрального трубопровода и потенциально способствует увеличению срока службы трубопроводов за счет снижения напряжений в местах крепления трубопровода опорой. Кроме того, предварительное получение информации о характеристиках грунтов также способствует повышению устойчивости опоры (Патент РФ № RU 2785329).

Разработаны опоры надземного магистрального трубопровода, сохраняющие устойчивость самой опоры при воздействии на нее сил морозного пучения, что способствует сохранению проектного положения трубопровода, закрепленного на этих опорах (Патент РФ № RU 2781733), (Патент РФ № RU 216684), (Патент РФ № RU 216414).

В результате теоретического исследования особенностей эксплуатации надземного трубопровода при условии морозного пучения грунта был разработан алгоритма расчета подбора опор надземных магистральных трубопроводов при условиях морозного пучения (Свидетельство о государственной регистрации

программы для ЭВМ № 2023663247). Было проведено исследование подходов к экспериментальной оценке напряжений на надземный магистральный трубопровод, транспортирующего нефть и газ.

Предлагаемый к применению в качестве несущего материала конструкция опоры обладает значительно высокой устойчивостью с способностью снизить напряжения на трубопровод при воздействии сил морозного пучения. Таким образом, достигается снижение напряжений по всему линейному участку надземного трубопровода. Кроме того, в работе обосновано применение разработанной конструкции опоры, доказана, что путем увеличения нагрузки трубопровода на железобетонный клин опоры можно добиться эффекта резания мерзлого грунта, путем соотношения между грунтом и нагрузкой трубопровода.

В результате экспериментальных исследований выявлено повышение устойчивости новой конструкций опоры при разрезании грунта (критичные напряжения разрушения мерзлого грунта) при выдержки образцов в среде низких температур в течение двух суток, что также говорит о потенциальной применимости новой конструкций опор в осложненно-климатических условиях, таким образом, расширяя возможности применения указанных опор. Повышение устойчивости опор происходит в связи с применением в качестве несущих опорных элементов из материала железобетона и в форме острой кромки, повышения прочности элемента опоры с мерзлым грунтом взаимодействия и разрушения грунта за счет нагрузки трубопровода на опору, что приводит к выводу о том, что для активации процесса разрушения грунта требуется большая нагрузка при криогенных температурах и определенная форма железобетонного элемента опоры. В результате это приводит как к росту показателей устойчивости опоры, так и сохранение проектного положения трубопровода.

Было проведено исследование подходов к экспериментальной оценке усилий вдавливания в грунт элемента разработанной опоры надземного трубопровода. Предложенная адаптация натуральных экспериментов показывает хорошую сходимость с результатами компьютерного моделирования (Относительная

погрешность составила не более 9,4 %). Критичные напряжения, возникающие в грунте, как ответная реакция на действующие нагрузки позволяет разрезать мерзлый грунт, полученные экспериментально.

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 грунтов.

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 моменте 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 выдергивающая сила сваи с клином, которая будет меньше вертикальной выдергивающей 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абжалимов, Р.Ш. Определение расчетных значений распределения отрицательной температуры в грунтах по глубине промерзания // Развитие городов и геотехническое строительство. – 2007. – Т.2. – № 11. – С. 204–210.
2. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – 2-е издание, переработанное и дополненное; Российская государственная библиотека. – Москва: 1976. – 280 с.
3. FAS.GOV.RU: средства массовой информации: сайт. – Москва, 2006 – . – URL: <https://fas.gov.ru> (дата обращения: 25.05.2024). – Режим доступа: для зарегистрир. пользователей. – Текст: электронный.
4. Аладинский, А. Ю. Ранжирование по срокам вывода в ремонт опорно-ригельной части участков надземных трубопроводов, проложенных в районах многолетнемерзлых грунтов / А. Ю. Аладинский, В. Е. Грязин, М. В. Чубунов // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2014. – № 2(42). – С. 34-37.
5. Алексеева, А.С., Тышкевич А.В., Черныховский Б.А. Строительство на мерзлых грунтах // Актуальные вопросы технических наук в современных условиях: сб. науч. тр. в по итогам междунаод. науч.-практ. конф. СПб.: Инновационный центр развития образования и науки, 2016. С. 82-84.
6. Александров, А.А. Компьютерная оценка ресурса прочности магистральных нефтепроводов на участках трасс со структурно неустойчивыми грунтами при температурных перепадах / А.А. Александров, В.И. Ларионов, В.А. Котляревский, Я.Р. Идрисова // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2011. – № 4(86). – С. 40–46.
7. Александров, А.А. Математическое моделирование напряженнодеформированного состояния магистрального трубопровода с учетом наличия крутоизогнутых вставок / А.А. Александров, Ю.В. Лисин, В.И. Ларионов

// Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана: Естественные науки. – 2012. – № 4(47). – С. 103–116.

8. Александров, А.А. Моделирование напряженно-деформированного состояния подземного трубопровода на участках сложных геологических условий / А.А. Александров, В.И. Ларионов, С.П. Суцев // Безопасность в техносфере. – 2012. – № 6. – С. 13–19.

9. Алешин, В.В. Численный анализ прочности подземных трубопроводов / В.В. Алешин, В.Е. Селезнев, Г.С. Клишин [и др.]; под ред. В.В. Алешина, В.Е. Селезнева. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 320 с.

10. Аладинский, А. Ю. Ранжирование по срокам вывода в ремонт опорно-ригельной части участков надземных трубопроводов, проложенных в районах многолетнемерзлых грунтов / А. Ю. Аладинский, В. Е. Грязин, М. В. Чубунов // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2014. – № 2(42). – С. 34-37.

11. Андреев, А.А. Анализ перспективы строительства магистрального газопровода «Сила Сибири» в условиях сейсмичности и вечномерзлых грунтов / А.А. Андреев // Молодой ученый. – 2015. – №10 (90). – С. 134–139.

12. Андреев, А.А. Природные условия строительства участка магистрального газопровода «Сила Сибири» / А.А. Андреев // Вестник магистратуры. – 2016. – №3-1 (54). – С. 22–29.

13. Андреева, Е.В. Выбор технических решений по прокладке нефтепровода ВСТО на участках с опасными инженерно-геологическими процессами / Е.В. Андреева, Г.Р. Габелая, А.А. Чичиринов // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2007. – № 4(10). – С. 28–31.

14. Анисимов, В.В., Криницын М.И. Строительство магистральных трубопроводов в районах вечной мерзлоты / В.В. Анисимов, М.И. Криницын – Гос. научно-техн. изд-во нефтяной горно-топливной литры, 1963. – 147 с.

15. Атлас природных и техногенных опасностей и рисков чрезвычайных ситуаций. Российская Федерация / МЧС России; под общ. ред. С.К. Шойгу. – М.: Дизайн. Информация. Картография, 2010. – 696 с.

16. Арабский, А.К. Инженерно-геологические изыскания и надежность закрепления трубопроводов / А.К. Арабский // Строительство предприятий нефтяной и газовой промышленности. Экспресс - информация. Сер. – Линейное трубопроводное строительство. – М.: ВНИИСТ, 1987. Вып. 6. – С. 10–14.

17. Бабин, Л.А. Типовые расчеты по сооружению трубопроводов / Л.А. Бабин, Л.И. Быков, В.Я. Волохов. – М.: Недра, 1979. – 176 с.

18. 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.

19. 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.

20. Бахтизин, Р.Н. Напряженно-деформированное состояние и оценка прочности трубопровода, составленного из кривых вставок, с учетом воздействия на трубу внутреннего рабочего давления и температурных напряжений [Эл. ресурс] / Р.Н Бахтизин, Р.Б. Масалимов, Р.М. Зарипов, К.Р. Зарипова // ЭНЖ «Нефтегазовое дело» / УГНТУ. – Уфа, 2013. – № 5. – С. 207–243.

21. Баясан, Р.М. Технология и технические средства термостабилизации мерзлых грунтов оснований магистральных и промысловых трубопроводов в криолитозоне / Р.М. Баясан, С.И. Голубин // Инженерные изыскания. – 2012. – № 7. – С. 64–69.

22. Баясан, Р.М. Технология и технические средства термостабилизации мерзлых грунтов оснований магистральных и промышленных трубопроводов в криолитозоне / Р.М. Баясан, С.И. Голубин // Инженерные изыскания. – 2012. – № 7. – С. 64–69.

23. Быков, Л.И. Типовые расчеты при сооружении и ремонте газонефтепроводов: учеб. пособие / Л.И. Быков, Ф.М. Мустафин, С.К. Рафиков [и др.]. СПб.: Недра, 2006. – 824 с.

24. Васильчук, Ю. К. Миграционные бугры пучения на севере Западной Сибири: южный и северный пределы ареала и современная динамика / Ю. К. Васильчук, А. К. Васильчук, Н. А. Буданцева, Ю. Н. Чижова // Инженерная геология. – 2012. – № 3. – С. 18-32.

25. SGROUND.RU: информационный сайт: сайт. – Новосибирск, 2018 – . – URL: <https://sground.ru> (дата обращения: 16.11.2023). – Режим доступа: для зарегистрир. пользователей. – Текст: электронный.

26. ВСН 221-87. Ведомственные строительные нормы по закреплению трубопроводов вмораживаемыми стержневыми анкерами на вечномерзлых грунтах (для опытно-промышленных участков). – М.: ВНИИСТ, 1987. – 16 с.

27. Гаррис, Н. А. Проблемы трубопроводного транспорта углеводородов в условиях мерзлоты и пути их решения / Н. А. Гаррис, О. Ю. Полетаева, Т. А. Бакиев // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2020. – № 3. – С. 64-67.

28. Гаррис, Н. А. Учет степени техногенного воздействия подземных трубопроводов на теплопроводность вмещающих мерзлых грунтов / Н. А. Гаррис, А. И. Русаков // Нефтегазовое дело. – 2020. – Т. 18, № 6. – С. 99-106.

29. Гаррис, Н. А. Борьба с буграми пучения / Н. А. Гаррис, Э. А. Закирова // Нефтегазовое дело. – 2017. – Т. 15, № 2. – С. 73-78.

30. Гаррис, Н. А. О постановке задач регулирования ореола протаивания вокруг трубопровода в районах распространения мерзлоты / Н. А. Гаррис, Э. А. Закирова // Территория Нефтегаз. – 2017. – № 1-2. – С. 100-106.

31. Гаррис, Н. А. Оценка экологического риска в зонах воздействия магистрального нефтепровода на многолетнемерзлые грунты / Н. А. Гаррис, Э. А. Закирова, Л. Д. Шарипова // 65-я научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ, Уфа, 23–24 апреля 2014 года / Редакционная коллегия: Том Книга 2. – Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2014. – С. 179.

32. Горохов, Е.Н. Обеспечение экологической безопасности нефтепровода «Восточная Сибирь – Тихий Океан» на участках, проложенных многолетнемерзлых грунтах / Е.Н. Горохов, Е.В. Копосов, С.В. Соболев, В.И. Ларионов [и др.] // Приволжский научный журнал. – 2011. – № 3(19). – С. 158-164.

33. ГОСТ 24846–2012. Межгосударственный стандарт измерений деформаций оснований зданий и сооружений; введ. 01.07.2013. – М.: Стандартиформ, 2014. – 22 с.

34. ГОСТ 25100–2011. Межгосударственный стандарт классификации скальных грунтов; введ. 01.01.2013. – М.: Стандартиформ, 2013. – 42 с.

35. ГОСТ 12248.4-2020. Межгосударственный стандарт определения характеристик деформируемости методом компрессионного сжатия; введ. 14.10.2023. – М.: Стандартиформ, 2020. – 19 с.

36. ГОСТ 13015-2012. Межгосударственный стандарт изделий бетонных и железобетонных для строительства; введ. 01.01.2014. – М.: Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, 2012. – 28 с.

37. Гумеров, К.М. Безопасность трубопроводов при длительной эксплуатации / К.М. Гумеров, И.Ф. Гладких, Н.М. Черкасов [и др.]. - Челябинск: РАЕН, 2003. - 326 с.

38. Гумеров, А.Г. Безопасность длительно эксплуатируемых магистральных нефтепроводов / А.Г. Гумеров, Р.С. Гумеров, К.М. Гумеров. – М.: Недра, 2001. – 305 с.

39. Гумеров, А.Г. Расчет на прочность и выбор рациональных конструктивных решений прокладки подземных нефтепроводов на пересеченном

рельефе местности / А.Г. Гумеров, Р.С. Гаспарян // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2007. – № 4(10). – С. 26–27.

40. Гумеров, А.К. Определение и прогнозирование напряженно-деформированного состояния трубопровода с учетом грунтовых изменений в процессе эксплуатации / А.К. Гумеров, Р.М. Каримов, Р.М. Аскараров, Х.Ш. Шамилов // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2020. – №10(4). – С. 372–378.

41. Дементьев, А. В. Развитие трубопроводной системы / А.В. Дементьев // Трубопроводный транспорт нефти. – 2007. – № 6. – С. 30–31.

42. Дерцакян, А.К. Строительство трубопроводов на болотах и многолетнемерзлых грунтах / А.К. Дерцакян, Н.П. Васильев. – Л.: Недра, 1978. – 167 с.

43. Закирова, Э. А. Как избежать выпучивания опор надземных трубопроводов в районах пучинистых грунтов / Э. А. Закирова, Н. А. Гаррис // Нефтегазовое дело. – 2016. – Т. 14, № 2. – С. 85-92.

44. Зеленин, А. Н. Основы разрушения грунтов механическими способами / А. Н. Зеленин. – М.: Машиностроение, 1968. – 198 с.

45. Зотов, М.Ю. Опыт применения программных комплексов для расчета напряженно-деформированного состояния нефтепроводов, прокладываемых на вечноммерзлых грунтах / М.Ю. Зотов, И.В. Ушаков, И.Л. Димов, А.О. Олейникова // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2012. – № 2(6). – С. 61–65.

46. Иваницкая, Е.В. Опыт мониторинга уникального трансальпийского нефтепровода / Е.В. Иваницкая // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2011. – № 1 (1). – С. 96–101.

47. Карнаухов, Н.Н. Механика мерзлых грунтов и принципы строительства нефтегазовых объектов в условиях Севера / Карнаухов Н.Н. [и др.]. – М.: ЦентрЛитНефтеГаз, 2008. – 203 с.

48. Колоколова, Н.А. О выборе способа прокладки трубопроводов в районах вечной мерзлоты. / Н.А. Колоколова, Н.А. Гаррис // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2013. – №1. С. 13–17

49. Котляревский, В.А. Проверка прочности подземных трубопроводов в условиях дефицита информации по планово-высотному положению [Текст] / В.А. Котляревский, А.А. Александров, Ю.В. Ларионов // Известия вузов. Машиностроение. – 2012. – № 11. – С. 92–100.

50. Кудрявцев, С.А. Промерзание и оттаивание грунтов: практические примеры и конечно-элементные расчеты / С.А. Кудрявцев, И.И. Сахаров, В.Н. Парамонов. – СПб.: Геореконструкция, 2014. – 247 с.

51. Кумар, Б.К. Сооружение и ремонт нефтепроводов: Учеб. пособие. / Б.К. Кумар, Т.И. Иргйбаев – Алматы: КазНТУ имени К. И. Сатпаева, 2015. –375 с.

52. Ларионов, В.И. Анализ напряженно-деформированного состояния трубопровода на участках с карстами / В.И. Ларионов, А.К. Гумеров, П.А. Новиков // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер.: Машиностроение. - 2012. - №3(38). - С. 60-67.

53. Лисин, Ю.В. Выбор оптимальных технических решений по прокладке нефтепровода для обеспечения надежной эксплуатации трубопроводной системы «Заполярье–НПС Пурпе» на основе прогнозных теплотехнических расчетов / Ю.В. Лисин, А.Н. Сапсай, В.В. Павлов, М.Ю. Зотов, В.Д. Кауркин // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2014. – № 1. – С. 3–7.

54. Лисин, Ю.В. Оценка планово-высотного положения трубопровода на участках с многолетнемерзлыми грунтами / Ю.В. Лисин, А.А. Александров, В. И. Ларионов, М.А. Козлов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение. – 2012. – № 3(88). – С. 68-79.

55. Лисин, Ю.В. Развитие технологий и строительных решений по способам прокладки трубопровода Заполярье – Пурпе на многолетнемерзлых грунтах и их применение на подводных переходах трубопровода Куюмба – Тайшет / Ю.В. Лисин, В.В. Павлов, А.Е. Сощенко, М.Ю. Зотов // Наука и технологии

трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2014. – № 3(15). – С. 68–71.

56. Лисин, Ю.В. Система автоматизированного мониторинга магистральных трубопроводов на участках со сложными геологическими условиями / Ю.В. Лисин, А.А. Александров, С.П. Сушев // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2012. – № 3(89). – С. 73-79.

57. Лисин, Ю.В. Технические решения по способам прокладки нефтепровода Заполярье – НПС «Пурпе» / Ю.В. Лисин, А.Е. Сощенко, В.И. Суриков, В.В. Павлов, М.Ю. Зотов // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2014. – № 1(13). – С. 24–28.

58. Лисин, Ю.В. Технические решения по температурной стабилизации многолетнемерзлых грунтов оснований объектов трубопроводной системы «Заполярье – НПС «Пур-Пе» / Ю.В. Лисин, А.Е. Сощенко, В.В. Павлов, А.В. Коргин, В.И. Суриков // Промышленное и гражданское строительство. – 2014. – № 1. – С. 65–68.

59. Лисин, Ю.В. Создание и реализация инновационных технологий строительства в проектах развития нефтепроводной структуры Западной Сибири: проекты «Пурпе – Самотлор», «Заполярье – Пурпе» / Ю.В. Лисин, А.Н. Сапсай, В.И. Суриков // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2013. – № 4 (12). С. 6–11.

60. Методическое пособие по проектированию оснований фундаментов на пучинистых грунтах. – М.: Изд-во АО "НИЦ Строительство» НИИОСП им. Н.М. Герсеванова, 2019. – 57 с.

61. Новичков, А. В. Улучшение условий эксплуатации трубопроводов на многолетнемерзлых грунтах / А. В. Новичков, А. П. Токарев, Н. А. Гаррис // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2022. – № 4(138). – С. 76-88.

62. Общее мерзлотоведение (геокриология) / под ред. В.А. Кудрявцева. – М.: Изд-во МГУ, 1978. – 404 с.

63. ОДМ 218.3.103-2018. Отраслевой дорожный методический документ по применению винтовых свай на автомобильных дорогах. – М.: 2018. – 105 с.

64. Паздерин, Д.С. Расчет ореола промерзания грунта вблизи двух сезоннодействующих охлаждающих устройств / Д.С. Паздерин // Нефтяное хозяйство. – 2014. – № 2. – С. 20 – 21.

65. Патент РФ №. 2244192 Российская Федерация, МПК F16L 1/026 Способ сооружения трубопровода в вечномёрзлых грунтах (варианты) / Мухаметдинов Х.К.; Мухаметдинов Х.К. – №2004109254/06; Заявл. 30.03.2004; Оpubл. 10.01.2005.

66. Патент РФ №. 2479779 Российская Федерация, МПК F16L 3/205 Опора трубопровода / Тарасов Ю.Д., Николаев А.К., Коптев В.Ю.; Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный горный институт имени. Г. В. Плеханова (технический университет)». – № 2010132513/06; Заявл. 02.08.2010; Оpubл. 10.06.2009.

67. Патент РФ №. 2358177 Российская Федерация, МПК F16L 1/024 Трубопровод надземной прокладки / Тарасов Ю.Д., Николаев А.К., Докукин В.П., Козлова Т.В.; Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный горный институт имени. Г. В. Плеханова (технический университет)». – №2007149502/06; Заявл. 27.12.2007; Оpubл. 10.06.2009.

68. Патент РФ №. 2461758 Российская Федерация, МПК F16L 3/20 Опора трубопровода / Тарасов Ю.Д., Николаев А.К., Захарова Н.А.; Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный горный институт имени. Г. В. Плеханова (технический университет)». – № 2011118657/06; Заявл. 10.05.2011; Оpubл. 20.09.2012.

69. Патент РФ №. 2413896 Российская Федерация, МПК F16L 3/205 Опора трубопровода / Тарасов Ю.Д., Николаев А.К., Докукин В.П., Михайлов А.Ю., Кондратенко О.В., Авксентьев С.Ю.; Государственное образовательное

учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный горный институт имени. Г. В. Плеханова (технический университет)». – № 2009108825/06; Заявл. 10.03.2009; Оpubл. 20.09.2010.

70. Патент РФ № 2466322 Российская Федерация, МПК F16L 1/028 Способ прокладки трубопровода на заболоченной местности / Тарасов Ю.Д., Михайлов А.Ю., Николаев А.К., Червонный С.И., Панченко Г.С.; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный горный институт». – №2011113817/03; Заявл. 08.04.2011; Оpubл. 10.11.2012.

71. Патент РФ № 2430287 Российская Федерация, МПК F16L 3/00 Надземный трубопровод повышенной надежности / Абовский Н.П., Палагушкин В.И., Сапкалов В.И.; Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет». – №2010108557/06; Заявл. 09.03.2010; Оpubл. 27.09.2011.

72. Патент РФ № 2601651 Российская Федерация МПК F16L 3/14 РФ Опора подвесная для участков подземной прокладки трубопроводов / РевельМуроз П.А., Лисин Ю.В., Сощенко А., Броненников В.А., Бондаренко В.В., Суриков В.И., Михеев Ю.Б., Шонин К.С.; ПАО «Транснефть». – №2015113927/06; Заявл. 15.04.2015; Оpubл. 10.11.2016.

73. Патент РФ на изобретение № 2781733 С1. Опора надземного магистрального трубопровода // И. А. Шаммазов, Д. И. Сидоркин, А. М. Батыров // МПК F16L 3/10, F16L 3/205. Оpubл. 17.10.2022.

74. Патент РФ на изобретение № 2785329 С1. Способ защиты несущей опорной конструкции надземного магистрального трубопровода от воздействий сил морозного пучения грунта // И. А. Шаммазов, Д. И. Сидоркин, А. М. Батыров // МПК E02D 27/35. Оpubл. 06.12.2022.

75. Патент РФ на полезную модель № 216414 U1. Опора надземного магистрального трубопровода // И. А. Шаммазов, Д. И. Сидоркин, А. М. Батыров // МПК F16L 3/205. Оpubл. 02.02.2023.

76. Патент РФ на полезную модель № 216684 U1. Опора надземного магистрального трубопровода // И. А. Шаммазов, Д. И. Сидоркин, А. М. Батыров // МПК F16L 3/205, F16L 3/10. Оpubл. 20.02.2023.

77. Петров И.П., Спиридонов В.В. Надземная прокладка трубопроводов. – М.: Недра», 1973 г. – 470 с.

78. Петров, П.К. Будущее САД-систем / П.К. Петров // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2011. – № 4. – С. 41–47.

79. Радионова, С.Г. Совершенствование методов и средств прогнозных расчетов ореолов оттаивания, просадки и величины напряженно-деформированного состояния трубопроводов, проложенных в многолетнемерзлых грунтах / С.Г. Радионова, Ю.В. Лисин, Т.И. Кузнецов, А.А. Коротков, Э.Н. Фигаров // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2016. – № 1(21). – С. 39–43.

80. Рахманин, А.И. Обеспечение устойчивости проектного положения и прочности подземного магистрального нефтепровода в зоне вечной мерзлоты // Молодой ученый. – 2010. – №5. – Т. 1. – С. 69–72. – URL: <https://moluch.ru/archive/16/1581/> (дата обращения: 18.12.2018).

81. РТМ 24.038.12-72. Руководящий технический материал по выбору упругих опор для трубопроводов тепловых и атомных электростанций. Министерство тяжелого, энергетического и транспортного машиностроения: 1973. . – 26 с.

82. Руководство по проектированию оснований и фундаментов на пучинистых грунтах / НИИОСП им. Н. М. Герсевича Госстроя СССР. — М.: Стройиздат, 1979. — 39 с.

83. Сапсай, А.Н. Конструктивные решения термостабилизаторов грунтов и оценка их эффективности для обеспечения твердомерзлого состояния грунтов оснований фундаментов при надземной прокладке трубопровода / А.Н. Сапсай, А.Е. Сощенко, Ю.Б. Михеев // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2014. – № 1 (13). – С. 36–41.

84. 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

85. Суриков, В.И., Варшицкий В.М., Бондаренко В.В. Применение метода конечных элементов при расчете на прочность опор трубопроводов для участков надземной прокладки нефтепровода «Заполярье – НПС «ПУР-ПЕ» // Вестник МГСУ. 2014. № 1. С. 66-74.

86. Смирнов, В.В. Проблемы обеспечения надежности эксплуатации сооружений в криолитозоне / В.В. Смирнов, Ю.Д. Земенков // Инновации в науке. – 2013. – №25. – С. 57-65.

87. Соколов, С.М. Теоретические основы новых методов сооружения нефтепромысловых трубопроводов в условиях Западной Сибири / Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – Тюмень, 2009. – 357 с.

88. СП 47.13330.2012. Свод правил по инженерным изысканиям для строительства. Основные положения. – М.: Госстрой России, 2013. – 116 с.

89. СП 25.13330.2012. Свод правил по основаниям и фундаментам на вечноммерзлых грунтах. – М.: Минрегион России, 2012. – 110 с.

90. СП 22.13330.2016. Свод правил по основаниям зданиям и сооружениям. – М.: Минрегион России, 2016. – 160 с.

91. СП 24.13330.2011. Свод правил по свайным фундаментам. – М.: Минрегион России, 2011. – 10 с.

92. СП 284.1325800.2016. Свод правил по трубопроводам промышленным для нефти и газа. Правила проектирования и производства работ: введен впервые / утв. Минстрой России 16.12.2016 г. № 978/пр, введ. 17.06.2017 г.

93. СП 36.13330.2012. Магистральные трубопроводы: СНиП 2.05.06-85* Актуализированная редакция / Минрегион России. – Введ. 01.01.2013. – М., 2012.

94. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ РФ № RU 2023663247. Программа расчета опор надземных магистральных трубопроводов, проложенных на многолетнемерзлых грунтах в условиях морозного пучения // А. В. Бойков, Д. И. Сидоркин, А. М. Батыров // Оpubл. 21.06.2023.

95. Строкова, Л.А. Природные особенности строительства магистрального газопровода «Сила Сибири» на участке Чаяндинское нефтегазоконденсатное месторождение – Ленск / Л.А. Строкова, А.В. Ермолаева // Известия томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Том 326 (№4). – С. 41-55.

96. Тарасенко, А. А., Грученкова А.А., Чепур П.В., Юргевич А.В. Оценка эффективности работы анкерных противопучинных свай в условиях многолетнемерзлых грунтов // Успехи современного естествознания. 2016. № 11-2. С. 411- 416

97. Тимофеев, В. Ю. Исследование напряженно-деформированного состояния трубопровода гибкой опорой при эксплуатации осложненных условиях вечной мерзлоты / В. Ю. Тимофеев, П. В. Бурков, В. П. Бурков, С. П. Буркова // Инновационные технологии в машиностроении: сборник трудов XIV Международной научно-практической конференции, Юрга, 25–27 мая 2023 года / Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Юргинский технологический институт. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2023. – С. 45-49.

98. Харионовский, В.В. Надежность и ресурс конструкций газопроводов. М.: Недра, 2000. 466 с.

99. Хафизов, А.Р., Назарова М.Н., Ценев А.Н., Ценев Н.К. О роли строительных и металлургических дефектов в разрушении магистральных

трубопроводов // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2017. Т. 7, № 3. С. 24-31

100. Цытович, Н.А. Механика мерзлых грунтов. Общая и прикладная: учеб. пособие / Н.А. Цытович. – Изд. 2-е. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ». – 2010. – 448 с.

101. Шамилов, Х.Ш. Оптимизация проектных решений при прокладке магистральных трубопроводов в условиях островной и прерывистой мерзлоты / Х.Ш. Шамилов, Р.М. Каримов, А.К. Гумеров, А.Р. Валеев, Р.Р. Ташбулатов // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2021. №11(2). С. 136–144.

102. Шаммазов, А.М. Расчет и обеспечение прочности трубопроводов в сложных инженерно-геологических условиях: в 2 т. / А.М. Шаммазов, Р.М. Зарипов, В.А. Чичелов, Г.Е. Коробков. – М.: Интер, 2005. – Т. 1: Численное моделирование напряженно-деформированного состояния и устойчивости трубопроводов. – 706 с.

103. Шаммазов, А.М. Расчет и обеспечение прочности трубопроводов в сложных инженерно-геологических условиях: в 2 т. / А.М. Шаммазов, Р.М. Зарипов, В.А. Чичелов, Г.Е. Коробков. – М.: Интер, 2005. – Т. 2: Оценка и обеспечение прочности трубопроводов в сложных инженерно-геологических условиях. – 564 с.

104. Шаммазов, А.М. Расчет магистральных газопроводов в карстовой зоне / А.М. Шаммазов, В.А. Чичелов, Р.М. Зарипов, Г.Е. Коробков. – Уфа: Гилем, 1999. – 213 с.

105. 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.

106. 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.

107. 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.

108. Шарыгин, В.М. Разработка методов повышения устойчивости северных газопроводов / Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – Ухта, 2006. – 314 с.

109. Шишкин, И.В. Развитие методов оценки устойчивости газопроводов в многолетнемерзлых грунтах / Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Ухта, 2014. – 159 с.

110. Шмелев, Д. Российские магистральные трубопроводы на мерзлоте: практика изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации / Д. Шмелев, Ю. Станиловская, Э. Грин, П. Добаун // Материалы пятой конференции геокриологов России. – МГУ им. М. В. Ломоносова. – 2016. – С. 235–240.

111. Alfaro, M.C. Laboratory studies on fracturing of low-permeability soils / M.C. Alfaro, R.K. Wong // Canadian Geotechnical Journal. – 2001. – Vol. 38(2). – P. 303-315.

112. Allen, Lawrence J. The Trans-Alaska Pipeline. Vol 1: The Beginning. Vol 2: South to Valdez. Seattle; Scribe Publishing Co. – 1975 and 1976.

113. Andersen, K.H. (1994). Estimation of hydraulic fracture pressure in clay / K.H. Andersen, C.G. Rawlings, T.A. Lunne, T.H. By // Canadian Geotechnical Journal. – 1994. – Vol. 31(6). – P. 817–828.

114. Askarov, R.M. Analysis of Longitudinal Stresses in Main Pipelines with a Long Operating Life / R.M. Askarov, A.K. Gumerov, Kh.Sh. Shamilov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2020. – Vol. 459. – P. 042047.

115. Azari, B. Assessment of the elastic-viscoplastic behavior of soft soils improved with vertical drains capturing reduced shear strength of a disturbed zone / B. Azari, B. Fatahi, H. Khabbaz // International Journal of Geomechanics. – 2016. – Vol. 16(1).

116. Cai, Y., Effect of polypropylene fibre and lime admixture on engineering properties of clayey soil / Y. Cai, B. Shi, C. Ng, C. Tang // Engineering Geology. – 2006. Vol. 87(3). – P. 230–240.

117. Chai, J.C. Vacuum consolidation and its combination with embankment loading / J.C. Chai, S. Hayashi, J.P. Carter // Canadian Geotechnical Journal. – 2006. – Vol. 43(10). – P. 985–996.

118. Cognon, J.M. Vacuum Consolidation Technology-Principle and Field Experience, Vertical and Horizontal Deformation of Foundations and Embankments /

119. J.M. Cognon, I. Juran, S. Thevanayagam // ASCE Geotechnical Special Publication. – 2002. – Vol. 40. – P. 1237–1248.

120. Fatahi, B. Mechanical characteristics of soft clay treated with fibre and cement / B. Fatahi, H. Khabbaz, B. Fatahi // Geosynthetics International. – 2012. – Vol. 19(3). – P. 252–262.

121. Fioravante, V. Load transfer from a raft to a pile with an interposed layer / V. Fioravante // Géotechnique. – 2010. – Vol. 61(2). – P. 121–132.

122. Garris, N. A. Analysis of Piping Methods in Permafrost Soils / N. A. Garris, Z. R. Glukhova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Vladivostok, 06–09 октября 2020 года. – Vladivostok, 2021. – P. 042046.

123. Holtz, R.D. Improvement of the stability of an embankment by piling and reinforced earth / R.D. Holtz, K.R. Massarsch // In: Proc. 6th ECSMFE, Vienna, Austria. – 1976. – Vol. 1(2). – P. 473–478.

124. Huijun, Jin. Design and construction of a large-diameter crude oil pipeline in Northeastern China: A special issue on permafrost pipeline / Jin Huijun // *Cold Regions Science and Technology*. – 2010. – Vol.64. – P. 209-212.

125. Jin, H.J. Zonation and assessment of frozen-ground conditions for engineering geology along the China - Russia Crude Oil Pipeline route from Mo'he to Daqing / H.J. Jin, J.Q. Hao, X.L. Chang, J.M. Zhang, Q.H. Yu, J.L. Qi, L.Z. Lü, S.L. Wang // *Northeastern China. Cold Reg. Sci. Technol.* – 2010. – №3 (64). – P. 213–225.

126. Johansson, A.W. Observation of pore pressure and soil movements during lime column installation /Johansson A.W. // In: *Proceeding of Dry Mix Method for Deep Soil Stabilition, Stockholm*. – 1999. – P. 252–258.

127. Kamruzzaman, A.H. Structuration and Destructuration Behavior of CementTreated Singapore Marine Clay / A.H. Kamruzzaman, S.H. Chew, F.H. Lee // *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*. – 2009. – Vol. 135(4). – P. 573–589.

128. Kjellman, W. Consolidation of clayey soils by atmospheric pressure / W. Kjellman // In: *Proceedings of a Conference on Soil Stabilization, Massachusetts Institute of Technology, Boston*. – 1952. – P. 258–263.

129. Kouï, K. Frost heave predictions of buried chilled gas pipelines with the effect of permafrost / K. Kouï, Z. Wei, L. H. Scott // *Cold Regions Science and Technology*. – 2008. – P. 382–396.

130. Larsson, S. Uniformity of lime-cement columns for deep mixing: a field study / S. Larsson // *Ground Improvement*. – 2005 – Vol. 9(1). – P. 1–15.

131. Leong, E.C. Soil improvement by surcharge and vacuum preloadings / E.C. Leong, R.A.A. Soemitro, H. Rahardjo // *Géotechnique*. – 2000 – Vol. 50(5). – P. 601–605.

132. Liu, S.Y. A combined DJM-PVD method for soft ground improvement / S.Y. Liu, J. Han, D.W. Zhang, Z.S. Hong // *Geosynthetics International*. – 2008. – Vol. 15(1). – P. 43–54.

133. Lorenzo, G.A. Fundamental characteristics of cement-admixed clay in deep mixing / G.A. Lorenzo, D.T. Bergado // *Journal of materials in civil engineering*. – 2006. – Vol. 18(2). – P. 161–174.
134. Michalowski, R.L. Triaxial compression of sand reinforced with fibers / R.L. Michalowski, J. Cermák // *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*. – 2003. – Vol. 129, no. 2. – P. 125–136.
135. Mori, A. Hydrofracturing pressure of cohesive soils / A. Mori, M. Tamura // *Soils and Foundations*. – 1987. – Vol. 27(1). – P. 14–22.
136. Nguyen, L.D. A constitutive model for cemented clays capturing cementation degradation / L.D. Nguyen, B. Fatahi, H. Khabbaz // *International Journal of Plasticity*. – 2014. – Vol. 56. – P. 1–18.
137. Nishimura, S. THM-coupled finite element analysis of frozen soil: formulation and application / S. Nishimura, A. Gens, S. Olivella, R. J. Jardine // *Géotechnique*. – 2009. – Vol. 56. – P. 159–171.
138. Porbaha, A. State of the art in deep mixing technology. Part I: Basic concepts and overview / A. Porbaha // *Ground Improvement*. – 1998. – Vol. 2(2). – P. 81–92
139. Ruixia, He. Permafrost and cold-region environmental problems of the oil product pipeline from Golmud to Lhasa on the Qinghai–Tibet Plateau and their mitigation / He. Ruixia, Jin Huijun // *Cold Regions Science and Technology*. – 2014. – Vol. 64. – P. 279–288.
140. Singh, R. Arctic Pipeline Planning / R. Singh // *Design, Construction, and Equipment*. – 2013.
141. Shakeel, M. Settlement and load transfer mechanism of a pile group adjacent to a deep excavation in soft clay / M. Shakeel, C.W.W. Ng // *Computers and Geotechnics*. – 2018. – Vol. 96. – P. 55–72.
142. Shamilov, Kh.Sh. Underground Fastening of the Trunk Pipelines in Areas of Intermittent and Insular Permafrost / Kh.Sh. Shamilov, A.K. Gumerov, S.M. Sultanmagomedov // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2020. – P. 1–7.

143. 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 // *Appl. Sci.* - 2023. - №13. – P. 1–18.

144. Suebsuk, J. Modified Structured Cam Clay: A generalised critical state model for destructured, naturally structured and artificially structured clays / J. Suebsuk, S. Horpibulsuk, M. D. Liu // *Computers and Geotechnics.* – 2010. – Vol. 37(7). – P. 956–968.

145. Tang, C. Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil / C. Tang, B. Shi, W. Gao, F. Chen, Y. Cai // *Geotextiles and Geomembranes.* – 2007. – Vol. 25(3). – P. 194–202.

146. Wong, P.K. Economic Design of Controlled Modulus Columns for Ground Improvement / P.K. Wong, T. Muttuvel // *ANZ 2012 Conference Proceedings.* – 2012.

147. Xu, S.L. Field trials of the vacuum compaction method for soil improvement / S. L. Xu, X. M. Lu, C. M. Liu, Y. Y. Liu // *Proceeding of 9th National Geotechnical Conference, Beijing, China.* – 2003. – Vol. 2. – P. 736–739.

148. Yee, K. Controlled Modulus Columns (CMC): A New Trend in Ground Improvement and Potential Applications to Indonesian Soils / K. Yee, R. A. Setiawan, O. Bechet, // *ISSMGE - TC 211 International Symposium on Ground Improvement ISGI Brussels 31 May & 1 June 2012.* – 2012.

149. Zhang, D.W. Fracturing mechanism in soils with three-dimension stress state / D.W. Zhang, S.Y. Liu // *Geotechnics of Waste Management and Remediation, ASE GeotechnicalC Special Publication.* – 2008. – Vol. 177. – P. 543-550.

150. Zornberg, J. Discrete framework for limit equilibrium analysis of fibereinforced soil / J. Zornberg // *Geotechnique.* –2002. – Vol. 52(8). – P. 593-604.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

**Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2023663247 «Программа расчета опор надземных магистральных
трубопроводов, проложенных на многолетнемерзлых грунтах в условиях
морозного пучения»**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО
о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2023663247

**Программа расчета опор надземных магистральных
трубопроводов, проложенных на многолетнемерзлых
грунтах в условиях морозного пучения**

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет» (RU)*

Авторы: *Сидоркин Дмитрий Иванович (RU), Батыров
Артур Магомедович (RU), Бойков Алексей Викторович
(RU)*

Заявка № **2023661892**
Дата поступления **08 июня 2023 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **21 июня 2023 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов



ПРИЛОЖЕНИЕ Б
Патент на изобретение № 2781733 «Опора надземного магистрального трубопровода»



ПРИЛОЖЕНИЕ В

Патент на изобретение № 2785329 «Способ защиты несущей опорной конструкции надземного магистрального трубопровода от воздействий сил морозного пучения грунта»



ПРИЛОЖЕНИЕ Г
Патент на изобретение № 216684 «Опора надземного магистрального трубопровода»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 216684

**ОПОРА НАДЗЕМНОГО МАГИСТРАЛЬНОГО
ТРУБОПРОВОДА**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет" (RU)*

Авторы: *Шаммазов Ильдар Айратович (RU), Сидоркин Дмитрий Иванович (RU), Батыров Артур Магомедович (RU)*

Заявка № 2022134216

Приоритет полезной модели **26 декабря 2022 г.**
Дата государственной регистрации
в Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации **20 февраля 2023 г.**
Срок действия исключительного права
на полезную модель истекает **26 декабря 2032 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Ю.С. Зубов



ПРИЛОЖЕНИЕ Д
Патент на изобретение № 216414 «Опора надземного магистрального трубопровода»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 216414

**ОПОРА НАДЗЕМНОГО МАГИСТРАЛЬНОГО
ТРУБОПРОВОДА**

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет" (RU)*

Авторы: *Шаммазов Ильдар Айратович (RU), Сидоркин Дмитрий Иванович (RU), Батыров Артур Магомедович (RU)*

Заявка № 2022134217

Приоритет полезной модели 26 декабря 2022 г.

Дата государственной регистрации в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 02 февраля 2023 г.

Срок действия исключительного права на полезную модель истекает 26 декабря 2032 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Ю.С. Зубов



ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Акт внедрения результатов диссертации в деятельности ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург»



Общество с ограниченной ответственностью «Газпром трансгаз Санкт-Петербург»
(ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург»)

АКТ

«13» апреля 2023 г.

№ ВБ/7524



УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального директора по
производству

И.С. Харисов.

«13» апреля 2023 г.

АКТ

о внедрении результатов
кандидатской диссертации
Батырова Артура Магомедовича
по научной специальности

2.8.5. «Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и
хранилищ»

Комиссия в составе:

Председатель

Харисов Ирек Саитгалиевич - заместитель генерального директора по
производству;

Члены комиссии:

1. Белинский Василий Федорович – главный технолог;
 2. Замараев Денис Михайлович – начальник управления по эксплуатации магистральных газопроводов, газораспределительных станций и защиты от коррозии (УЭМГ, ГРСиЗК);
 3. Первых Николай Сергеевич – начальник службы обеспечения восстановления основных фондов (СОВОФ);
- составили настоящий акт о том, что результаты диссертации на тему «Разработка опорных конструкций надземных магистральных трубопроводов, снижающих влияние морозного пучения грунта», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы в деятельности ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург» при проведении лабораторных испытаний в виде:

1. Экспериментальных данных по исследованию (Глава 3 диссертации соискателя) – определение напряженно-деформированного состояния надземного магистрального трубопровода, в условиях морозного пучения грунта.

2. Экспериментальных данных по исследованию (Глава 4 диссертации соискателя) – определение усилий вдавливания опорной конструкции надземного магистрального трубопровода в мерзлый грунт, в условиях морозного пучения.

3. Методики интерпретации результатов, получаемых в ходе лабораторных испытаний.

Использование указанных результатов позволяет:

1. Повысить качество проектирования в области подбора опорных конструкций надземных магистральных трубопроводов, в условиях морозного пучения грунта;

2. Повысить количество и качество получаемых в процессе экспериментальных исследований данных (повышение количества получаемых данных на 30%, а возможность для интерпретации результатов на 16,6%)

Главный технолог

Белинский В.Ф.

Начальник УЭМГ, ГРС и ЗК

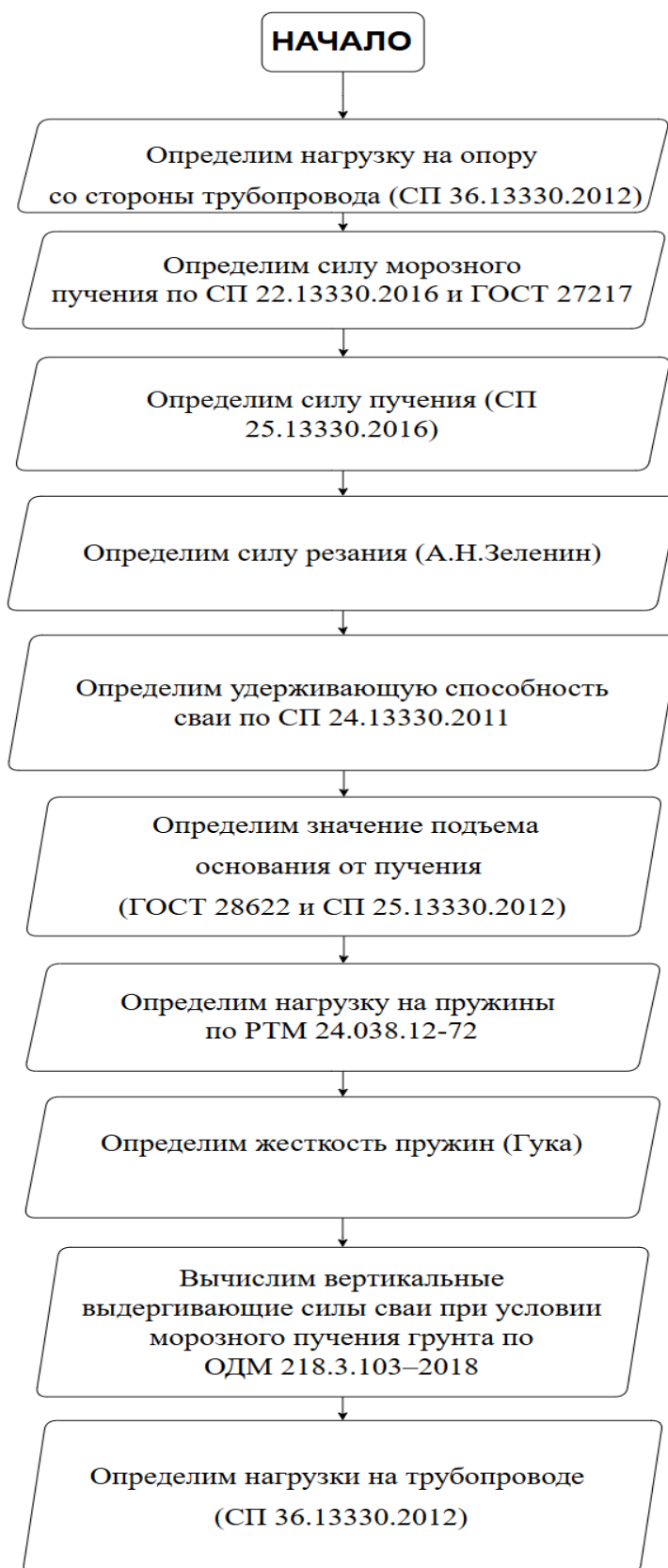
Замараев Д.М.

Начальник СОВОФ

Первых Н.С.

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

Алгоритм расчетной модели



ПРИЛОЖЕНИЕ 3 Чертеж конструкции опоры

