

**ФГАОУ ВО «НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

На правах рукописи

Филимонов Андрей Алексеевич

**МЕТОДИКА ПРОГНОЗА ДЕФОРМИРОВАНИЯ ОСНОВАНИЙ
ПОДЗЕМНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ В КРИОЛИТОЗОНЕ**

1.6.7. Инженерная геология, мерзловедение и грунтоведение

**Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Научный руководитель:
доктор геолого-минералогических наук,
профессор **Строкова Людмила Александровна**

Томск, 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ	16
1.1. Подземный способ устройства трубопроводов	16
1.2. Изученность проблемы и анализ работ по расчетам подземного трубопровода в условиях распространения многолетнемерзлых грунтов.....	21
1.3. Анализ нормативно-технической документации Российской Федерации	27
1.3.1. Нормативная документация по проектированию и строительству подземных трубопроводов в криолитозоне	27
1.3.2. Нормативная документация по геотехническому мониторингу подземных трубопроводов в криолитозоне.....	37
1.4. Выводы по главе 1	39
ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ ОСНОВАНИЙ ПОДЗЕМНЫХ ЛИНЕЙНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ В КРИОЛИТОЗОНЕ	41
2.1. Комплексная методика расчета подземного трубопровода в сложных геокриологических условиях	41
2.2. Влияние входных параметров и граничных условий на результаты теплотехнических расчетов.....	50
2.3. Влияние результатов теплотехнических расчетов на напряженно- деформированное состояние трубопровода	81
2.4. Верификация комплексной методики расчетов подземных трубопроводов по данным мониторинга эксплуатируемого объекта.....	83
2.4.1. Характеристика инженерно-геокриологических и климатических условий	84
2.4.2. Исходные данные, результаты геотехнического мониторинга	90
2.4.3. Формирование расчетных моделей верифицируемого участка	91
2.4.4. Результаты верификации.....	93
2.5. Выводы по главе 2.....	116
ГЛАВА 3. ГЕОТЕХНИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ПОДЗЕМНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ В КРИОЛИТОЗОНЕ	117
3.1. Основные проблемы проведения геотехнического мониторинга подземных трубопроводов	117

3.2. Обоснование применения комплексной методики расчета подземного трубопровода для целей геотехнического мониторинга.....	118
3.3. Применяемые методы и конструкции для измерения деформаций подземного трубопровода	120
3.4. Предложение по контролируемым параметрам сети ГТМ для подземных линейных сооружений в ММГ	127
3.5. Обоснование применения оборудования глобальных навигационных спутниковых систем для мониторинга деформаций подземных трубопроводов в криолитозоне.....	132
3.5.1. Актуальность применения современного оборудования.....	132
3.5.2. Анализ литературы по применению ГНСС оборудования для целей геотехнического мониторинга	134
3.5.3. Методика проведения мониторинга деформаций подземного трубопровода с применением ГНСС.....	137
3.5.4. Выбор объекта для проведения сравнения методов измерения деформаций	140
3.5.5. Разработка программы мониторинга для измерения деформаций методами геометрического нивелирования и методом спутникового измерения	143
3.5.6. Экономическая эффективность предлагаемой методики	147
3.6. Выводы по главе 3.....	148
ГЛАВА 4. АНАЛИЗ ИНЖЕНЕРНЫХ УСЛОВИЙ И ЗАЩИТНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ ДЛЯ ПОДЗЕМНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ В КРИОЛИТОЗОНЕ. ПРИМЕНЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЙ	150
4.1. Предпосылки для проведения анализа	150
4.2. Первичный анализ инженерных условий и защитных мероприятий	153
4.2.1. Сбор и анализ проектной документации	153
4.2.2. Характеристика инженерно-геокриологических и климатических условий	155
4.2.3. Факторная классификация	167
4.2.4. Результат первичного анализа	170
4.3. Применение методики многофакторного корреляционно-регрессионного анализа	176
4.3.1. Теоретическая основа многофакторного корреляционного анализа	176

4.3.2. Проведение корреляционного анализа	180
4.3. Выводы по главе 4.....	189
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	191
Список литературы	193
Приложение А. Рекомендации по устройству сети и проведению геотехнического мониторинга подземного трубопровода в условиях распространения многолетнемерзлых грунтов	207
Приложение Б. Акт внедрения результатов диссертационной работы в производственные процессы	215

5 ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Последние десятилетия связаны с активным освоением месторождений в регионах с наличием многолетнемерзлых пород (ММП). Наличие мерзлых пород значительно осложняет проектирование, разработку и эксплуатацию линейных сооружений, протяженность которых может составлять десятки километров. Изменяемая структура мерзлых пород, литологическое строение, прерывистое распространение многолетнемерзлых пород и большое количество неопределенностей делает крайне актуальным вопросы о корректном прогнозировании изменения природно-технической системы (ПТС) «подземный трубопровод – многолетнемерзлый грунт – атмосфера», возможности применения наиболее эффективных защитных мероприятий и проведения циклических наблюдений за состоянием данной системы. Решение этих вопросов позволит снизить или исключить аварийность подземного линейного сооружения и минимизировать возможные катастрофические последствия оттаивания многолетнемерзлых грунтов (ММГ), как социально-экологические, так и экономические.

За прошедшие 7-10 лет, помимо технического прогресса вычислительной техники, произошло активное развитие прикладного программного обеспечения по численному моделированию теплового состояния грунтов, которое содержит современные теоретические постановки, позволяет с относительно небольшими временными затратами рассчитывать сложные дифференциальные уравнения в трехмерной постановке, рассматривать сложные сочетания геокриологических условий, воздействия атмосферы, тепловыделяющих объектов, систем охлаждения, в расчетных моделях с большим количеством конечных элементов и увеличенными объемами расчетов.

Геотехнический мониторинг (ГТМ), получивший новый импульс развития в стране, на данный момент имеет ряд проблем с отсутствием конкретики требований в федеральных нормативных документах, отсутствием единого центра компетенций и накопленной базы мониторинга всех типов сооружений в

разных климатических зонах. Мониторинг подземных трубопроводов в многолетнемерзлых грунтах связан с трудоемкостью проведения контроля параметров протяженных сооружений, а также со сложностью измерений деформаций подземного сооружения стандартными геодезическими методами. Особенной задачей является мониторинг деформаций трубопровода, нормативные требования к точности измерений которого несоразмерны с фактическими перемещениями трубопровода.

Таким образом, актуальность темы исследования подчеркивается важностью корректного моделирования ПТС и прогнозирования ее изменения, проведения натурных наблюдений состояния трубопровода и вмещающего его грунта.

Степень разработанности проблемы. Среди российских ученых проблематика расчетов процессов теплопереноса, осадки многолетнемерзлых грунтов при оттаивании, изменения пространственного положения и напряженно-деформированного состояния трубопроводов изучалась такими авторами, как Азметов Х.А., Александров А.А., Айнбиндер А.Б., Анисимов О.А., Баулин В.В., Баясан Р.М., Брушков А.В., Бородавкин П. П., Бабин Л.А., Великоднев В.Я., Горохов Е.Н., Гумеров К.М., Гаррис Н.А., Горелик Я.Б., Голубин С.И., Ершов Э.Д., Кондратьев В.Г., Лисин Ю.В., Мельников В.П., Пармузин С.Ю., Султанмагомедов С.М., Харионовский В.В., Хрусталев Л.Н., Цытович Н.А.

Результаты исследований, посвященных изучению теплового взаимодействия многолетнемерзлых грунтов и подземных трубопроводов, представлены в работах Голубина С.И. (2009), Долгих Г.М. (2010), Великоднева В.Я. (2011), Смирнова В.В. (2013), Жолобова И.А. (2015), Короткова А.А. (2021), Мельникова В.П. (2022), Пермякова П.П. (2022), Брушкова А.В. (2023), Шаммазова И.А. (2023) и других.

Вопросы комплексного взаимодействия ПТС «подземный трубопровод – многолетнемерзлый грунт – атмосфера» были рассмотрены в работах Агафонова

А.В. (2010), Великоднева В.Я. (2011), Горохова Е.Н. (2011), Зотова М.Ю. (2012), Баясан Р.М. (2012), Лисина Ю.В. (2012), Новикова П.А. (2016), Радионовой С.Г. (2016), Акимова М.П. (2017), Трифонова О.В. (2020).

Применение численных методов решения уравнения теплопроводности и программных комплексов для расчетов трубопроводов в сложных геокриологических условиях представлены в работах Ивакина А.В. (2009), Власова А.Н. (2011), Дрынкиной Т.Н. (2011), Горохова Е.Н. (2011), Зотова М.Ю. (2012), Борисова В.С. (2015), Бадиной Я.С. (2016), Степанова С.П. (2018), Ефимова Д.В. (2019), Гунара А.Ю. (2021), Хилимонюк В.З. (2022).

Целью работы является обоснование применения комплексной методики расчета подземных трубопроводов для прогнозирования изменений ПТС «подземный трубопровод – многолетнемерзлый грунт – атмосфера», а также для обоснования предельных критериев контролируемых параметров, объема и расположения сети геотехнического мониторинга.

Задачи исследования:

1. Формирование комплексной методики прогноза деформаций оснований подземных трубопроводов в криолитозоне, исследование влияния граничных условий и начальных параметров расчетных моделей на результаты расчетов. Верификация методики теплотехнических расчетов подземных трубопроводов в ММП по данным геотехнического мониторинга реального объекта.

2. Оценка применимости результатов комплексного расчета подземных трубопроводов для проведения геотехнического мониторинга в период эксплуатации сооружения. Назначение и обоснование контролируемых параметров системы ГТМ, объема и расстановки элементов сети для контроля за состоянием природно-технической системы «подземный трубопровод – многолетнемерзлый грунт – атмосфера».

3. Статистический анализ результатов расчетов подземных трубопроводов по комплексной методике и составление прогнозного уравнения оттаивания ММГ для технико-экономической оценки применения защитных мероприятий.

Объектом исследования является природно-техническая система «подземный трубопровод – многолетнемерзлый грунт – атмосфера».

Предметом исследования является процесс разработки расчетных моделей грунтовых массивов в криолитозоне во взаимодействии с подземным трубопроводом для изучения изменений температурного режима многолетнемерзлых и немерзлых грунтов, осадки грунтов при оттаивании.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач были использованы фактические материалы АО «ТомскНИПИнефть»: отчеты по инженерным изысканиям, проектная документация по подземным трубопроводам, результаты теплотехнических расчетов, проводимых автором исследования в 2020-2024 годах, а также отчеты по геотехническому мониторингу подземного трубопровода АО «РОСПАН ИНТЕРНЕШНЛ».

Теплотехнические прогнозные расчеты и расчеты осадки мерзлых грунтов выполнялись автором по методикам СП 25.13330.2020 и РСН 67-87, с применением специализированного программного обеспечения «Frost.Термо», «Frost.Осадка», «Борей 3D».

Прочностные расчеты трубопроводов выполнялись с применением специализированного программного обеспечения «СТАРТ-Проф» сотрудниками отдела трубопроводного транспорта АО «ТомскНИПИнефть».

Статистическая обработка и аналитический обзор результатов исследований были проведены в программном пакете Microsoft Office – Excel, Word и STATISTICA ver.10.

Для обработки спутниковых снимков было использовано геоинформационное программное обеспечение ESRI ArcGIS.

Основным результатом работы является научное обоснование технологии разработки расчетных моделей грунтов для численного прогноза оттаивания многолетнемерзлых грунтов и деформаций оснований сооружений трубопроводного транспорта в криолитозоне.

Конкретными результатами, содержащимися в работе и полученными

лично автором, являются:

- 1) Методика и последовательность проведения теплотехнических прогнозных расчетов и расчетов осадки подземных линейных сооружений.
- 2) Методики определения, калибровки, проверки входных параметров при моделировании, процедура подбора защитных мероприятий по результатам теплотехнических расчетов.
- 3) Обоснование и применение результатов теплотехнических расчетов в качестве предельных значений для проведения геотехнического мониторинга.
- 4) Разработка критериев проектирования сети геотехнического мониторинга для подземных трубопроводов.
- 5) Обоснование возможности применения современного спутникового геодезического оборудования для проведения измерений деформаций подземных трубопроводов.
- 6) Уравнение регрессии для прогнозирования расчета ореола оттаивания в двух климатических зонах на основе факторов – параметров трубопровода, геологических и метеорологических данных.

Положения, выносимые на защиту:

1. Прогноз оттаивания и деформирования грунтов криолитозоны природно-технической системы «подземный трубопровод – многолетнемерзлый грунт – атмосфера» может основываться на итерационном моделировании в трехмерной постановке всей протяженности участков трубопровода со вскрытыми ММГ, с проверкой воздействия максимальных осадок оттаявшего мерзлого основания на напряженно-деформированное состояние трубопровода до удовлетворения условий прочности и устойчивости.
2. Для достоверной оценки изменения геологической среды и напряженно-деформированного состояния трубопровода в криолитозоне, установление требований к контролируемым параметрам, объему сети, периодичности и возможным методам проведения геотехнического мониторинга может основываться на результатах прогнозных теплотехнических расчетов,

проведенных по всей протяженности трассы со вскрытыми участками ММГ, а также на проектных параметрах трубопровода.

3. Статистический анализ результатов комплексного расчета ПТС «подземный трубопровод – многолетнемерзлый грунт – атмосфера» позволяет составлять прогнозное уравнение оттаивания ММГ под трубопроводом для оценки применения разных защитных мероприятий и технических параметров трубопровода.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Сформирована методика и описана последовательность проведения теплотехнических прогнозных расчетов всей протяженности подземных линейных сооружений со вскрытыми ММГ; установлены необходимые параметры для моделирования подземных линейных сооружений, влияющие на результат моделирования, даны рекомендации по разработке моделей;

2. Предложено использование результатов комплексного расчета для геотехнического мониторинга линейных подземных сооружений: описан подход к анализу прогноза, к определению расчетного предельного значения деформаций основания и контролируемых температур грунтов;

3. Разработаны критерии для проектирования сети мониторинга подземных трубопроводов в ММГ;

4. Обосновано применение оборудования глобальных навигационных спутниковых систем для измерения деформаций подземного трубопровода в ММГ;

5. При помощи многофакторного корреляционно-регрессионного анализа было сформировано уравнение регрессии, применимое для прогнозирования ореола оттаивания ММГ вокруг трубопровода в исследуемых регионах.

Теоретическая и практическая значимость. Описанный в диссертации принцип последовательного итерационного численного моделирования позволяет получать исчерпывающие результаты теплового прогноза всего

массива многолетнемерзлых грунтов; обозначить критичные параметры и сократить неопределенности при назначении входных параметров, тем самым улучшить качество проектирования; описанные методы формирования расчетных моделей позволяют существенно уменьшить трудозатраты и временные ресурсы на выполнение прогнозных тепловых расчетов и инженерных расчетов деформаций оснований сооружений в криолитозоне. Предложенный подход к проектированию подземных трубопроводов позволяет обоснованно использовать результаты для проведения геотехнического мониторинга, обеспечивая безопасную эксплуатацию сооружения.

Оформленные предложения по конкретизации требований к проведению геотехнического мониторинга могут быть использованы для дополнения нормативно-технической документации (НТД) федерального значения для формализации требований и исключения некорректного прочтения требований норм, для дальнейшего совершенствования расчетных моделей, входных параметров и граничных условий, основываясь на исчерпывающих данных ГТМ. Предложенная и обоснованная методика измерения деформаций при помощи глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) природно-технической системы «подземный трубопровод – многолетнемерзлый грунт – атмосфера» позволяет значительно сократить трудовые и финансовые затраты на проведение мониторинга объекта. Основные выводы могут быть внесены в нормативные документы и рекомендации по проектированию оснований трубопроводов в криолитозоне.

Систематизация и статистический анализ данных тепловых расчетов, защитных мероприятий по разным регионам имеет цель обеспечить качество дальнейшего проектирования, уменьшение трудозатрат и временных ресурсов, является базой и основой для принятия будущих проектных решений в соответствующем регионе. Сформированное уравнение связи позволяет проводить прогнозный расчет, вводя данные по климатическим, геологическим и техническим характеристикам объекта, получая предварительное значение

ореола оттаивания, что дает возможность обосновывать технические решения и способ прокладки трубопровода в ММГ с учетом различных сочетаний исходных данных.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Тема диссертационного исследования соответствует пп. 3, 11, 12 паспорта специальности 1.6.7. Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение:

3. Напряженное состояние массивов пород (грунтовых толщ), оценка их прочности, устойчивости и деформируемости при природных и техногенных нагрузках.

11. Мониторинг природных и природно-технических систем, геологических, геокриологических и инженерно-геологических процессов, определяющих их факторов и негативных социально-экономических и экологических последствий с использованием аэрокосмических и наземных методов, технические средства и технологии мониторинга.

12. Физическое, математическое, аналоговое и другое моделирование геологических, геокриологических и инженерно-геологических процессов, прогноз их развития во времени-пространстве, оценка и управление геологическими опасностями и геологическими рисками.

Личный вклад.

Автором исследования были выполнены:

- исследование, подбор и анализ актуальных научно-технических публикаций по теме диссертации, нормативно-технической документации;
- сбор проектно-сметной документации, данных геотехнического мониторинга, обработка, структурирование данных;
- геоинформационная обработка территорий исследуемых объектов;
- все прогнозные теплотехнические расчеты, задействованные в исследовании (модели 86 подземных трубопроводов общей длиной 316 км, выполненных в 2020-2023 годах; 32 расчетные модели 400 м длиной, выполненные в 2022-2023 годах), прочностные расчеты выполнены в

сотрудничестве с отделом трубопроводного транспорта АО «ТомскНИПИнефть»;

- статистический анализ данных по объектам исследования, корреляционно-регрессионный анализ результатов тепловых расчетов.

Автор исследования принимал непосредственное участие в разработке, формировании и формализации комплексной методики расчетов подземных трубопроводов в ММГ, применяемой в АО «ТомскНИПИнефть». Автором предложено использовать результаты теплотехнических расчетов в качестве предельного значения при проведении геотехнического мониторинга подземных трубопроводов; автором разработан и предложен перечень контролируемых параметров для проведения ГТМ трубопроводов, обосновано технически и экономически применение оборудования глобальных навигационных спутниковых систем для геотехнического мониторинга подземных трубопроводов.

Апробация и реализация результатов диссертации. Основные положения работы докладывались и обсуждались на международных и всероссийских научных и научно-технических конференциях и симпозиумах: 1) VI Всероссийский научный молодежный геокриологический форум «Актуальные проблемы и перспективы мерзлотоведения», г. Якутск, июнь 2021 г.; 2) XXV Международный симпозиум имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 120-летию горно-геологического образования в Сибири, 125-летию со дня основания Томского политехнического университета, Томск, апрель 2021 г.; 3) Общероссийская научно-практическая конференция «Изучение опасных природных процессов и геотехнический мониторинг при инженерных изысканиях», г. Москва, март 2022 г.; 4) XXVI Международный симпозиум имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященный 90-летию со дня рождения Н.М. Рассказова, 120-летию со дня рождения Л.Л. Халфина, 50-летию научных молодежных конференций имени академика М.А. Усова, апрель 2022 г.; 5) V научно-техническая

конференция "Технологии обустройства нефтяных, газовых и газоконденсатных месторождений", г. Томск – сентябрь 2022 г.; 6) II научно-техническая конференция Специализированного института Геотехнических исследований объектов нефтегазодобычи в криолитозоне (СИ ГИОНК) «Проектирование, строительство и эксплуатация зданий и сооружений на многолетнемерзлых грунтах», г. Краснодар, ноябрь 2022 г.; 7) Всероссийская конференция с международным участием «Устойчивость природных и технических систем криолитозоны в условиях изменения климата», г. Якутск, март 2023 г.; 8) 69-ая Университетская научно-практическая конференция студентов и молодых ученых (УНТК-2023), Томск, 2023 г.; 9) VI научно-техническая конференция "Технологии обустройства нефтяных, газовых и газоконденсатных месторождений", г. Томск – сентябрь 2023 г.; 10) III научно-техническая конференция Специализированного института Геотехнических исследований объектов нефтегазодобычи в криолитозоне (СИ ГИОНК) «Проектирование, строительство и эксплуатация зданий и сооружений на многолетнемерзлых грунтах», г. Уфа, декабрь 2023 г.; 11) 70-ая Университетская научно-практическая конференция студентов и молодых ученых (УНТК-2023), Томск, апрель 2024 г.

Публикации. Основные положения диссертации и результаты исследований опубликованы в 8 печатных работах: 4 публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 2 из которых состоят в перечнях Web of Science и Scopus.

Достоверность результатов. Достоверность результатов и защищаемых положений, выводов и рекомендаций обеспечена анализом широкого круга научных работ по теме диссертации, использованием современных теоретических представлений, применением современного программного обеспечения, имеющего сертификацию и апробацию результатов, проведение собственной верификации результатов расчетов на натурных данных.

Структура диссертации и объём. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов, заключения, библиографического списка и представлена на 215 страницах, включает 81 рисунок, 21 таблицу и 2 приложения.

Благодарность. Автор выражает благодарность и глубокую признательность своему научному руководителю – профессору, д.г.-м.н. Л.А. Строковой за всестороннюю помощь в проведении исследования, ценные советы и наставления.

Кроме того, автор искренне признателен сотрудникам «Томского научно-исследовательского и проектного института нефти и газа»: ученому секретарю, к.т.н. Ю.С. Захаревич, к.т.н. А.Г. Чернову за методическую помощь, А.В. Саитову и Д.В. Липихину за поддержку, Е.В. Юрицыной и А.П. Лыровой за помощь в расчете напряженно-деформированного трубопроводов, сотрудникам АО «РОСПАН ИНТЕРНЕШНЛ» Л.Ф. Халикову, М.Ю. Икизли и К.С. Батурина за открытость и предоставленные данные.

ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Подземный способ устройства трубопроводов

Значительная часть мировых запасов газа и нефти находится в районах распространения вечной мерзлоты, в частности, в России, многолетнемерзлые грунты занимают площадь 11 миллионов квадратных километров или практически 2/3 территории страны. Трубопроводы являются одним из наиболее эффективных и экономически выгодных способов доставки углеводородов от месторождения к потребителю. Несмотря на то, что международный опыт эксплуатации трубопроводов на мерзлых породах насчитывает не одно десятилетие, по мере освоения новых месторождений инженеры часто сталкиваются с нетривиальными инженерно-геологическими и геокриологическими условиями, а в сочетании с различными технологическими режимами эксплуатации трубопроводов, каждый проект имеет уникальное сочетание исходных условий для проектирования [3, 4].

Основной задачей при вскрытии многолетнемерзлых грунтов по трассе проектируемого трубопровода, является корректная оценка изменения геокриологических условий при техногенном воздействии, от которой зависит выбор прокладки трубопровода, обоснованный как технически, так и экономически.

Существует несколько способов устройства трубопроводов в условиях распространения ММГ: надземный, наземный и подземный. Подземный способ является самым распространенным - до 90% от общей протяженности трубопроводов запроектированы подземным способом.

Подземный способ прокладки трубопровода заключается в монтаже трубопровода ниже планировочной отметки земли, в теле грунта.



Рисунок 1.1 – Подземная прокладка трубопровода

Подземный способ прокладки можно разделить по методу строительства: открытый вариант со вскрытием грунта и устройством траншеи, и бестраншейный вариант прокладки – с использованием методов прокола, продавливания, а также метода горизонтально-направленного бурения.

Земляные работы, проводимые при подземной прокладке, заключаются в разработке траншеи на расчетную глубину, выравнивании дна и укрепления стен траншеи, отсыпке песчаной подушки под трубопроводом, и обратной засыпке траншеи.

На участках с многолетнемерзлыми грунтами технология монтажа подземной прокладки отличается от обычных условий тем, что строительно-монтажные работы по укладке трубопровода на ММГ, в большинстве случаев, рекомендуется проводить только в зимний период, поскольку изменение естественного теплового баланса пород, сложившегося на участке работ, будет приводить к изменению состояния грунтов и проявлению процессов оттаивания мерзлых пород. При применении бестраншейной методики горизонтально-направленного бурения на ММГ, следует придерживаться тех же принципов по

защите трубопровода, что и при открытой прокладке – следует обратить особенное внимание на тепловое воздействие от процессов бурения, применять расчетную толщину тепловой изоляции для уменьшения оттаивания ММГ [5].

Глубина прокладки трубопроводов зависит от многих факторов, таких как рельеф местности, проектные уклоны, глубина сезонного промерзания грунтов, наличия препятствий в виде рек, озер, переходов и другие факторы. При этом, при выборе глубины прокладки однозначно требуется учитывать сложность разработки многолетнемерзлых грунтов и объемы земляных работ.

Особым условием является то, что при подземной прокладке трубопровод имеет прямой контакт с грунтом, который, изменяя свои физические и механические характеристики во время эксплуатации, имеет свое воздействие на тело трубы по всей ее протяженности. Во время эксплуатации изменяется проектное положение трубопровода, из-за чего возникают различные схемы взаимодействия трубопровода и грунта, что приводит к локальным изменениям напряженно-деформированного состояния трубопровода. На участках с многолетнемерзлыми грунтами, прямой контакт трубопровода и мерзлых пород приводит к деградации ММГ и проявлению неравномерных осадок по длине трубопровода. Для нивелирования возникающих деформаций, к подземному трубопроводу может применяться большое количество компенсирующих мероприятий, например, устройство подземных систем компенсации продольных перемещений, применение баллаستировки на обводненных или заболоченных грунтах, замена просадочных грунтов и другие [6].

Преимущества подземной прокладки заключаются в возможности устройства трубопровода в различных геологических условиях и применения различных методов строительства, технологичности строительного процесса, отсутствии свайных и металлических конструкций. Среди преимуществ можно выделить также низкую стоимость строительно-монтажных работ по сравнению с надземным и наземным способами. Также плюсом является отсутствие прямого воздействия окружающей среды на тело трубопровода, что позволяет

исключать дополнительные мероприятия по подогреву или охлаждению продукта, а ограничиваться тепловой изоляцией, в отдельных случаях.

Но также есть и ряд больших недостатков [7], таких как:

- непосредственное температурное воздействие на многолетнемерзлые грунты с последующими осадками грунтов;
- затруднительность наблюдения за положением трубопровода;
- сложность проведения ремонтных работ;
- высокая аварийность (которая, судя по статистическим данным, с каждым годом уменьшается);
- сложность проектирования природно-технической системы «подземный трубопровод – многолетнемерзлый грунт – атмосфера».

Также к минусам можно отнести то, что для подземной прокладки требуется особенный подход к проведению инженерных изысканий. Количество горных выработок по нормативу не позволяет исключить геологическую неопределенность между скважинами, что приводит к неточностям расчетов, которые требуется учитывать «в запасе» прочности трубопровода, но даже это не гарантирует безопасность эксплуатации по причине возможного проявления негативных геокриологических процессов в неизученном межскважинном пространстве [8].

При всех перечисленных недостатках, наиболее крупные и инновационные магистральные трубопроводы России устроены подземным способом и успешно эксплуатируются, несмотря на наличие многолетнемерзлых грунтов - это проекты «Восточная Сибирь – Тихий Океан 1,2» (ВСТО) [9, 10, 11] и «Сила Сибири» [12, 13].

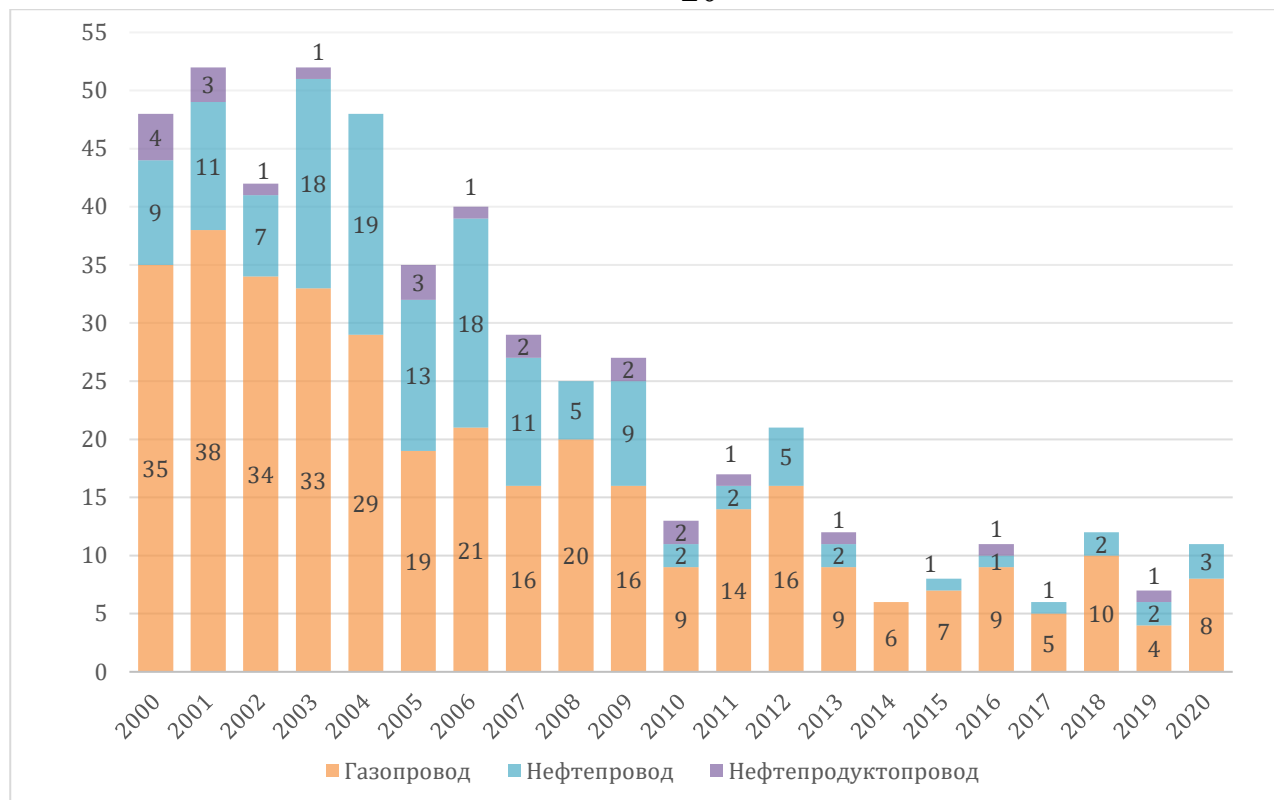


Таблица 1.1 – Число аварий на трубопроводах России за 2000-2020 гг.

Статистика аварий на трубопроводах России собрана на основе данных научной литературы [14, 15] и анализа открытых данных Ростехнадзора [16-20] и представленная в таблице 1.1, визуально отображает тенденцию к уменьшению количества аварий трубопроводного транспорта и установлению усредненного количества аварий за последние пять лет данной статистики (2015-2020 годы) около 10 аварий ежегодно. Однако, стоит учитывать, что, согласно третьему оценочному докладу Росгидромета, учитывающего статистические данные по приповерхностной температуре воздуха в период с 1976 по 2021 год, усредненный линейный тренд глобального потепления на всей территории России составляет $0,49\text{ }^{\circ}\text{C}$ за 10 лет, при этом, на части территорий ожидается увеличение скорости изменения приземной температуры до $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ за 10 лет уже в ближайшие 20-25 лет – это территории Ямало-Ненецкого и Ханты-Мансийского автономных округов [21]. Таким образом, адаптация к грядущим климатическим изменениям, корректное прогнозирование изменений с учетом

техногенного воздействия, обеспечение безаварийной эксплуатации трубопроводного транспорта в Арктической зоне является важным аспектом в обеспечении развития перспективных нефтегазодобывающих проектов нашей страны [22].

1.2. Изученность проблемы и анализ работ по расчетам подземного трубопровода в условиях распространения многолетнемерзлых грунтов

Среди российских ученых проблематика расчетов процессов тепломассопереноса, расчетов осадки многолетнемерзлых грунтов при оттаивании, изменения пространственного положения и НДС трубопроводов изучалась такими авторами, как Азметов Х.А., Александров А.А., Айнбиндер А.Б., Анисимов О.А., Баулин В.В., Баясан Р.М., Брушков А.В., Бородавкин П. П., Бабин Л.А., Великоднев В.Я., Горохов Е.Н., Гумеров К.М., Гаррис Н.А., Горелик Я.Б., Голубин С.И., Ершов Э.Д., Кондратьев В.Г., Лисин Ю.В., Мельников В.П., Пармузин С.Ю., Султанмагомедов С.М., Харионовский В.В., Хрусталева Л.Н., Цытович Н.А. [3, 5, 6, 7, 28, 35, 36- 43] и других авторов. В их работах отражены как решения отдельных тепловых расчетов трубопроводов, так и подходы к расчетам НДС трубопроводов под внешними воздействиями. Вопросы комплексного взаимодействия ПТС «подземный трубопровод – многолетнемерзлый грунт – атмосфера» были рассмотрены в работах [4, 5, 29, 44, 45].

Мерзлые грунты отличаются от дисперсных немерзлых грунтов сцементированностью минеральных частиц грунтом и наличием криогенной структуры и текстуры. Это обуславливает фазовые переходы грунтовой воды в лед и обратно, что сопровождается сложными физико-химическими процессами. Во время промерзания и протаивания деятельного слоя, а также при оттаивании многолетнемерзлых пород происходит изменение температурного поля, в связи с чем, происходит преобразование не только льда, но и минерального, химического и органического состава скелета породы. Изменение агрегатного состояния и теплофизических характеристик среды происходит одновременно с

массопереносом, вызванным миграцией влаги, что говорит о нелинейности процесса. Задача о протекании данных процессов является одной из сложных задач математической физики [4, 23].

Возможность проведения тепловых расчетов имеет огромную практическую значимость в мерзлотоведении, так как они необходимы для прогнозирования изменения теплового режима грунта в условиях строительства в криолитозоне [24, 25]. При проектировании особо сложных сооружений в зоне ММГ, в том числе трубопроводов, прокладываемых подземным способом, любой недоучтенный негативный геокриологический процесс является перспективно опасным, что может привести к развитию критических деформаций трубопровода, к аварийным ситуациям и остановке транспортировки углеводородов. Сложность состоит в корректном прогнозировании процессов, которые будут проявляться при эксплуатации, а также в расчете их количественного выражения [24, 26-30].

В качестве негативного примера, при строительстве подземного нефтепровода «Ванкор – Пурпе», запущенного в эксплуатацию в 2009 году, были применены современные технологии прогнозирования изменения теплового состояния грунтов с применением мероприятий по инженерной защите ПТС – активная термостабилизация грунтов, теплоизоляционные материалы, подземные компенсаторы для уменьшения напряжений в теле трубы. Однако, с учетом всех этих мероприятий, трубопровод не удалось оградить от разрушительного влияния негативных криогенных процессов, вдобавок к неточностям инженерных изысканий и неудовлетворительному качеству проведения строительно-монтажных работ, которые практически невозможно учесть при прогнозировании [31]. В связи с состоянием подземной части трубопровода, с 2015 года проводится капитальная реконструкция трубопровода с изменением прокладки трубопровода на надземную, которой сопутствуют колоссальные капитальные вложения [32]. Данный факт еще раз подтверждает тезис о том, что для обеспечения безаварийной эксплуатации, при

проектировании тепловыделяющих подземных трубопроводов в криолитозоне, требуется максимально детально учитывать процессы, происходящие в ПТС «подземный трубопровод – многолетнемерзлый грунт – атмосфера» в целом [31, 33, 34].

Несмотря на обширную изученность отдельных проблем обеспечения безаварийной эксплуатации подземных трубопроводов на ММГ, существование различных методов теплового расчета и расчета осадки при оттаивании многолетнемерзлых грунтов, а также оценки напряженно-деформированного состояния трубопроводов, позволяет заключить, что совершенствование теплового и механического взаимодействия компонентов ПТС «подземный трубопровод – многолетнемерзлый грунт – атмосфера» является актуальной проблемой.

Существующие методики расчета теплового состояния грунта совместно с тепловыделяющим сооружением можно подразделить на аналитические методы и численные методы (методы математического моделирования) [46]. Аналитические методы имеют ограничения в виде высокой вычислительной сложности, а также получения решения только для простых условий. С развитием компьютерных технологий, стали возможны к использованию в проектных работах и научных исследованиях программы, основанные на численных методах решения уравнения теплопроводности, такие как «Тепло» (HEAT) (разработчик - кафедра геокриологии МГУ под руководством Л.Н. Хрусталева, основана на методе конечных разностей), «WARM» (разработчики - Хрусталева Л.Н., Емельянов Н.В, Пустовойт Г.П., Яковлев С.В.); «Termostab 67-87» (основана на алгоритме РСН 67-87), QFrost (разработчик – Д.Г. Песоцкий, М.С. Торгонский, основана на методе конечных разностей), «PROGNOZ» (разработчик – АО «Фундаментпроект», основана на алгоритме РСН 67-87), «ФСА-прогноз» (ранее – «Frost(DK)», разработчик – Simmakers Ltd., основана на методе конечных элементов), «Frost 3D» (разработчик – ООО «НТЦ «Симмэйкерс», основана на методе конечных разностей), «Борей 3Д»

(разработчик – ИП Усачев А.А., основана на методе конечных разностей), «ANSYS» (разработчик – ANSYS Inc., основана на методе конечных элементов), «ABAQUS», «COMSOL», «FEniCS» и ряд других программ [4, 23, 35, 47-55].

Стоит отметить некоторые методологические аспекты, отмечающиеся в научных работах по тепловым расчетам:

Расчеты изменения температурного поля с вмещающим трубопроводом выполняются в двумерной постановке в «характерных точках выбранных участков», то есть в ортогональных (поперечных) сечениях, выбранных по определенным критериям, определяемых авторами/проектировщиками. В достаточном количестве исследований геологические условия «типизированы» с целью выделения конечного количества типов условий по трассе для уменьшения объема проводимых расчетов. При этом, шаг между сечениями может составлять сотни метров, а расчеты в неисследованных областях между сечениями либо не проводятся, либо результаты расчетов линейно интерполируются [13, 44].

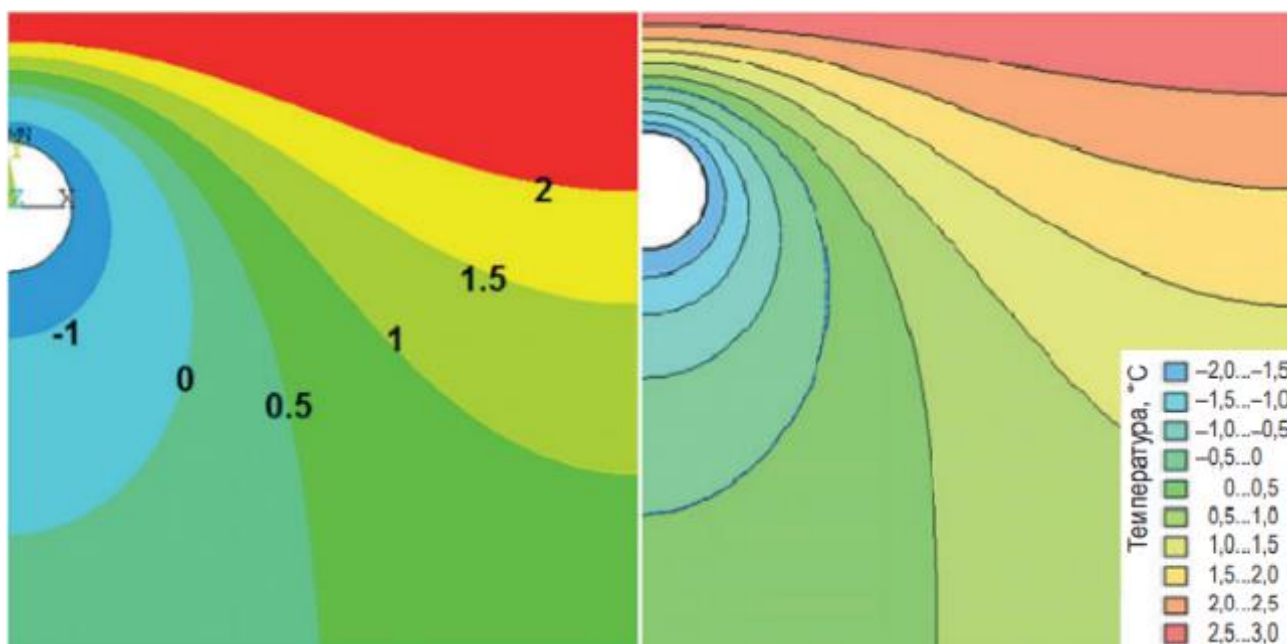


Рисунок 1.2 – Результаты решения задачи теплового взаимодействия трубопровода и ММГ при двумерной постановке (О. В. Трифионов, В. М. Силкин, В. П. Черный и др.)

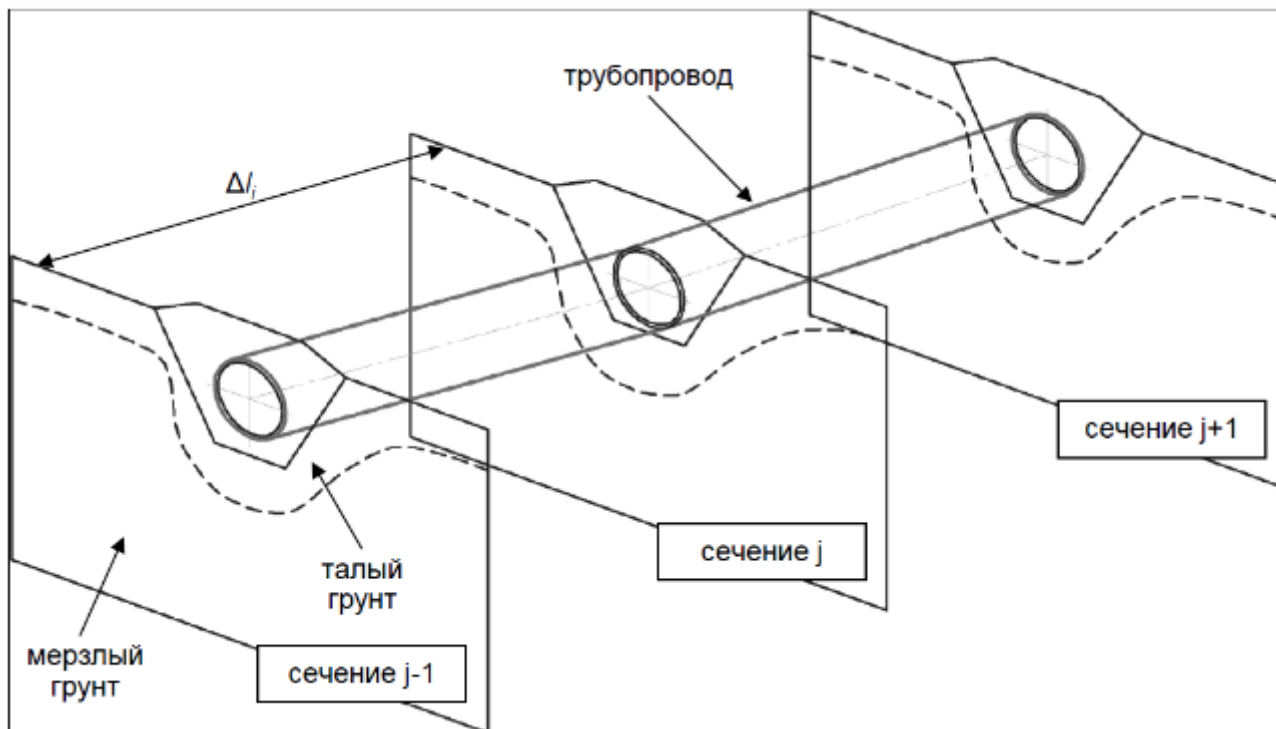


Рисунок 1.3 – Методика выбора шага сечений трубопровода для двумерного расчета (П.А. Новиков)

- 1) Тепловые расчеты проводятся для отдельных участков трассы небольшой протяженности (от десятков до сотен метров).
- 2) По причине двумерного расчета, в моделях не учтены тепловые воздействия от смежных участков трубопровода, от пересекаемых трубопроводов, расположенных перпендикулярно трассе, не представляется возможным учет пространственного изменения положения защитных мероприятий, учет работы сезонно-действующих охлаждающих устройств (СОУ).
- 3) Аналитический расчет дифференциальных уравнений не позволяет в полной мере автоматизировать расчет, требуется высокая квалификация специалистов, проводящих расчет;
- 4) Не учитывается реальная геометрия объектов и геологии в модели, нет описания методик моделирования сложной геологии и формирования начального температурного распределения.

5) Предельные деформации трубопровода ограничиваются либо одним значением для всей трассы линейного трубопровода, либо рассчитываются с шагом, равным шагу расчетных сечений для тепловых расчетов. Отсутствует возможность определить динамические (изменяемые) предельные значения допустимых деформаций, только для геологических условий рассчитываемых сечений.

Обобщая, можно сформировать ряд требований по постановке задачи по проведению тепловых и механических расчетов, учитывающих недостатки разных подходов и решений:

1) Задача тепломассообмена должна разрешаться в трехмерной постановке, что позволит учитывать реальные формы и размеры объектов, наличие пересекаемых объектов и т.д.;

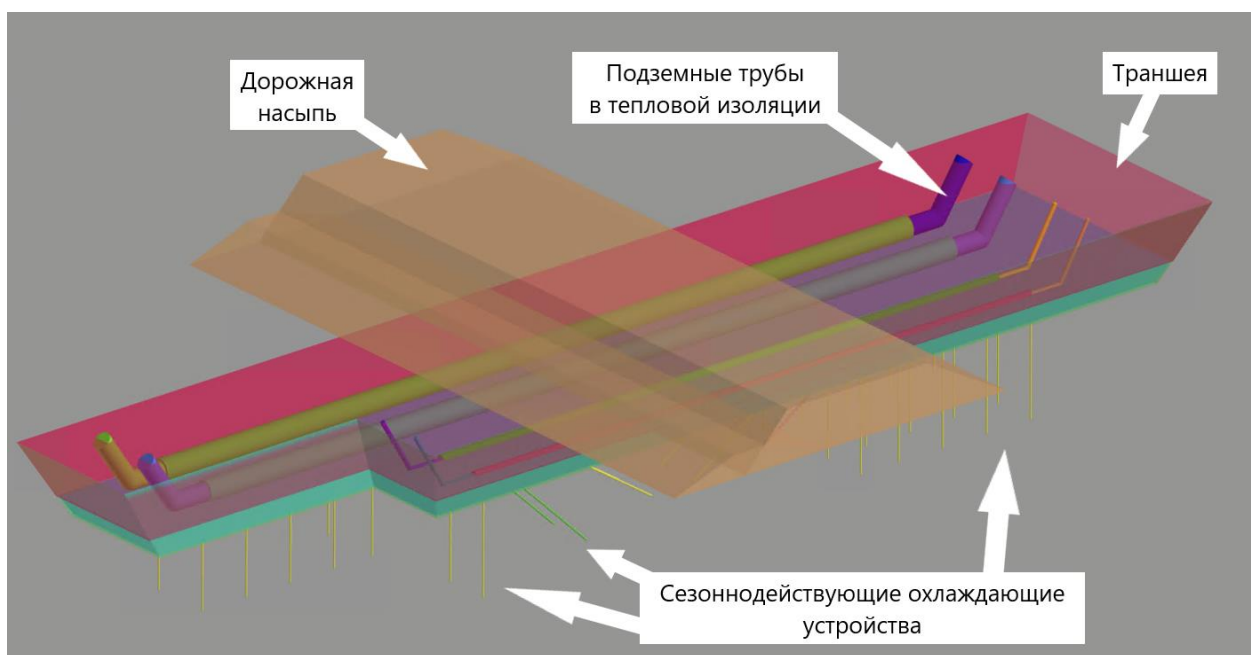


Рисунок 1.4 – Трехмерная постановка расчетной модели с учетом пространственного положения объектов подземного перехода через автодорогу (трубы, траншея, вертикальные и наклонные СОУ, тепловая изоляция, дорожная насыпь)

2) В моделях необходимо учитывать большое числа факторов, влияющих на тепловое взаимодействие трубы и грунта: литологическая и геокриологическая изменчивость вдоль трассы, учет межскважинного

пространства, рельефа грунта, изменение свойств грунтов при оттаивании, метеоусловий, изменение параметров перекачиваемого продукта, наличие разнообразных защитных мероприятий и др.;

3) Требуется проведение расчетов всех участков трассы с ММГ, а не отдельных участков, выделенных с учетом какой-либо типизации;

4) Модели должны быть сформированы с высокой степенью точности и разбиением сетки для учета тонких линз грунта или объектов;

5) Сформированные расчетные модели должны позволять определять расчетное значение деформаций ММГ и изменения температурного поля для всей протяженности трассы трубопровода для геотехнического мониторинга в период эксплуатации сооружения.

1.3. Анализ нормативно-технической документации Российской Федерации

1.3.1. Нормативная документация по проектированию и строительству подземных трубопроводов в криолитозоне

Основным нормативным документом, регламентирующим проектирование на многолетнемерзлых грунтах, является СП 25.13330.2020 «Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Актуализированная редакция СНиП 2.02.04-88 (с Изменениями №1, 2, 3, 4)».

Данный документ регламентирует подход к проектированию зданий и сооружений, возводимых на территории распространения многолетнемерзлых грунтов, в том числе и подземных сооружений. Особенности проектирования трубопроводов, находящихся в криолитозоне, содержатся в 13 разделе. Отдельное внимание стоит уделить пунктам 13.1, 13.6 и 13.9, из которых можно сделать вывод о сложности проектирования подземных трубопроводов в ММГ, поскольку проектировщикам требуются знания в смежных областях для корректного учета всех факторов, влияющих на сооружение во время строительства и эксплуатации, такие как, учет теплового влияния сооружения на ММГ, учет деформаций основания при оттаивании или промерзании, расчет

трубопровода на прочность и устойчивость по I и II группе предельных состояний.

Таблица 1.2 – Классификация нормативной документации по проектированию, строительству и геотехническому мониторингу подземных трубопроводов в криолитозоне

Область применения	Нормативная документация	Область нормирования
Проектирование оснований и фундаментов сооружений в криолитозоне	СП 25.13330.2020 «Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Актуализированная редакция СНиП 2.02.04-88 (с Изменениями №1, 2, 3)»	Общие принципы проектирования сооружений на ММГ; Выбор принципа проектирования на ММГ
Проектирование подземных трубопроводов	СП 36.13330.2012 «Магистральные трубопроводы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.06-85* (с Изменениями №1, 2)»	Основные требования при проектировании магистральных трубопроводов: конструктивные требования, требования к трассе, требования при разных видах прокладки и другие.
	СП 86.13330.2022 «Магистральные трубопроводы»	Правила производства строительных работ при укладке трубопроводов
	СП 284.1325800.2016 «Трубопроводы промышленные для нефти и газа. Правила проектирования и производства работ»	Основные требования при проектировании промышленных трубопроводов
	СП 410.1325800.2018 «Трубопроводы магистральные и промышленные для нефти и газа. Строительство в условиях вечной мерзлоты и контроль выполнения работ»	Правила производства строительных работ при укладке трубопроводов в условиях распространения многолетнемерзлых грунтов
	ГОСТ 34737-2021 «Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Перекачивающие станции. Проектирование»	Основные требования при проектировании магистральных трубопроводов и перекачивающих станций
Инженерные изыскания в криолитозоне	СП 47.13330.2016 «Инженерные изыскания для строительства. Основные положения.	Регламентирует состав, объем, методы и технологии производства инженерно-геологических изысканий для

Область применения	Нормативная документация	Область нормирования
	Актуализированная редакция СНиП 11-02-96»	строительства на территориях, занятых мерзлыми грунтами.
	СП 11-105-97 «Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть IV. Правила производства работ в районах распространения многолетнемерзлых грунтов»	Описаны правила проведения инженерных изысканий в районах ММГ
	СП 493.1325800.2020 «Инженерные изыскания для строительства в районах распространения многолетнемерзлых грунтов. Общие требования»	Устанавливает общие требования к выполнению ИИ, разработке документации, проектированию
Геотехнический мониторинг зданий и сооружений в период строительства и эксплуатации	СП 497.1325800.2020 «Основания и фундаменты зданий и сооружений на многолетнемерзлых грунтах. Правила эксплуатации»	Указания по проведению геотехнического мониторинга при строительстве и эксплуатации зданий и сооружений, в том числе подземных
	СП 305.1325800.2017 «Здания и сооружения. Правила проведения геотехнического мониторинга при строительстве»	
	СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83»	Основные требования к геотехническому мониторингу, предельные деформации основания фундаментов
	СП 249.1325800.2016 «Коммуникации подземные. Проектирование и строительство закрытым способом»	Основные геотехнические требования для подземных коммуникаций

Поскольку трубопроводы являются протяженными сооружениями, по всей их длине в их основании может сменяться множество инженерно-геологических и геокриологических условий. В связи с этим, пункт 6.1.6 допускает проектировать отдельные участки трассы, применяя различные принципы использования многолетнемерзлых грунтов. Также для этого в приложении С приведена типизация участков по сложности строительства в зависимости от

характеристики местности и величины относительного сжатия ММГ при оттаивании. Также в приложении С предлагаются различные способы устройства магистральных трубопроводов, с описанием их преимуществ и недостатков, в зависимости от группы местности. Таким образом, СП 25.13330.2020 объединяет опыт проектирования и эксплуатации, и позволяет применять различные способы укладки трубопровода с упором на инженерно-геологическую составляющую.

Приложение Н содержит формулы и номограммы для определения глубины оттаивания многолетнемерзлых грунтов от воздействия горячих и теплых трубопроводов. Основная проблема состоит в том, что данные расчеты используют эмпирические номограммы, достаточно трудоемки и не учитывают различных пространственных факторов. Для проведения корректных расчетов, требуется просчитать влияние от трубопровода в каждой точке трассы трубопровода, с учетом изменения литологического строения, изменения температуры в трубопроводе по протяженности, что усложняет процесс проектирования.

В наше время технологический прогресс позволяет улучшить процесс проектирования путем использования различных специализированных программных комплексов для упрощения расчетных задач, основанных на определенных расчетных методах. Применение программного обеспечения основано на численных методах расчета, и должно отвечать установленным нормативным требованиям. Применение программных комплексов позволяет обрабатывать большие объемы данных, проводить экспериментальные расчеты, устанавливать закономерности, получать более детальные расчеты, ранее недоступные из-за сложности применения аналитических методов расчета.

Соответственно, на данный момент, справочных данных таблицы Н для качественного проектирования подземного трубопровода, и расчета влияния только по данным формулам и номограммам, конечно, недостаточно. Также, как и справочное приложение С на данный момент неактуально в плане выбора

способа устройства трубопровода. В современной нефтегазовой отрасли, работающей на высоких темпах разработки месторождений от проекта до запуска, для выбора способа устройства трубопровода проводится мультифакторный технико-экономический анализ. Данный анализ учитывает влияние большого перечня факторов: сравнение стоимости и скорости строительно-монтажных работ, стоимость дополнительных защитных мероприятий для разных способов устройства, стоимость различных систем поддержания температур трубопровода, стоимость дополнительных сооружений обустройства, анализ факторов риска, анализ количества прогнозируемых отказов при различных способах и другие. Общим выводом данного анализа может стать однозначное утверждение экономической и технической целесообразности применения определенного способа устройства трубопровода, что может и противоречить справочным данным СП.

Нормативная документация для проектирования и производства работ достаточно обширна и разделена по типам трубопроводов. Основными нормативными документами для проектирования и строительства магистральных трубопроводов на территории РФ являются СП 36.13330.2012 «Магистральные трубопроводы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.06-85* (с Изменениями №1, 2)» и СП 86.13330.2022 «Магистральные трубопроводы».

Для проектирования промысловых трубопроводов утвержден СП 284.1325800.2016 «Трубопроводы промысловые для нефти и газа. Правила проектирования и производства работ».

Также действующим документом, регламентирующим производство работ при строительстве трубопроводов в криолитозоне, является СП 410.1325800.2018 «Трубопроводы магистральные и промысловые для нефти и газа. Строительство в условиях вечной мерзлоты и контроль выполнения работ».

В СП 36.13330.2012 отражены основные требования, требуемые учета при проектировании трубопроводов – конструктивные требования, требования к трассе, требования при разных видах прокладки и другие. Для проектирования

трубопроводов в криолитозоне в данном документе выделен раздел 9.5 «Прокладка трубопроводов в районах многолетнемерзлых грунтов». Основные пункты содержат в себе информацию о нормативных документах по изысканиям, требующих совместного учета, рекомендации по выбору трассы трубопроводов, проходящих через ММГ, информацию о возможных принципах использования ММГ и требований при выборе каждого из них.

Отдельно стоит выделить пункты 7.12 и 13.7, которые говорят о том, что основным принципом использования многолетнемерзлых грунтов в качестве основания трубопроводов является принцип использования их в мерзлом состоянии, сохраняемом в процессе строительства и эксплуатации сооружения, то есть I принцип использования мерзлых грунтов, что для подземных трубопроводов в большинстве случаев необоснованно по нескольким причинам. Во-первых, любые работы по монтажу подземных трубопроводов, такие как выемка грунтов, разработка траншеи, укладка тела трубопровода нарушают естественный тепловой баланс участка, изменяют фильтрационные потоки в грунтах, изменяют теплофизические свойства грунтов обратной засыпки траншеи, альбедо поверхности. Все данные процессы приводят к изменению глубины сезонного оттаивания, дополнительной обводненности и процессам консолидации грунтов деятельного слоя в первые 1-3 года, что впоследствии может привести к процессам деградации многолетнемерзлых грунтов. Во-вторых, горячие или теплые трубопроводы будут излучать тепловую энергию в грунт на протяжении всего периода эксплуатации, при этом, если оттаивание будет происходить ниже глубины промерзания, образуется незамерзающий слой, который будет расти год от года, что противоречит I принципу использования грунтов, и придется применять дополнительные мероприятия либо для уменьшения теплового воздействия, либо для промораживания грунтов.

Возвращаясь к разделу 9.5, следует выделить 2 абзац пункта 9.5.5, утверждающий, что трубопроводы при использовании их по принципу II

необходимо рассчитывать на просадки и пучения. В данном пункте данный расчет в большей степени относится к многолетнемерзлым грунтам, а не к деятельному слою, но все же просадка и пучение при II принципе будет учитывать эти же процессы в деятельном слое.

Свод правил 86.13330.2022 направлен на регламентирование требований к организации всех строительных работ и эксплуатации магистральных трубопроводов, в том числе и в сложных геологических условиях криолитозоны.

По аналогии с СП 36.13330.2012, в разделе конструктивных требований к трубопроводам СП 284.1325800.2016, выделен раздел 9.6 «Прокладка трубопроводов на многолетнемерзлых грунтах». Ниже перечислены основные важные пункты данного свода правил.

Пункт 9.6.2 регламентирует учет дополнительных напряжений от изгиба трубопровода, вызванного неравномерной осадкой основания, при использовании грунтов по II принципу, в соответствии с СП 25.13330.2020. Данный пункт позволяет понять, что оттаивание ММГ должно быть всегда учтено при проведении прочностных расчетов трубопроводов.

Пункт 13.9 допускает оттаивание ММГ в процессе строительства и эксплуатации на участках с льдистостью менее 0,1. Но при этом допущении оттаивания ММГ не указывается об обязательности учета изменения профиля трубопровода на участках, а также учета данных изменений при проведении расчетов трубы на прочность и устойчивость. Также данный пункт допускает многолетнее промораживание талых непучинистых грунтов, транспортирующих газ с отрицательной температурой, что достаточно часто встречается при проектировании.

Пункт 15.9 ограничивает работы по сооружению трубопроводов на многолетнемерзлых грунтах периодом наличия отрицательных температур окружающей среды.

Пункт 20.4.17 гласит о наличии валика грунта поверх засыпки траншеи мерзлым грунтом, с учетом последующей его осадки при оттаивании. Данный

пункт также требует изначального учета при проведении прогнозных расчетов. Присыпка валика обычно производится песчаным грунтом, а осадка может составлять субметровые величины, в связи с чем засыпка валика над траншеей может иметь влияние на поверхностное граничное условие при проведении теплотехнических расчетов, что может привести к увеличению оттаивания ММГ и дополнительным напряжениям в трубопроводе.

Также важен пункт 26.7, в котором указано, что при прокладке трубопроводов требуется сохранять температурный и влажностный режим ММГ, а в грунтах с высокой льдистостью не допускается ведение земляных работ методами, использующими термическое воздействие на грунты. В данном или других пунктах по производству земляных работ не указывается, что методика разработки должна быть изначально учтена при проектировании и прогнозировании изменений состояния грунтов, поскольку разработка траншеи в летнее время с естественным оттаиванием может привести к сильным изменениям геокриологического состояния грунтов из-за прямого воздействия солнечной радиации на разрабатываемую траншею, что приводит к увеличению глубины сезонного оттаивания, а также из-за инфильтрации поверхностных осадков в толщу мерзлого грунта.

Еще одним действующим документом, регламентирующим производство работ при устройстве трубопроводов в криолитозоне является СП 410.1325800.2018 «Трубопроводы магистральные и промысловые для нефти и газа. Строительство в условиях вечной мерзлоты и контроль выполнения работ»

Важным пунктом является пункт 5.4, регламентирующий, что основным принципом использования ММГ при условиях величины относительной осадки более 0,1 должен быть принцип сохранения многолетнемерзлых грунтов в мерзлом состоянии на весь период эксплуатации. Но при этом, данное ограничение не является строгим. Использование I принципа при проектировании подземных трубопроводов с значительным тепловым воздействием на мерзлые грунты, например, при высоких температурах

продукта, влияние от которых не удастся сократить только использованием тепловой изоляции, приводит к применению дополнительных мероприятий по температурной стабилизации – устройству утепления траншеи или применению СОУ. В особенности, применение СОУ, приводит к значительному удорожанию проекта, а также, не всегда является безопасным и качественным техническим решением, о чем может говорить опыт проектирования и эксплуатации подземного трубопровода «Ванкор-Пурпе».

Также в пункте 5.16 дублируется информация пункта 13.9 СП 36.13330.2012.

В СП 410.1325800.2018 также регламентируется и проведение геотехнического мониторинга трубопроводов. Согласно пункту 11.46, прокладка трубопровода на ММГ должна выполняться с проведением систематических натурных наблюдений в соответствии с СП 25.13330.2020. Проведение мониторинга трубопроводов на ММГ особенно важно, поскольку трубопровод, являясь линейным протяженным объектом, может находиться в разнообразных инженерно-геологических, геокриологических и температурных условиях, изменение любого из которых может привести к отказу трубопровода или аварийной ситуации. И чем обширнее будет сеть мониторинга, тем более безопасным будет дальнейшая эксплуатация объекта.

Для проектирования любых сооружений на участках распространения многолетнемерзлых грунтов требуется с особенной тщательностью проводить инженерные изыскания. Основными документами, нормирующими проведение инженерных изысканий на многолетнемерзлых грунтах, является СП 47.13330.2016 «Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96», а также СП 11-105-97 «Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть IV. Правила производства работ в районах распространения многолетнемерзлых грунтов».

Данные документы устанавливают состав, объем, методы и технологии производства инженерно-геологических изысканий для строительства на территории Российской Федерации, занятой многолетнемерзлыми грунтами.

В пункте 6.3.3 СП 47.13330 описаны все дополнительные требования к результатам инженерно-геологических изысканий для подготовки проектной документации в районах распространения ММГ, и в частности, при наличии различных геокриологических процессов, встреченных при изысканиях.

В свою очередь, СП 11-105-97, часть IV, устанавливает правила проведения и производства самих инженерно-геологических изысканий для территории, занятой многолетнемерзлыми грунтами как для проектной документации, так и для рабочей документации.

Разный подход к объемам проведения инженерных изысканий для стадии ПД и РД конкретно для подземных трубопроводов, по опыту, является неактуальным. Большая часть изыскательских экспедиций в нефтегазовой отрасли проводится в одну стадию, без дальнейшего уточнения при обработке данных проектировщиками. Это связано и с достаточно хорошей изученностью районов изысканий, а также с постоянно увеличивающимися темпами проектирования и строительства объектов нефтегазовой отрасли. Также в связи с уровнем ответственности сооружения линейного объекта по транспорту нефти, к подземным трубопроводам требуется иной подход к проведению наиболее качественных изысканий. Количество продольных выработок по трассе, приведенное в таблице 8.3, а также глубина выработок, указанная в таблице 7.2, являются недостаточными для проведения детального прогнозного теплотехнического расчета по всей длине трассы. В особенности, в сложных условиях с большим количеством геологических наслоений и изменениями положения кровли ММГ, переходами «многолетнемерзлый грунт - талый грунт». Поскольку фактические условия в пространстве между скважинами для подземных трубопроводов (от 100 до 200 метров между скважинами), такие как форма геологических наслоений, их мощность, температура грунтов, наличие

линз льда или карстовых полостей, контур фронта мерзлоты, являются неисследованными, прогноз не является однозначно корректным с точки зрения учета всех криогенных процессов. Неучет указанных выше факторов может привести к аварийным ситуациям на подземном трубопроводе. Для изучения межскважинных областей должно быть строго регламентировано применение различных геофизических методов определения состава, формы и состояния грунтов.

На данный момент, нормативная база, объединяющая в себе многолетний опыт проектирования и изучения криолитозоны, является достаточной для проведения проектных работ на площадных объектах, линейных сооружениях, устроенных надземным способом на свайных основаниях, при устройстве подземных переходов. Что касается подземной прокладки трубопроводов в многолетнемерзлых грунтах - нормативная база на данный момент не учитывает всей сложности ПТС «подземный трубопровод – многолетнемерзлый грунт – атмосфера», не описывает все возможные вариации устройства данного вида сооружений, а также не содержит конкретики по последовательности проведения качественных расчетов данного вида сооружений, оставляя это в зоне ответственности проектирующей организации.

1.3.2. Нормативная документация по геотехническому мониторингу подземных трубопроводов в криолитозоне

Для проведения анализа состояния нормативной базы была рассмотрена подборка основных НТД, в которых изложены требования по геотехническому мониторингу подземных трубопроводов в ММГ (табл. 1.2)

Основные требования к проведению геотехнического мониторинга в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов описываются СП 25.13330.2020. Необходимость проведения ГТМ для подземных трубопроводов обоснована в пунктах 15.3 СП 25.13330.2020, пункте 8.7.2 СП 305.1325800.2017 и пункте 11.46 СП 410.1325800.2018. Таблица М.1 СП 25.13330.2020 определяет основные

контролируемые параметры при ГТМ – температура грунта, уровень подземных вод, деформация, температура охлаждающих устройств. Конструктивно, устройства для наблюдения за указанными параметрами не зависят от типа сооружения и аналогичны как для площадных сооружений, так и для подземного трубопровода.

Область применения СП 497.1325800.2020 не распространяется на линейные объекты, СП 22.13330.2016 не распространяется на проектирование сооружений на ММГ, а СП 305.1325800.2017 не распространяется на мониторинг магистральных трубопроводов, таким образом, на данный момент в федеральных нормах отсутствуют требования и указания по проведению геотехнического мониторинга подземных трубопроводов.

Перечень НТД для проектирования трубопроводов достаточно обширен и разделен, в основном, по типам трубопроводов. В каждом из нормативных документов таблицы 3.1 содержатся отдельные требования по необходимости мониторинга ММГ и состояния трубопровода, но без определения объема и состава работ, перечня элементов сети ГТМ и иных требований, за исключением СП 410.1325800.2018, который содержит информацию о необходимости «установки маркировочных стоек-реперов для оценки просадки трубопровода».

Для зданий и сооружений с наличием фундаментов, предельное значение контролируемых параметров устанавливает проектная организация в соответствии с требованиями НТД: для температур грунтов – расчетный температурный режим в зоне устройства фундамента по теплотехническому прогнозу, для деформаций – предельные деформации основания фундаментов в соответствии с приложением Г СП 22.13330.2016. Для подземных трубопроводов предельные значения не определены нормативно и должны быть получены расчетным способом, о чем гласит пункт 8.5.4 ГОСТ 34737-2021 и пункт 5.4.1 СП 305.1325800.2017, при этом, отсутствует перечень допускаемых методов и требования, предъявляемые к методам, результатам расчетов и их точности. Таким образом, все расчетные методы, определяющие механику

взаимодействия трубы и вмещающего грунта только в определенных сечениях, с типизированием геологических условий (о которых упоминалось в разделе 1.2), являются допустимыми с точки зрения требований федеральных норм, но, по мнению авторов, не являются релевантными для всей протяженности трассы линейного сооружения по причине несоответствия точности результатов и сложности геотехнической системы «многолетнемерзлый грунт - подземный трубопровод».

Резюмируя, можно выделить две основные проблемы современного состояния нормативной документации по геотехническому мониторингу подземных трубопроводов:

1. Отсутствие требований по методам определения предельных значений контролируемых параметров и их значений для подземных трубопроводов в криолитозоне;
2. Отсутствие требований по составу, объему, типовым конструкциям, расположению элементов сети ГТМ и применяемым методам измерения контролируемых параметров для подземных линейных сооружений в ММГ [2].

1.4. Выводы по главе 1

Подводя итоги приведенного обзора работ и состояния нормативно-технической базы, необходимо отметить, что совершенствование теплового и механического взаимодействия компонентов ПТС «подземный трубопровод – многолетнемерзлый грунт – атмосфера» является актуальной проблемой.

Корректное прогнозирование изменений ММГ с учетом техногенного воздействия, обеспечение безаварийной эксплуатации трубопроводного транспорта в криолитозоне является важной задачей по обеспечению развития нефтегазовой отрасли, а также сохранения экологически безопасной обстановки в северных регионах. Наличие множества аналитических и численных методов прогнозирования изменения ММГ от воздействия подземных трубопроводов

обозначает глубокую заинтересованность и важность корректного учета данной технической задачи.

Обзор работ по теме исследования показывает, что существующие методики формирования расчетных моделей для теплового и механического расчета объясняют частные случаи, рассматриваются упрощенное строение системы - отдельные участки трассы, поперечные сечения, а не вся ПТС в целом по всей протяженности трубопровода. Исходя из этого, возникают вопросы о корректности прогнозирования данными методами и возникает ряд требований к формированию расчетных моделей и проведению тепловых и механических расчетов ПТС.

При этом, отсутствует связность современной нормативной литературы, разобщенные единичные требования или разделы, иногда идущие вразрез друг другу, не дают понимания об многокомпонентности системы «подземный трубопровод – многолетнемерзлый грунт – атмосфера», требующей комплексного рассмотрения при проектировании.

Выявлено отсутствие конкретных требований по составу, объему, расположению элементов сети ГТМ для подземных линейных сооружений в ММГ, а также отсутствие обоснования по методикам получения расчетного значения предельных деформаций подземного сооружения, как и требований к самим значениям.

Обозначенные вопросы совершенствования методик тепловых расчетов и геотехнического мониторинга подземных трубопроводов и являются предметом исследования настоящей работы.

ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ ОСНОВАНИЙ ПОДЗЕМНЫХ ЛИНЕЙНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ В КРИОЛИТОЗОНЕ

2.1. Комплексная методика расчета подземного трубопровода в сложных геокриологических условиях

Подземный трубопровод располагается в разнообразных геологических и геокриологических условиях: сменяющиеся типы распространения ММГ по трассе, от сплошного до редкоостровного распространения ММГ, наличие перелетков, сквозных и несквозных таликов, разнообразная литология, широкие диапазоны температур ММГ – от температур, близких к температурам фазовых переходов, до температур перехода в твердомерзлое состояние – все перечисленные условия можно встретить на инженерно-геологическом профиле одного трубопровода. Транспортирование углеводородов на протяженные расстояния должно производиться при соответствии требованиям к поддержанию и изменению температур продукта. Смена технологических режимов и изменение объемов перекачки приводит к наличию диапазона температурных режимов трубопровода. Изменяющийся ландшафт и рельеф поверхности, изменение высотных отметок поверхности, водные и иные преграды приводят к смене положений трубопровода в грунте, применению отводов, компенсаторов, балластировки и иных элементов разной номенклатуры.

Все вышеперечисленное имеет непосредственное взаимное воздействие в природно-технической системе «подземный трубопровод – многолетнемерзлый грунт – атмосфера», и должно быть учтено при прогнозировании изменений системы. Таким образом, типизация геологических условий и применение двумерных расчетов методом поперечных сечений одного типа ИГУ или ряд подобных расчетов по трассе трубопровода, не учитывают всего диапазона возможных сочетаний геологических, геокриологических и технических условий прокладки в системе, что было описано в разделе 1.2 главы 1. Особенно

критичен метод сечений в местах смены геокриологических условий, где немерзлый грунт сменяется мерзлым, в местах с наклонным фронтом мерзлоты, на участках с островным распространением многолетнемерзлых грунтов [56].

Комплексная методика, основанная на итерационном тепломеханическом расчете всей протяженности трассы подземного трубопровода, применяется сотрудниками АО «ТомскНИПИнефть» в своих проектах с 2020 года. Методика заключается в объединении теплотехнического и прочностного расчетов, проведении анализа их результатов и итерационного подбора экономически эффективных защитных мероприятий как основания трубопровода, так и самого трубопровода, по определенному алгоритму.

Основные положения методики заключаются в следующем:

1. Расчеты теплового режима грунтового основания и расчеты на прочность и устойчивость трубопровода должны проводиться численными методами в специализированном программном обеспечении.

2. Для подземных трубопроводов, по трассе которых были вскрыты ММГ, должны быть рассчитаны тепловые режимы и изменение напряженно-деформированных состояний (НДС) полностью по всей длине трассы, без применения типизирования по инженерно-геокриологическим и геоморфологическим условиям.

3. При проведении расчетов, должны быть учтены условия, наиболее близкие к реальным параметрам эксплуатации трубопровода, с восстановлением инженерно-геологических профилей с учетом положений границ ММГ, падения температур продукта по протяженности трубопровода и изменения температурного режима флюида во времени.

Основные этапы проведения расчетов подземных трубопроводов отражены в блок-схеме (рис. 2.1).

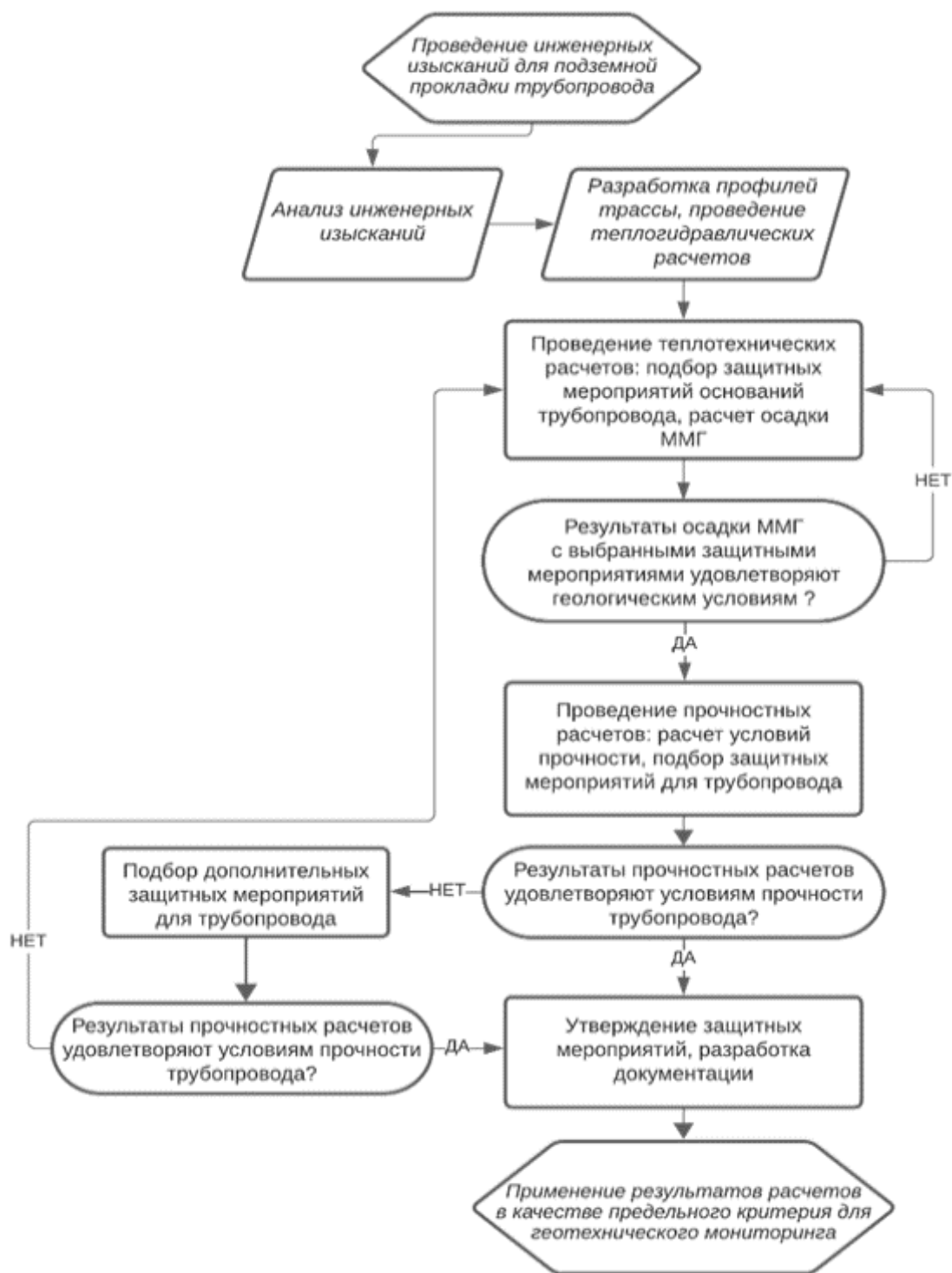


Рисунок 2.1 - Блок-схема применения комплексной методики расчета подземного трубопровода в криолитозоне

К изысканиям для подземной прокладки трубопровода должны предъявляться особые требования, так как количество и объем исходных данных

для расчетов является важным для корректности прогнозирования и результатов расчетов [57].

После того, как изыскания проведены в достаточном объеме, специалистами трубопроводного транспорта разрабатывается профиль трассы, формируется вертикальная планировка прокладки трубопровода, при необходимости, намечаются пикеты срезки или досыпки грунта, обозначаются места переходов через преграды. Также проводится комплексный гидравлический расчет для группы объектов или отдельного трубопровода, при котором подбираются параметры трубопровода – определяется диаметр трубопровода и толщина стенок, оцениваются параметры давления, пропускной способности, определяется температурный режим перекачки продукта и изменение температуры флюидов по трассе трубопровода при неизотермическом движении жидкости. Для тепловых расчетов грунтов основания наиболее значимым результатом гидравлического расчета является график изменения температуры флюида от протяженности трассы в течение всего периода эксплуатации, на котором могут быть выделены разные участки системы трубопроводного транспорта с разными параметрами (диаметр, толщины стенок, давление и так далее) (рис. 2.2). Современное программное обеспечение позволяет детализировать изменение температуры продукта не только по протяженности, но и во времени, что позволяет учесть разное тепловое воздействие от трубопровода на грунты основания в любой точке трассы за исследуемый прогнозный период. На основании результатов гидравлического расчета определяется необходимость в тепловой изоляции для сохранения необходимого температурного режима углеводородов при транспортировании. Учет неизотермического движения жидкости в трубопроводе обязателен при длинах трубопровода от нескольких километров, а также при широком диапазоне температур, как по длине трассы, так и по годам эксплуатации, поскольку температура продукта является основным техногенным тепловым воздействием на многолетнемерзлые грунты, вмещающие трубопровод.

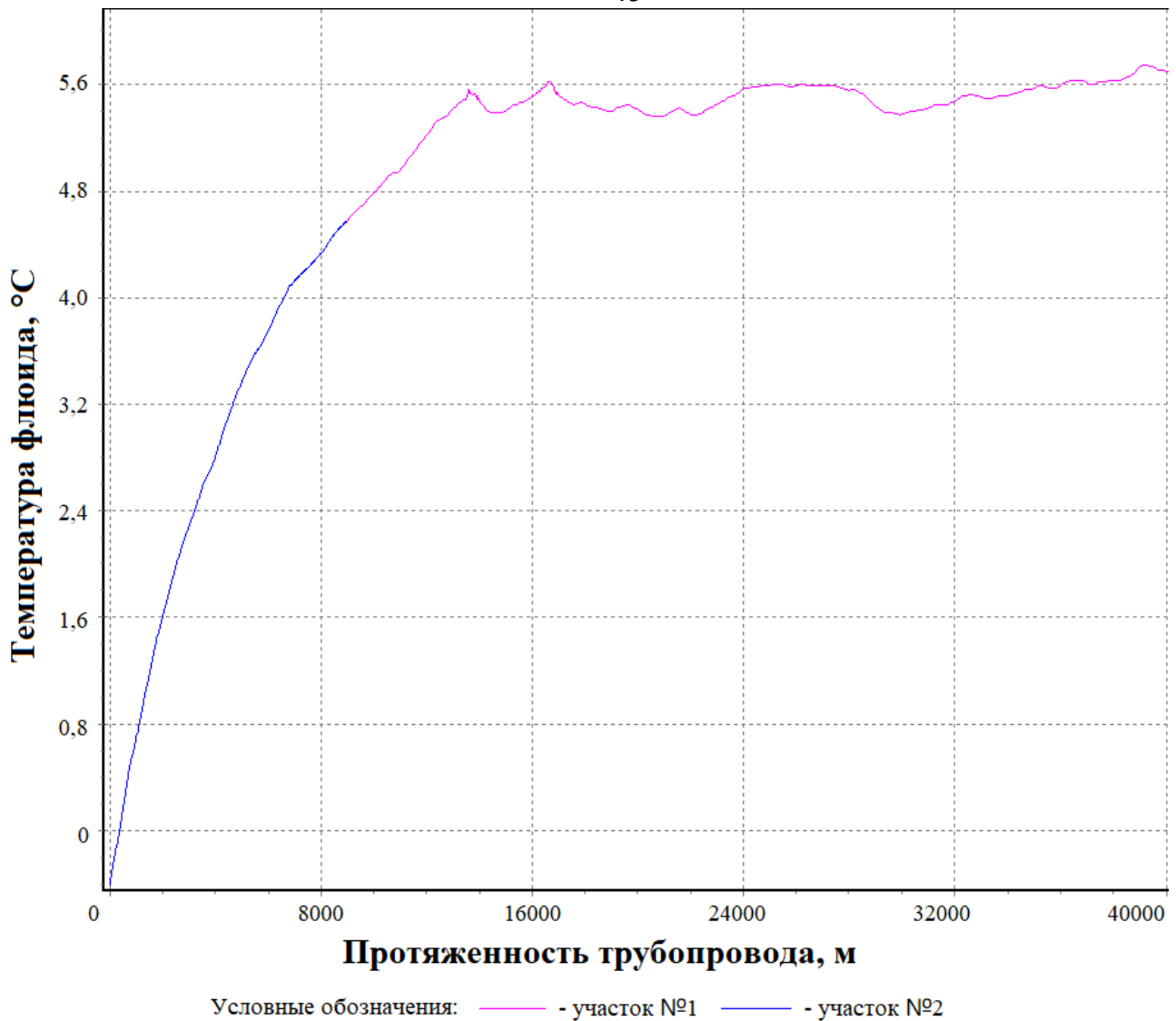


Рисунок 2.2 – График изменения температуры флюида по протяженности трассы трубопровода

Сформированный профиль трассы, гидравлические расчеты, совместно с результатами инженерных изысканий являются исходными данными для проведения начальной итерации теплотехнических расчетов. В специализированном программном обеспечении для всех участков трассы, находящихся в многолетнемерзлых грунтах, создается трехмерная расчетная модель, в которой воссоздается профиль трассы с его литологическим строением, моделируется температурное поле по исследованным термометрическим изысканиям, обозначается местоположение фронта мерзлоты, выделяются немерзлые грунты.

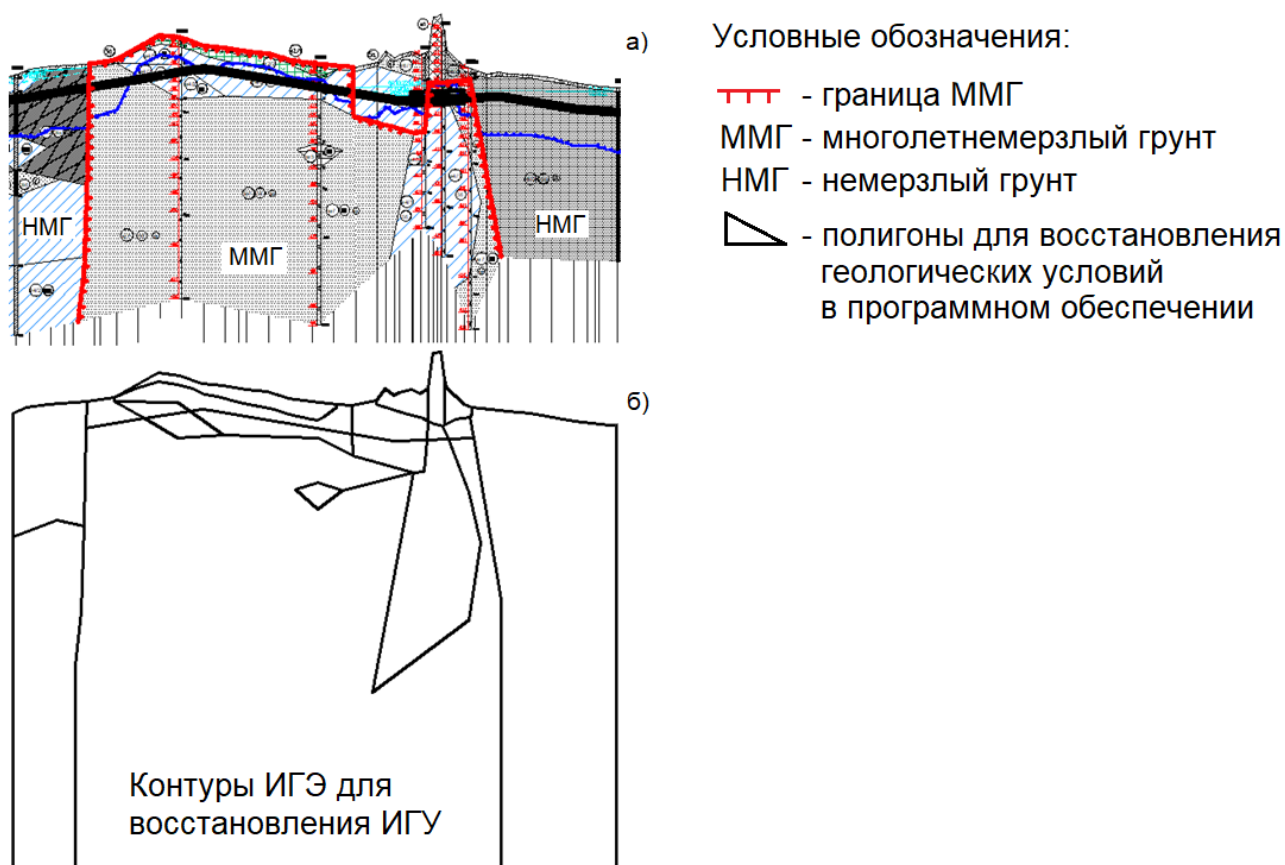


Рисунок 2.3 – Один из способов восстановления геологического профиля трубопровода: а) геологический профиль трубопровода; б) преобразованный и подготовленный профиль с разбиением на ИГЭ с выделением мерзлых/немерзлых грунтов, грунтов относительно положения трубопровода

Трубопровод моделируется с изменением пространственного положения в грунте, в соответствии с профилем трассы, с динамическим изменением температуры флюида в трубопроводе по длине трассы и по времени эксплуатации.

Цель первой итерации расчета – рассчитать изменение температурных полей и спрогнозировать оттаивание ММГ с первоначальными техническими мероприятиями – только с учетом мероприятий, заложенных по результатам теплогидравлического расчета или задания на проектирование.

Поскольку при теплотехнических расчетах рассчитывается весь массив ММГ, то и протаивание можно просчитать для всей длины трубопровода.

Результатом теплотехнического расчета является прогнозируемый профиль осадки трубопровода – график максимальной осадки многолетнемерзлого грунта за весь период эксплуатации по длине расчетного участка (рис. 2.4).

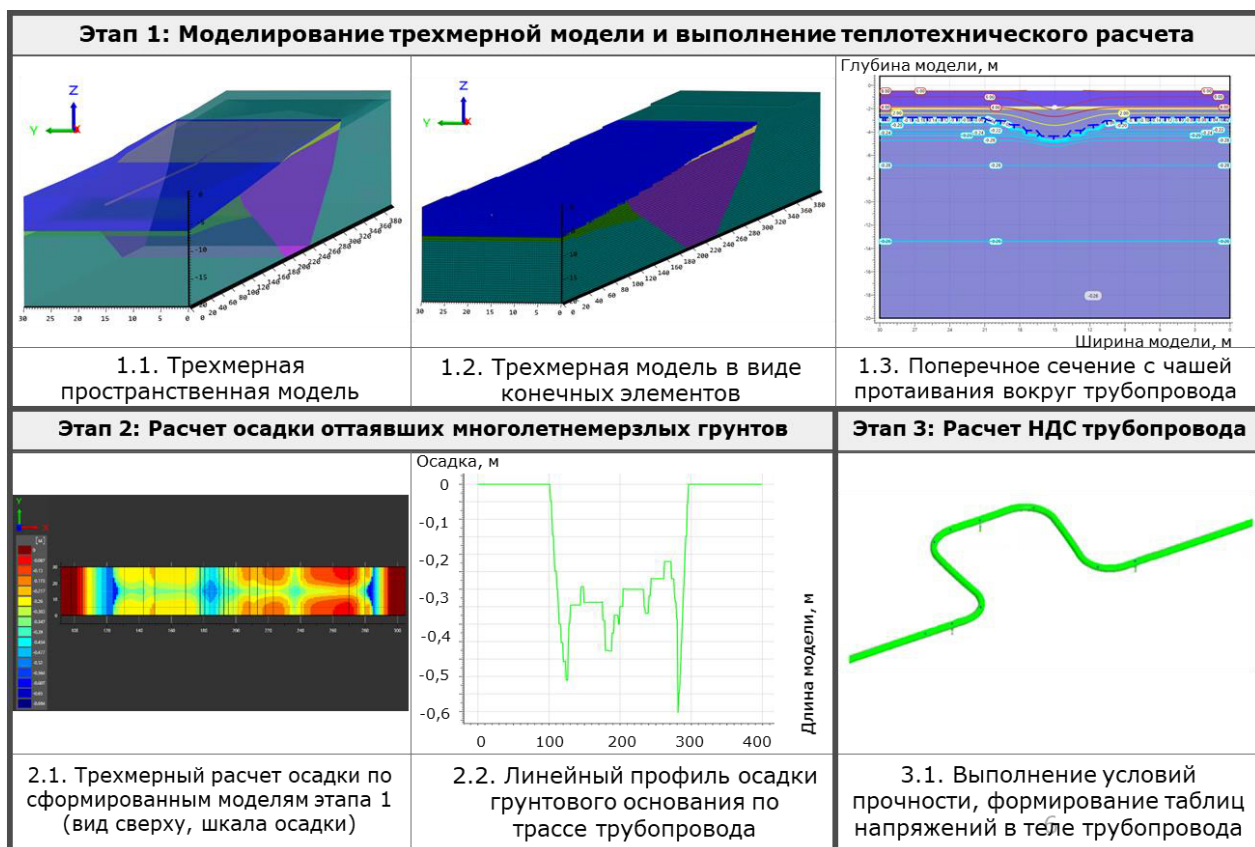


Рисунок 2.4 - Результаты теплотехнического расчета – получение профиля осадки расчетной модели длиной (этап 2.2)

Поскольку для подземных трубопроводов отсутствуют нормативные ограничения по осадке грунтов основания, при проведении первоначальных теплотехнических расчетов, требуется исключать высокие значения просадки грунтов в коридоре трассе трубопровода для недопущения значительного понижения отметок естественного рельефа. Термопросадка в зоне прокладки трубопровода с образованием чаши оттаивания вдоль оси трубы во время эксплуатации может привести к развитию экзогенных геологических процессов, процессам обводнения и заболачивания, стока поверхностных вод в зону траншеи трубопровода с понижением высотной отметки рельефа, развития процессов пучения и ускорения процессов деградации ММГ. В зависимости от

инженерно-геологического строения и характеристик грунтов приповерхностного слоя, требуется ограничивать значение максимальной осадки грунтов, которое можно нивелировать при помощи защитных мероприятий по отведению поверхностных вод от траншеи – формированию кюветов у подошвы откоса, надтраншейного валика, высота которого определяется с учетом осадки.

После анализа результатов первой итерации теплотехнического расчета, при высоких значениях осадки производится дополнительный теплотехнический расчет с подбором защитных мероприятий по уменьшению оттаивания – рассматривается увеличение тепловой изоляции трубопровода и/или реализация тепловой изоляции котлована, проведение замены грунта на непучинистые грунты и иные мероприятия. Таким образом, цикл теплотехнических расчетов продолжается до удовлетворения условий по исключению высоких значений осадок и возможного развития опасных геологических процессов (в блок-схеме данные условия названы «геологическими»).

В результате, формируется окончательный профиль осадки ММГ при оттаивании, который используется в качестве исходных данных для задания дополнительных условий нагрузки на трубопровод при проведении следующего этапа - прочностного расчета.

Прочностной расчет проводится в специализированном программном обеспечении на всю длину трубопровода, как в ММГ, так и в немерзлых грунтах. В прочностных расчетах учитываются все пространственные изменения трубопровода, применение баллаستировки, тип вмещающего грунта, характеристики продукта и трубы и другие параметры [58].

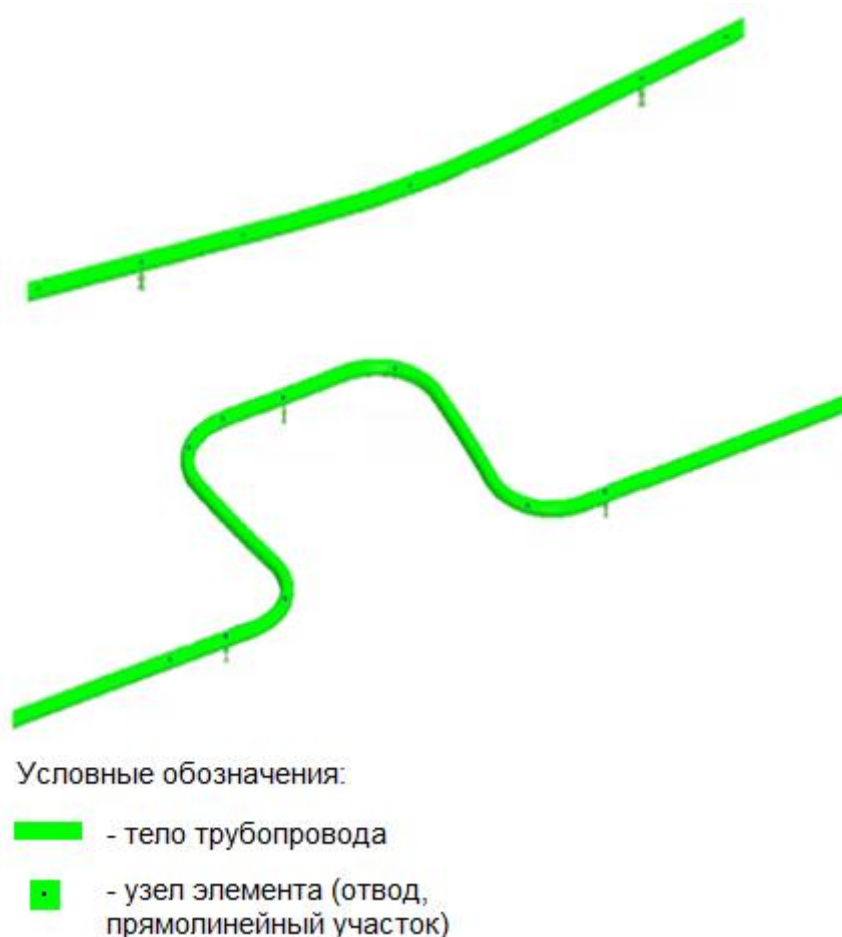


Рисунок 2.5 – Вид трубопровода в расчетной модели для расчета НДС

При неудовлетворении результатов прочностных условий, подбираются защитные мероприятия к трубопроводу – от замены отводов и изменения радиусов изгиба до увеличения класса прочности стали.

При повторном неудовлетворении прочностных условий, отмечаются пикеты трубы с превышением напряжений и направляются в качестве исходных данных на повторную итерацию теплотехнического расчета для подбора и применения дополнительных мероприятий основания на конкретном участке трассы, далее - повторный прочностной расчет.

При удовлетворении условий прочности трубы, защитные мероприятия основания трубопровода и тела трубопровода утверждаются как окончательные, на основании данных результатов разрабатывается рабочая документация.

2.2. Влияние входных параметров и граничных условий на результаты теплотехнических расчетов

При применении комплексной методики, в части теплотехнических расчетов, при которых моделируется вся геологическая информация разреза, одной из основных проблем проведения теплотехнических расчетов является неопределенность исходных данных – отсутствие измерений температуры талых грунтов, участвующих в процессах теплообмена, ограниченная глубина геологических выработок, неоднозначность положения фронта многолетнемерзлых грунтов.

Для корректного применения комплексной методики требуется выявить факторы и неопределенности исходных данных с возможными допущениями, которые критично повлияют на НДС трубопровода. Для этого было проведено исследование по применению различных методик задания исходных данных для теплотехнических расчетов и сравнение влияния результатов расчетов теплового состояния на напряженно-деформированное состояние (НДС) трубопровода. Методология состояла в следующем:

- 1) восстановление геологического профиля трассы трубопровода;
- 2) выбор программного обеспечения (ПО) и методик моделирования геологической обстановки (литологического строения профилей трассы, температурных полей) в ПО для проведения сравнительного анализа;
- 3) выбор проектируемого объекта с наличием многолетнемерзлых грунтов островного распространения и анализ материалов инженерно-геологических изысканий участков трассы;
- 4) разработка расчетных моделей (РМ), сравнение и оценка результатов теплотехнических расчетов;
- 5) установление критичности изменения факторов на прочностные характеристики трубопровода путем проведения расчетов прочности трубопровода.

Для проведения теплотехнических расчетов численными методами в исследовании применялось ПО «Frost 3D» (далее – ПО №1), «Борей 3D» (далее – ПО №2), для проведения прочностных расчетов трубопровода использовалось ПО «СТАРТ-Проф».

Выбор ПО и методик восстановления геологической обстановки

Теплотехнический расчет подземных трубопроводов требуется выполнять в случаях, когда трубопровод прокладывается в грунтовых условиях с присутствием ММГ. Суть расчета состоит в определении результатов теплового воздействия от трубопровода на мерзлоту, то есть в определении ореолов оттаивания (либо промораживания) грунта за период эксплуатации сооружения и вычислении значений осадки грунтового основания в пределах данных ореолов.

Особенностью создания расчетной модели в ПО являются различные способы задания как инженерно-геологических элементов (ИГЭ), так и температурного поля в грунте, которые могут повлиять на получаемый прогноз.

Геологический профиль можно смоделировать при помощи двух способов:

1) Через внутренний инструмент ПО – задание «Геологических скважин»: при таком способе восстановления задается геологический разрез в выработанных геологических скважинах (реализован в ПО №1 и №2). Изменение литологии, учитывающее наслоения, изменение мощностей ИГЭ между выбуренными скважинами назначается при помощи задания дополнительных скважин, фактически соответствующих профилю трассы, но физически не реализованных при изысканиях. Межскважинное пространство интерполируется между значениями назначенных скважин (только в ПО №1, в ПО №2 используется вертикализация скважин);

2) Через инструмент ПО – «Строительный объект» (реализован в ПО №1 и №2): при таком способе восстановления, геологический профиль может быть начерчен или обработан в полном соответствии с данными инженерных изысканий в системах автоматизированного проектирования (САПР) и черчения,

и импортирован в ПО в качестве типа «Строительный объект» с последующим присвоением характеристик грунтов данным объектам. Межскважинное пространство, масштабы и контуры ИГЭ также полностью соответствуют геологическому профилю, сформированному в отчете по результатам инженерно-геологических изысканий (рис. 2.3).

Температурное поле в расчетной модели также можно задать двумя способами:

1) Задание фиксированной температуры ИГЭ/материала (реализован в ПО №1) – выбранному ИГЭ/материалу в расчетной модели присваивается назначаемая температура по всей мощности, находящейся в расчетной модели, вне зависимости от ее местоположения, глубины и мощности слоев.

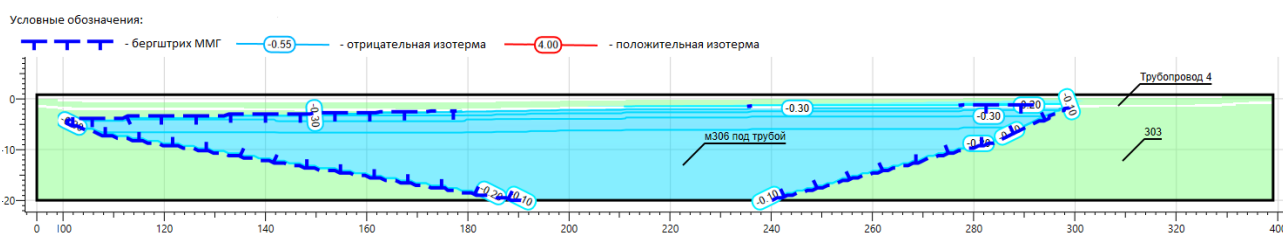


Рисунок 2.6 – Начальное тепловое распределение с температурой немерзлых грунтов 1,0 °С

2) Задание температуры расчетной модели через тепловое распределение (реализован в ПО №1 и №2): в расчетной модели задается ряд температурных скважин, со значениями на различных глубинах, изученных при проведении инженерных изысканий, температурное поле между данными скважинами получается при помощи математической интерполяции.

Были выбраны несколько основных факторов для оценки влияния на результаты теплотехнических расчетов: температура немерзлых грунтов, габаритные размеры расчетной модели, разные мероприятия по уменьшению ореолов оттаивания, применение разных граничных условий (ГУ) на нижнюю грань расчетной модели.

Температура немерзлых грунтов

Во время инженерно-геологических изысканий для изучения геологического профиля производятся температурные замеры только мерзлых грунтов, возникает вопрос о том, какую температуру талых грунтов допустимо принять в расчетной модели, и какое воздействие данный фактор будет иметь на изменение фронта ММГ в расчетной модели.

Важно отметить, что температуры как мерзлых, так и талых грунтов, используются только для первоначального распределения температурного поля в пространстве расчетной модели, то есть для нулевой итерации, температура не является постоянной характеристикой материала, а участвует в решении уравнений теплопроводности.

Для сравнения были определены 4 варианта задания температурных полей:

- 1) С температурой талых грунтов $1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, задаваемых фиксировано для всего массива талых грунтов (реализован только в ПО №1);
- 2) С температурой талых грунтов $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, задаваемых фиксировано для всего массива талых грунтов (реализован только в ПО №1);
- 3) С температурой талых грунтов $0,05^{\circ}\text{C}$, задаваемых фиксировано для всего массива талых грунтов (реализован только в ПО №1);
- 4) С температурным распределением в зоне фронта ММГ, в котором температуры и талых и мерзлых грунтов задаются через тепловое распределение.

В данном способе, температуры задаются при помощи вертикальных температурных скважин с определенными координатами в расчетной модели, температуры между которыми интерполируются для получения температурного поля всей расчетной модели (реализован в ПО №1 и №2).

Габаритные размеры расчетной модели

Габаритные размеры имеют большое влияние на тепловое распределение внутри самой модели. Для исключения накопления тепла на границах расчетных моделей, границы должны быть удалены как друг от друга, так и от тепловыделяющих объектов. В исследовании была принята фиксированная

ширина расчетной модели – 30 метров, длина модели - 400 метров, включает в себя центральный участок с островной мерзлотой длиной 200 метров, с двух сторон ограниченный участками с немерзлыми грунтами по 100 метров длиной.

Стоит отметить, что глубина выработки для подземных трубопроводов обычно не превышает 20 метров. При необходимости увеличить высоту расчетной модели, возникает неопределенность задания геологического разреза и температуры нижележащих слоев. При отсутствии данных, экстраполируются данные нижних слоев (местоположение фронта ММГ и геологических слоев) вертикально вниз, используются ИГЭ, вскрытые на забое скважины, для нижележащих слоев используется температура грунтов, измеренная в нижней точке геологической скважины.

Для исследования влияния глубины расчетной модели на результаты теплотехнических расчетов, были рассмотрены 3 разных значения высоты расчетной модели:

- 1) 20 метров;
- 2) 30 метров;
- 3) 40 метров.

Разные мероприятия по уменьшению ореолов оттаивания

Для учета изменения температурного поля на границе фронта ММГ, было рассмотрено 2 тепловых защитных мероприятия:

- 1) Тепловая изоляция толщиной 62,5 мм;
- 2) Установка локальных сезоннодействующих охлаждающих устройств на границах (фронте ММГ) «ММГ-немерзлый грунт», с шагом 2 метра по обе стороны от трубопровода.

Применение разных граничных условий на нижнюю грань расчетной модели

Поскольку расчетная модель снизу ограничивается глубиной нулевых амплитуд, существует постановка, что корректным условием описания теплообмена с нижней поверхностью является граничное условие 1 рода

(условие Дирихле) – условие с постоянной температурой, в связи с чем, для расчетных моделей с глубиной 40 метров, было рассмотрено применение двух вариантов ГУ:

- 1) С граничным условием 2 рода (условие Неймана) на нижней границе расчетной модели – с нулевым тепловым потоком;
- 2) С граничным условием 1 рода на нижней границе расчетной модели – с постоянной отрицательной температурой на участках с ММГ, равной самому нижнему измеренному значению температуры, для талого грунта – в соответствии с температурой талого грунта, принятого в данной расчетной модели.

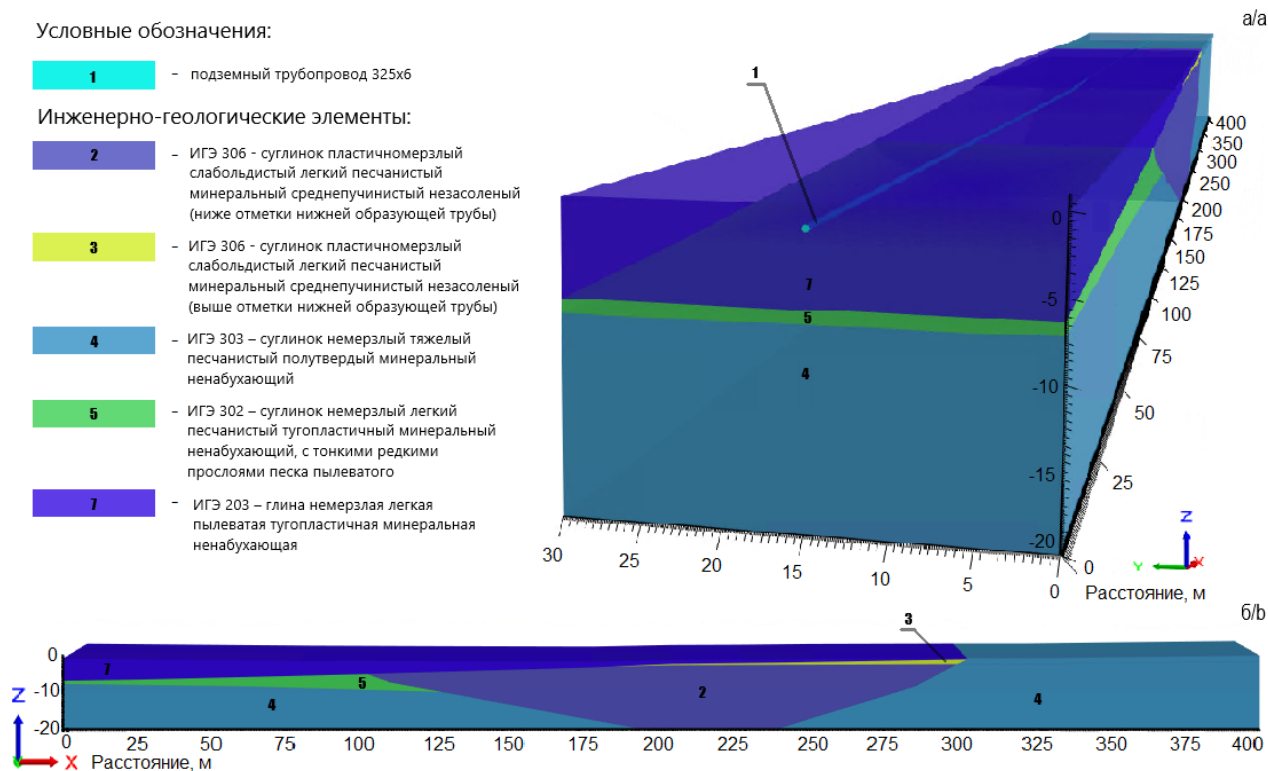


Рисунок 2.7 - Виды смоделированной расчетной модели в ПО «Frost 3D»:

а) расчетная модель в перспективе; б) расчетная модель по длине профиля

Таблица 2.1 - Перечень расчетных моделей (РМ) и исходных условий

Условия задания расчетной модели (РМ)		С граничным условием 2 рода на нижней границе РМ			С граничным условием 1 рода на нижней границе РМ
		20 метров	30 метров	40 метров	40 метров
Тепловая изоляция толщиной 62,5 мм	С температурой талых грунтов 1,0 °С	РМ №1	РМ №5	РМ №9	РМ №13
	С температурой талых грунтов 0,5 °С	РМ №2	РМ №6	РМ №10	РМ №14
	С температурой талых грунтов 0,05 °С	РМ №3	РМ №7	РМ №11	РМ №15
	С температурным распределением в зоне фронта ММГ	РМ №4	РМ №8	РМ №12	-
Установка локальных сезоннодействующих охлаждающих устройств на границах ММГ	С температурой талых грунтов 1,0 °С	РМ №16	РМ №20	РМ №24	РМ №28
	С температурой талых грунтов 0,5 °С	РМ №17	РМ №21	РМ №25	РМ №29
	С температурой талых грунтов 0,05 °С	РМ №18	РМ №22	РМ №26	РМ №30
	С температурным распределением в зоне фронта ММГ	РМ №19	РМ №23	РМ №27	-

Учитывая сочетания условий, всего было разработано 30 расчетных моделей в ПО «Frost 3D» (рис. 2.7). Параметры и характеристики расчетных моделей приведены в таблице 2.1.

Также было проведено 2 прогнозных расчета в ПО «Борей 3D» для верификации результатов теплотехнических расчетов, выполненных в ПО «Frost 3D».

Выбор проектируемого объекта с наличием многолетнемерзлых грунтов островного распространения

В качестве объекта исследования выбран подземный газопровод в Иркутской области, соединяющий месторождение, условно обозначенное, как «Объект №1» и месторождение, условно обозначенное, как «Объект №2».

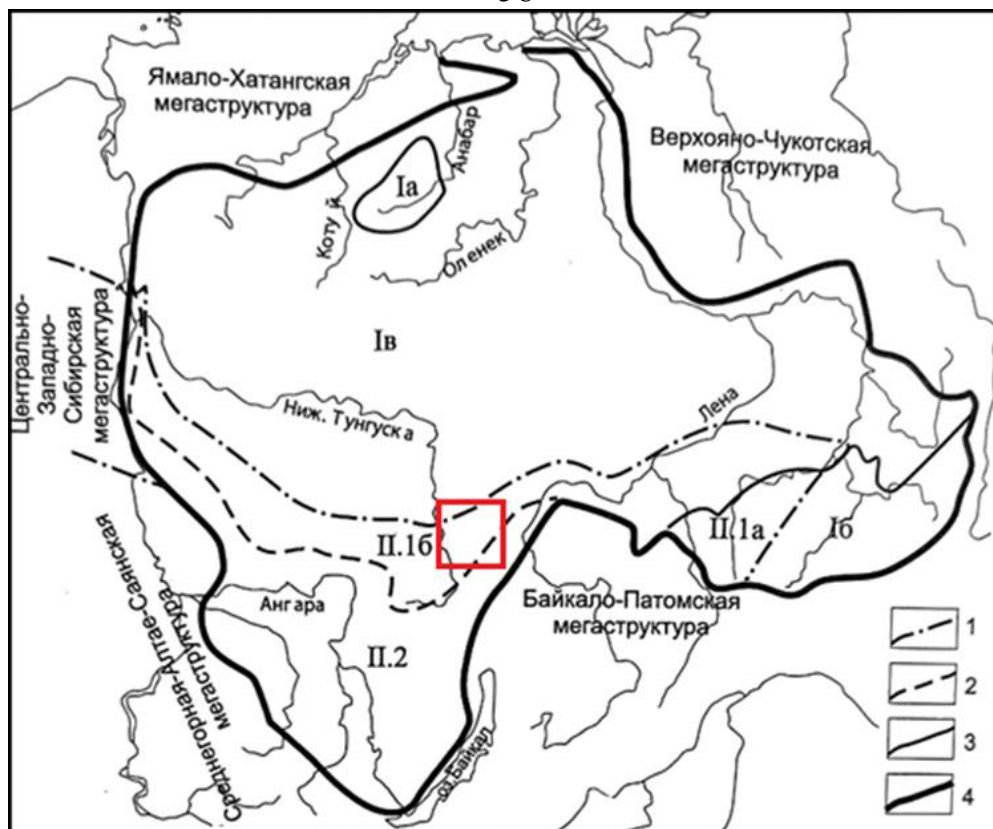


Рисунок 2.8 - Спутниковые снимки участка исследования: а) спутниковый снимок месторасположения объекта исследования; б) увеличенный вид участка, трасса газопровода выделена цветом

Участок расположен на Сибирской платформе, типологически являющейся древней платформой платформа с совместным распространением талых и островных ММП мощностью 30-200 м, с сезонным промерзанием и протаиванием пород. Регионально относится с Южно-Сибирской мегаструктуре, Лено-Енисейской мезоструктуре, с абсолютными отметками 320-470 метров (рис. 2.9).

Лено-Енисейская мезоструктура охватывает бассейн Подкаменной Тунгуски, верховья Нижней Тунгуски и верховья Лены. В орографическом отношении она включает Центрально-Тунгусское плато, северную часть Ангарского кряжа и Ербогаченскую равнину.

Большая часть территории представлена плосковершинными трапповыми массивами, столовыми возвышенностями и грядами с высотными отметками 500-600 м, чередующимися с пологоволнистыми туфогенными плато с абсолютными отметками 300-400 м, которые расчленены глубокими (до 250 м) каньонообразными речными долинами. В бассейне верхнего течения Нижней Тунгуски отмечается слабоприподнятая холмистая Ербогаченская равнина с одиночными куполовидными сопками.

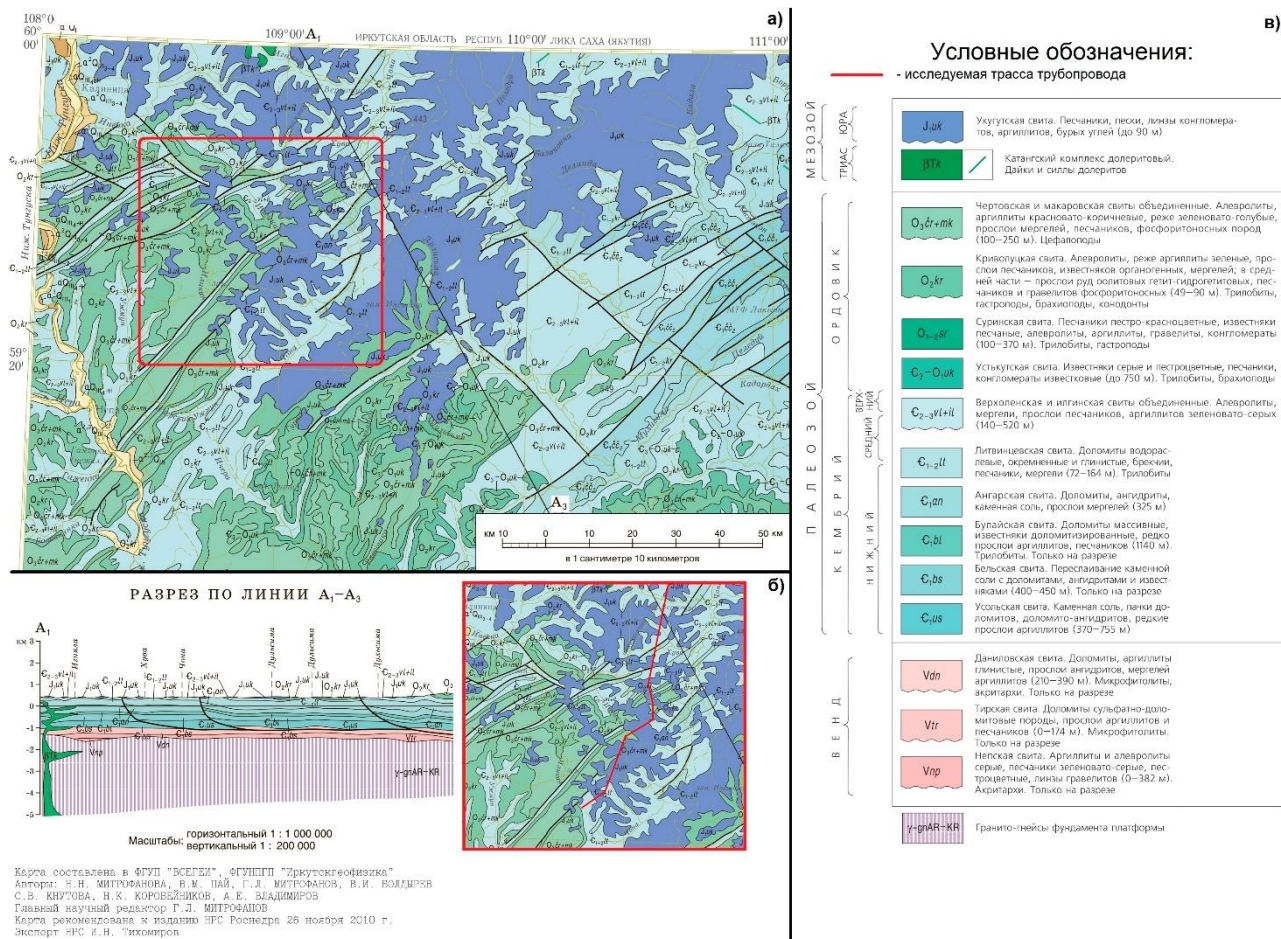


Условные обозначения:

- участок исследования
- 1 - границы мегаструктур
- 2 - границы макроструктур
- 3 - границы мезоструктур
- 4 - граница Сибирской платформы
- Iв - Хатанга-Тунгусская мезоструктура
- II.16 - Лено-Енисейская мезоструктура
- II.2 - Ангара-Ленская макро- и мезоструктура

Рисунок 2.9 – Региональные инженерно-геологические структуры
Сибирской платформы по В.Т. Трофимову

Отметки поверхности равнины 200—400 м. Для долин рек характерны пологие склоны и широкие днища. Речную сеть образуют Подкаменная и Нижняя Тунгуска, Лена и их притоки.



Геокриологические особенности. На Центрально-Тунгусском плато в бассейнах среднего и верхнего течения рек Подкаменная Тунгуска и Катанга; а также в пределах Ербогаченской равнины в бассейнах рек Непа, Нюя, Пеледуй, в верховье р. Нижняя Тунгуска, на Лено-Нюйском междуречье распространение мерзлых толщ является островным и массивно-островным. Острова мерзлых пород приурочены в основном к затененным, заторфованным долинам рек, к заболоченным замшелым Участкам водоразделов, реже к пологим заболоченным или крутым затененным склонам долин и занимают до 20-35% площади. Более сухой восточной зоне свойствен массивно-островной и прерывистый характер развития многолетнемерзлых пород.

Температура мерзлых горных пород. В подошве слоя годовых колебаний она изменяется от $-0,1$ до $-0,3$ °C в бассейнах Бельмо и Теи до -1 , -2 °C на плосковолнистом водоразделе Центрально-Тунгусского плато. Наиболее низкие (до -3 °C) температуры отмечены в льдистых песчано-иловатых и глинистых отложениях заболоченной поймы и низких террас верховьев Нижней Тунгуски. На большей части территории температура горных пород повышается от днищ долин к водоразделам.

В талых породах, ниже мерзлой толщи, значения градиентов температур существенно меньше и составляют $1-2,5$ °C на 100 м. Геотермические данные показывают, что в современных климатических условиях освоение территории с существенным изменением ландшафтной и грунтово-влажностной обстановки может способствовать как сохранению, так и деградации мерзлых толщ.

Формирование распространения, мощности и строения мерзлых толщ. В регионе, к югу от широтного течения Нижней Тунгуски, характер теплообмена на протяжении всей эпохи охлаждения неоднократно существенно изменялся, что обуславливало смену процессов многолетнего промерзания (охлаждения) и протаивания (прогрева) горных пород. Поэтому на большей части региона существующие в настоящее время мерзлые породы сформировались лишь в голоцене после термического максимума. Особенности их распространения и

развития соответствуют изменению уровня теплообмена на протяжении позднего голоцена и в современных природных условиях территории.

Мощность мерзлой толщи изменяется от 10-25 до 100 м, местами более. Мерзлая толща имеет здесь одноярусное строение и представлена только многолетнемерзлыми породами.

Сезонное оттаивание пород. На большей части территории оно не превышает 1—1,5 м. На склонах южной экспозиции верхняя поверхность мерзлых пород глинистого состава часто располагается на глубинах 22,5 м, а на склонах северной экспозиции — 0,4—0,9 м. Так же мало оттаивают грунты на заторфованных участках (0,4—0,6 м). В долинах рек с песчано-галечными грунтами сезонное оттаивание достигает 3—4 м. На отдельных участках, в пределах несквозных таликов — под руслами рек, иногда на высоких речных террасах, сложенных песчаными водопроницаемыми грунтами (бассейны р. Чуни и др.), верхняя поверхность многолетнемерзлых пород располагается на глубинах 3—6 м и не сливается с промерзающим за зиму слоем.

Подземные воды. Подземные воды сосредоточены в основном в терригенных, вулканогенно-терригенных, карбонатно-терригенных породах раннемезозойского и палеозойского возраста. Это подмерзлотные водоносные горизонты порово-пластовых и трещинно-пластовых вод гидрокарбонатно-хлоридного натриевого и гидрокарбонатно-кальциевого состава с минерализацией до 100 г/л при средних значениях 13—60 г/л. Места разгрузки подмерзлотных вод приурочены к тектоническим зонам по долинам рек Чона, Нижняя Тунгуска и ее левых притоков Тетя и Малая Ерёма. Суммарные дебиты отдельных групп восходящих источников достигают 2000 л/с. Температурный режим крайне непостоянен, по отдельным площадям температура воды на выходе изменяется от 0,3 до 15 °С. Воды четвертичных отложений и верхней части зоны выветривания терригенных пород часто проморожены. На участках, где многолетнемерзлые породы отсутствуют, подземные воды разгружаются в виде нисходящих источников в долину Нижней Тунгуски и ее притоков с

суммарным дебитом от 10 до 80- 120 л/с. В теплое время года на многих сезонноталого слоя бывают спорадически обводнение местности. Дебиты нисходящих рассеянных источников надмерзлотных вод обычно не превышают 0,1-0,2 л/с. Химический состав вод — гидрокарбонатный кальциевый, минерализация изменяется от 0,1 до 0,5-1 г/л, температура колеблется от 0,5 до 3 °С.

В северо-восточной и восточной частях в области прерывистого распространения многолетнемерзлые породы ограничивают площади питания подмерзлотных водоносных горизонтов и способствуют возникновению напорных вод. Взаимосвязь поверхностных и подземных вод осуществляется по таликовым зонам в долинах крупных рек и на водораздельных участках, сложенных песчаными отложениями. На юго-западе территории при островном распространении мерзлых пород последние не оказывают заметного влияния на взаимодействие поверхностных и подземных вод.

Современные геологические процессы и явления. В регионе они распространены достаточно широко и представлены преимущественно мерзлотными видами. Среди них встречаются как современные, так и реликтовые формы. Пологие и средней крутизны склоны трапповых массивов местами покрыты курумами, которые переходят на крутых склонах в осыпи. На карбонатных породах курумы развиты меньше. Наличие мерзлых пород в регионе обуславливает развитие торфяников и болот всех трех видов: верховых, переходных и низинных. Обычно заболочены поверхности плоских междуречий, сложенные пластовыми интрузиями траппов. Пологие водораздельные склоны часто сильно замшелы и заболочены. В поймах рек, небольших долинах, западинах отмечаются низинные болота. Иногда они представляют последнюю стадию зарастания больших водоемов или термокарстовых озер. Мощность торфа на заболоченных участках составляет 1,5-3 м, реже 4—5 м. Такие участки многие исследователи относят к реликтовым торфяникам. В днищах долин рек и плоских заболоченных массивах междуречий встречаются сезонные и

многолетние бугры пучения высотой 1-2 м. Часто можно встретить среди торфяников сочетание мерзлых бугров и талых обводненных мочагин. Современное морозобойное растрескивание грунтов в регионе отмечается на реликтовых торфяниках, в заболоченных и заторфованных котловинах, на поймах и пологих замшелых склонах, сложенных суглинками. Отличительной особенностью развития микрорельефа по морозобойным трещинам является отсутствие валиков. Полости трещин заполнены жильным льдом либо оплывшим гумусированным суглинком. Часто при морозобойном растрескивании формируется мелкобугристый микрорельеф, как, например, в бассейне р. Чуни, в долине р. Ерёмы и других местах. В верховье Нижней Тунгуски в отложениях террас плейстоценового возраста на различной глубине встречаются следы реликтовых криогенных нарушений, представленных клиновидными структурами, смятиями слоистости, карманообразными и языкообразными границами слоев. В пределах региона почти повсеместно проявляется солифлюкция, образующая на склонах языки, шлейфы, реже террасы и полосы. На крутых склонах при оттаивании пород в летнее время наблюдаются быстрые сплывы. Широко развито нивелирование солифлюкционным процессом нескольких террас в единую наклонную поверхность. Термокарст имеет развитие в днищах долин и распадков и сопутствует льдистым аллювиальным отложениям. Иногда он встречается и на междуречье. Термокарстовые формы представлены западинами, блюдцами, котловинами, небольшими озерами округлой формы с неровными очертаниями берегов. Развитие термокарста вблизи бровок надпойменных террас происходит вследствие вытаивания в обнажениях повторно-жильных и инъекционных льдов.

Бугристо-западинный рельеф, как реликтовая форма вытаивания повторно-жильных льдов, типичен как для надпойменных террас рек, так и для междуречий. В верхнем течении Нижней Тунгуски бугристо-западинный рельеф встречается на поверхности всех террас. Поверхность террас обычно неровная,

местами этот рельеф напоминает настоящие дюнные всхолмления. Западины диаметром до 60-70 м достигают глубины 2 м.

Выделенные инженерно-геологические элементы на участке (рис. 2.11):

- ИГЭ 202 – глина легкая пылеватая твердая минеральная ненабухающая (IaQIV);
- ИГЭ 302 – суглинок легкий песчанистый тугопластичный минеральный ненабухающий (edQIV);
- ИГЭ 303 – суглинок тяжелый песчанистый полутвердый минеральный ненабухающий (edQIV);
- ИГЭ 306 - суглинок пластичномерзлый слабольдистый легкий песчанистый минеральный среднепучинистый незасоленный, при оттаивании мягкопластичный (edQIV).

Условные обозначения:

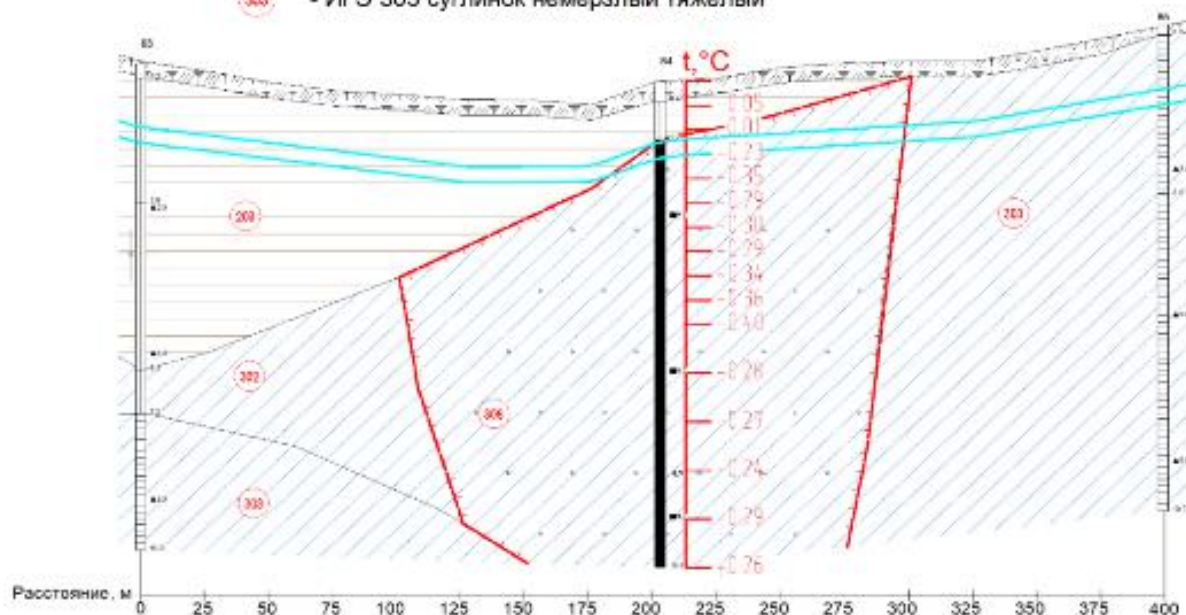
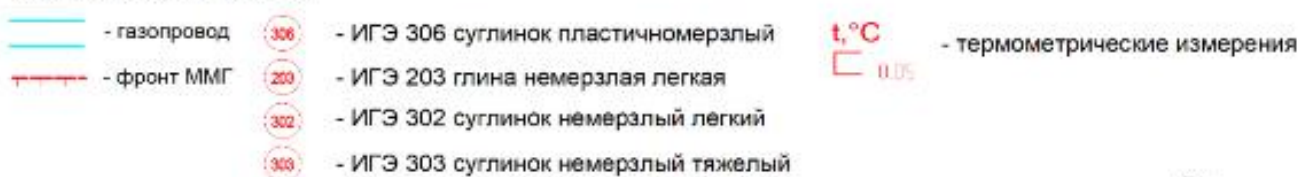


Рисунок 2.11 – Геологический разрез профиля участка трассы

Ниже представлены исходные данные по участку, учтенные при формировании расчетных моделей – физико-механические и компрессионные

характеристики (табл. 2.2), теплофизические свойства инженерно-геологических элементов (табл. 2.3), графики зависимости количества незамерзшей воды от температур грунтов (рис. 2.12-2.15), а также климатические условия (табл. 2.4), термометрия (табл. 2.5) и температура перекачиваемого продукта (табл. 2.6).

Таблица 2.2 - Физико-механические свойства грунтов на участке

№ ИГЭ	Суммарная влажность, W_{tot} , д.е.	Плотность сухого грунта, ρ_d , кг/м	Температура фазового перехода, T_{bf} , °C	Число пластичности, I_p , д.е.	Коэффициент оттаивания, A_{th} , д.е.	Коэффициент сжимаемости при оттаивании, m_{th} , Мпа ⁻¹
ИГЭ 203	0,298	1510	-0,25	0,21	-	-
ИГЭ 302	0,217	1580	-0,2	0,12	-	-
ИГЭ 303	0,211	1620	-0,2	0,15	-	-
ИГЭ 306	0,245	1490	-0,19	0,1	0,093	0,17

Таблица 2.3 - Теплофизические свойства мерзлых и талых грунтов

№ ИГЭ	Теплопроводность в талом состоянии, λ_{th} , Вт/(м*°C)	Теплопроводность в мерзлом состоянии, λ_f , Вт/(м*°C)	Объемная теплоемкость в талом состоянии, Дж/(м ³ *°C)*10 ⁻⁶	Объемная теплоемкость в мерзлом состоянии, Дж/(м ³ *°C) *10 ⁻⁶
ИГЭ 203	1,68	2,13	3,24	2,36
ИГЭ 302	1,33	1,57	2,91	2,23
ИГЭ 303	2,15	2,50	2,64	1,95
ИГЭ 306	1,33	1,55	2,92	2,50

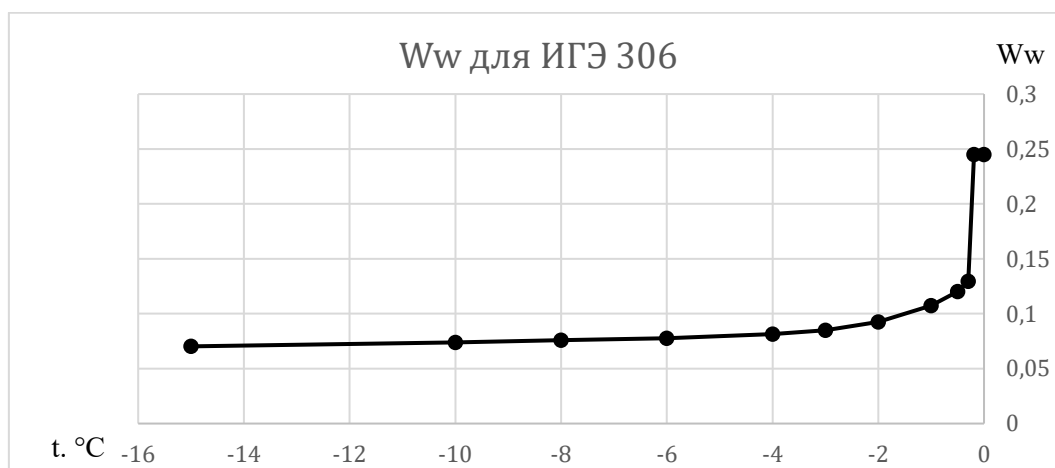


Рисунок 2.12 – График зависимости количества незамерзшей воды от температуры грунта для ИГЭ 306

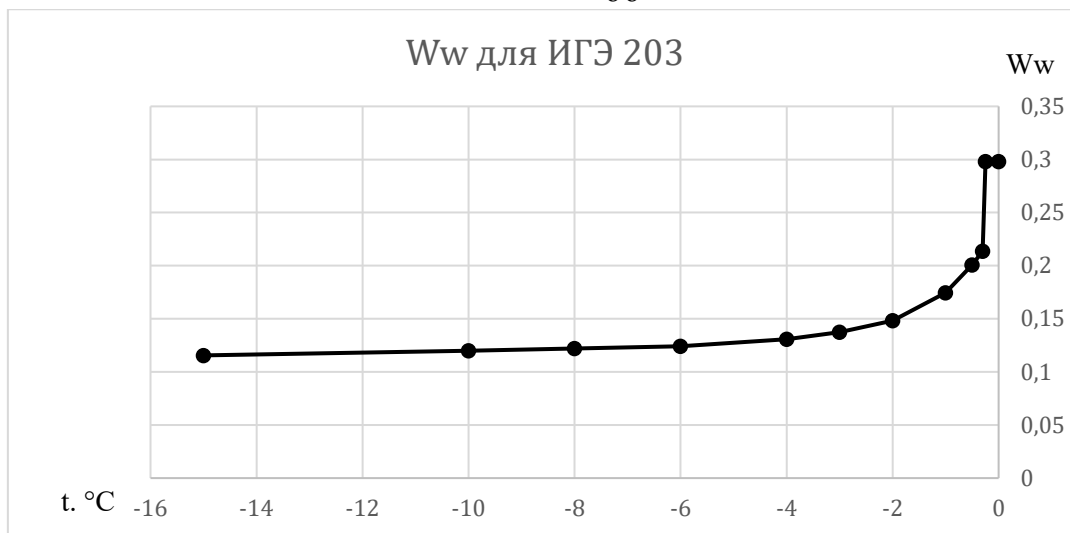


Рисунок 2.13 – График зависимости количества незамерзшей воды от температуры грунта для ИГЭ 203

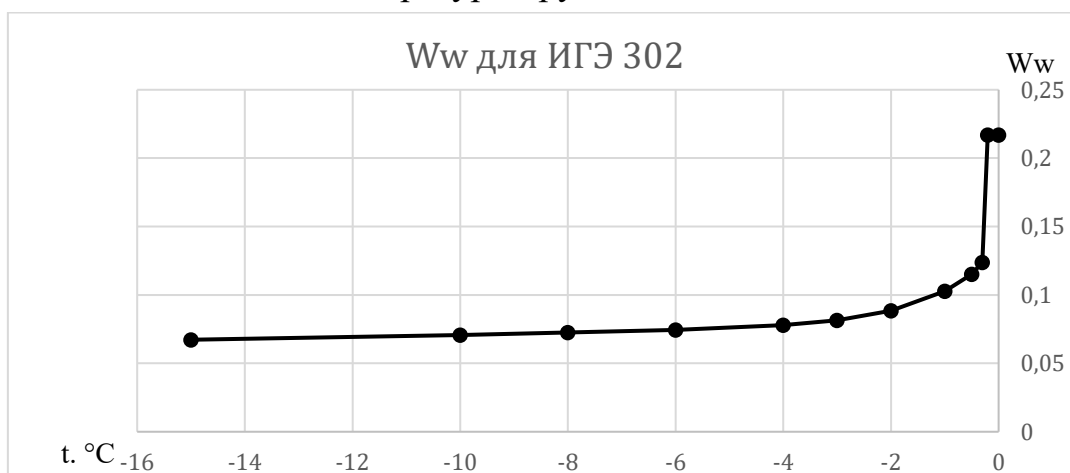


Рисунок 2.14 – График зависимости количества незамерзшей воды от температуры грунта для ИГЭ 302

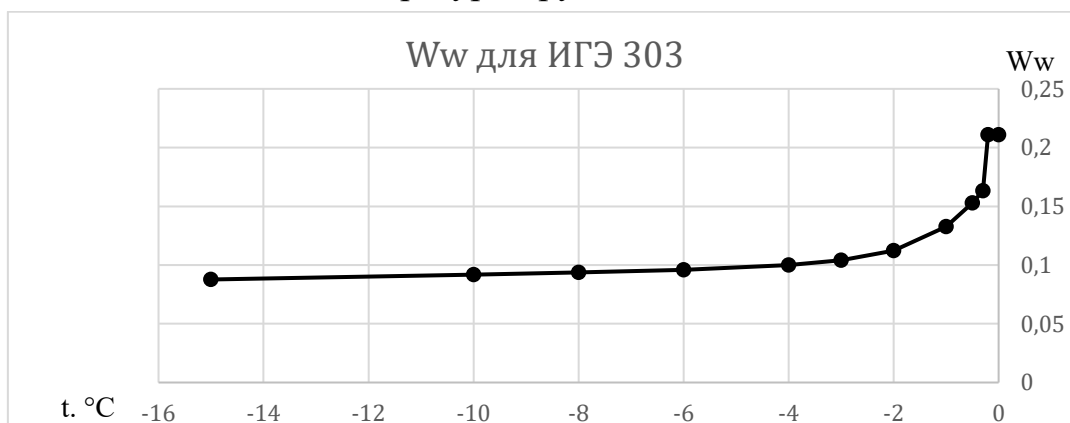


Рисунок 2.15 – График зависимости количества незамерзшей воды от температуры грунта для ИГЭ 303

Таблица 2.4 - Климатические условия района участка исследования

Среднемесячная температура воздуха, °С																																					
Месяцы	I			II			III			IV			V			VI			VII			VIII			IX			X			XI			XII			Год
Температура	-28,5			-25,4			-15,2			-3,8			5,8			15			17,3			13,6			5,7			-4,2			-19			-27			-5,5
Средняя месячная и годовая скорость ветра (м/с)																																					
Месяцы	I			II			III			IV			V			VI			VII			VIII			IX			X			XI			XII			Год
Скорость ветра	2			1,8			2,2			2,8			2,8			2,3			1,9			1,8			2			2,5			2,2			2			2,2
Средняя декадная высота снежного покрова (см) по постоянной рейке																																					
Месяцы	I			II			III			IV			V			X			XI			XII															
Декады	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3							
Средняя декадная	38	41	44	46	48	49	49	50	49	46	27	39	11	0	0	2	4	8	12	17	22	26	31	35													
Коэффициент конвективного теплообмена с поверхностью грунта, Вт/м*°С																																					
Месяцы	I			II			III			IV			V			VI			VII			VIII			IX			X			XI			XII			
Скорость ветра	14,54			13,7			15,38			17,89			17,89			16			14,1			13,7			14,5			16,64			15,38			14,54			

Таблица 2.5 - Термометрические изыскания в скв. №84 (дата замера 22.03.22)

Температура грунта по интервалам глубин (м), в градусах Цельсия																
Глубина	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10	
t, °С	-0,05	-0,01	-0,23	-0,35	-0,29	-0,30	-0,29	-0,34	-0,36	-0,40	-0,28	-0,27	-0,24	-0,29	-0,26	

Таблица 2.6 - Температура продукта в трубопроводе на период эксплуатации

Год эксплуатации	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Температура	31,5	27,2	13,9	13,5	10,8	8,4	1,0	2,5	2,4	4,7	5,3	5,5	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7

Разработка расчетных моделей, сравнение и оценка результатов теплотехнических расчетов

Разработка расчетных моделей для теплотехнических расчетов предполагает моделирование выделенного участка трассы с учетом пространственного положения трубопровода - изгибы, подъемы, опуски, изменения литологии - учет всех инженерно-геологических скважин в пределах расчетной модели и напластования грунтов между ними, температур грунтов в трехмерном пространстве - задание температурного режима ММГ и талых

грунтов, динамики изменения температур продукта в трубопроводе за период расчета.

Результатом являются изменяющиеся во времени температурные поля от теплового воздействия трубопровода и атмосферного влияния на грунт, по которым определяются значения ореолов оттаивания грунта в его основании. По данным о распространении ореолов оттаивания определяются расчетные значения осадок грунтов при их оттаивании. Далее, определяется максимальное значение ореола оттаивания, и соответственно, максимальные осадки грунта за период эксплуатации. Результаты расчетов осадки формируются в профили осадки – линейные графики максимальной осадки ММГ за период эксплуатации для всего расчетного участка. Следующим этапом, численные значения профилей осадки используются в качестве дополнительной нагрузки на трубопровод при проведении расчетов на прочность трубопровода.

Всего было проведено 32 расчета для сравнения воздействия различных условий на результаты теплотехнических расчетов. Декомпозируя результаты теплотехнических расчетов, сравним отдельно каждый из факторов, влияющих на результаты расчетов.

Для начала были сравнены методики задания температурного распределения в теле расчетной модели – с фиксированной температурой талых грунтов и через температурное распределение в зоне фронта ММГ. Первоначальное распределение формируется при помощи интерполяции в горизонтальном направлении между вертикальными температурными скважинами. При недостаточном количестве дополнительных вертикальных температурных скважин, в расчетной модели искажается положение фронта ММГ, что приводит к возникновению нефизичных (аномальных) зон с большим значением осадки при оттаивании на профилях осадки, диапазон 170-180 метров и 230-240 метров по длине расчетной модели (рис. 2.16), несмотря на различные мероприятия по снижению осадки ММГ при оттаивании.

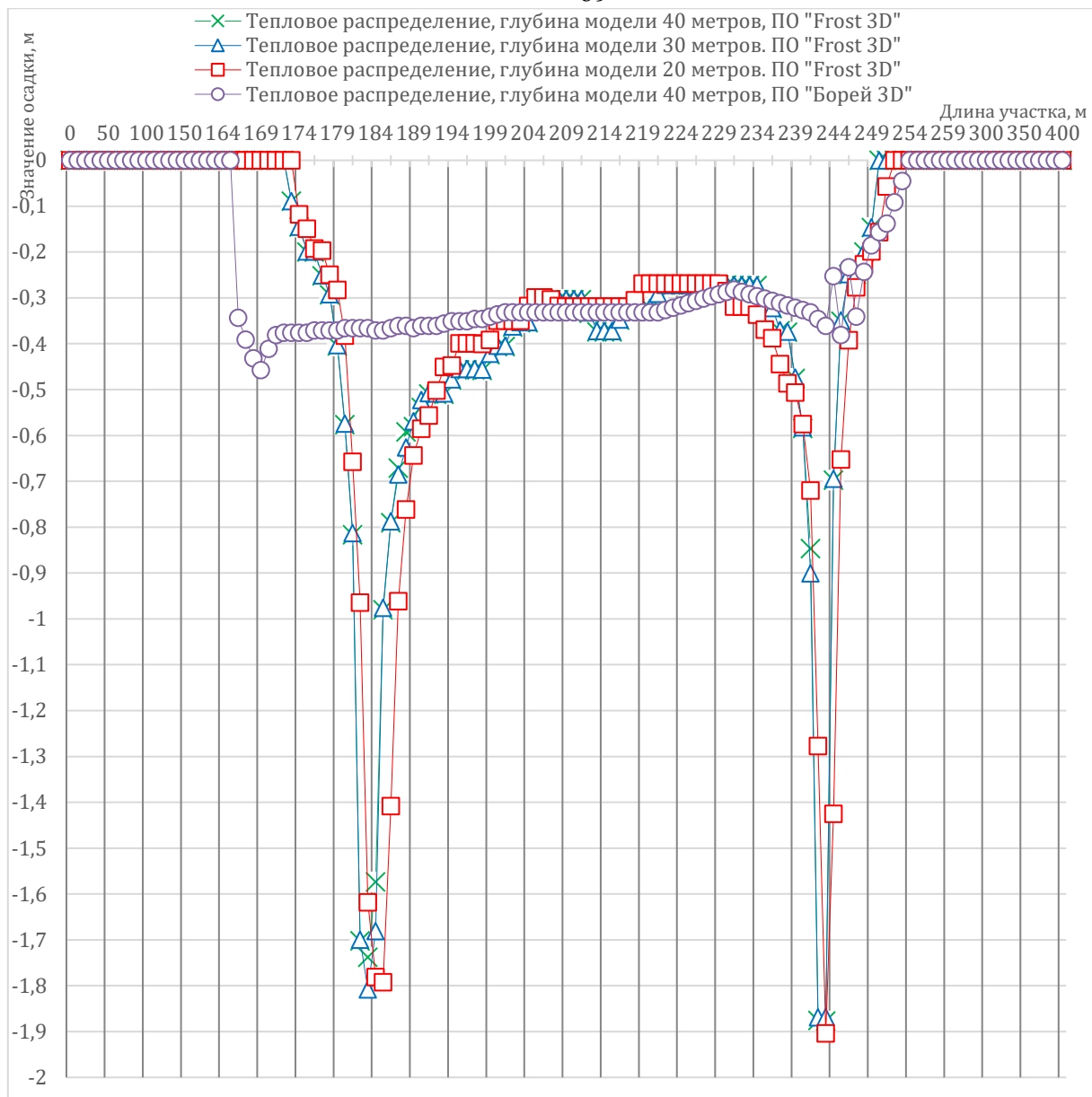


Рисунок 2.16 - Результаты расчета осадки с методикой температурного распределения на переходе «талый-ММГ» в ПО №1 и ПО №2

Задание дополнительных, или фиктивных, скважин является трудоемкой задачей, так как они задаются в вертикальном направлении по глубине массива. Количество дополнительных скважин зависит от сложности формы фронта ММГ. Массив между заданными скважинами принимает интерполированную температуру между двумя ближайшими скважинами, соединяя изолинии одинаковых температур линейно, что не позволяет отразить в массиве сложные формы границы ММГ, отмеченные на инженерно-геологическом профиле.

Также стоит отметить, что значения температур в дополнительных скважинах являются заимствованными с ближайших исследованных скважин, в которых проводились фактические термометрические замеры. Данный способ не позволил восстановить сложную форму границы ММГ в начальном температурном распределении, это привело к некорректным результатам прогнозирования. Поскольку вторая методика задания начальных температур грунтов с точным восстановлением положения фронта ММГ – присвоения температуры всему массиву, позволяет корректно восстановить положение ММГ – способ задания через температурное распределение более не рассматривался.

В расчете в ПО №2 – «Борей 3D», возникновение аномальных зон осадки на фронте ММГ не выявлено, однако, выявлено смещение фронта ММГ и распределение температур в сложной форме перехода «талый-мерзлый» по причине вертикализации интерполированных температурных скважин, то есть, невозможностью сформировать наклонный фронт промерзания, в связи с чем, осадка на границах островной мерзлоты смещена, но стоит отметить, что в зоне сливающейся мерзлоты оба программных комплекса показывают хорошую сходимость результата, разница между значениями осадок минимальна и составляет порядка 5 см.

Далее проведено сравнение результатов расчетов с различной температурой талых грунтов - были сравнены РМ с разными температурами немерзлых грунтов при одинаковой глубине расчетной модели (20, 30, 40 м).

Результаты сравнения значений осадки при разных температурах на конец эксплуатации сооружения показывают, что основное различие возникает на границах «ММГ-талый грунт», причем, чем выше заданная температура талого грунта, тем больше фронт ММГ смещается вглубь островного ММГ. При этом, максимальная разница в значениях осадки на границе «ММГ-талый грунт» составляет от 9,8 до 16,9 см, в зависимости от глубины модели.

Также при сравнении температурных полей на конец эксплуатации в продольном сечении расчетной модели, для расчетных моделей глубиной 20

метров (рис. 2.18), было отмечено смещение фронта ММГ в сторону немерзлого грунта (промерзание талого грунта) на расстояние до 30 метров, а по мере увеличения температуры талого грунта, смещение фронта ММГ становится меньше, так как для смещения фронта ММГ в сторону талых грунтов с более высокими температурами требуются большие тепловые затраты на перераспределение температур.

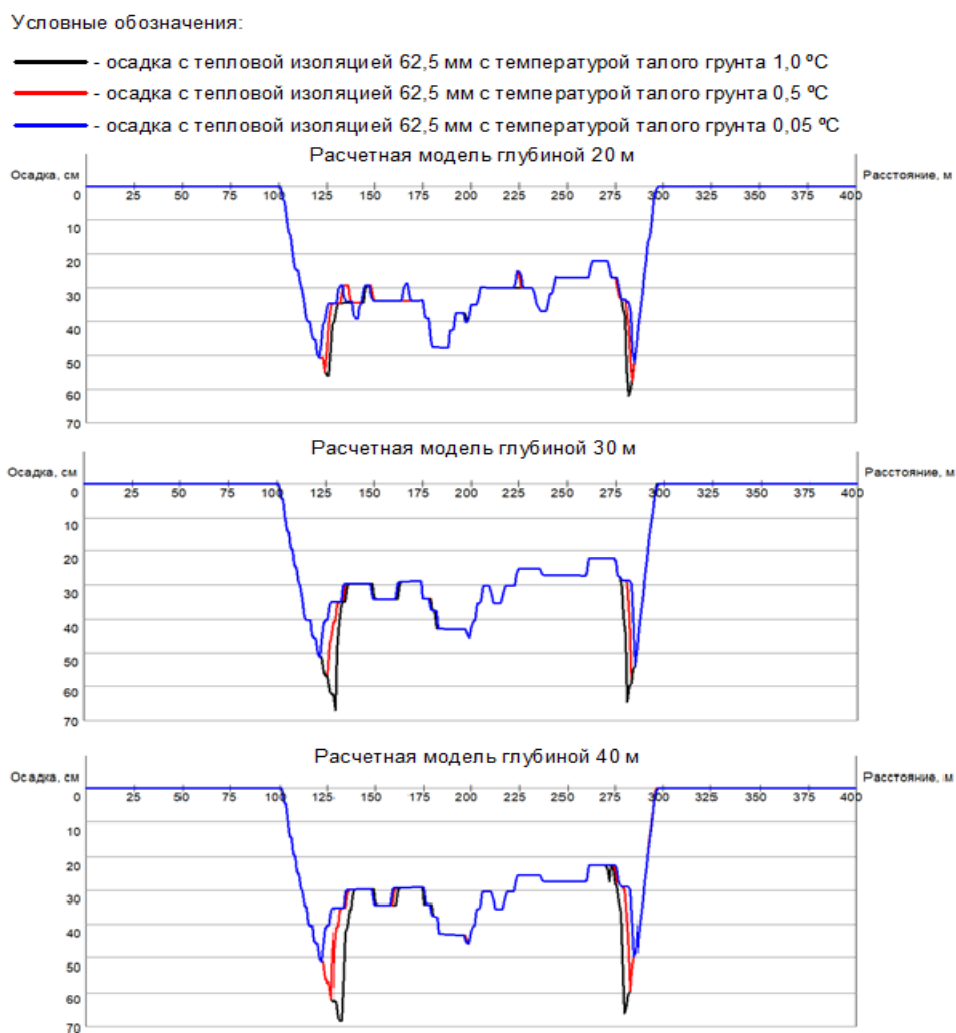
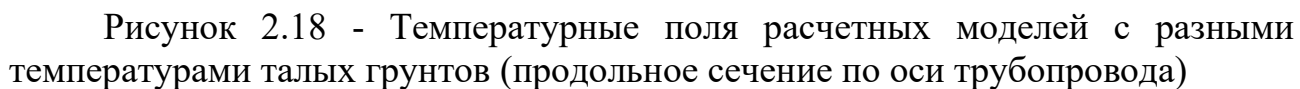


Рисунок 2.17 - Результаты расчета осадки с методикой температурного распределения на переходе «талый-ММГ» в ПО №1 и ПО №2

Стоит заметить, что такое перераспределение, хоть и не имеет критичного влияния на результаты осадки ММГ при оттаивании, но предпосылка наличия глубины нулевых теплооборотов и неизменяемости отрицательных температур ниже определенных глубин должна соблюдаться, фронт ММГ не должен



Учитывая данный фактор, были сравнены температурные поля для РМ глубиной 30 и 40 метров. Результаты говорят о том, что на расчетных моделях глубиной 30 метров, при любых температурах талых грунтов наблюдается аналогичное распределение (как для РМ с глубиной 20 метров) с наличием смещения фронта ММГ в сторону немерзлых грунтов. Однако, при увеличении

глубины расчетной модели до 40 метров, положение фронта ММГ остается неизменным относительно границы, принятой при инженерных изысканиях, в связи с чем, является предпочтительной минимальной глубиной расчетных моделей.

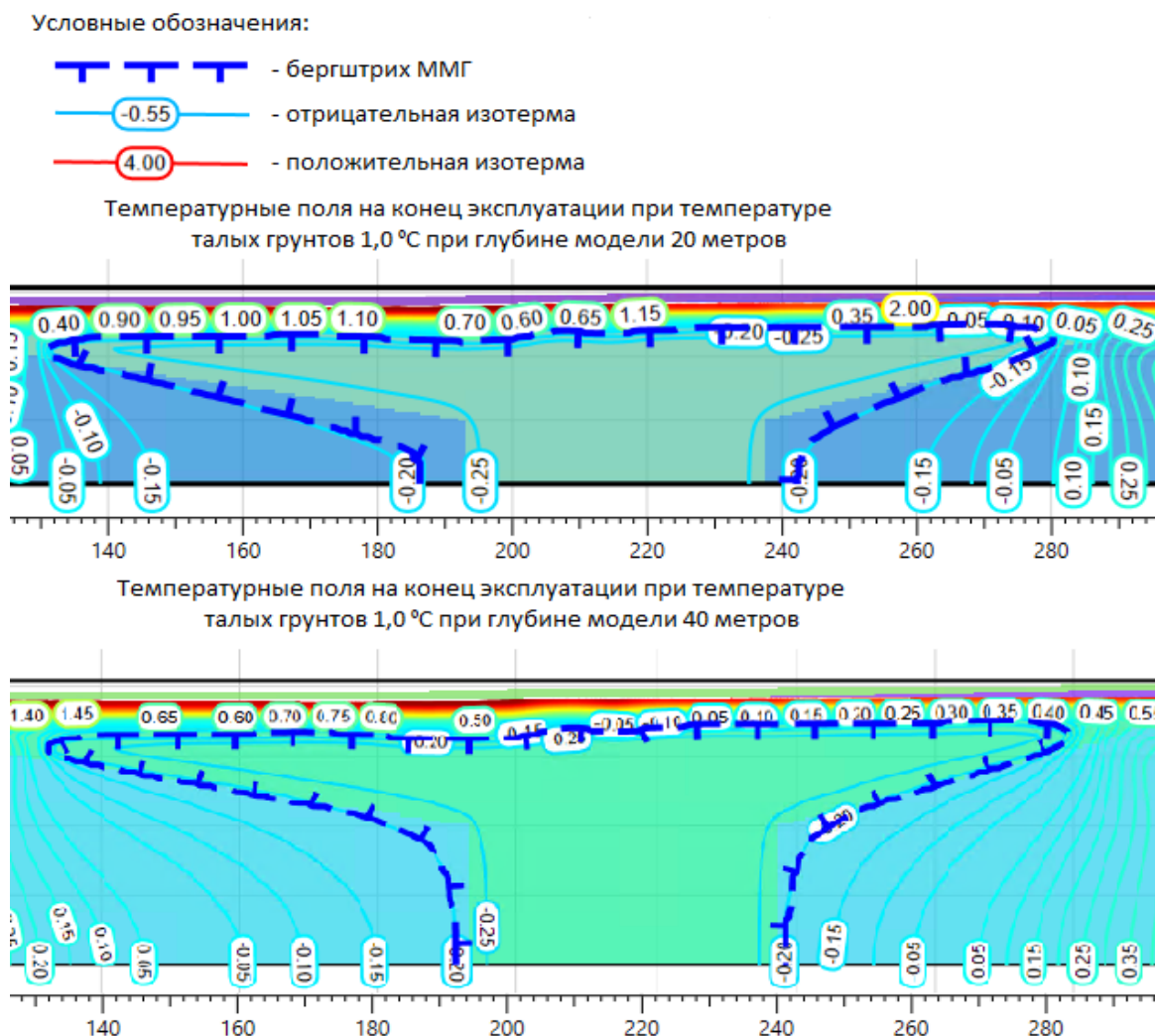


Рисунок 2.19 - Температурные поля расчетных моделей с температурой талых грунтов 1,0 °С для расчетных моделей глубиной 20 и 40 метров

По результатам анализа была отмечена РМ№9, с температурой немерзлых грунтов 1,0 °С и глубиной РМ 40 метров с наиболее корректным температурным распределением в теле модели.

Следующим этапом проведено сравнение РМ с разными глубинами, но одинаковыми температурами талых грунтов, для выявления влияния глубины расчетной модели на результат осадки. На всех трех типах заданной температуры результаты осадки грунтов находятся в одном диапазоне, при этом, у расчетных

моделей с глубинами 30 м и 40 м отмечено совпадение результатов осадки на 88% протяженности участка мерзлого грунта, РМ с глубиной 20 метров имеет расхождения как в большую, так и в меньшую сторону до 12,2 см.

Общее поле осадок для 9 вариантов РМ и 1 верификационного расчета показывает расхождения на глубинах расчетных моделей 20 м с расчетной разницей от 4,7 см в мерзлом грунте, до 16,3 см на границе талый-ММГ. Наибольшая осадка по участку проявляется на границах ММГ-талый, самое большое значение осадки отмечено у РМ№9, ранее выявленной как предпочтительной. Верификационный расчет в ПО «Борей 3D» показал в целом усредненные значения осадки на участке 170-240 м со сливающейся островной ММГ, однако, распределение по фронту ММГ рассчитывает с погрешностью и смещением фронта на 40-60 метров.

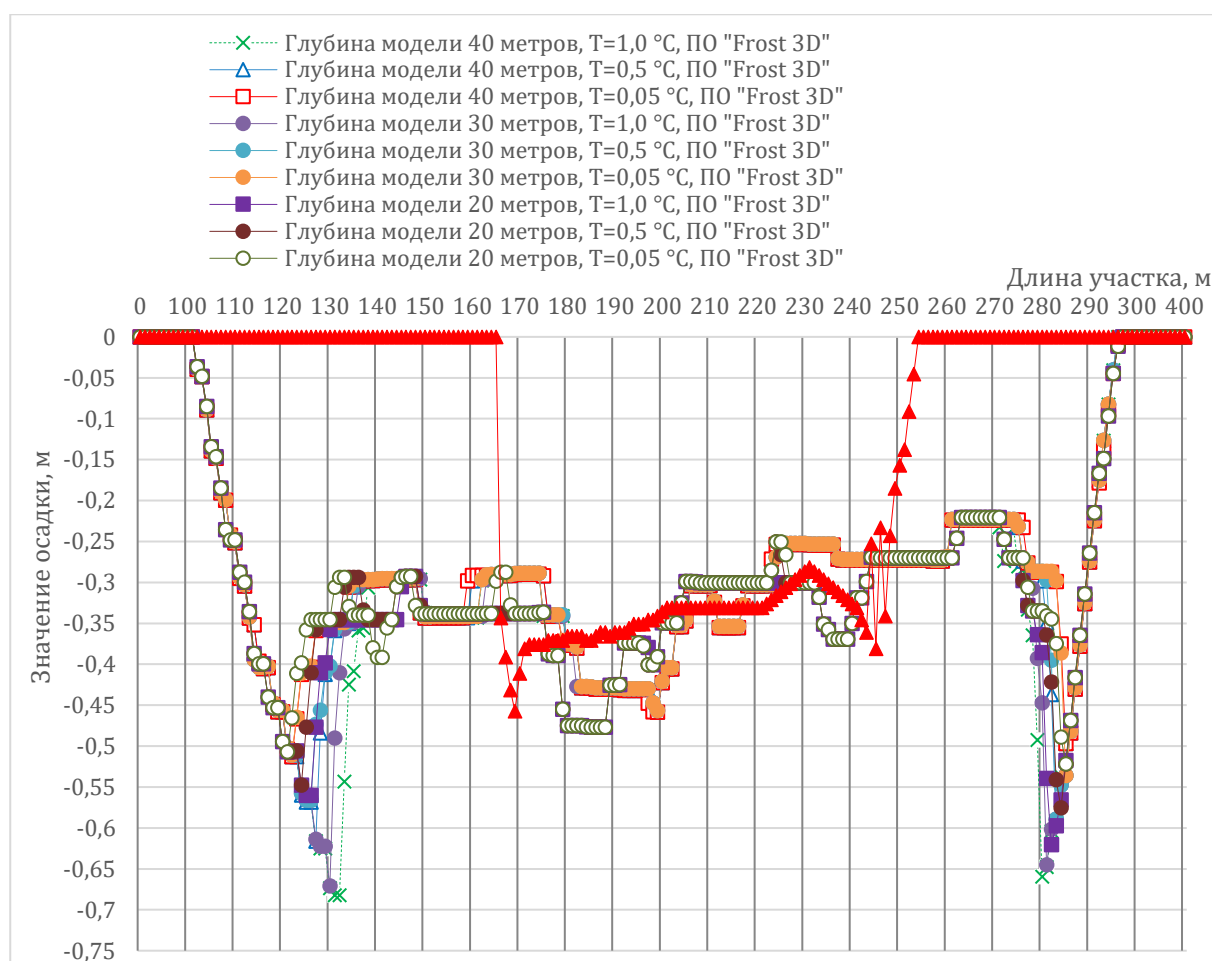


Рисунок 2.20 - Профили осадки РМ с глубинами 20...40 метров и температурами 0,05...1,0 °C, верификационная РМ

Поскольку при анализе было отмечено возникновение смещение фронта ММГ на глубинах ниже глубины нулевых амплитуд, следующим этапом были рассмотрены варианты изменения граничного условия (ГУ) на нижнюю грань расчетной модели – применение ГУ 1 рода с постоянной температурой (условие Дирихле). Однако, поскольку ММГ на участке встречается локально и внутри расчетной модели имеются участки немерзлых грунтов, появляется необходимость задавать два ГУ – для мерзлого участка, с постоянной отрицательной температурой с максимальной изученной глубины при термометрическом замере, и для талого участка – с установленной температурой, в соответствии с вариантом расчетной модели. Поскольку было отмечено, что наиболее корректное распределение температурных полей отмечено для глубин 40 метров, сравнение производилось только для аналогичной глубины.

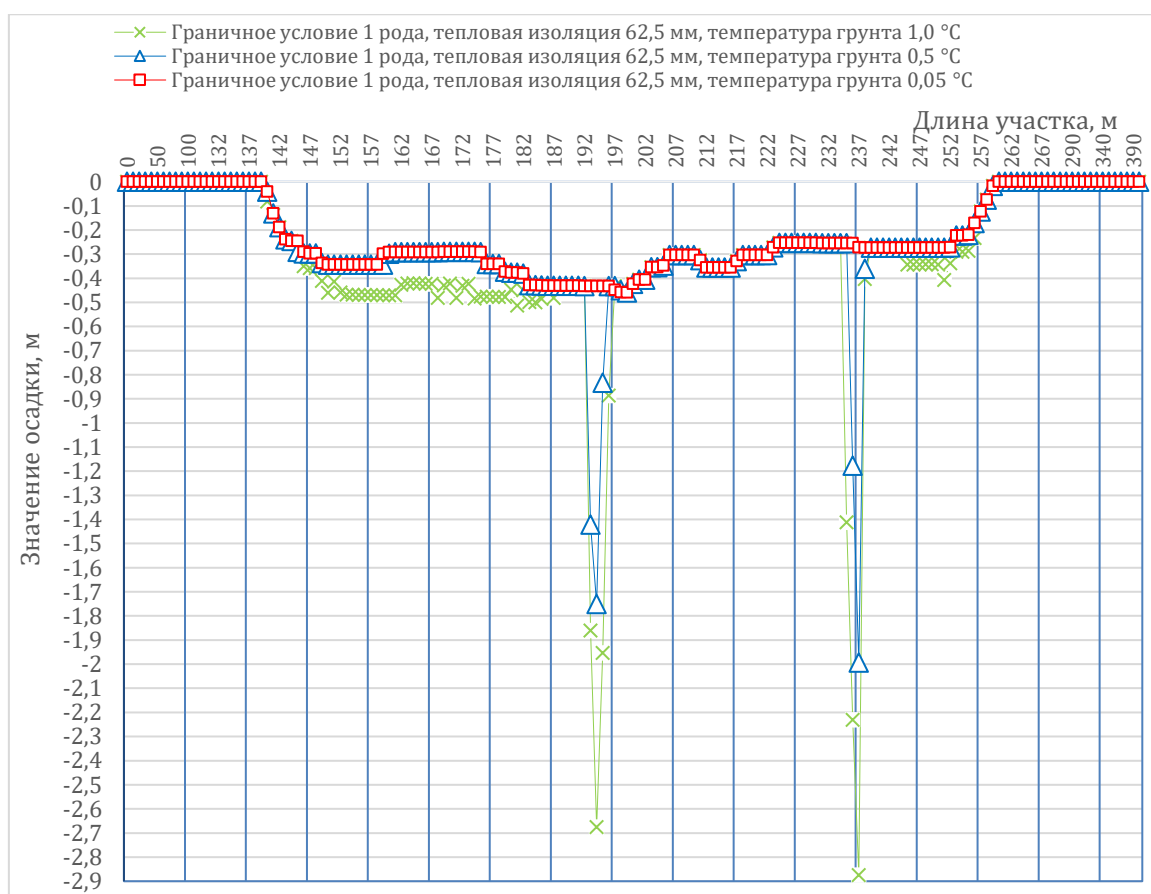


Рисунок 2.21 - Профили осадки для РМ с нижним граничным условием 1 рода при разных температурах талых грунтов

Результаты сравнения моделей с разными температурами показывают, что при применении ГУ 1 рода на нижней границе расчетной модели, образовывается дополнительное температурное накопление на вертикальном переходе талый-ММГ в области нижней грани, что приводит к искажению результатов расчетов и дополнительному оттаиванию ММГ в нижних зонах модели без присутствия теплового воздействия от атмосферы, либо теплового воздействия трубопровода, что можно отметить на профилях осадки для температур талых грунтов $1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 2.21). При этом, данное накопление уменьшается по мере уменьшения постоянной температуры ГУ нижней границы для талых грунтов. При задании температуры талых грунтов $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$, дополнительные искажения нивелируются, температурные изополя распределяются корректно, фронт ММГ остается неизменным по сравнению с исходным положением.

При использовании ГУ 1 рода, предпочтительной расчетной моделью с корректным распределением температурных изополей определена РМ№15 – с температурой талых грунтов $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$ и глубиной расчетной модели 40 метров. Однако, при детальном рассмотрении участка границы «талый-ММГ», выявлено смещение наклонного фронта ММГ в РМ№15, что говорит о недостаточно высокой температуре талых грунтов для исключения «замораживающего» эффекта в сторону талых грунтов в зоне границы «талый-ММГ». При этом, если рассмотреть РМ№14, отличающейся только температурой талых грунтов, в ней наклонная граница талый-ММГ остается неизменной. Таким образом, при применении ГУ 1 рода на нижней границе, при назначении температуры талого грунта $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$, вертикальные границы фронта ММГ за период эксплуатации не изменяют своего местоположения, а вот наклонный фронт – изменяется (рис.2.23). При назначении температуры талого грунта $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ – наоборот, наклонный фронт ММГ не изменяет своего положения, но вертикальная граница ММГ смещается. Из этого можем сделать вывод о возможности выборочного применения ГУ 1 рода на нижней границе расчетной модели с постоянной

температурой в зависимости от условий наличия переходной границы «талый-ММГ» в теле расчетной модели, а также расположения фронта ММГ – вертикальном, наклонном или иных нелинейных форм.

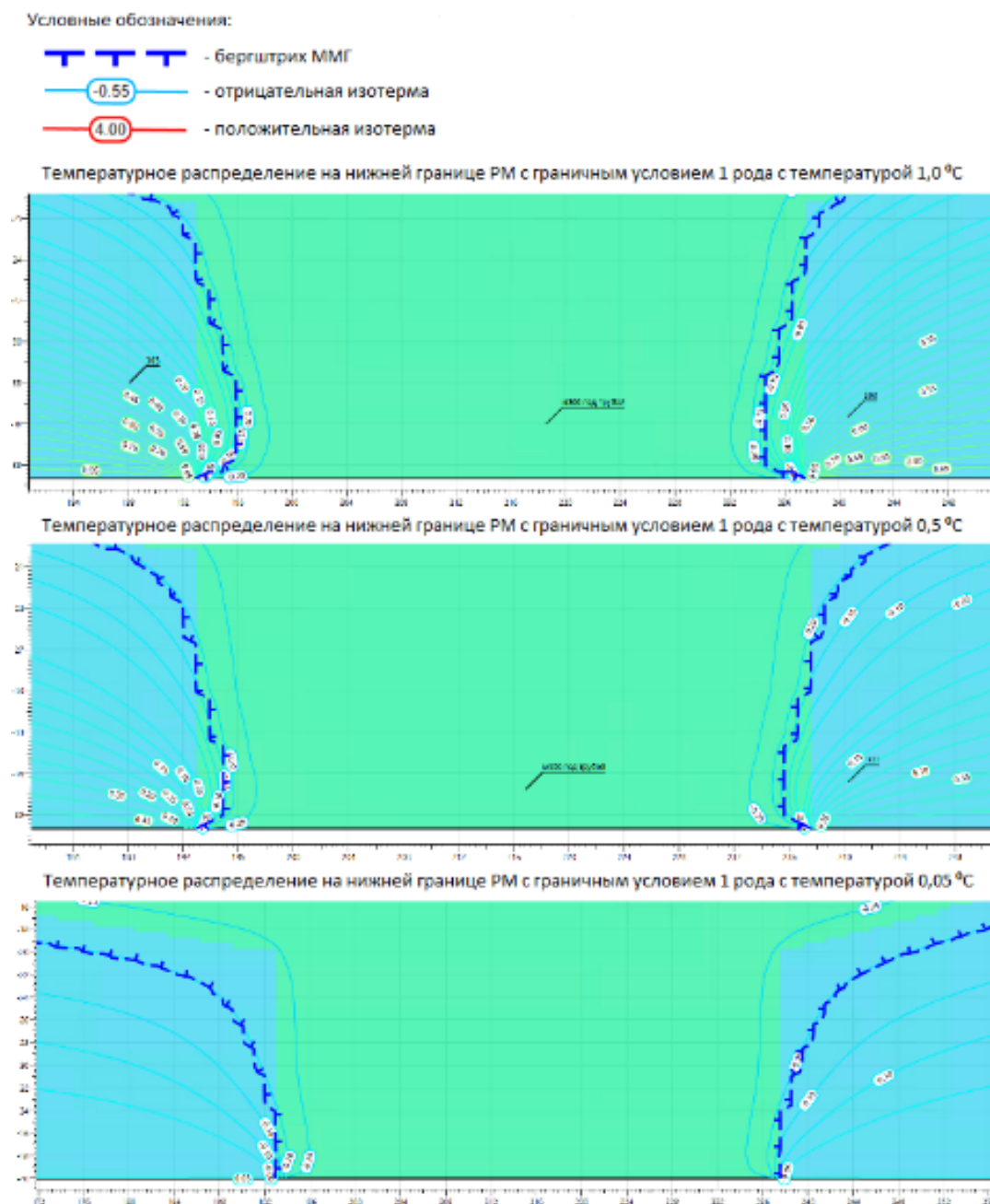


Рисунок 2.22 - Температурные поля для РМ с граничным условием 1 рода на нижней грани расчетной модели при разных температурах талых грунтов

Помимо мероприятий с тепловой изоляцией, были рассмотрены иные мероприятия по уменьшению осадки многолетнемерзлых грунтов при

оттаивании, а именно температурная стабилизация грунтов (ТСГ) в зоне переходов «талый-ММГ». На всех расчетных моделях были применены идентичные мероприятия по ТСГ с одинаковыми характеристиками и объемом замораживающих устройств.

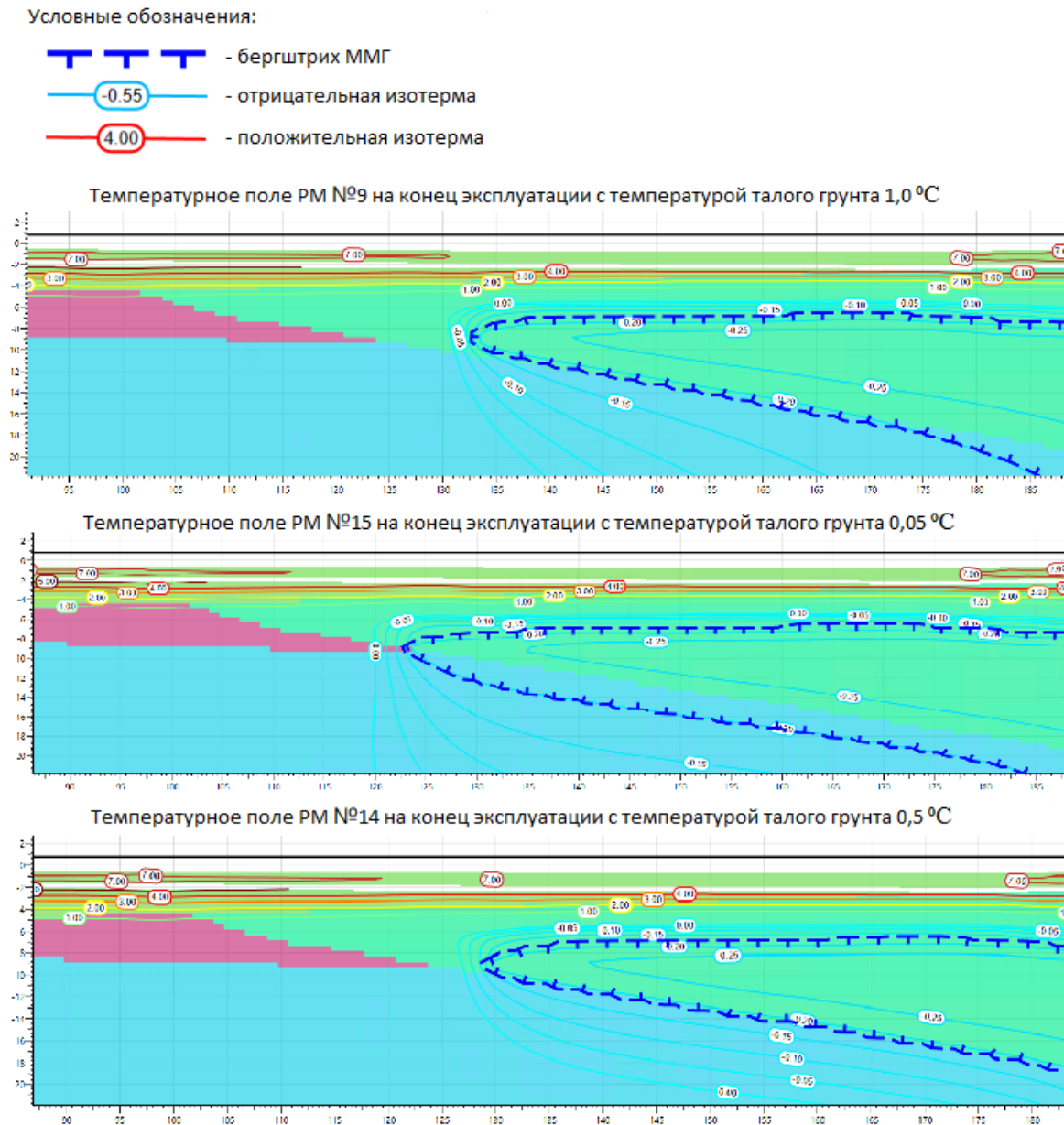


Рисунок 2.23 - Температурные поля наклонного фронта ММГ для РМ с нижним граничным условием 1 рода при разных температурах талых грунтов

На рисунке 2.24 представлена схема установки ТСГ, а также профили осадки для 9 расчетных моделей с применением температурной стабилизации грунтов.

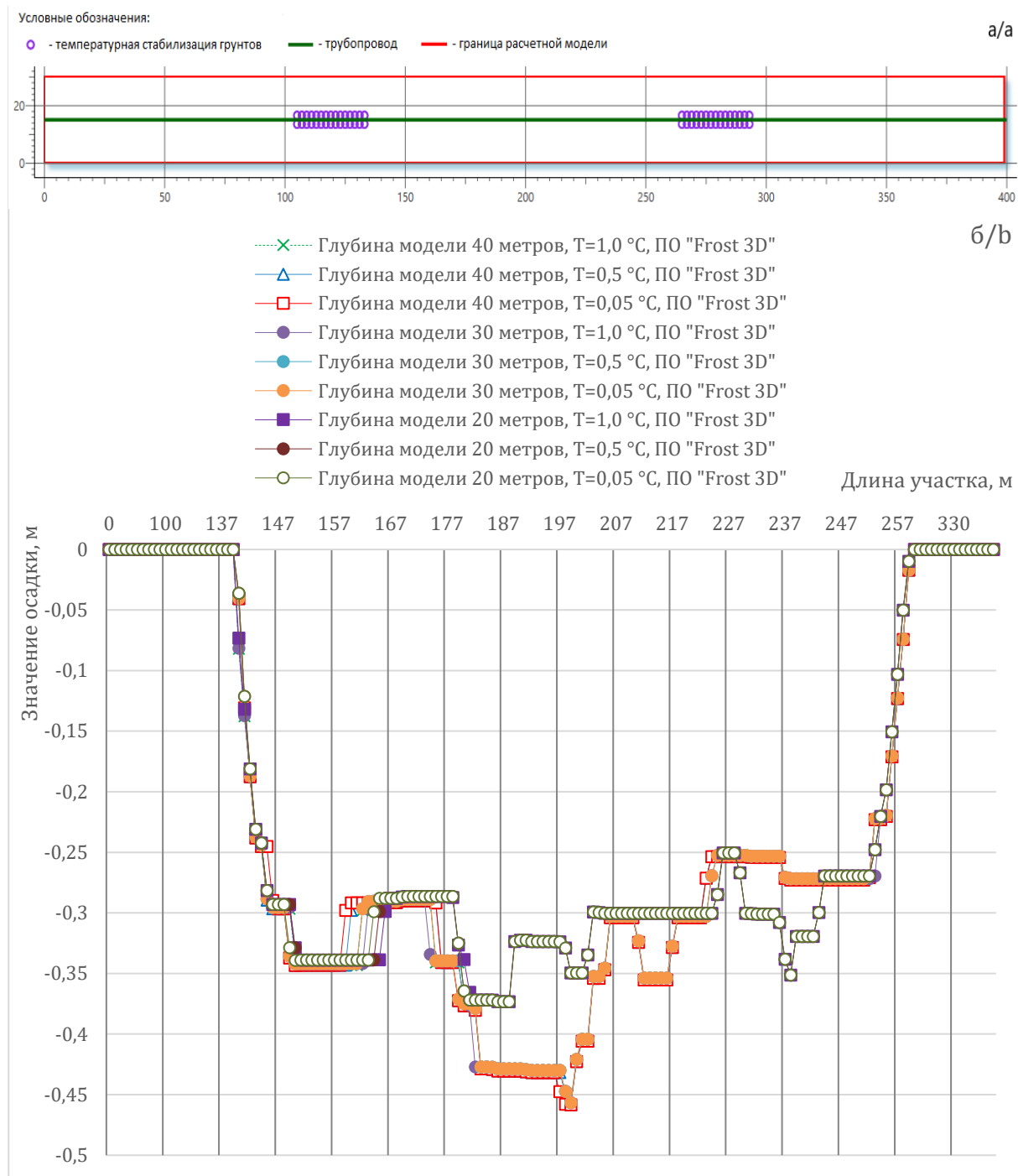


Рисунок 2.24 - Расчетные модели с температурной стабилизацией грунтов: а) вид расчетной модели в плане; б) профили осадки расчетных моделей с применением температурной стабилизации грунтов

Общий визуальный график осадок для 9 вариантов РМ показывает расхождения результатов осадки от 5,4 см до 13,2 см. По всей протяженности мерзлого участка, совпадения результатов осадки для РМ с глубинами моделей 30 и 40 метров – до 95%, различия встречены для РМ глубиной 20 метров, которые ранее отмечены как модели, искажающие температурные поля, то есть являющиеся некорректными. При применении ТСГ на участках перехода «талый-ММГ», исключаются максимальные расчетные осадки, в зоне ММГ различия в задании исходных данных в расчетных моделях не являются критичными.

Резюмируя, проведя сравнительный анализ результатов теплотехнических расчетов по различным факторам, можно сделать ряд выводов:

1. Задание температурного распределения в расчетной модели через температурные скважины требует детального восстановления местоположения фронта ММГ и применения большого количества дополнительных температурных скважин, и не рекомендуется к использованию в качестве способа задания температур грунтов для линейных сооружений при наличии островной ММГ по причине искажения исходных данных термометрических замеров и изначального положения фронта ММГ, отмеченного на геологических профилях, согласно результатам отчетов инженерных изысканий.
2. Применение ГУ 1 рода (условие Дирихле) на нижней границе с наличием внутри расчетной модели границ «талый-ММГ» требует предварительного анализа и вариантного расчета по подбору температуры талых грунтов для удовлетворения предпосылки о неизменности положения фронта ММГ в зоне отсутствия теплового воздействия ниже глубины нулевых амплитуд. Предпочтительно использование ГУ 2 рода на нижней границе расчетной модели.
3. По результатам факторного анализа результатов теплотехнических расчетов, предпочтительной является РМ №9 – с температурой талых грунтов 1,0 °С и глубиной расчетной модели не менее 40 метров.

4. Применение температурной стабилизации грунтов для исключения участков с наибольшими осадками на переходах «талый-ММГ» приводит к практически 100% совпадению результатов расчетов осадки для зоны сливающейся сплошной мерзлоты.

2.3. Влияние результатов теплотехнических расчетов на напряженно-деформированное состояние трубопровода

Для проведения комплексного сравнения влияния результатов теплотехнических расчетов на НДС трубопровода, было сформировано 30 расчетных моделей в ПО «СТАРТ-Проф» для проведения прочностных расчетов трубопровода.

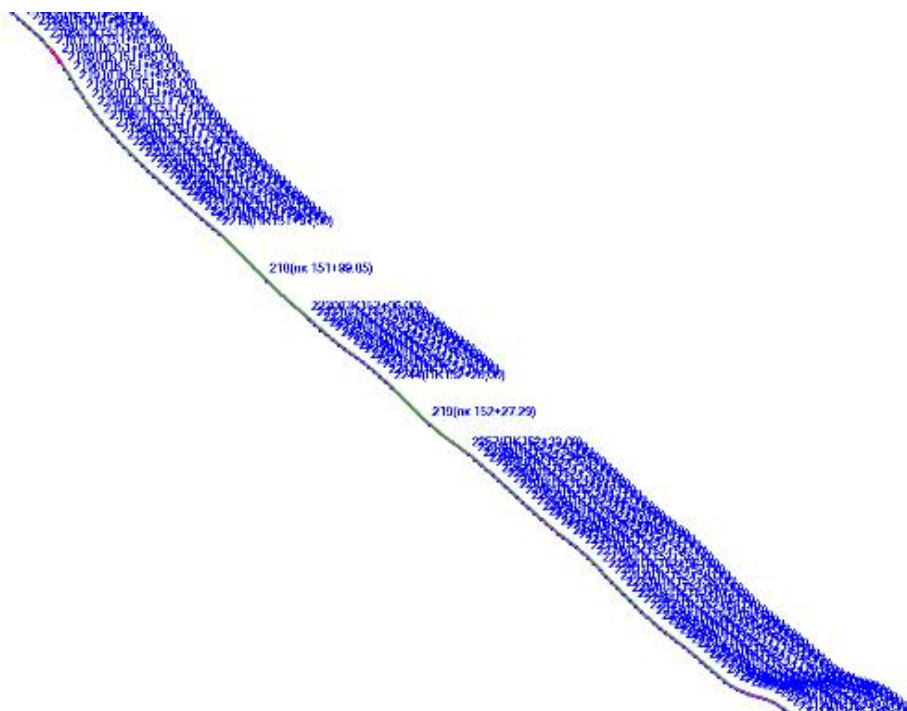


Рисунок 2.25 - Расчетная схема участка для прочностного расчета в ПО «СТАРТ-Проф»

Итоговый вывод говорит о том, что вне зависимости от выбранного способа, наличие границ перехода «талый-ММГ» с аномальными «скачками» осадки является наихудшим условием, влияющим на прочностные характеристики трубопровода. При исключении осадок при оттаивании на границах «талый-ММГ» при помощи применения мероприятий по

температурной стабилизации грунтов, все расчетные модели с ТСГ удовлетворяют условиям прочности. Можно заключить, что результаты теплотехнических расчетов, заданные с изменением части характеристик при прочих равных условиях, имеют относительно небольшие отклонения и не несут критичного значения для удовлетворения условий прочности трубопровода.

Таблица 2.7 - Перечень расчетных моделей и результаты удовлетворительных прочностных расчетов расчетных моделей

Условия задания расчетной модели (PM)		С граничным условием 2 рода на нижней границе PM			С граничным условием 1 рода на нижней границе PM
		20 метров	30 метров	40 метров	40 метров
Тепловая изоляция толщиной 62,5 мм	С температурой талых грунтов 1,0 °С	PM №1	PM №5	PM №9	PM №13
	С температурой талых грунтов 0,5 °С	PM №2	PM №6	PM №10	PM №14
	С температурой талых грунтов 0,05 °С	PM №3	PM №7	PM №11	PM №15
	С температурным распределением в зоне фронта ММГ	PM №4	PM №8	PM №12	-
Установка локальных сезонно-действующих охлаждающих устройств на границах ММГ	С температурой талых грунтов 1,0 °С	PM №16	PM №20	PM №24	PM №28
	С температурой талых грунтов 0,5 °С	PM №17	PM №21	PM №25	PM №29
	С температурой талых грунтов 0,05 °С	PM №18	PM №22	PM №26	PM №30
	С температурным распределением в зоне фронта ММГ	PM №19	PM №23	PM №27	-

	- условия прочности удовлетворены
	- условия прочности не удовлетворены
	- расчет на прочность не проводился

Основные различия представлены на границах «талый-мерзлый грунт», что говорит о необходимости полноценного теплового расчета участков ММГ островного распространения, уделяя особенное внимание моделированию переходов, с последующим подтверждением прочности трубопровода. Несмотря

на наличие множества допущений и неопределенностей при проведении теплотехнических расчетов, основным расчетом стоит считать расчет на прочность, и основной целью комплексных расчетов подземных трубопроводов является удовлетворение условий прочности трубопровода [59].

2.4. Верификация комплексной методики расчетов подземных трубопроводов по данным мониторинга эксплуатируемого объекта

Для подтверждения сходимости комплексной методики расчетов подземных трубопроводов, была проведена верификация на опытных данных геотехнического мониторинга подземного трубопровода эксплуатируемого объекта.

Основная сложность поиска объекта для проведения верификации прогнозных методик по данным мониторинга реального объекта заключается в неидеальных условиях реализации объектов: отклонения от проектных решений на этапе строительно-монтажных работ, активизация опасных геологических процессов, изменение технических параметров трубной продукции, мероприятий по температурной стабилизации, смещение сроков реализации проекта, погрешности инженерных изысканий и иные.

Все данные нюансы невозможно учесть в прогнозном расчете, поскольку они либо являются стохастическими, либо инструментально неизмеримыми, либо отсутствует описанная математическая модель данного процесса.

Таким образом, погрешность сходимости результатов прогнозирования и реальных данных при статистической обработке результатов верификации может иметь более широкие диапазоны, чем закладываемые в проекте в идеальных условиях.

2.4.1. Характеристика инженерно-геокриологических и климатических условий

Рассматриваемый участок расположен на севере центральной части Западно-Сибирской низменности, в лесотундровой зональной области, Северо-Надымско-Пуровской и Нижнетазовской провинции, Надым-Пуровского и Пур-Тазовского междуречья с долиной реки Пур (рис. 2.26).

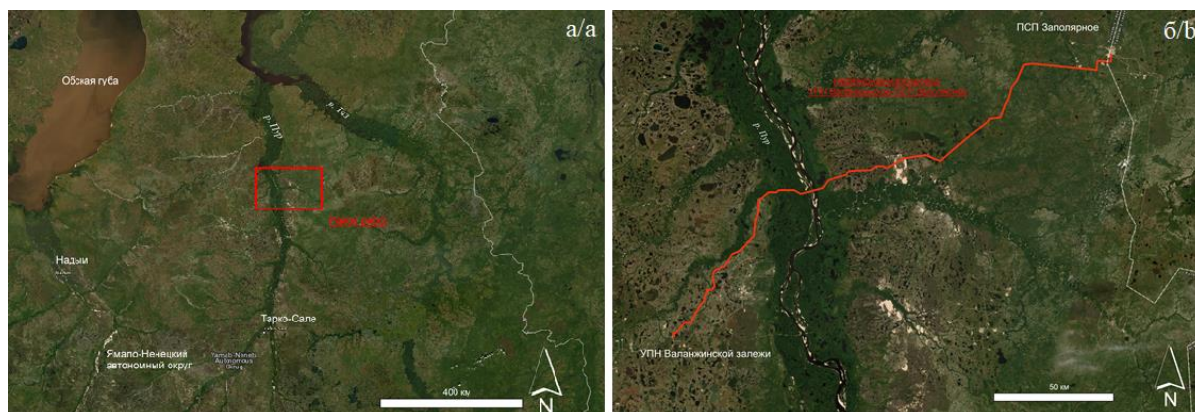


Рисунок 2.26 - Спутниковые снимки участка верификации:
а) спутниковый снимок месторасположения объекта исследования;
б) увеличенный вид участка, трасса выделена цветом

Наиболее крупным населенным пунктом является г. Новый Уренгой.

По схеме физико-географического районирования Тюменской области (автор – Н.А. Гвоздецкий и др.) район расположен на территории Пур-Тазовской провинций лесной, равнинной широтно-зональной области.

Климат района резко-континентальный. Зима суровая, холодная, продолжительная, с сильными ветрами и ранними осенними заморозками. Лето сравнительно короткое, но довольно теплое. Переходные периоды очень короткие, особенно весна.

Рельеф местности и геоморфология - плоская слабоволнистая западинная равнина, занятая лиственничными лесами и кочковатой безлесной тундрой. Расчлененность территории средняя, с общим уклоном в западном направлении в сторону реки Пур и на север в сторону долины реки Надосаляхадыта.

По схеме геоморфологического районирования изучаемая территория приурочена к Северной геоморфологической провинции, Обско-Тазовской

области, Пур-Тазовскому району с преобладающим типом рельефа – волнистая равнина. Абсолютные отметки поверхности изменяются от 5,8 (урез воды в р. Пур) до 90 м (рис. 2.27, а). Преобладающий угол наклона поверхности до 5° (рис. 2.27, б). Максимальные превышения водоразделов над урезами рек и озер – менее 5 м.

Геологическое строение рассматриваемого объекта представлено следующими стратиграфо-генетическими комплексами: верхнеплейстоценовых и голоценовых аллювиальных и озерно-аллювиальных отложений поймы (aH) и трех надпойменных террас (a1III4-H, a2III3, la3IIIer) (рис. 2.27, в), а также современных биогенных (болотных) грунтов (bH), развитых на всех геоморфологических уровнях.

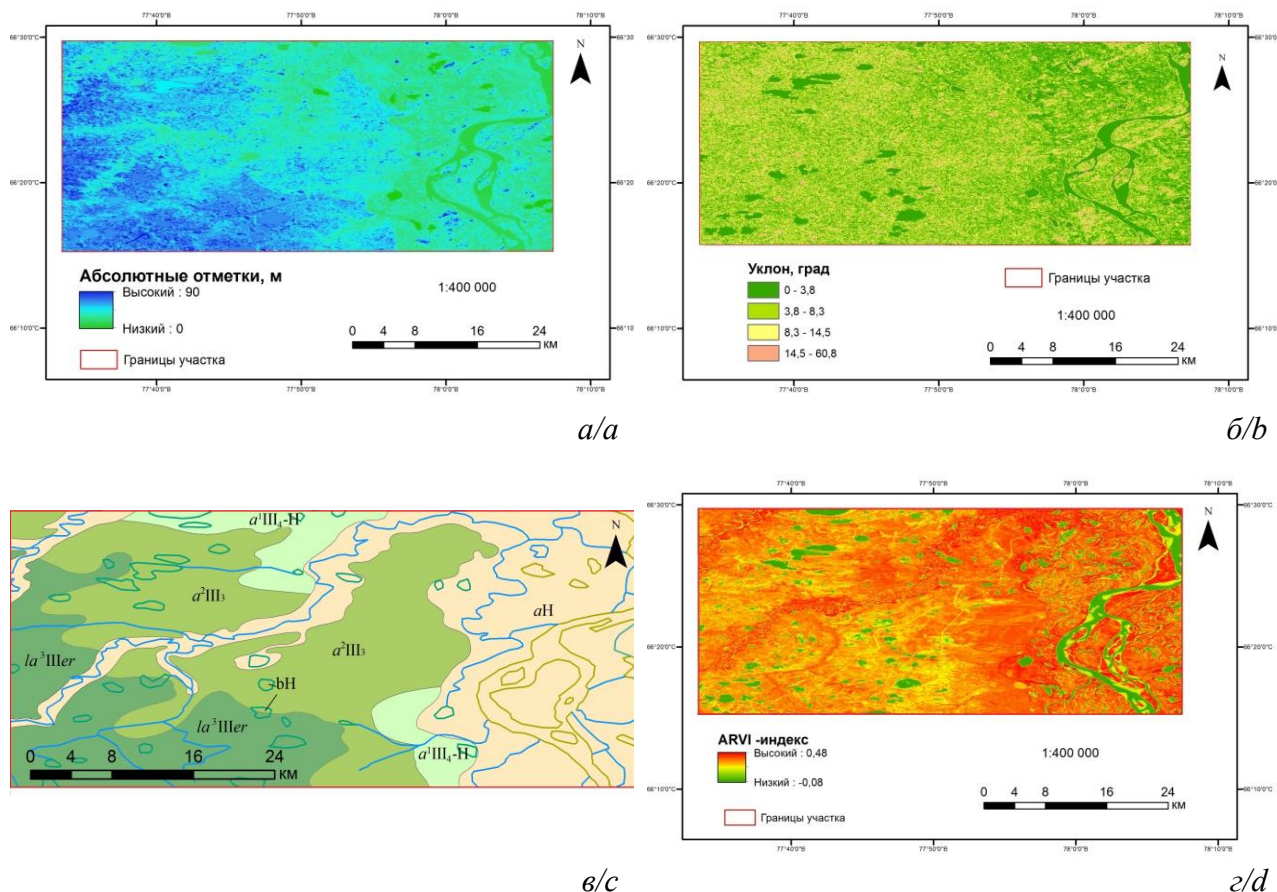


Рисунок 2.27 - Характеристики инженерно-геологических условий территории: а) абсолютные отметки поверхности; б) уклон поверхности; в) стратиграфо-генетические комплексы; г) вегетационный индекс, устойчивый к влиянию атмосферы (ARVI-индекс)

На рис. 2.27, г, приведены значения ARVI (Atmospherically Resistant Vegetation Index) – вегетационного индекса, устойчивого к влиянию атмосферы. Значения индекса изменяются от –1 до 1. Отрицательные значения характерны для водоемов и водотоков района (зеленый цвет). Растительность отображается в оттенках красного.

По характеру растительности район относится к зоне лесотундры. Растительность приурочена к сдrenированным бортам долин рек и представлена: лиственницами, реже елями и угнетенными березами, встречаемыми на дренированных бровках речных долин и русел рек, сложенных талыми грунтами. На плоских водоразделах заболоченная кочковатая тундра; на возвышенных сухих участках «суходолах», сложенных талыми песчаными грунтами или с заглубленной кровлей ММГ встречаются редколесье лиственница, в долинах рек и ручьев по талым грунтам ольха, береза, ива и разнообразный кустарник. Напочвенная растительность представлена мхами и лишайниками. Травяная растительность представлена осоками и другими видами злаков. Залежи торфа имеют ограниченное развитие. Широко развит органоминеральный слой, представленный мохово-растительный подушкой на заторфованном или заиленном субстрате.

Гидрография района представлена 12 водными объектами, самые крупные из них – реки Надосаляхадьта и Нюдя- Надосаляхадьта (левобережье реки Пур), их притоки и река Харвутаяха (левобережный бассейн реки Надым).

Трасса проходит по неосвоенной территории с отсутствием населенных пунктов. В геоморфологическом отношении территория изысканий приурочена к поверхности Надым-Пуровского водораздела с озерно-ледниковой равниной и озерно-аллювиальной равниной, с вложенными долинными комплексами р. Ярайнадояха и притоков р. Пур.

Поверхность рельефа пологоволнистая, отметки составляют 38,81 м в начале трассы, 9,3 м в конце трассы на пойме р. Пур.

В геологическом строении трассы трубопровода на глубину пробуренных скважин принимают участие современные болотные отложения, аллювиальные преимущественно песчаные отложения и комплекса озерных равнин, представленных незакономерным переслаиванием супесей, суглинков и песков, реже встречаются прослой глины. Разрез трассы на протяжении 11,7 км или 39 % представлен многолетнемерзлыми грунтами. Термометрические исследования в скважинах показали, что среднегодовая температура мерзлых грунтов на момент изысканий на глубине годовых нулевых амплитуд (10 м) составила минус 0,6 °С, изменяясь от минус 0,1 до минус 1,8 °С.

Трасса расположена на границе зон сплошного - I и прерывистого - II распространения многолетнемерзлых пород. По фактическим наблюдениям протяженность участков с многолетнемерзлыми грунтами по трассе нефтеконденсатопровода составляет 57,3 км или 55,6 % от линейной части. Талые грунты приурочены к долинам рек и ложбинам стока в районе крупных озер со сквозными таликами или заглубленной кровлей ММГ. Вскрытая мощность ММГ достигает 17 метров. Кровля многолетнемерзлых пород на момент изысканий встречена как с поверхности, так и на глубине от 9,2 до 10,8 м.

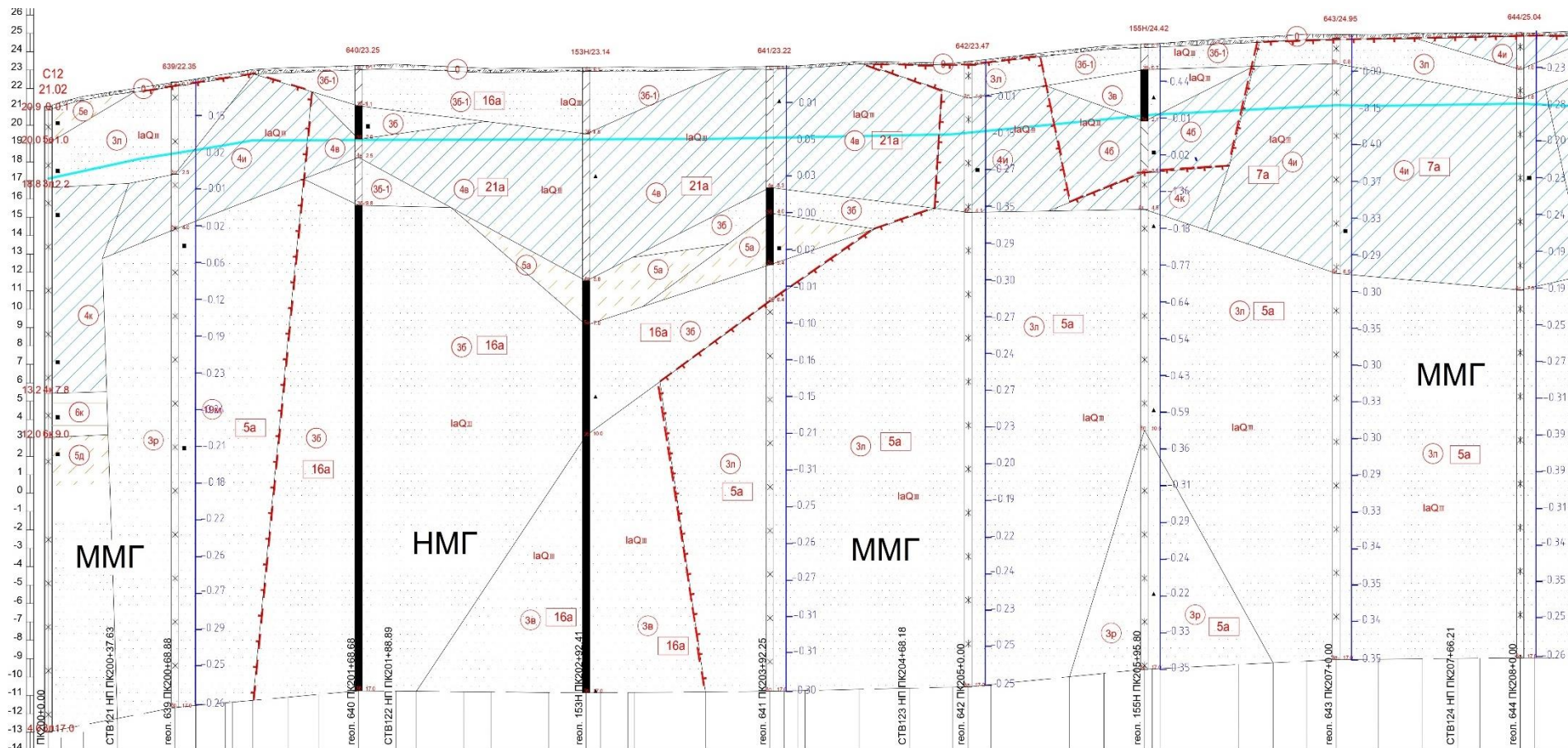
Особенности формирования мерзлоты связаны с климатическими условиями, тектоническим развитием территории в новейший этап и геолого-географической обстановкой, сформировавшей в регионе выдержанный геокриологический феномен - двухслойные по разрезу толщи многолетнемерзлых пород. Верхний слой позднеголоценовый, с температурой грунтов до минус 3,0 °С с прогрессирующей мерзлотой, а нижний - так называемый реликтовый - преимущественно плейстоценовый с температурой грунтов не более минус 2°С с деградирующей мерзлотой. Геокриологические условия района характеризуются залеганием древней реликтовой мерзлоты с наличием несквозных и сквозных таликов под руслами рек, мощностью более 25

м, с развитием многолетнемерзлых грунтов (ММГ) и ежегодным появлением в летнее время сезонно-талого слоя.

Среднегодовая температура мерзлых грунтов, по данным ранее проводившихся в этом районе исследований, колеблется от плюсовых значений до $-2,6^{\circ}\text{C}$. Термометрические исследования по данным 2014 года показали, что средняя температура мерзлых грунтов на глубине годовых нулевых амплитуд (10 м), составляла минус $0,74^{\circ}\text{C}$, по данным 2015 года показали, что средняя температура мерзлых грунтов на глубине годовых нулевых амплитуд (10 м), составляла минус $0,43^{\circ}\text{C}$. На момент изысканий 2018 года средняя температура мерзлых грунтов на глубине годовых нулевых амплитуд (10 м), составляет минус $0,56^{\circ}\text{C}$.

Многолетнемерзлые грунты, представлены суглинками от нельдистых до льдистых, супесями от слабольдистых до сильнольдистых; слабольдистыми и льдистыми глинами; песками слабольдистыми и льдистыми. По степени засоленности мерзлые оценены как незасоленные.

Современные тенденции развития толщ ММГ в районе работ, в пределах древних элементов рельефа на водоразделах - стабильное состояние. В пределах молодых элементов рельефа (долинных комплексов крупных рек) происходит активное промерзание, приводящее к появлению новообразований мерзлоты «перелетков» или к поднятию кровли ММГ.



Условные обозначения:

ТТТ - граница ММГ ММГ - многолетнемерзлый грунт НМГ - немерзлый грунт — - ось трубопровода

306 - инженерно-геологический элемент

Рисунок 2.28 – Продольный профиль участка для верификации

2.4.2. Исходные данные, результаты геотехнического мониторинга

Для верификации был выбран подземный трубопровод протяженностью 1 километр, в одном из исследуемых районов Ямало-Ненецкого автономного округа, технические параметры которого указаны в таблице 2.8.

Эксплуатируемый трубопровод имеет проектную сеть геотехнического мониторинга: термометрические скважины с шагом 50 метров вдоль оси трубопровода (рис. 2.29), результаты внутритрубной диагностики, с начала эксплуатации было проведено пять ежегодных циклов измерений с 2020 по 2024 годы.



Рисунок 2.26 – Визуальное обследование верификационного участка трубопровода

Трубопровод имеет высокую температуру перекачиваемого продукта, сплошную тепловую изоляцию, толщиной в 100 мм и коэффициентом теплопроводности $\lambda=0,033$ Вт/(м²х°С), а также сплошную установку одиночных сезонно-действующих охлаждающих устройств, установленных по схеме (рис. 2.30).

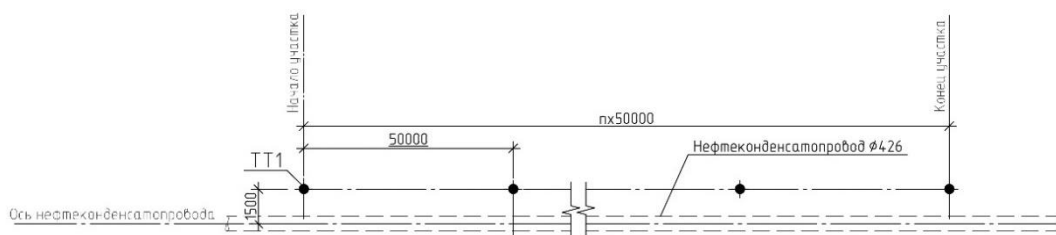


Рисунок 2.29 – Схема установки сети термометрических скважин

Таблица 2.8 – Технические характеристики трубопровода

Тип	Протяженность участка, м	Диаметр, толщина стенки, мм	Температура флюида на участке, °С	Защитные мероприятия
Нефтеконденсатопровод подземный	1000	426х9	+42	Тепловая изоляция толщиной 100 мм по всей длине участка, сплошная установка СОУ на участках с ММГ (ПК0+00-ПК1+43,5; ПК4+68-ПК10+00)

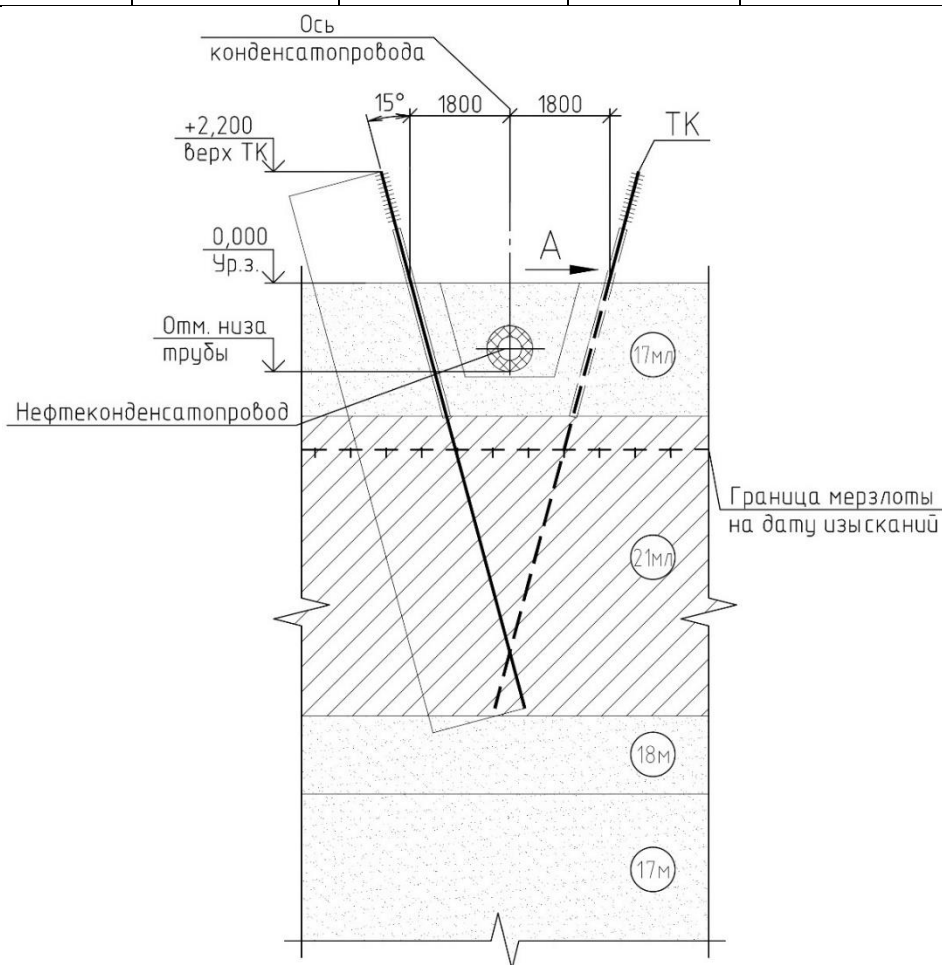


Рисунок 2.30 – Схема установки СОУ в зоне укладки трубопровода

2.4.3. Формирование расчетных моделей верифицируемого участка

На основании технических отчетов инженерно-геологических изысканий и рабочей документации, была сформирована расчетная модель для проведения теплотехнического расчета подземного трубопровода по комплексной методике расчетов (рис. 2.31, 2.32). Расчетная модель имеет размеры 40*40*1000 метров, общее количество конечных элементов в модели – 43 785 280 элементов. Всего

для начального температурного распределения приняты данные по 8 измерениям температур в геологических скважинах.

Для рассмотрения и сравнения всего выделено 2 типовых участка с разными геокриологическими и техническими условиями:

- 1) Участок со сливающимися ММГ с применением сплошной установки СОУ (с шагом 3,5 метра вдоль оси трубопровода);
- 2) Участок с заглубленной кровлей, без применения СОУ.

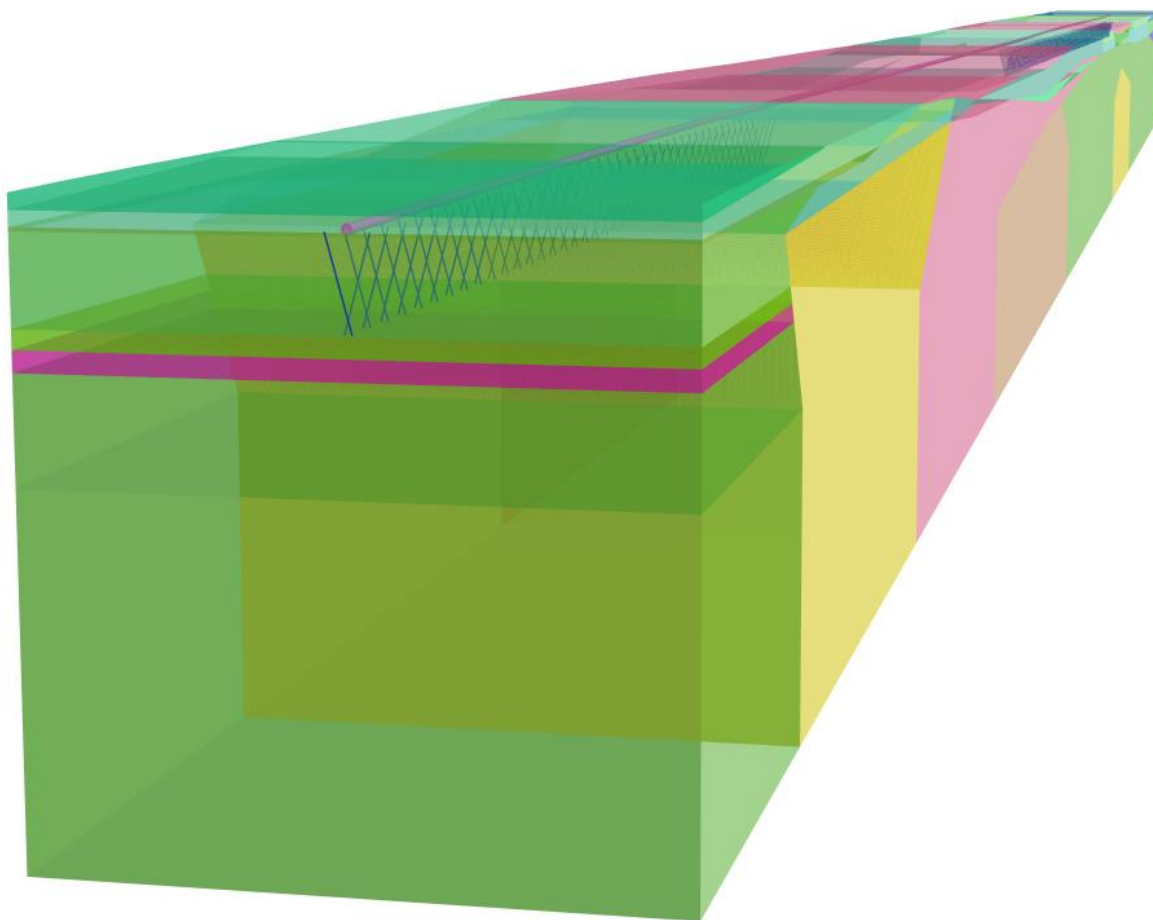


Рисунок 2.31 – Расчетная модель участка эксплуатируемого трубопровода
(вид в перспективе)



Рисунок 2.32 – Расчетная модель участка эксплуатируемого трубопровода
(вид сбоку)

2.4.4. Результаты верификации

Была проведена верификация на данных геотехнического мониторинга подземного трубопровода эксплуатируемого объекта, отмечено высокое совпадение результатов прогнозных расчетов в точках фактической установки термометрических скважин по всем трем типам выделенных участков.

Сходимость модели с натурными данными высокая (разница ниже СТС - от 0,1 до 0,4 °C), отмечены более низкие прогнозные температуры в зоне прокладки трубопровода по причинам отсутствия в расчетной модели учтенных факторов по активизации выявленных геологических процессов обводнения, графики сходимости фактических измерений и полученных результатов прогнозных расчетов, поперечные разрезы модели с температурными полями представлены на рисунках 2.33-2.42.

В зоне СТС отмечены различия, связанные с активизацией геологических процессов, которые на данный момент, не могут быть учтены в прогнозных моделях, что подтверждается отчетом по визуальному осмотру службы геотехнического мониторинга. Были отмечены такие процессы, как обводнение, заболачивание, размыв защитного валика в притраншейной зоне. Отмечены аномальные выбросы, выходящие за пределы усредненной погрешности, проявляющиеся на горизонтах 9-10 метров на определенных участках с ТСГ, которые автор связывает с возможными особенностями работы термостабилизаторов в сторону большей фактической эффективности. При этом, данные выбросы на более поздних датах (2024 г.) либо исчезают полностью, либо фактическая разница с прогнозными температурами сводится к усредненному значению (рис. 2.43-2.62)

На участке без применения ТСГ отмечено точное совпадение отметок кровли оттаивания с учетом шага измерений в термометрических скважинах в 0,5 метра.

ПКЗ+70

Условные обозначения:

—◆— 12.04.2021 (фактический) —■— 15.04.2021 (прогнозный)

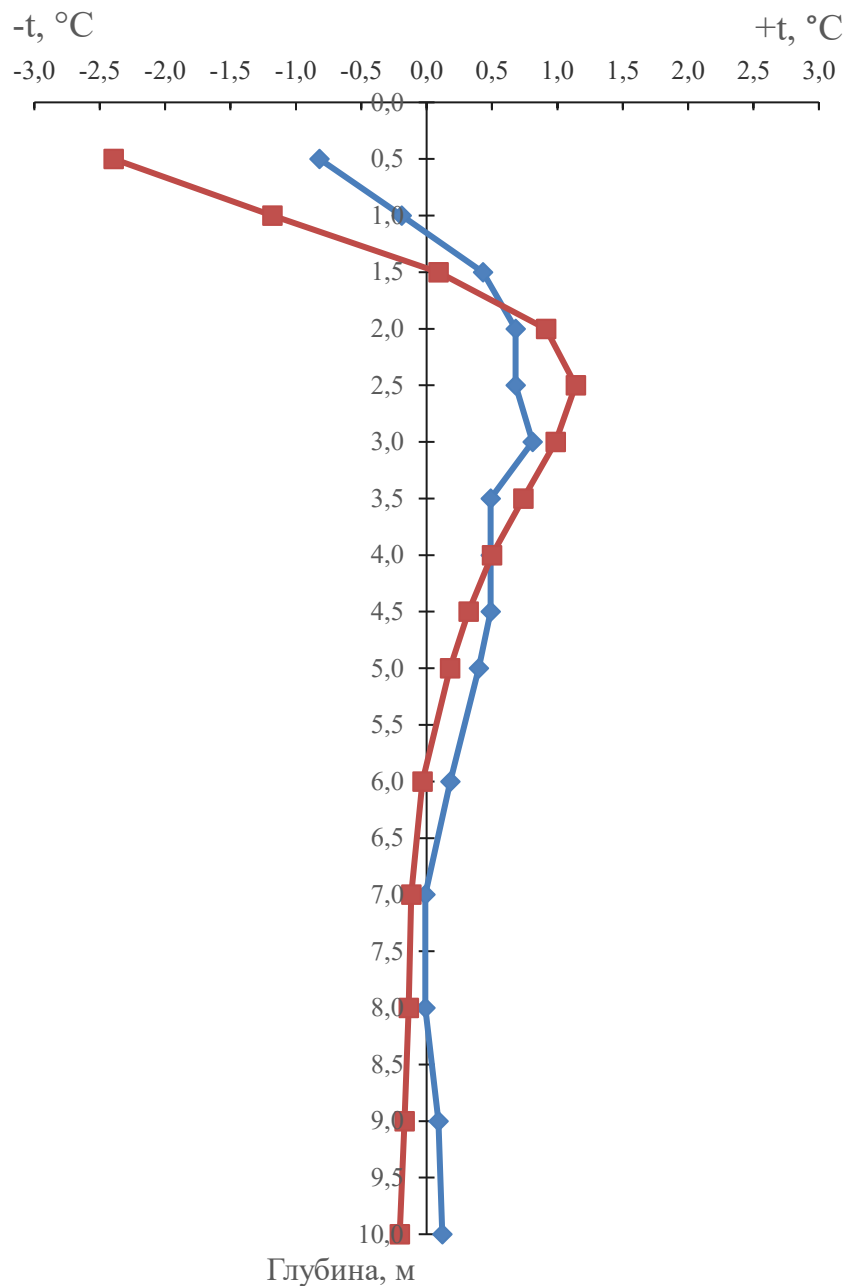


Рисунок 2.33 – Сравнение результатов температур реальных замеров в термометрической скважине с прогнозной моделью по комплексной методике для участка с заглубленной кровлей, без применения СОУ (ПКЗ+70 участка, апрель 2021 г.)

ПКЗ+70

Условные обозначения:

—◆— 20.02.2022 (фактический) —■— 15.02.2022 (прогнозный)

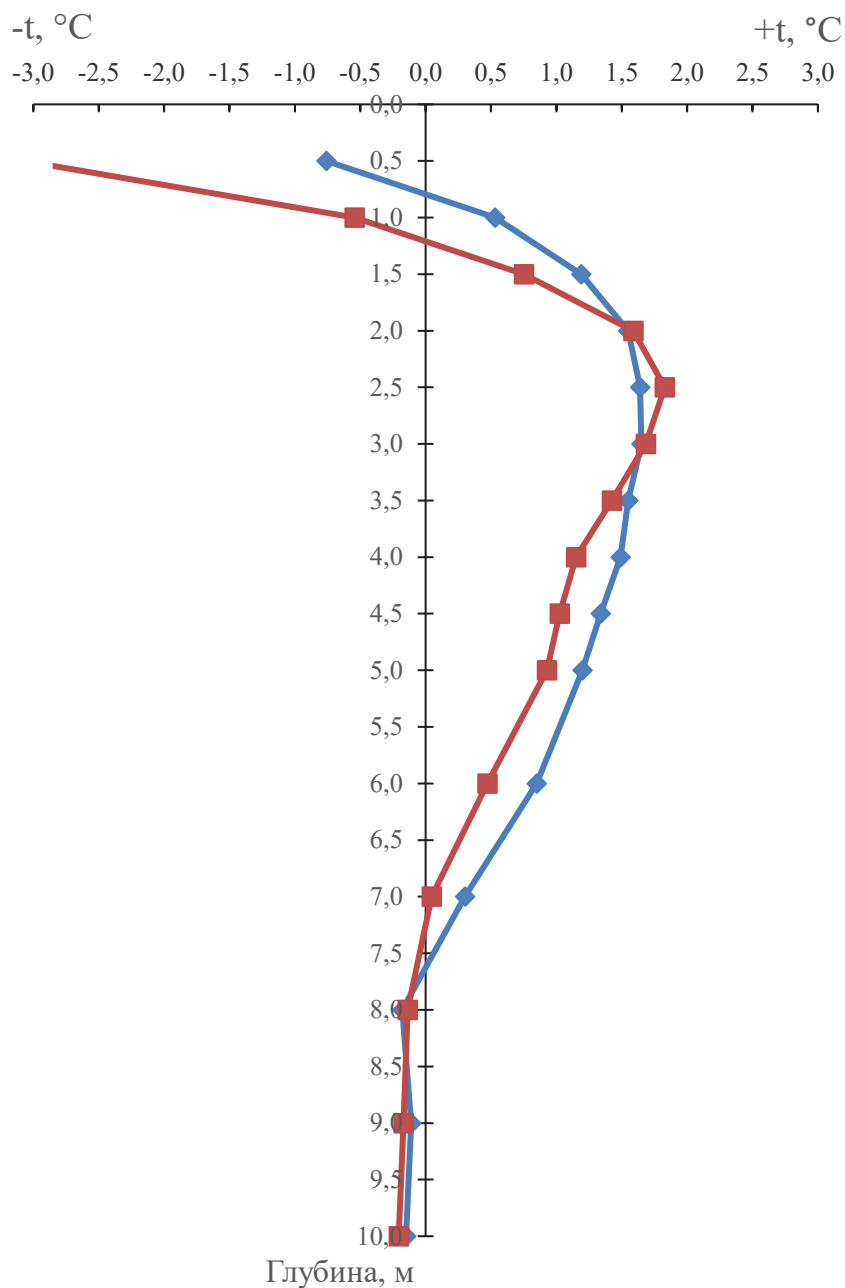


Рисунок 2.34 – Сравнение результатов температур реальных замеров в термометрической скважине с прогнозной моделью по комплексной методике для участка с заглубленной кровлей, без применения СОУ (ПКЗ+70 участка, февраль 2022 г.)

ПК3+70

Условные обозначения:

—◆— 31.01.2023 (фактический) —■— 15.01.2023 (прогнозный)

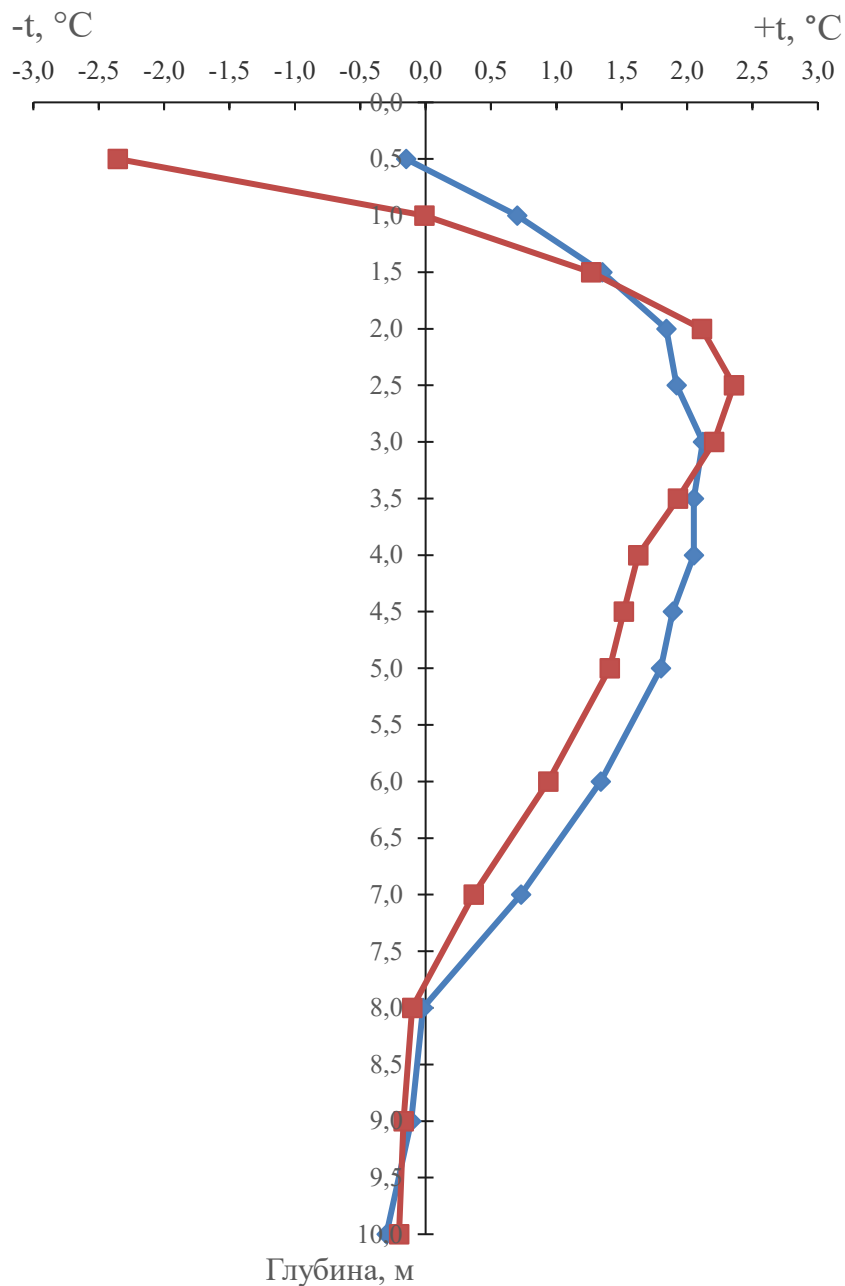


Рисунок 2.35 – Сравнение результатов температур реальных замеров в термометрической скважине с прогнозной моделью по комплексной методике для участка с заглубленной кровлей, без применения СОУ (ПК3+70 участка, январь 2023 г.)

ПКЗ+70

Условные обозначения:

—◆— 18.08.2023 (фактический) —■— 15.08.2023 (прогнозный)

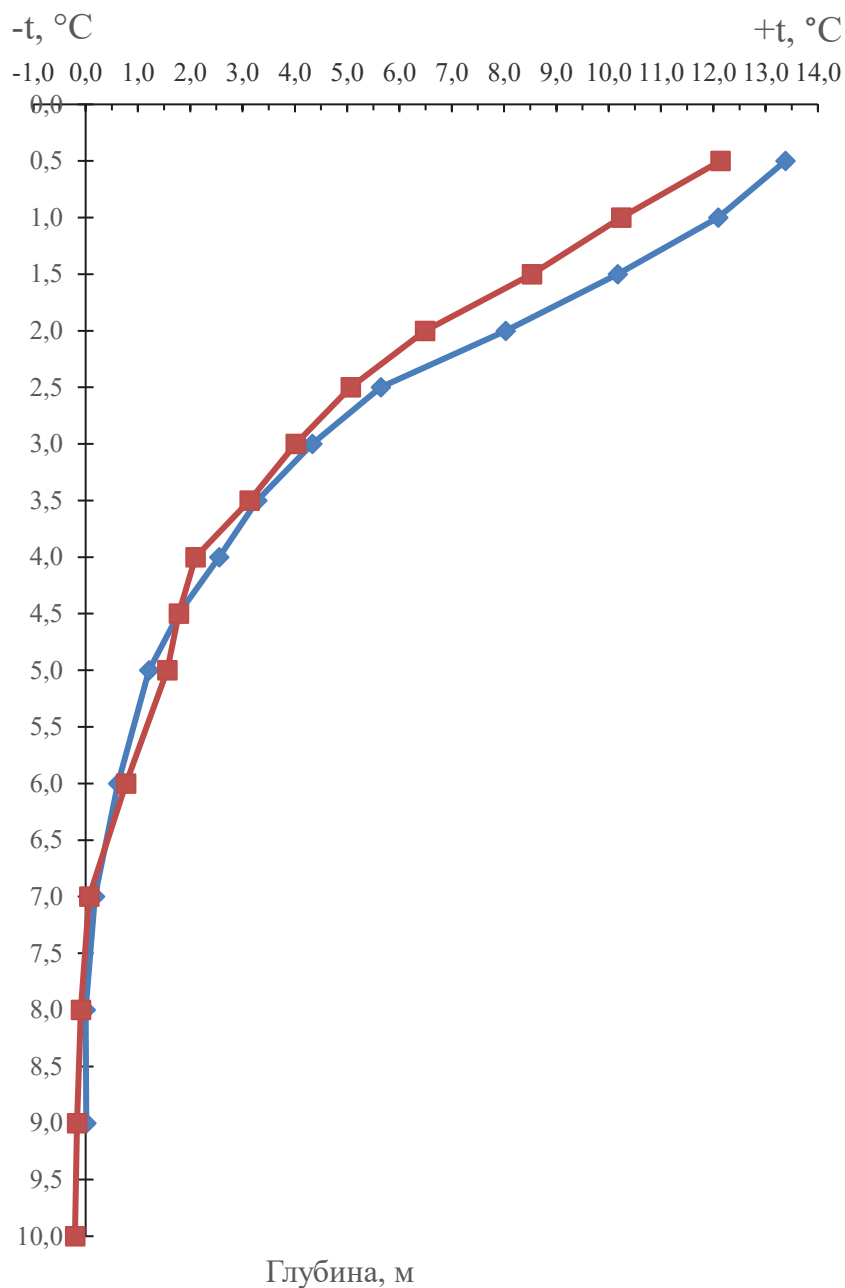


Рисунок 2.36 – Сравнение результатов температур реальных замеров в термометрической скважине с прогнозной моделью по комплексной методике для участка с заглубленной кровлей, без применения СОУ (ПКЗ+70 участка, август 2023 г.)

ПК3+70

Условные обозначения:

—◆— 24.01.2024 (фактический) —■— 15.01.2024 (прогнозный)

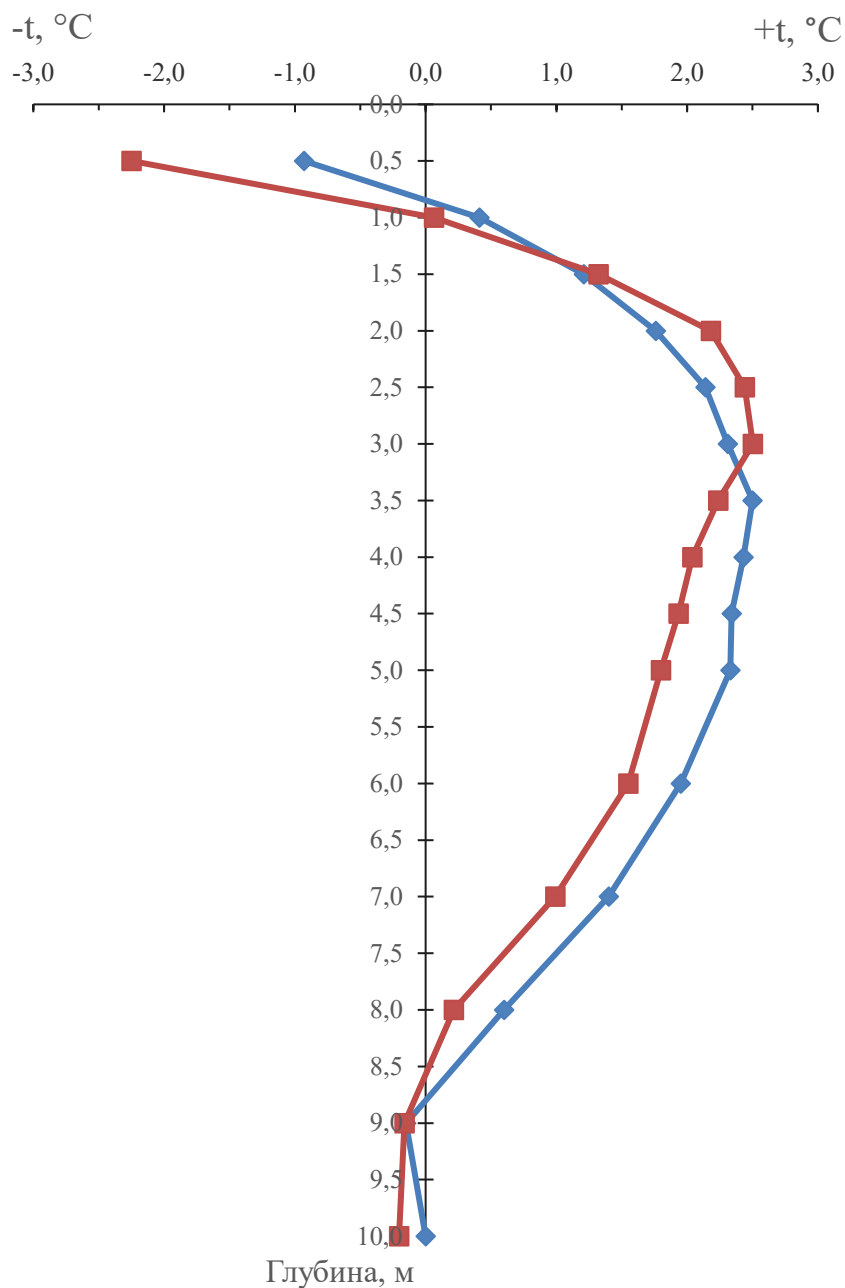


Рисунок 2.37 – Сравнение результатов температур реальных замеров в термометрической скважине с прогнозной моделью по комплексной методике для участка с заглубленной кровлей, без применения СОУ (ПК3+70 участка, январь 2024 г.)

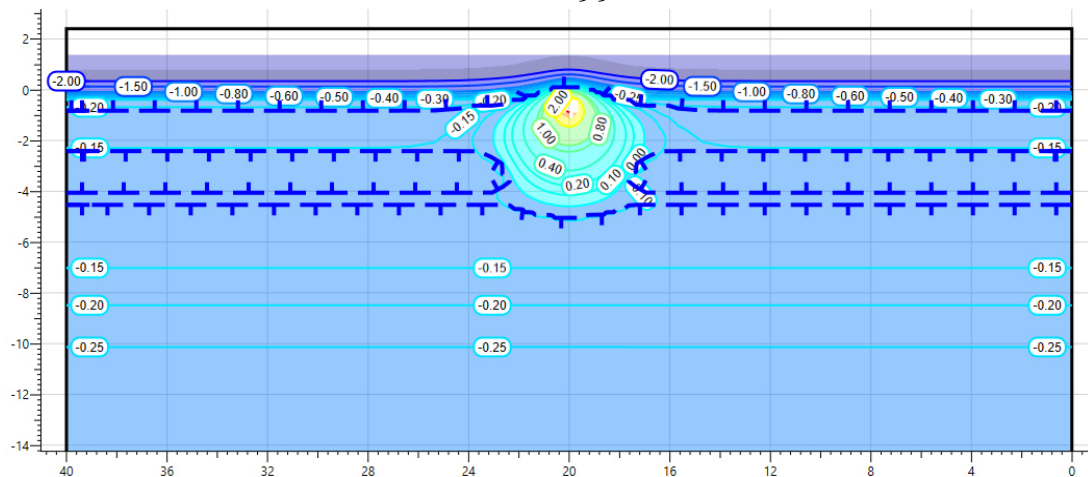


Рисунок 2.38 – Температурное поле поперечного разреза расчетной модели
(ПК3+70 участка, апрель 2021 г.)

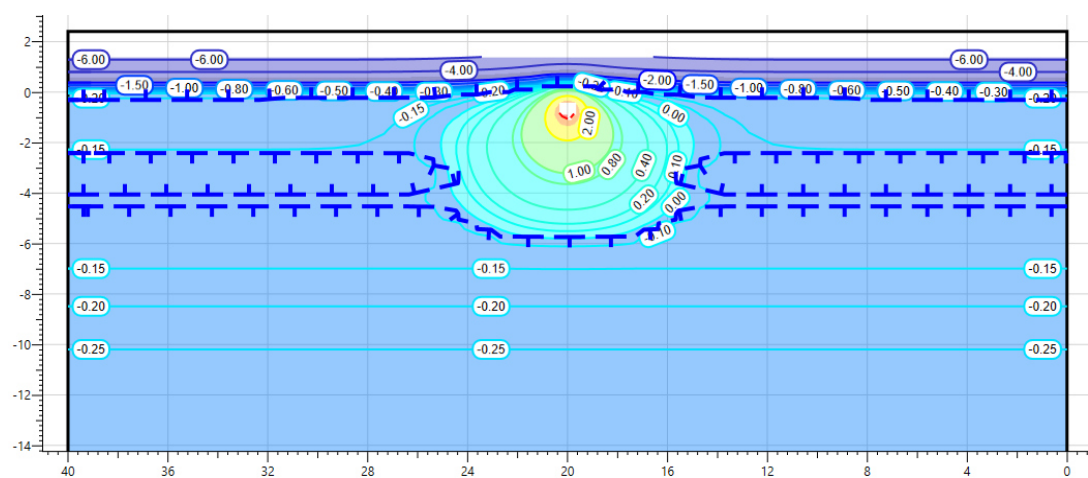


Рисунок 2.39 – Температурное поле поперечного разреза расчетной модели
(ПК3+70 участка, февраль 2022 г.)

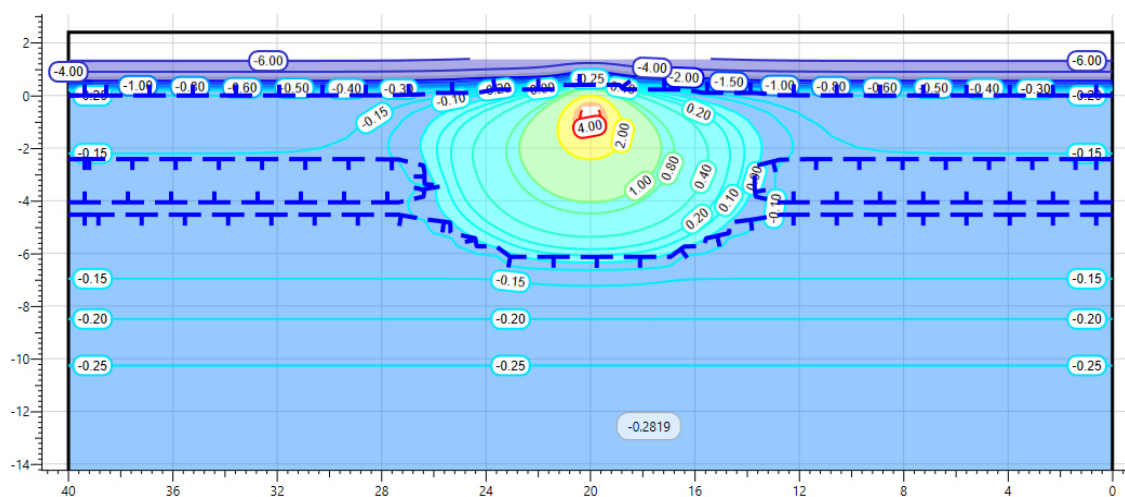


Рисунок 2.40 – Температурное поле поперечного разреза расчетной модели
(ПК3+70 участка, январь 2023 г.)

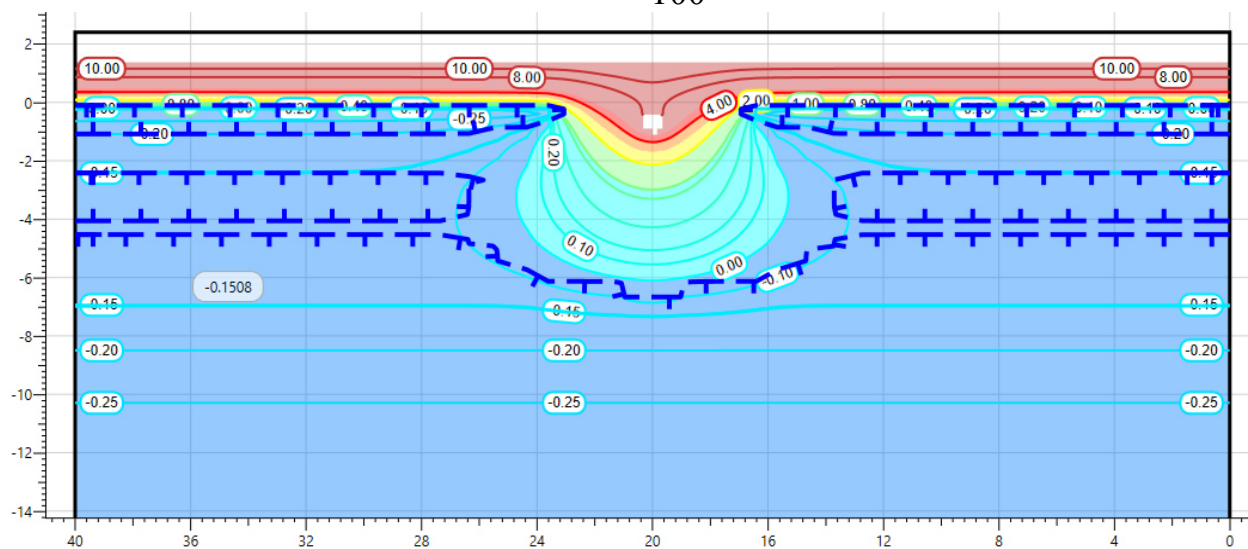


Рисунок 2.41 – Температурное поле поперечного разреза расчетной модели
(ПК3+70 участка, август 2023 г.)

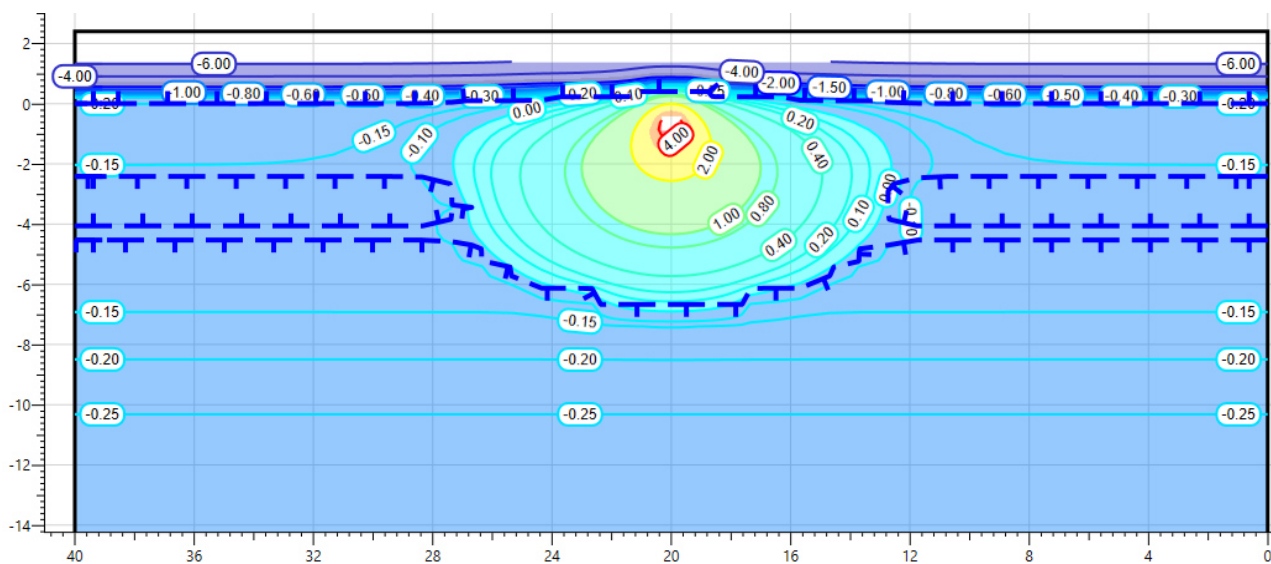


Рисунок 2.42 – Температурное поле поперечного разреза расчетной модели
(ПК3+70 участка, январь 2024 г.)

ПК6+70

Условные обозначения:

—◆— 12.04.2021 (фактический) —■— 15.04.2021 (прогнозный)

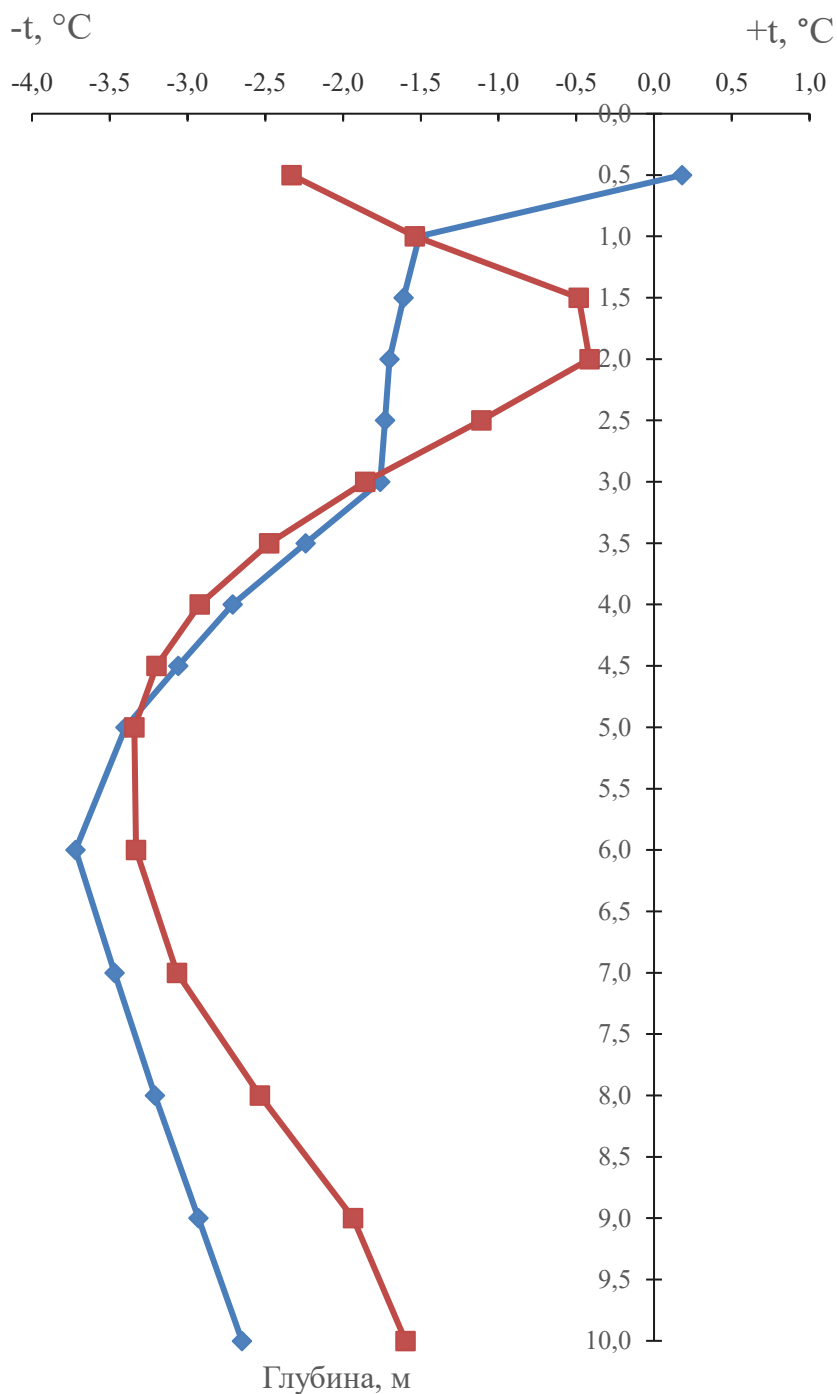


Рисунок 2.43 – Сравнение результатов температур реальных замеров в термометрической скважине с прогнозной моделью по комплексной методике для участка со сливающимися ММГ с применением сплошной установки СОУ (ПК6+70 участка, апрель 2021 г.)

ПК6+70

Условные обозначения:

—◆— 20.02.2022 (фактический) —■— 15.02.2022 (прогнозный)

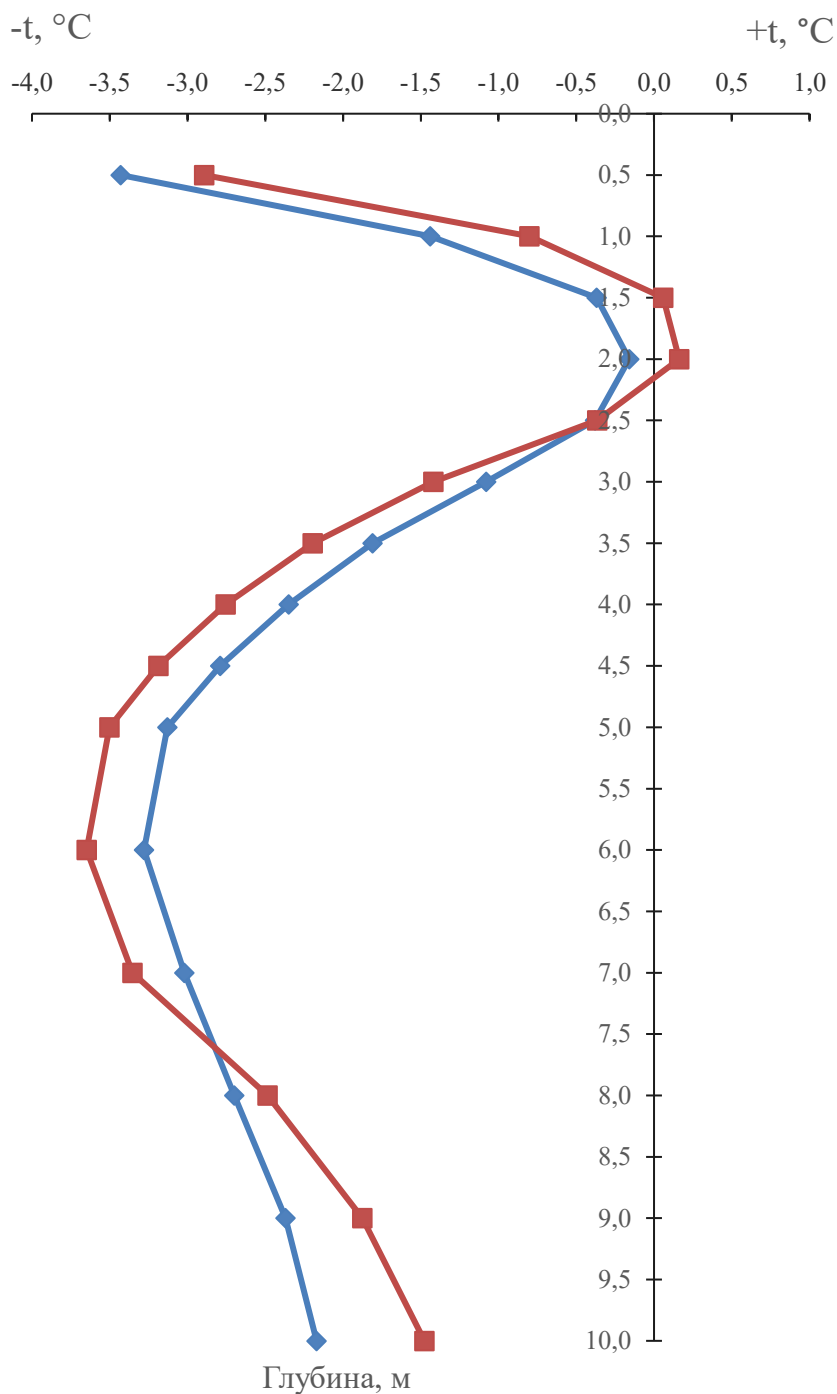


Рисунок 2.44 – Сравнение результатов температур реальных замеров в термометрической скважине с прогнозной моделью по комплексной методике для участка со сливающимися ММГ с применением сплошной установки СОУ (ПК6+70 участка, февраль 2022 г.)

ПК6+70

Условные обозначения:

—◆— 31.01.2023 (фактический) —■— 15.01.2023 (прогнозный)

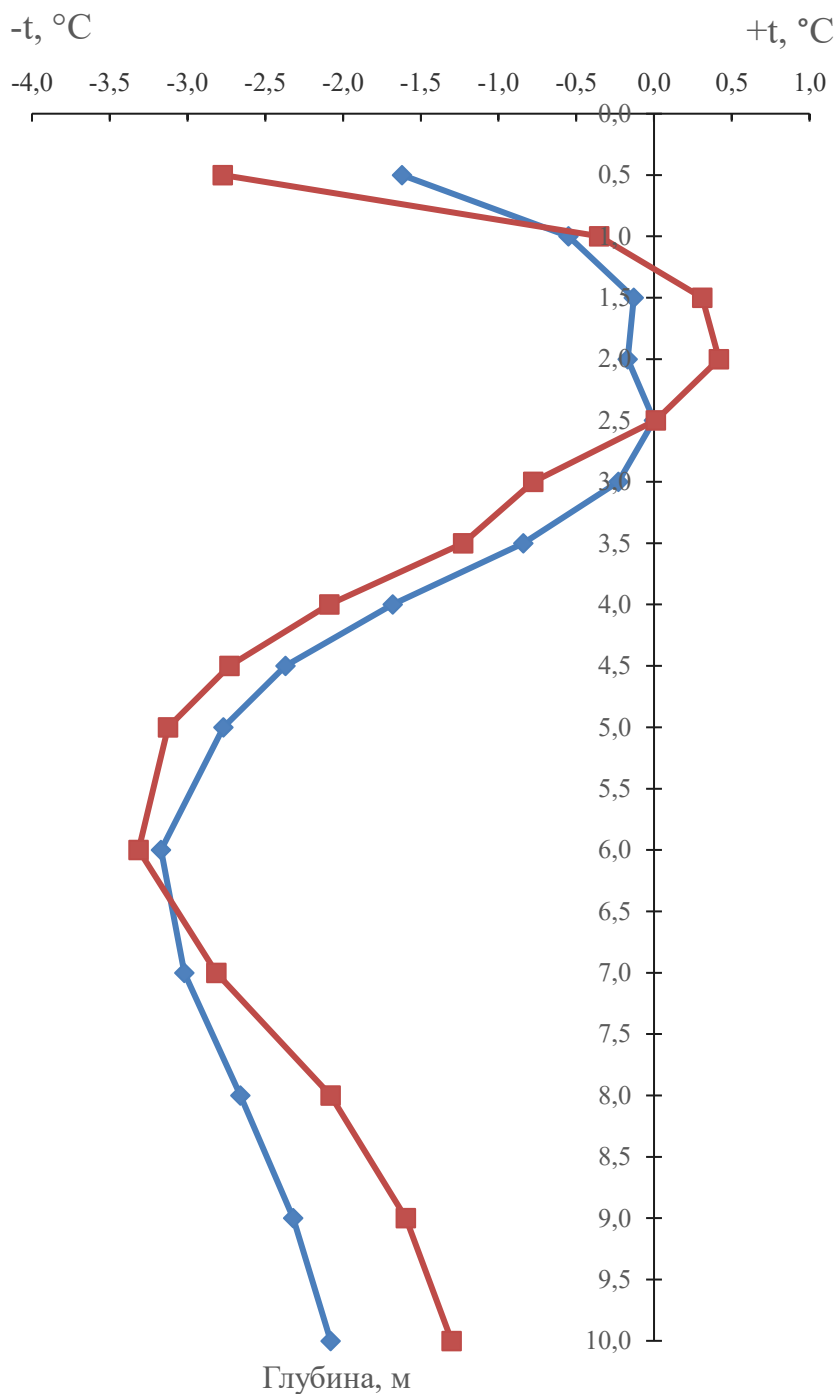


Рисунок 2.45 – Сравнение результатов температур реальных замеров в термометрической скважине с прогнозной моделью по комплексной методике для участка со сливающимися ММГ с применением сплошной установки СОУ (ПК6+70 участка, январь 2023 г.)

ПК6+70

Условные обозначения:

—◆— 18.08.2023 (фактический) —■— 15.08.2023 (прогнозный)

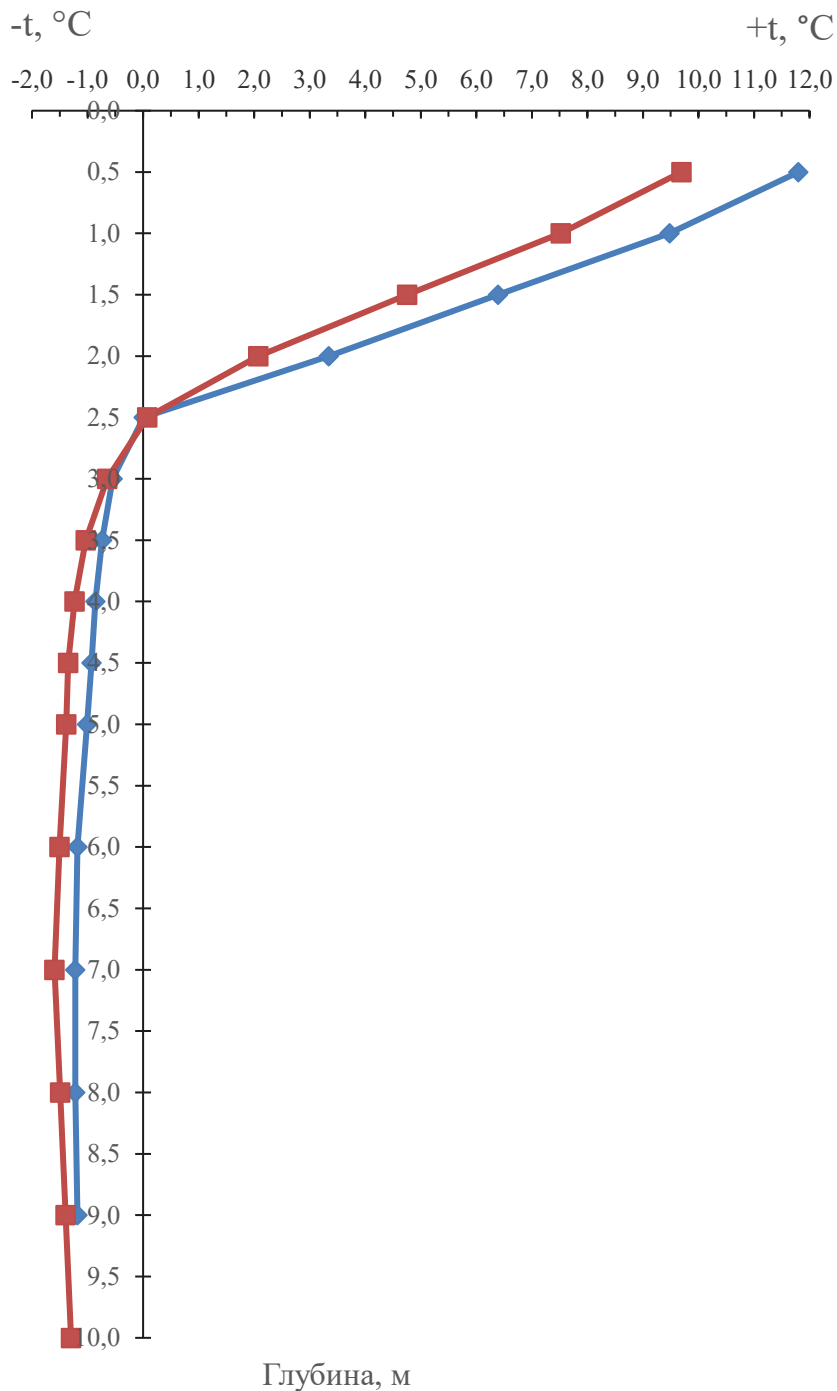


Рисунок 2.46 – Сравнение результатов температур реальных замеров в термометрической скважине с прогнозной моделью по комплексной методике для участка со сливающимися ММГ с применением сплошной установки СОУ (ПК6+70 участка, август 2023 г.)

ПК6+70

Условные обозначения:

—◆— 24.01.2024 (фактический) —■— 15.01.2024 (прогнозный)

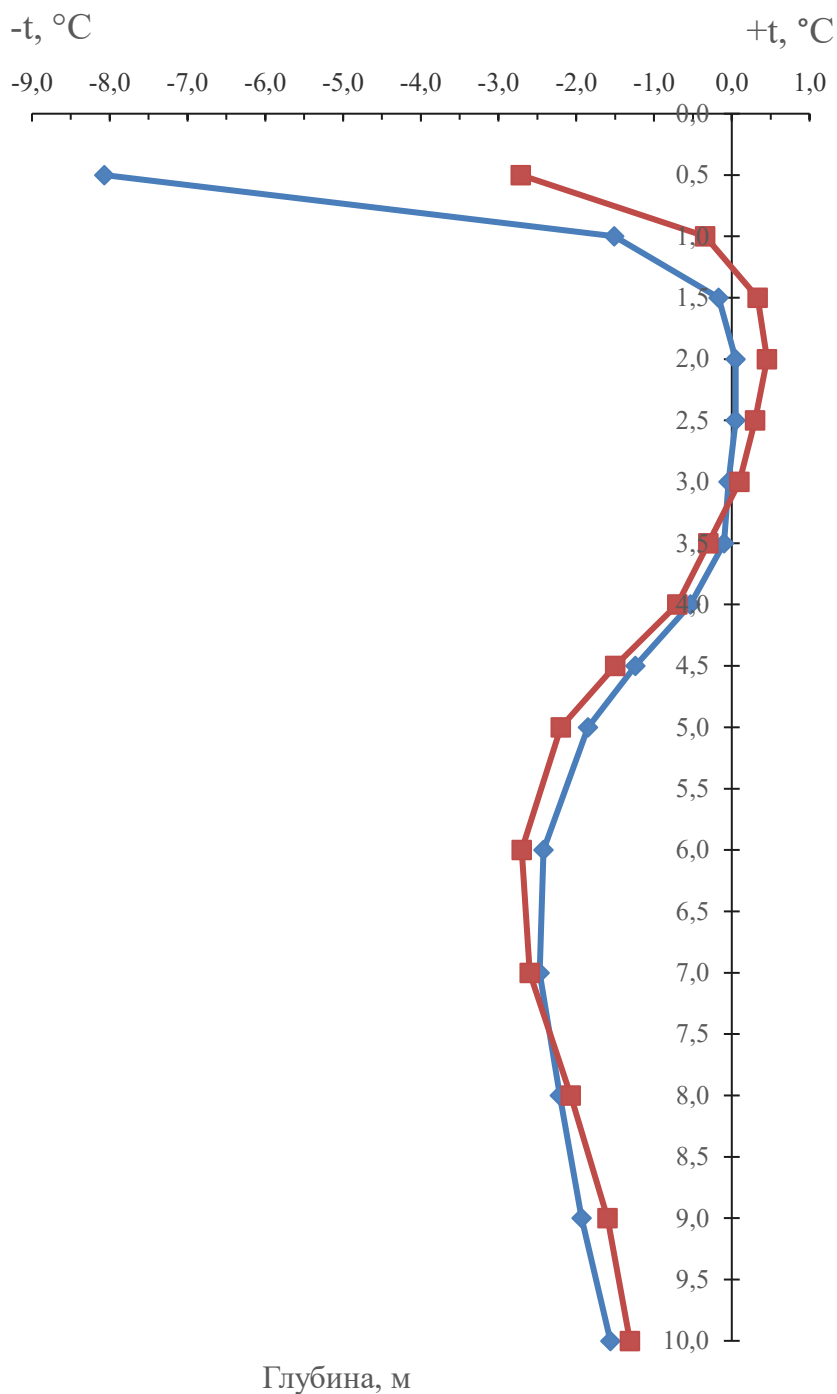


Рисунок 2.47 – Сравнение результатов температур реальных замеров в термометрической скважине с прогнозной моделью по комплексной методике для участка со сливающимися ММГ с применением сплошной установки СОУ (ПК6+70 участка, январь 2024 г.)

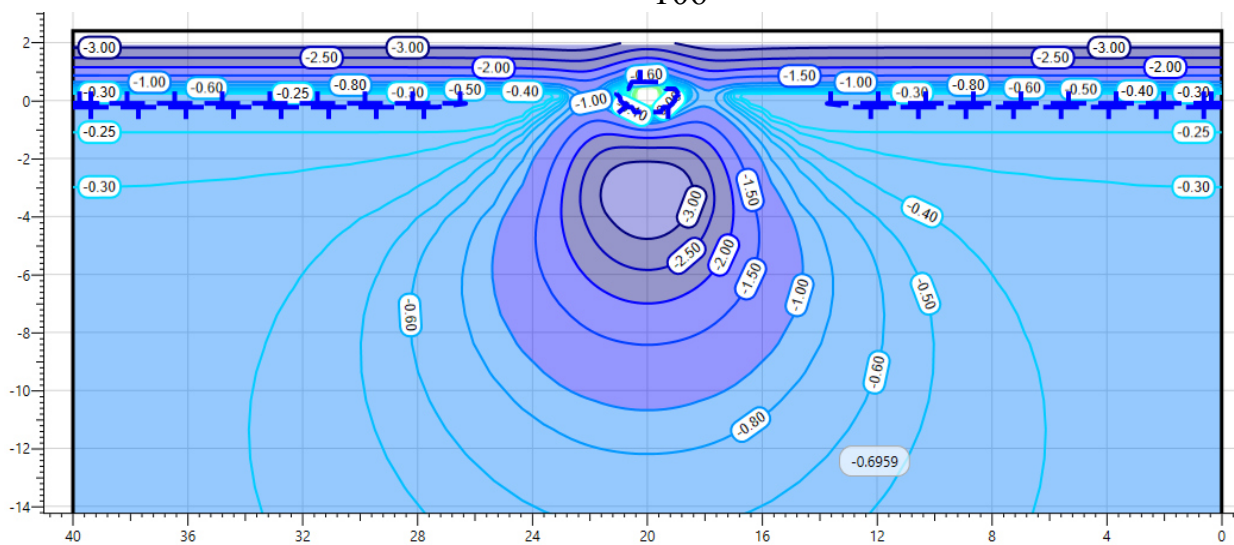


Рисунок 2.48 – Температурное поле поперечного разреза расчетной модели
(ПК6+70 участка, апрель 2021 г.)

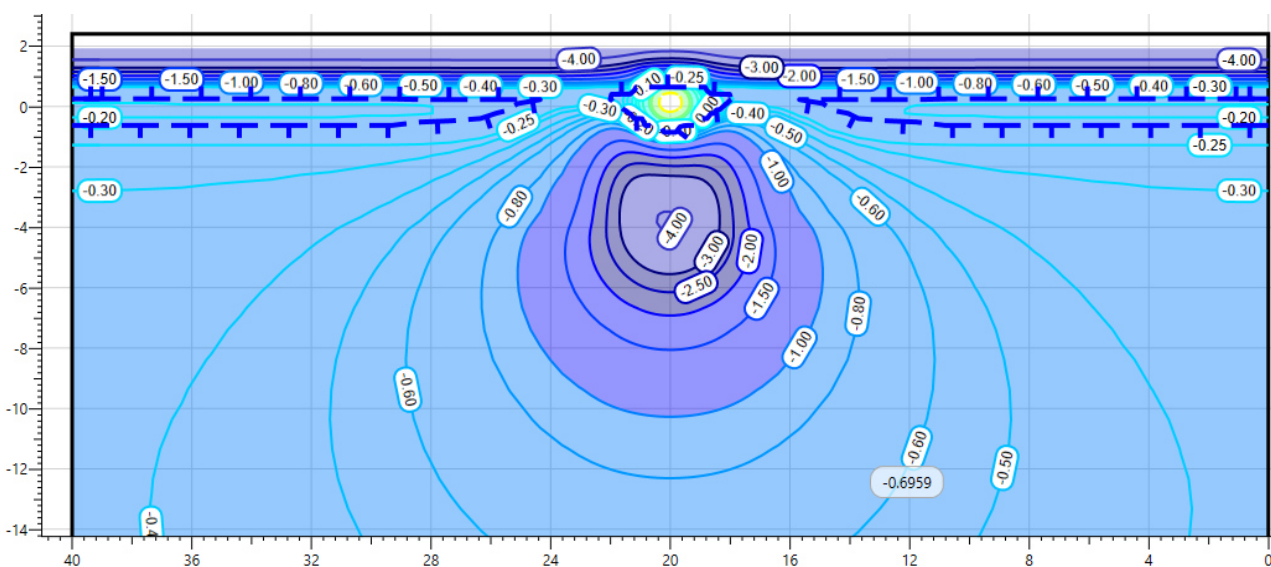


Рисунок 2.49 – Температурное поле поперечного разреза расчетной модели
(ПК6+70 участка, февраль 2022 г.)

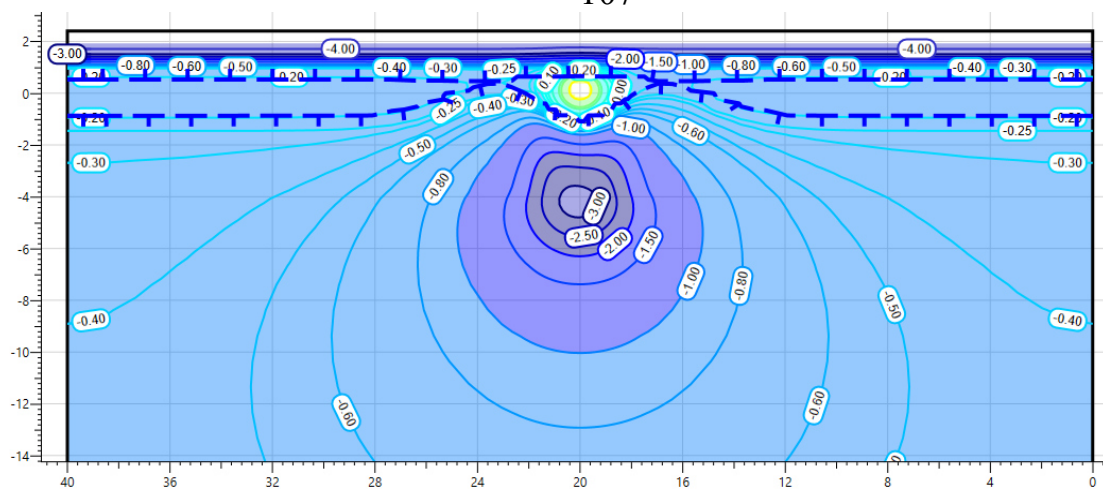


Рисунок 2.50 – Температурное поле поперечного разреза расчетной модели
(ПК6+70 участка, январь 2023 г.)

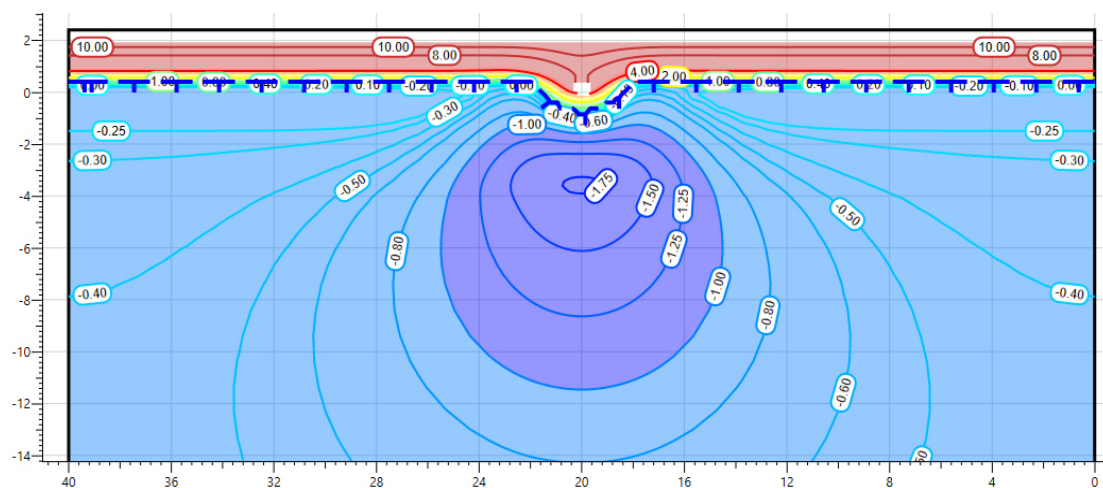


Рисунок 2.51 – Температурное поле поперечного разреза расчетной модели
(ПК6+70 участка, август 2023 г.)

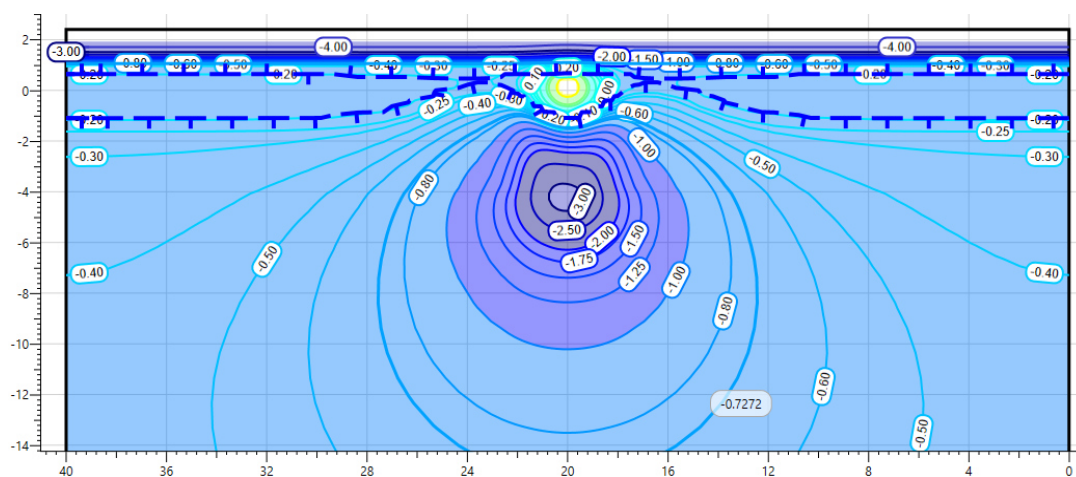


Рисунок 2.52 – Температурное поле поперечного разреза расчетной модели
(ПК6+70 участка, январь 2024 г.)

ПК9+70

Условные обозначения:

—◆— 12.04.2021 (фактический) —■— 15.04.2021 (прогнозный)

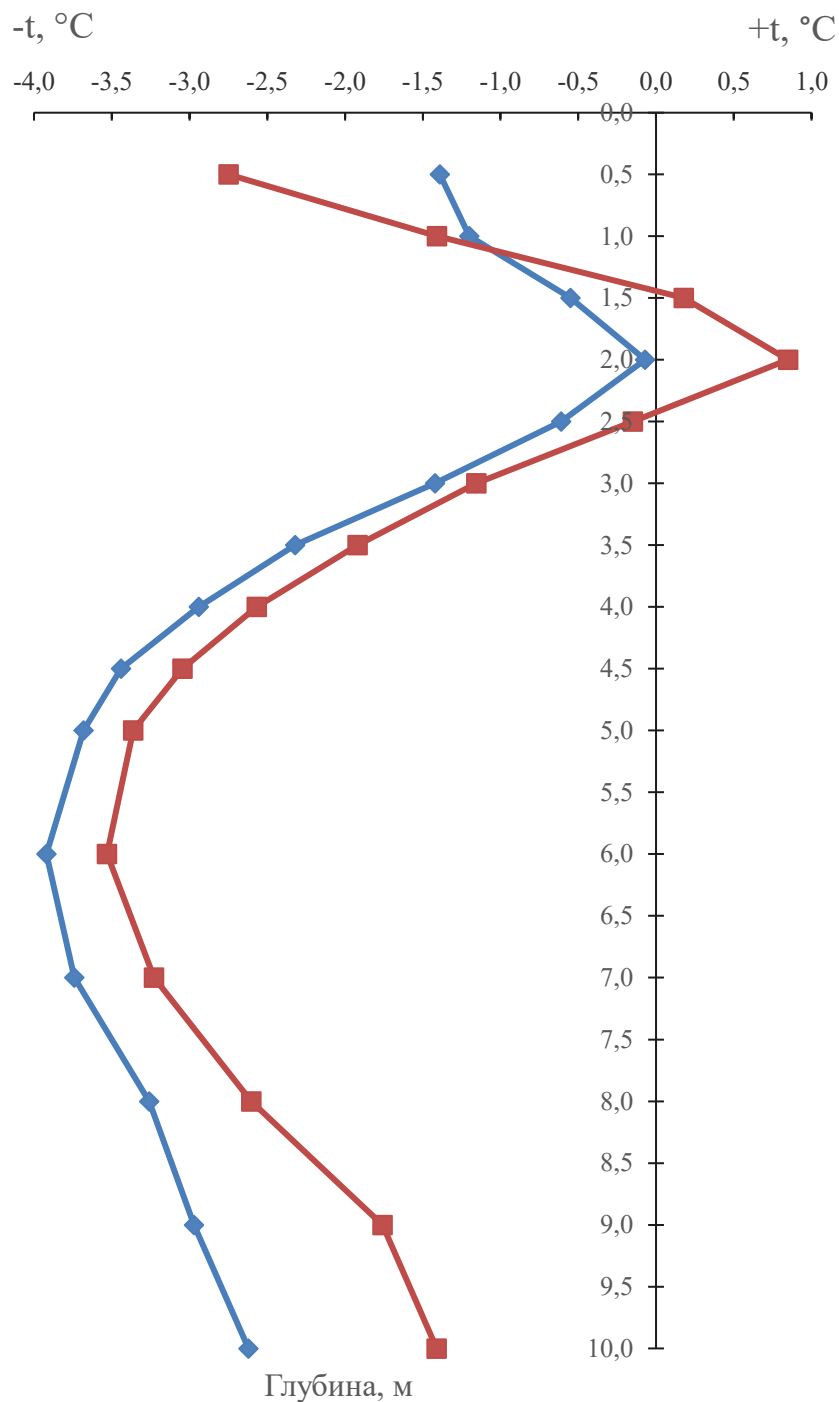


Рисунок 2.53 – Сравнение результатов температур реальных замеров в термометрической скважине с прогнозной моделью по комплексной методике для участка со сливающимися ММГ с применением сплошной установки СОУ (ПК9+70 участка, апрель 2021 г.)

ПК9+70

Условные обозначения:

—◆— 20.02.2022 (фактический) —■— 15.02.2022 (прогнозный)

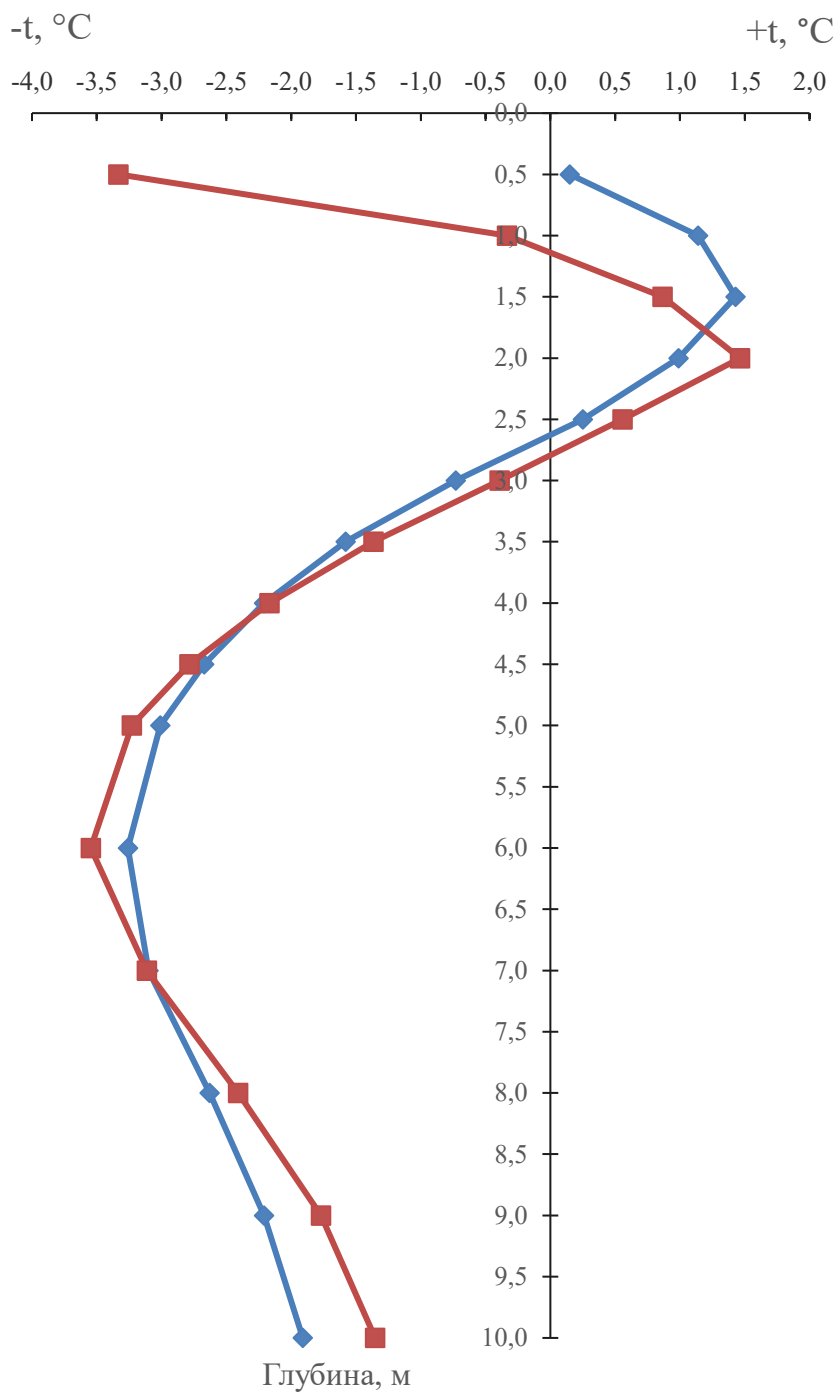


Рисунок 2.54 – Сравнение результатов температур реальных замеров в термометрической скважине с прогнозной моделью по комплексной методике для участка со сливающимися ММГ с применением сплошной установки СОУ (ПК9+70 участка, февраль 2022 г.)

ПК9+70

Условные обозначения:

—◆— 31.01.2023 (фактический) —■— 15.01.2023 (прогнозный)

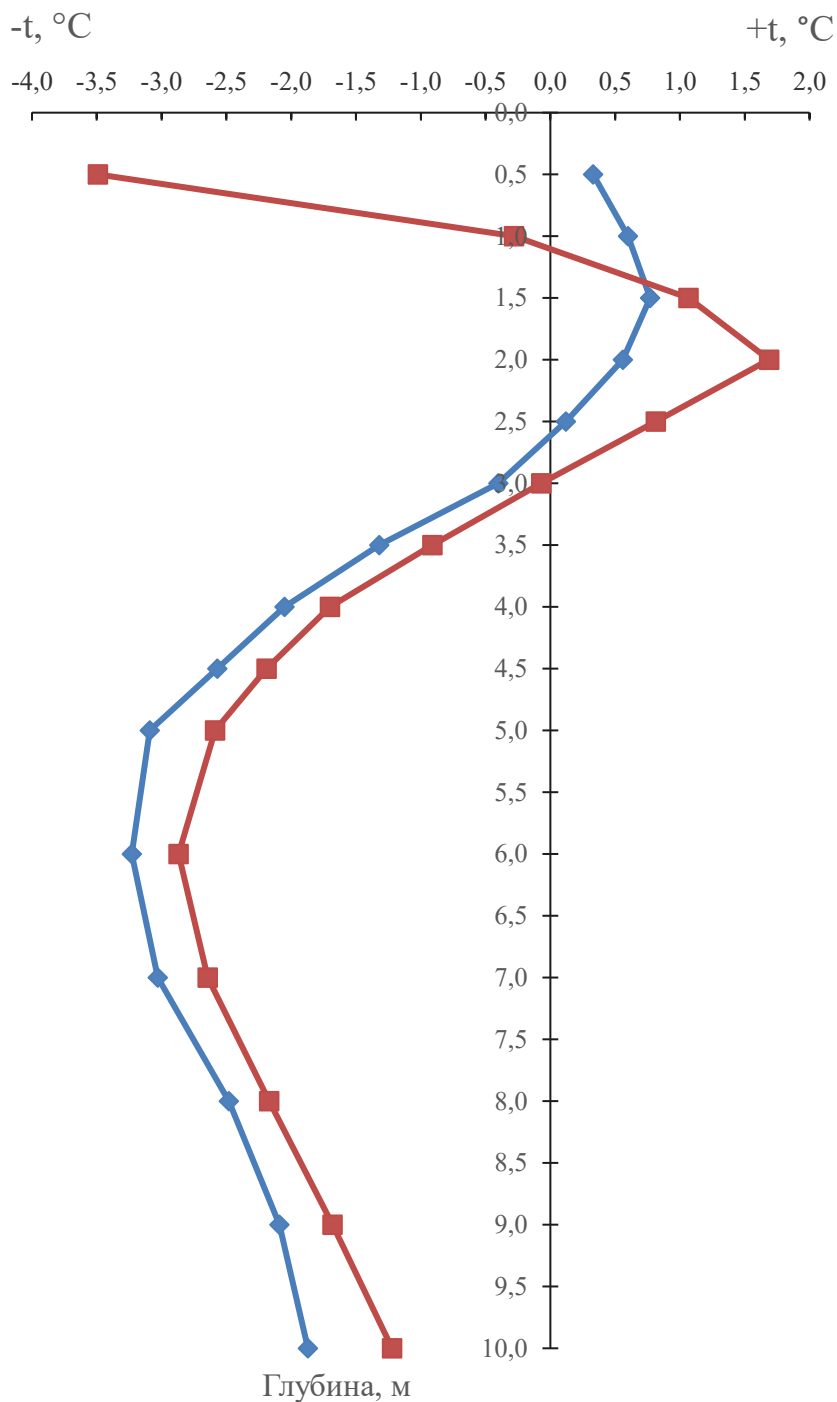


Рисунок 2.55 – Сравнение результатов температур реальных замеров в термометрической скважине с прогнозной моделью по комплексной методике для участка со сливающимися ММГ с применением сплошной установки СОУ (ПК9+70 участка, январь 2023 г.)

ПК9+70

Условные обозначения:

—◆— 18.08.2023 (фактический) —■— 15.08.2023 (прогнозный)

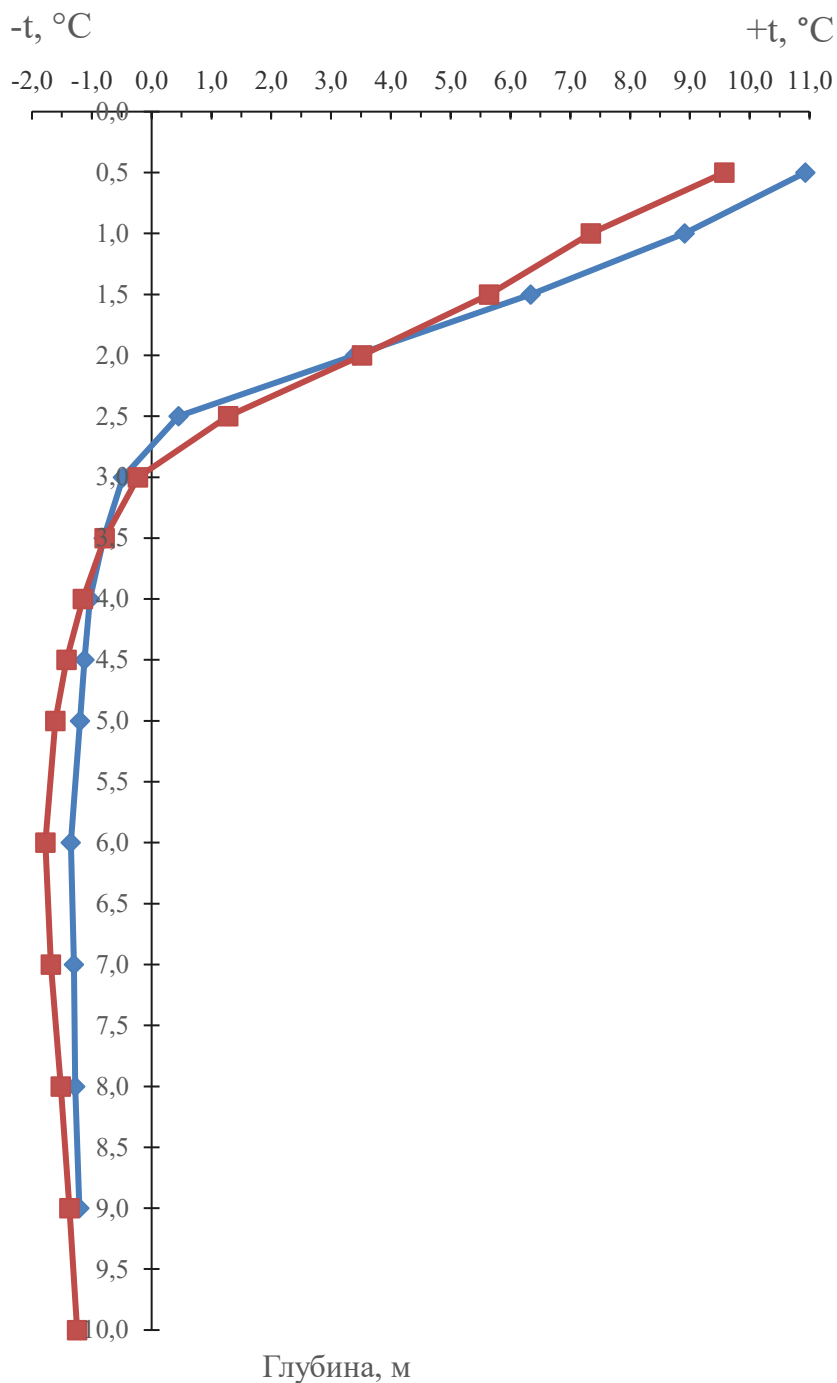


Рисунок 2.56 – Сравнение результатов температур реальных замеров в термометрической скважине с прогнозной моделью по комплексной методике для участка со сливающимися ММГ с применением сплошной установки СОУ (ПК9+70 участка, август 2023 г.)

ПК9+70

Условные обозначения:

—◆— 24.01.2024 (фактический) —■— 15.01.2024 (прогнозный)

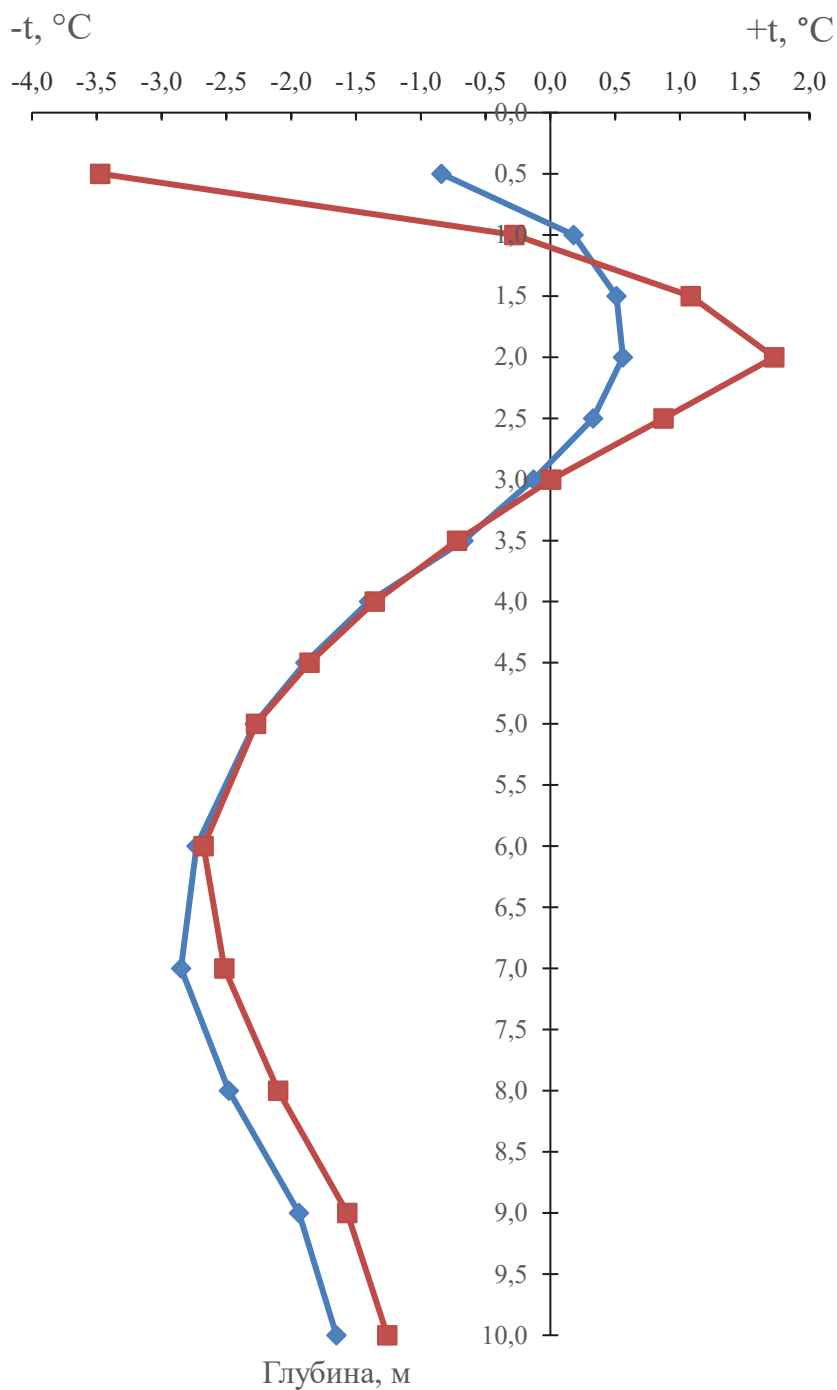


Рисунок 2.57 – Сравнение результатов температур реальных замеров в термометрической скважине с прогнозной моделью по комплексной методике для участка со сливающимися ММГ с применением сплошной установки СОУ (ПК9+70 участка, январь 2024 г.)

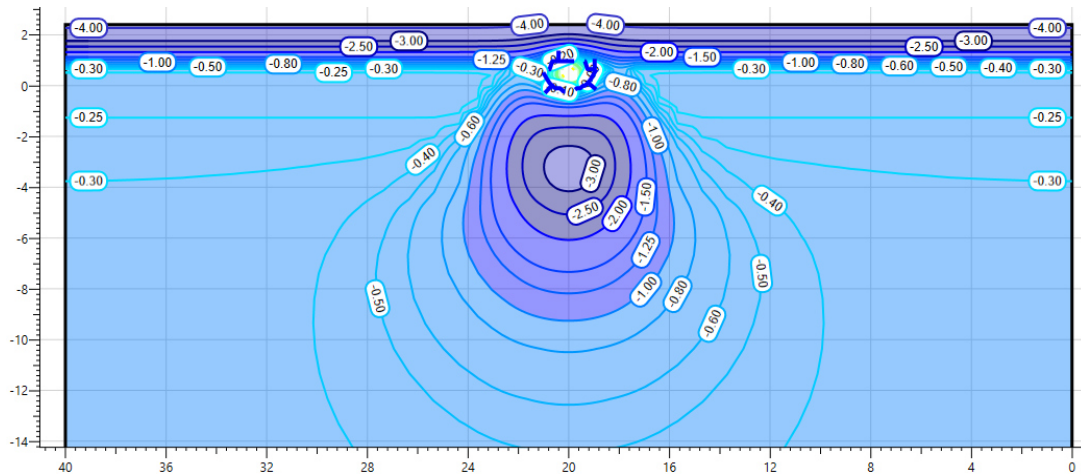


Рисунок 2.58 – Температурное поле поперечного разреза расчетной модели
(ПК9+70 участка, апрель 2021 г.)

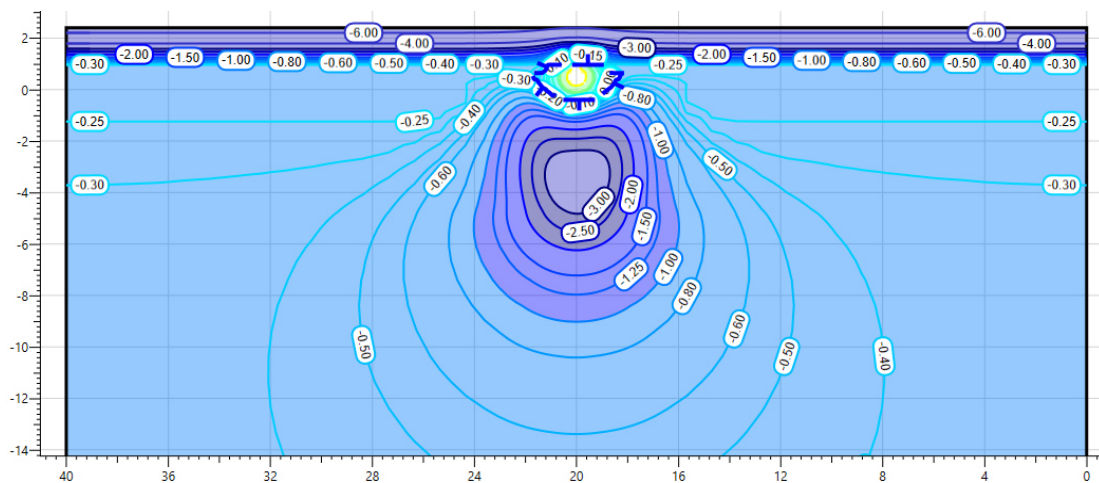


Рисунок 2.59 – Температурное поле поперечного разреза расчетной модели
(ПК9+70 участка, февраль 2022 г.)

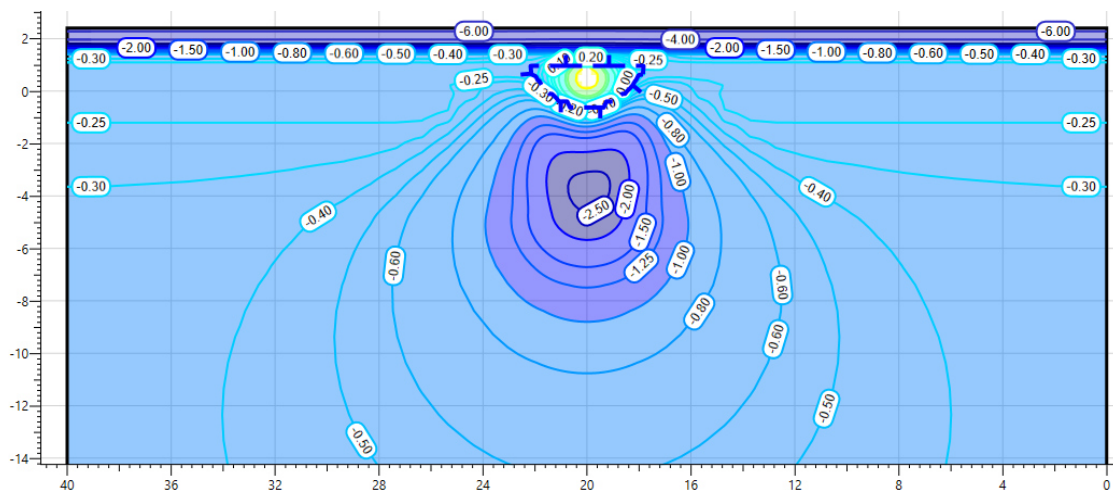


Рисунок 2.60 – Температурное поле поперечного разреза расчетной модели
(ПК9+70 участка, январь 2023 г.)

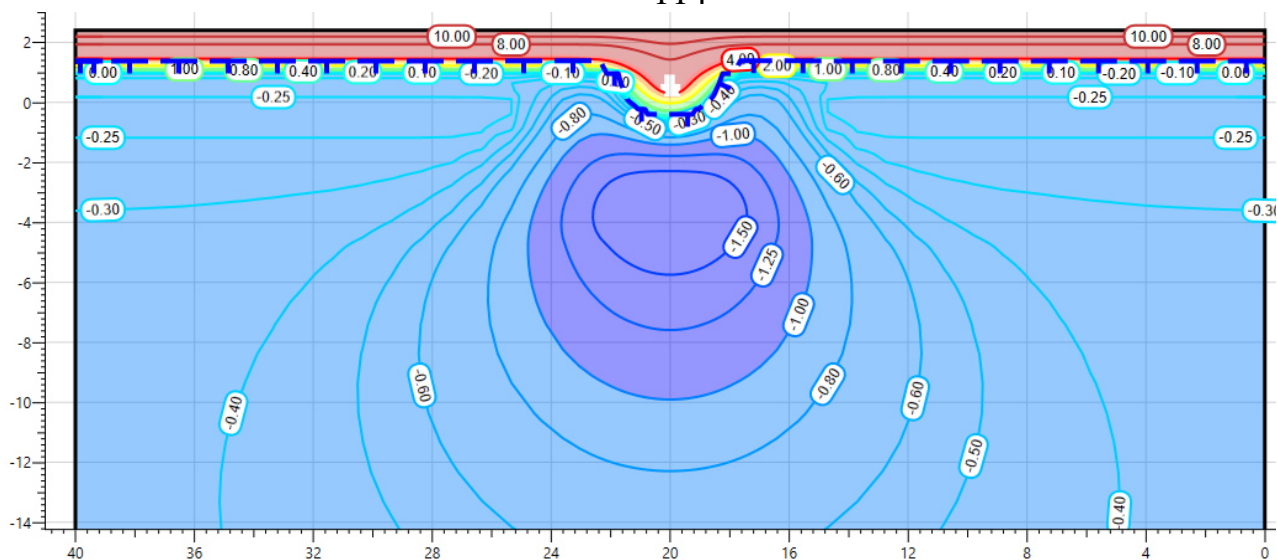


Рисунок 2.61 – Температурное поле поперечного разреза расчетной модели
(ПК9+70 участка, август 2023 г.)

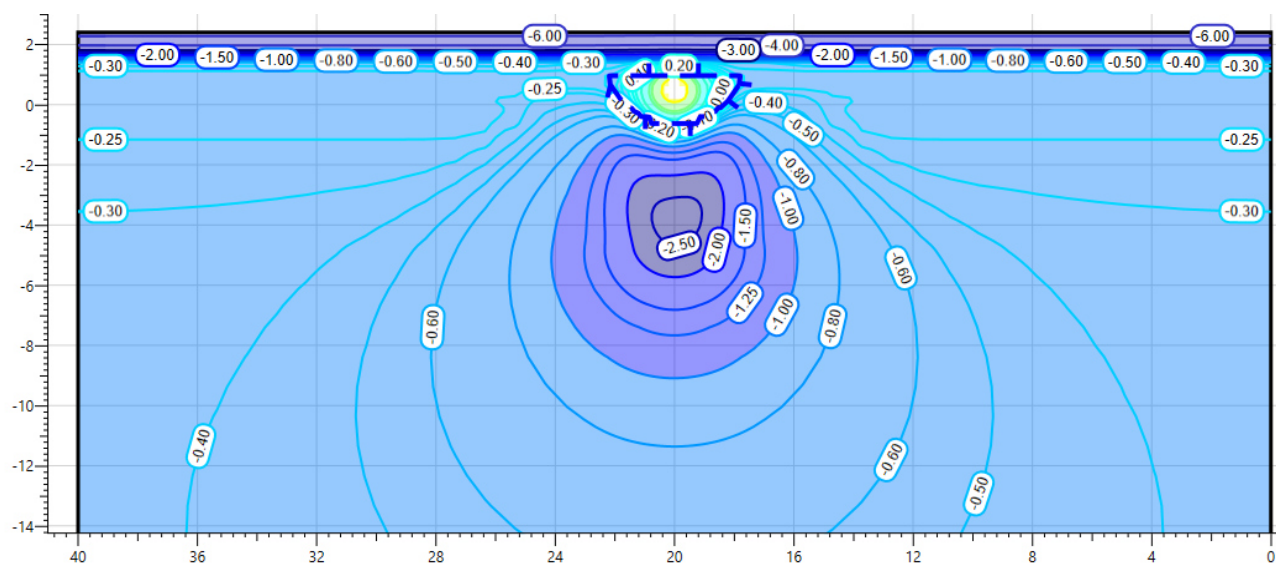


Рисунок 2.62 – Температурное поле поперечного разреза расчетной модели
(ПК9+70 участка, январь 2024 г.)

15.01.2024

Температура, °C

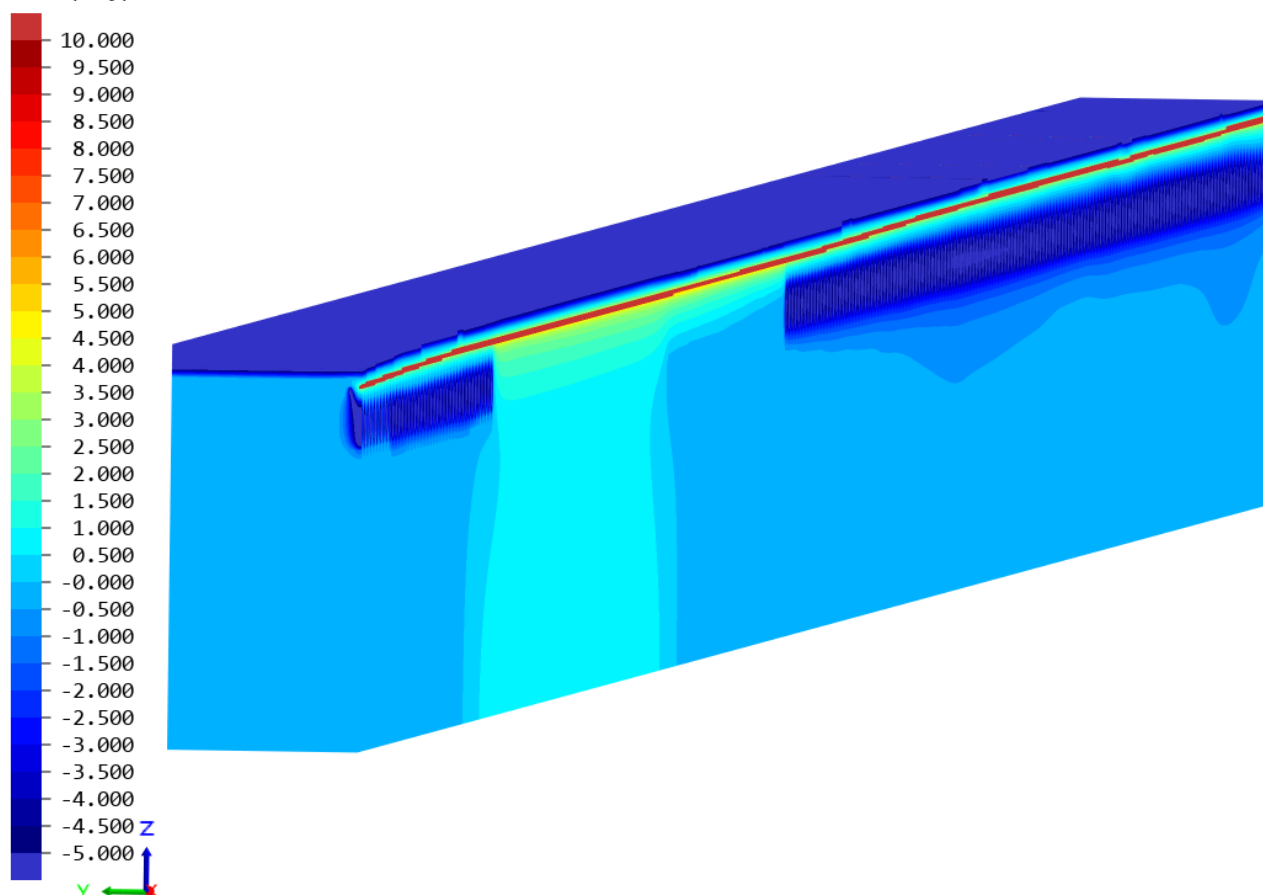


Рисунок 2.63 – Графическое отображение прогноза участка на дату 15.01.2024

Резюмируя, по полученным результатам верификации расчетных моделей на данных реального объекта можно утверждать, что комплексная методика позволяет проводить теплотехнические расчеты по всей протяженности трубопровода с высокой степенью сходимости, с учетом геологической изменчивости и применения различных технических решений.

2.5. Выводы по главе 2

1. Отмечены различия в профилях осадки мерзлого грунта при оттаивании на участках трассы с островной мерзлотой, в основном, на границах перехода немерзлых и мерзлых грунтов.
2. Использование граничного условия 1 рода на нижнюю грань расчетной модели применимо, но требует дополнительного анализа первичных результатов теплотехнических расчетов. Предпочтительно использование граничного условия 2 рода на нижней границе расчетной области.
3. Высоту расчетной модели стоит принимать не менее 40 метров для исключения дополнительных тепловых накоплений в пространстве расчетной модели. При применении температуры талых грунтов $1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, распространение температурных изолиний в пространстве расчетной модели удовлетворяет предпосылкам о неизменности температур ниже глубины нулевых амплитуд.
4. При наличии вертикального фронта промерзания в расчетной модели, требуется дополнительный анализ для определения задаваемых температур немерзлых грунтов для исключения смещения фронта ММГ, которое может значительно повлиять на результат расчетов осадки при оттаивании.
5. Любые полученные результаты теплотехнических расчетов подземного трубопровода требуется учитывать при последующей проверке прочностных условий трубопровода для подтверждения механической безопасности объекта.
6. Верификация комплексной методики расчетов по данным мониторинга эксплуатируемого объекта подтверждает возможность ее применения и высокие результаты сходимости прогнозов с реальными данными измерений.

ГЛАВА 3. ГЕОТЕХНИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ПОДЗЕМНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ В КРИОЛИТОЗОНЕ

3.1. Основные проблемы проведения геотехнического мониторинга подземных трубопроводов

При геотехническом мониторинге задачами является выявление состояния основания и сооружения, оценка критичности изменений и проведение поверочных прогнозов и расчетов изменения условий для дальнейшей безопасной эксплуатации. Выявление состояния производится на основании натурных наблюдений по ряду контролируемых параметров, обследования оснований и фундаментов сооружения. Оценка критичности производится в формате сравнения результатов натурных наблюдений с предельными значениями контролируемых параметров, назначаемых на этапе проектирования. Проведение поверочных прогнозных теплотехнических расчетов является обязательной частью для корреляции проектных решений с фактической обстановкой геологической среды с учетом техногенных изменений на этапе эксплуатации [60]. Также натурные данные геотехнического мониторинга являются основой для верификации и уточнения методик моделирования, совершенствование которых невозможно без объемной и стандартизированной базы геотехнического мониторинга по единым контролируемым параметрам на объектах, находящихся в разных геокриологических условиях [26].

Контролируемыми параметрами при проведении ГТМ, в соответствии с СП 25.13330.2020, являются: деформации, температура ММГ, высота снежного покрова, уровень подземных вод, выявление опасных геологических экзогенных процессов.

Геотехнический мониторинг подземных трубопроводов в криолитозоне является сложной задачей, поскольку само сооружение недоступно для физического и визуального обследования; в основании протяженных сооружений происходят разнообразные изменения геокриологических условий

по всей длине профиля, возникают разнонаправленные перемещения трубопровода, что приводит к различным сочетаниям деформированного состояния трубопровода, в связи с чем, требуется назначение варьируемых предельных деформаций и предельных температур грунтов по всей длине трубопровода [25, 61, 62].

На данный момент, существует достаточное количество методов проведения мониторинга по каждому контролируемому параметру, однако, не все из них могут быть применены для подземного трубопровода [63-77]. Большой проблемой для эксплуатационных служб являются проекты, в которых применяется типизация инженерно-геологических условий (ИГУ) по трассе по ландшафтно-индикационным признакам, литологическому строению и геокриологическим особенностям, соответственно, предельные критерии для мониторинга назначаются в соответствии с типизацией либо принимаются нормативно. Проведение мониторинга и оценка изменения геологической среды по типам ИГУ не позволяют достоверно оценивать напряженно-деформированное состояние трубопровода, о фактических значениях которого можно судить только по результатам внутритрубной диагностики.

Автором предлагается к применению комплексная методика расчетов подземного трубопровода в ММГ, которая позволяет прогнозировать изменения основания трубопровода по всей длины трассы, выявлять максимальные расчетные деформации основания и изменения температурных полей во времени, при которых будет удовлетворено условие прочности и устойчивости трубопровода [58], что является решением выявленной проблемы.

3.2. Обоснование применения комплексной методики расчета подземного трубопровода для целей геотехнического мониторинга

Для разработки рабочей документации по геотехническому мониторингу подземного трубопровода требуется наличие предельного критерия по деформациям, который может быть получен только расчетным путем, так как нормативное значение отсутствует, а предел должен быть динамическим,

отражая изменяемость системы по трассе. Именно эту задачу и решает комплексный подход к проектированию объекта (рис. 2.1) – профиль осадки трубопровода характеризует максимальную осадку ММГ при оттаивании в течение периода эксплуатации с высокой плановой и высотной точностью, при которой будут удовлетворены условия прочности, в связи с чем обеспечивается безопасная эксплуатация объекта (рис. 2.2).

Таким образом, профиль осадки обоснованно является расчетным предельным критерием по деформациям, за превышением которого и должен производиться контроль, что полностью отвечает требованиям нормативной документации на момент исследования.

Комплексный расчет также позволяет получить прогнозные расчетные значения температур многолетнемерзлых грунтов, а также значения перемещений кровли ММГ: в теплотехнических расчетах моделируется вся протяженность участков с мерзлыми грунтами, что позволяет формировать графики прогнозного изменения температур грунтов в любой точке геологического массива трассы – под трубой, на требуемом расстоянии от оси трубы, в точках геологических выработок и между скважинами, на местоположении перехода от мерзлых грунтов к немерзлым и так далее. Проектные прогнозные значения с заданным временным шагом (сутки, месяцы, годы, десятилетия) могут отслеживаться и сравниваться при проведении ГТМ в термометрических скважинах (ТС), установленных по трассе трубопровода (рисунок 3.1). При этом, натурные измерения температур позволят не только понимать современное состояние мерзлоты в исследуемой скважине, но и появится возможность сравнивать расхождение от прогнозируемых значений в динамике.

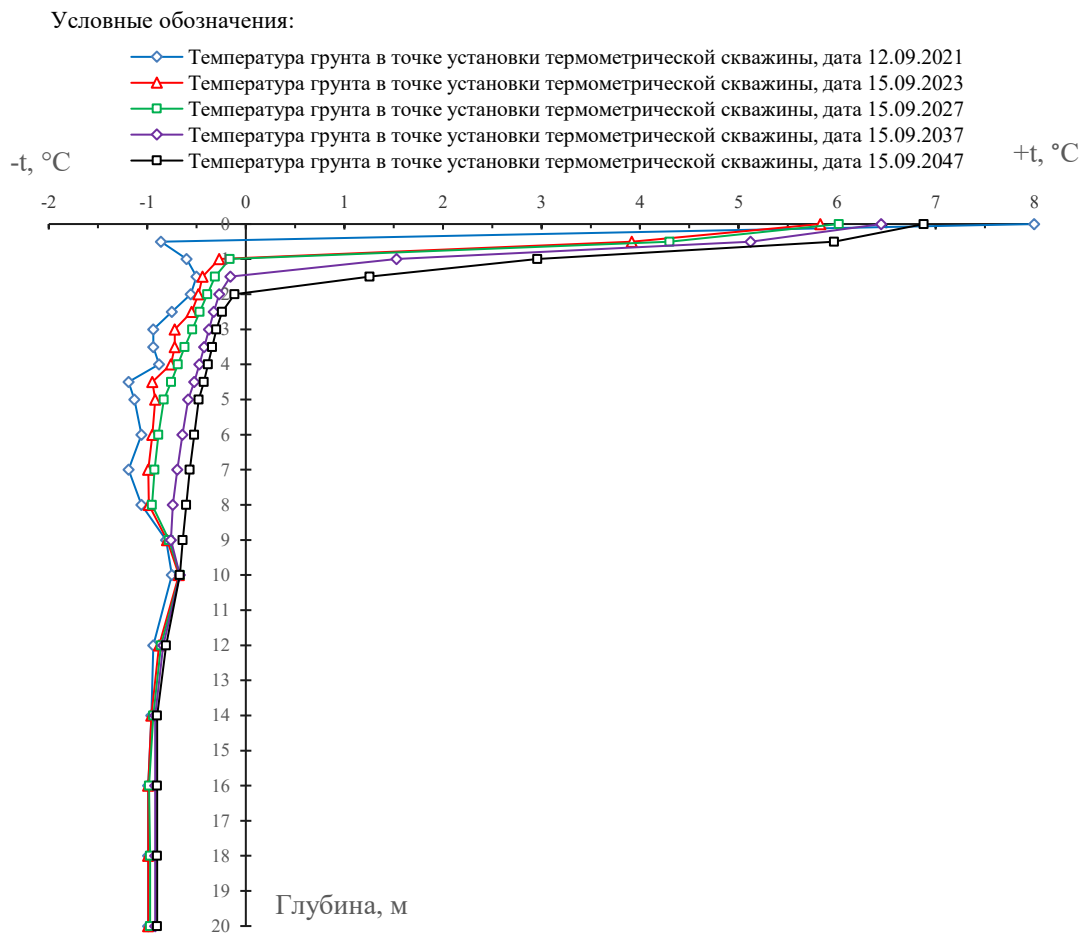


Рисунок 3.1 - Прогнозные температуры грунта в термометрической скважине по трассе трубопровода

3.3. Применяемые методы и конструкции для измерения деформаций подземного трубопровода

Поскольку нормативная документация по мониторингу деформаций не оговаривает конкретных методов и конструкций элементов сети ГТМ подземного трубопровода, рассмотрим уже применяемые методы и конструкции для измерения деформаций. Классическим и предпочтительным методом измерения вертикальных перемещений является геометрическое нивелирование [78]. Для него применяются конструкции, именуемые реперной маркой или деформационной маркой для подземных трубопроводов (рис. 3.2).

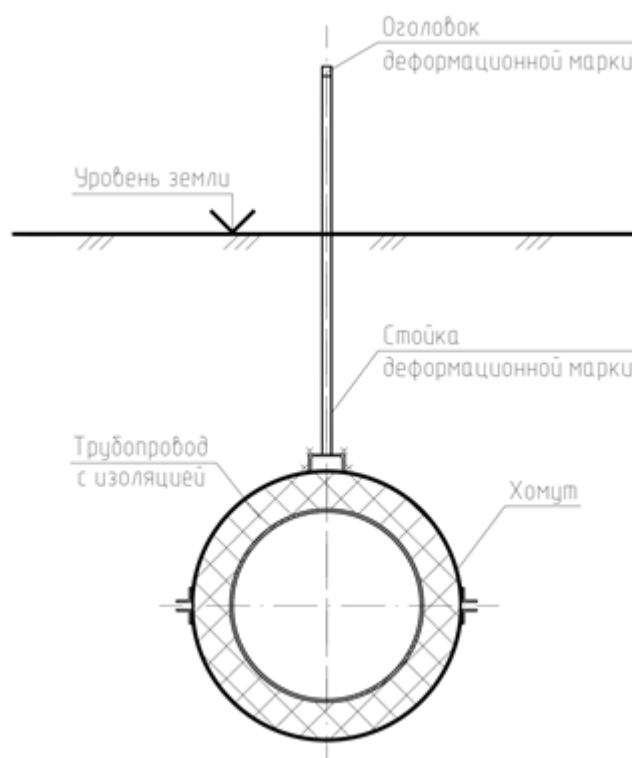


Рисунок 3.2 – Условная конструкция деформационной марки для геодезических методов измерения деформаций подземного трубопровода

В конструкцию марки входит металлический хомут для крепления к трубопроводу с тепловой изоляцией для исключения сварочных работ и вмешательства в конструкцию изоляции трубопровода, обычно состоящий из двух полухомутов для обеспечения удобного и быстрого монтажа в траншее после укладки плети. Допускается применять дополнительные прокладки из каучуковых материалов между хомутом и трубой. К конструкции хомута через дополнительные металлические элементы в виде труб или швеллеров и иных сварных конструкций для обеспечения увеличенной площади контакта, крепится стойка деформационной марки – из трубной продукции малых диаметров, из круга металлического, арматуры, уголка металлического. Высота надземной части стойки должна обеспечивать доступность измерения в зимнее время с учетом максимальной возможной высоты снежного покрова, при этом, жесткость элементов стойки должна обеспечивать умеренную гибкость конструкции. Оголовок деформационной марки выполняется либо в виде

реперной сферической головки, либо механически обрабатывается конец стойки из круга, уголка и арматуры – для обеспечения корректного положения установки нивелирной рейки. В некоторых конструктивных решениях также применяются обсадные трубы вокруг стойки деформационной марки для исключения смерзания окружающего грунта с конструкцией стойки.



Рисунок 3.3 – Конструкции деформационной марки для геодезических методов измерения деформаций подземного трубопровода

Основная проблема данной конструкции – отсутствие устойчивого планового и высотного положения оголовка марки [79]. Высотное положение заглубленного трубопровода в грунте может достигать нескольких метров, высота надземной части также может достигать 1-1,5 метра, таким образом, стойка за счет общей длины может терять жесткость и собственное устойчивое положение. Также нельзя пренебрегать и иными процессами, возникающими в грунтах – смерзание стойки с грунтом, пучение грунта, смещение грунтов, температурное линейное расширение трубопровода, приводящее к излому заземленной грунтом марки. Однако, несмотря на все перечисленные минусы, марка для геодезических методов измерения деформаций позволяет отслеживать вертикальное перемещение трубопровода при оттаивании или пучении ММГ в основании, конструкция может изменяться под различные требования

эксплуатирующих служб, для измерения деформаций не требуется дополнительного оборудования, кроме геодезического. При частом шаге установки марок по трассе трубы и совместном анализе с результатами внутритрубной диагностики, могут достигаться удовлетворительные результаты по определению планово-высотного положения подземного трубопровода.

Стоит отметить разработку автоматизированной системы геотехнического мониторинга подземного трубопровода, запатентованной сотрудниками ПАО «Транснефть» (рис. 3.4, пояснения по тексту ниже) [80].



Рисунок 3.4 - Конструкция автоматизированного мониторинга подземного трубопровода ПАО «Транснефть»

Устройство автоматизированного геотехнического мониторинга трубопровода (20) состоит из несущей стойки (1), штанги (2) для установки и извлечения первого термопреобразователя сопротивления (3), второго термопреобразователя сопротивления (4), опоры (5), отражателя (6) в виде пластины, многозонного цифрового датчика температуры (7) с по меньшей мере пятью измерительными зонами (участками), первой (8) и второй (9)

дополнительной стойки, деформационной марки (10), регистратора - измерителя температуры (11), логгера (12), теплоизоляции (13), кабельных вводов (14), коммутационной коробки (15), распределительной коробки (16), гибких элементов фиксации (17) в виде лент, защитных резиновых элементов (18), изогнутое основание (19) несущей стойки (1).

Данное устройство обеспечивает получение данных температуры окружающего воздуха в районе размещения марки, температуры по периметру наружной поверхности трубопровода или теплоизоляции на границе с грунтом, пространственного положения подземного трубопровода при помощи установленной деформационной марки, а также возможность использования дистанционного метода – воздушного лазерного сканирования (ВЛС) с использованием пластины-отражателя.

Положительными сторонами применения данного решения является получение температурного распределения в основании трубопровода в автоматизированном режиме, возможность применения более быстрых и современных методов измерений по перемещению трубопровода в пространстве. Несмотря на это, минусом является сложность конструкции системы, приводящая к общему удорожанию проекта и ограничению ее применения на трубопроводах повышенного уровня ответственности, магистральных трубопроводах.

Деформационные марки для подземных трубопроводов имеют существенные минусы – по ним можно судить только о локальном изменении пространственного положения трубопровода в точке установки марки, результаты мониторинга дискретны во времени, нормативной периодичности измерений деформаций может быть недостаточно для отслеживания изменений положения трубопровода. При этом количество марок должно обеспечивать получение данных по вертикальным перемещениям не только самых опасных участков трассы, но и всей протяженности трассы, для возможности заключения

о безопасном состоянии трубопровода, что приводит к увеличению объема работ и стоимости мониторинга.

Для того, чтобы непрерывно измерять деформации в трубопроводе по всей его протяженности, применяются волоконно-оптические системы, состоящие из набора распределенных датчиков (сенсоров) и анализатора распределенных датчиков [81-85]. Данные системы в качестве датчиков используют само волокно, за счет чего измерение температур и деформаций производится по всей длине трубопровода, при этом, данные сенсоры имеют широкий диапазон рабочих температур, они устойчивы к химическим и механическим воздействиям, не требуют обслуживания (при отсутствии дефектов), а также дополнительного электропитания. Принцип действия распределенных волоконно-оптических сенсоров основан на эффекте рассеивания Мандельштама-Бриллюэна, при котором сдвиг частоты отраженного оптического сигнала зависит от температуры и деформации. Оптическое волокно размещено в распределенном датчике деформации таким образом, чтобы максимально точно передать деформацию объекта мониторинга на волокно, не допуская его разрушения в широком диапазоне деформаций. Для разного типа задач сенсоры температуры и деформации могут применяться как совместно, так и раздельно. Важным условием для определения перемещения трубопровода в пространстве, является размещение датчиков по трем направлениям от оси трубопровода [86]. Сенсоры крепятся к трубопроводу при помощи металлических хомутов, пластиковых стяжек, либо при помощи иной обмотки с определенным расчетным шагом, обеспечивая плотное прилегание сенсоров к телу трубопровода (рис. 3.5). Преимущества системы состоят в непрерывности получения данных, высокой точности определения деформаций по всей длине трассы, исключении человеческого фактора при измерениях деформаций, уменьшении трудозатрат на проведение мониторинга. Тем не менее, недостатками системы являются ее крайне высокая стоимость, длительный процесс пусконаладки и калибровки сенсоров, сложность

интерпретации напряжений, полученных от сенсора в физическое перемещение объекта, необходимость в специализированном программном обеспечении для анализа и хранения информации по мониторингу. Также система является уязвимой с точки зрения ремонтпригодности – при наличии разрыва волокна, процесс мониторинга невозможен до момента ремонта волокна, для которого потребуются повторные земляные работы, восстановление линии оптоволоконна и повторной пусконаладки системы.

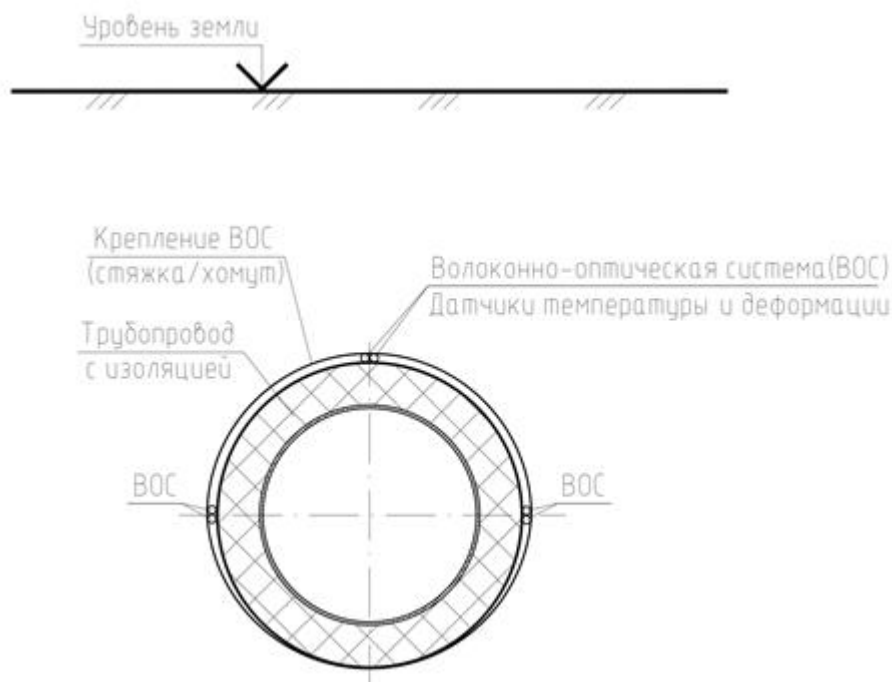


Рисунок 3.5 – Условная конструкция мониторинга деформаций подземного трубопровода с применением волоконно-оптических систем (ВОС)

Процесс мониторинга заключается в сравнении фактической и предельной расчетной деформации трубопровода. Поскольку результатом комплексной методики проведения расчетов подземных трубопроводов является максимальная осадка ММГ при оттаивании за период эксплуатации по всей трассе трубопровода, являющаяся расчетной предельной деформацией геотехнической системы «многолетнемерзлый грунт-трубопровод», любой из перечисленных, а также применение иных методов проведения геотехнического

мониторинга деформаций подземного трубопровода совместим с изложенной комплексной методикой.

3.4. Предложение по контролируемым параметрам сети ГТМ для подземных линейных сооружений в ММГ

ПТС «подземный трубопровод – многолетнемерзлый грунт – атмосфера» во время эксплуатации имеет внутреннее взаимодействие: функционирование трубопровода приводит к изменению всех компонент геологической среды, и наоборот, изменение среды имеет воздействие на тело трубопровода, поэтому проведение натурных наблюдений требуется для всех основных параметров системы – температура многолетнемерзлого грунта, уровень подземных вод, деформация ММГ, высота и плотность снежного покрова, температура охлаждающих устройств, целостность и контроль НДС трубопровода.

Для решения проблемы отсутствия требований НТД по составу, объему и расположению элементов сети ГТМ для подземных трубопроводов, автором было проведено исследование требований к видам наблюдений при мониторинге, проанализированы результаты собственных расчетов подземных трубопроводов по комплексной методике, публикации по мониторингу подземных трубопроводов и сформированы предложения по назначению контролируемых параметров в продолжение таблицы М.1 СП 25.13330.2020, с приведением краткого обоснования в примечании таблицы (Приложение А).

Температура грунта. Расстановка термометрических скважин нормативно не ограничена, поэтому критерием для подбора объема сети объем сети термометрических скважин является возможность отслеживать критичные температурные изменения по трассе, при этом, шаг конструкций должен быть экономически целесообразен. Это приводит к необходимости расстановки ТС с определенным шагом и дополнительным сгущением сети на наиболее «опасных» пикетах трассы с наибольшей вероятностью отклонения от проектных температурных значений – в понижениях рельефа, на участках вблизи

водных переходов, на пересечениях с иными трубопроводами, изменениях типа распространения ММГ, вблизи с фронтом мерзлоты.

Поскольку на данный момент, требования норм для геологических изысканий являются достаточными для проведения теплотехнических расчетов трассы подземного трубопровода и прогнозирования изменений, на основании которых принимаются технические решения и назначаются защитные мероприятия, обоснованным является применение шага геологических выработок для подземных трубопроводов для целей натурных наблюдений. Шаг по сгущению сети также принят в соответствии с шагом по инженерно-геологическим изысканиям для водных переходов.

Уровень подземных вод. Стационарные наблюдения за гидрогеологическим режимом необходимо проводить в случаях, когда подземные воды распространены или могут образовываться в зоне взаимодействия эксплуатируемого объекта с ММГ, прогнозируется процесс затопления, а также, если подземные воды могут влиять на изменение свойств грунта и интенсивность развития опасных геологических процессов, таких как термокарст или морозное пучение. Количество элементов сети, периодичность и продолжительность наблюдений должны быть обоснованы при разработке программы мониторинга с учетом сложившихся природных условий. Продолжительность наблюдений должна составлять не менее одного гидрологического года или периода проявления процесса, периодичность наблюдений должна гарантировать регистрацию максимальных и минимальных значений изменений компонентов геологической среды за период наблюдений.

Для I принципа использования ММГ с сохранением мерзлого состояния на период эксплуатации, применение гидрогеологических скважин нецелесообразно. Шаг в 1-2 км для II принципа использования ММГ для установки гидрогеологического режима при оттаивании ММГ обоснован наличием малоизменяемого температурного режима продукта в трубопроводе в диапазоне шага гидрогеологических скважин. При этом, основное решение по

выбору шага и установке одиночных наблюдательных скважин должно приниматься и описываться в программе мониторинга с учетом конкретных условий проекта трубопровода и анализа его гидрологических условий.

Температура охлаждающих устройств. При наличии сезоннодействующих или постоянно действующих охлаждающих устройств, применяемых при I принципе использования ММГ, требуется проверять работоспособность всех устройств при помощи тепловизионной съемки надземной части термостабилизатора, при помощи пирометра или визуально по наличию конденсата на оребрении.

Высота и плотность снежного покрова. Снежный покров является важным параметром, изменяющим естественный приток тепла и холода от атмосферы в грунт. Для проведения уточняющих или поверочных теплотехнических расчетов, должно учитываться фактическое значение данных параметров, для чего требуется их наблюдение совместно с термометрическими наблюдениями для наилучшей взаимосвязанности в прогнозе.

Деформация. Для определения деформаций подземного трубопровода, предложено внесение двух наиболее распространенных методов измерения – при помощи геодезической марки и применения волоконно-оптических систем.

По причине экономической целесообразности и необходимости оптимизации стоимости геотехнического мониторинга, максимальный шаг деформационной марки принят в соответствии с шагом термометрических скважин – 100 метров. Это позволит иметь минимальную информацию о пространственном положении подземного трубопровода с учетом изменения геокриологических условий на пикете с совместным измерением температур, высоты и плотности снежного покрова, сравнивать полученные результаты с прогнозными значениями и видеть динамику изменения многолетнемерзлых грунтов и положения трубы, соответственно. Однако, для получения полноценной информации о планово-высотном положении трубопровода, требуется сгущение шага марок по трубопроводу. Минимальный диапазон шага

в 10-30 метров обосновывается локальностью изменений геологической среды и необходимостью отслеживания деформаций в данном диапазоне.

На взгляд автора, обоснование количества элементов и уплотнения наблюдательной сети должно основываться на расчетных значениях как минимум, одного из следующих условий:

1) Профиль осадки и относительная разница осадок.

При применении комплексной методики расчета подземного трубопровода, проектировщику фактически доступны номера пикетов и протяженность участков со значениями осадок ММГ, из которых можно выделить участки с максимальными осадками, с относительной небольшими осадками и с отсутствием осадок ММГ, на основании которых и можно проектировать оптимальную сеть деформационных марок.

2) Жесткость трубопровода при рассмотрении трубопровода в балочной интерпретации.

При рассмотрении тела трубопровода в виде балки, возможно расчетным способом определить пролет между опорами, при котором теряется прямолинейность трубопровода и возникает прогиб. Расстояние пролета между опорами допускается принять в качестве минимального шага марок, обеспечивающего прямолинейность трубопровода между марками, что позволит получать действительную информацию о положении трубопровода в пространстве. Однако, при небольших диаметрах и толщинах трубопровода, данный метод может быть не применим по причине небольшой длины пролета между опорами.

3) Учет трубопроводных элементов в качестве точек изменения системы.

Любые элементы в виде отводов различной номенклатуры, плановые и высотные углы поворота трубопровода, компенсаторы, фитинги являются наиболее опасными точками, в которых могут возникать изменения положения трубопровода. В данных точках предлагается сгущать сеть геодезических марок, а на остальных прямолинейных участках трассы применять типовой шаг.

4) Увеличение объема сети при уменьшении класса точности.

Поскольку требований по предельным деформациям к подземному трубопроводу нормативной документацией не предъявляется, при наличии обоснования точности измерений геодезическими методами, предлагается понижать класс точности нивелирования для уменьшения общей стоимости измерений, при этом, позволяя увеличить количество геодезических марок - точек измерения деформации.

При применении волоконно-оптических систем, конкретные требования к сети: протяженность линий, точки выхода кабелей на поверхность для подключения анализаторов, общее количество точек выхода, и иные дополнительные требования должны прорабатываться проектировщиком в рамках конкретного объекта и указываться в программе мониторинга.

Состояние трубопровода и планово-высотное положение. Внутритрубная диагностика (ВТД) - метод неразрушающего контроля, являющийся самым информативным методом оценки состояния НДС трубопровода, его планово-высотного положения и вида, количества и местоположения дефектов. Данный вид диагностики должен быть учтен в качестве одного из способов проведения геотехнического мониторинга, поскольку по его результатам можно косвенно судить и об изменении геологической среды.

Визуально-инструментальный осмотр притраншейной зоны проводится для отслеживания активизации опасных экзогенных процессов в зоне прокладки трубопровода, изменения приповерхностного слоя, влияющего на отвод поверхностных вод. В инструментальный осмотр входит циклическое фотодокументирование выделенных участков трубопровода с неизменяемых точек с максимально схожим ракурсом, либо применение современных технологий – БПЛА, спутниковые снимки, на которых возможен анализ изменения поверхностных участков притраншейной зоны прокладки трубопровода.

Стоит отметить, что ВТД, волоконно-оптические системы (ВОС) и геодезические методы измерения деформаций имеют свои погрешности измерений и грубые ошибки, результаты ВТД должны проверяться и подтверждаться дополнительным методом измерения деформаций (или планово-высотного положения) и быть комплексным способом измерения деформаций и выявления планово-высотного положения трубопровода [87].

Предложения и рекомендации автора по устройству сети мониторинга подземного трубопровода, применяемым методам и оборудованию, проведению мониторинга изложены в рекомендациях в Приложении А.

3.5. Обоснование применения оборудования глобальных навигационных спутниковых систем для мониторинга деформаций подземных трубопроводов в криолитозоне

3.5.1. Актуальность применения современного оборудования

Подземные трубопроводы являются сложным объектом с точки зрения организации геотехнического мониторинга по причине своей протяженности, прокладки в труднодоступных районах, требующих хорошей технической оснащенности и значительного количества человеческих ресурсов. В зоне распространения многолетнемерзлых грунтов мониторинг осложняется разнообразными видами работ – измерение деформаций, температуры, высоты снежного покрова, уровня подземных вод. Большой объем элементов мониторинга, разный состав элементов сети для подземного трубопровода может сильно расширять количество привлекаемых специалистов, а также увеличивать срок проведения измерений, что негативно сказывается на производительности подразделения, проводящего мониторинг. Поэтому применение современного оборудования и методов мониторинга линейных сооружений является актуальной задачей.

Наиболее сложным и трудозатратным видом работ при мониторинге является измерение деформаций. Самым распространенным методом измерения

деформаций сооружений является геодезический метод геометрического нивелирования. Одним из наиболее современных способов определения местоположения объектов является применение глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) [88-98]. Данное оборудование широко применяется при геодезических работах во время проведения инженерных изысканий, для топографической съемки, геодинамического мониторинга, строительства и иных сфер хозяйственной деятельности. Однако, применение ГНСС для циклического отслеживания вертикальных перемещений ограничивается высокими погрешностями, получаемыми при измерении [99-110].

В соответствии с пунктом 4.2 ГОСТ 24846-2019, для большей части подземных сооружений необходимым классом точности измерений рекомендуется принимать 2 класс, при котором допускаемая погрешность измерения вертикальных перемещений составляет 2 мм. При этом, нормативно-технической документацией не предъявляются требования по предельным деформациям к геотехнической системе «подземный трубопровод - многолетнемерзлый грунт», а расчетные осадки основания трубопровода могут достигать субметровых величин. Таким образом, обеспечение рекомендуемой точности с учетом отсутствия конкретных требований не является рациональным и экономически эффективным решением, в связи с чем, предлагается рассмотреть применение современных методов измерения вертикальных перемещений при применении ГНСС оборудования.

Целью автора является рассмотрение возможности применения современных технологий для проведения геотехнического мониторинга, обоснование возможности применения ГНСС оборудования для отслеживания деформаций подземных трубопроводов в криолитозоне путем проведения сравнения технико-экономических показателей данного метода с классическим методом геометрического нивелирования и выявление наиболее рационального и эффективного метода измерения для внедрения в последующее применение при проведении ГТМ.

Для выполнения обоснования автором были выделены и выполнены следующие задачи:

- 1) анализ нормативной литературы на предмет возможности применения ГНСС для мониторинга вертикальных перемещений;
- 2) определение методики и оборудования для проведения измерений деформаций при использовании ГНСС;
- 3) выбор объекта исследования, проведение технико-экономического сравнения применения различных методик измерения деформаций;
- 4) сравнение и анализ полученных результатов;
- 5) формирование рекомендаций к проведению опытно-промышленных испытаний предлагаемой технологии.

3.5.2. Анализ литературы по применению ГНСС оборудования для целей геотехнического мониторинга

Перечень нормативных документов, регламентирующих основные положения глобальных навигационных спутниковых систем и различные аспекты применения ГНСС, обширен. Несмотря на это, отмечено отсутствие нормативного документа, описывающего или регламентирующего применение спутникового оборудования для проведения геодезического мониторинга или мониторинга деформаций. В таблице 3.1 представлены документы, имеющие отдельные пункты или разделы, которые могут давать разъяснения или уточнять отдельные требования по применению ГНСС.

Метод измерения вертикальных перемещений следует устанавливать в зависимости от требуемой точности измерения, характеристик грунтов основания и экономической целесообразности, в соответствии с пунктом 4.2 ГОСТ 24846-2019.

При этом, пункт 6.4.19 ГОСТ 31937 – 2011 гласит, что определение точности измерения вертикальных и горизонтальных деформаций проводят в зависимости

от ожидаемого расчетного значения перемещения, то есть предельной осадки ПТС «подземный трубопровод – многолетнемерзлый грунт – атмосфера».

Но подземные трубопроводы не имеют нормативного значения предельных деформаций и должны быть получены расчетным способом, о чем гласит пункт 8.5.4 ГОСТ 34737-2021 и пункт 5.4.1 СП 305.1325800.2017 (ранее описывалось в разделе 1.3.2.).

Таким образом, в соответствии с пунктом 7.7 СП 126.13330.2017, предельное отклонение, или предельные деформации определяются по формуле:

$$\delta = t * m,$$

где δ – предельные деформации; t – величина, равная 2; 2,5; 3 с доверительной вероятностью соответственно 0,95; 0,98; 0,99; m – среднеквадратическая погрешность. Имея предельные деформации подземного трубопровода, можем получить необходимую среднеквадратическую погрешность измерения, либо точность:

$$m = \frac{\delta}{t}.$$

Аналогичный подход имеется в СТО СРО-Г 60542954 00007-2020, согласно пункту 7.3.3.1 которого среднеквадратическая погрешность связана с предельной погрешностью ожидаемого параметра деформаций:

$$M_{\Delta\text{пред}} = \frac{\Delta}{2t},$$

где Δ – предельная погрешность; t – величина, равная 2; 2,5; 3 с доверительной вероятностью соответственно 0,95; 0,98; 0,99; Δ – ожидаемая деформация.

Связь предельной и среднеквадратической погрешностей определяются из уравнения:

$$M_{\Delta\text{пред}} = 3 * m,$$

где m – среднеквадратическая погрешность.

Преобразовывая формулу, получаем формулу среднеквадратической погрешности в зависимости от ожидаемой деформации:

$$m = \frac{136}{3 * 2t} \cdot \Delta$$

Таблица 3.1 - Перечень нормативно-технической документации, регламентирующих использование ГНСС для проведения измерения вертикальных деформаций

Нормативная документация	Область нормирования
СП 126.13330.2017 «Геодезические работы в строительстве. СНиП 3.01.03-84 (с Изменением N 1)»	Регламентирует производство геодезических работ и устанавливает требования к мониторингу деформаций строительных конструкций, исполнительным и контрольным съемкам, выполняемым при строительстве, реконструкции, эксплуатации
ГОСТ Р ИСО 17123-8-2011 «Оптика и оптические приборы. Методики полевых испытаний геодезических и топографических приборов. Часть 8. Полевые испытания GNSS-аппаратуры в режиме "Кинематика в реальном времени" (RTK)»	Устанавливает методы полевых испытаний для определения и оценки прецизионности спутниковой аппаратуры в режиме "Кинематика в реальном времени" при проведении измерений
ГОСТ 31937-2024 «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния»	Стандарт регламентирует требования к работам и их составу по получению информации, необходимой для контроля и повышения степени механической безопасности зданий и сооружений, мониторингу технического состояния зданий и сооружений
СТО СРО-Г 60542954 00007-2020 «Геодезический мониторинг. Наблюдения за осадками и кренами зданий и сооружений»	Стандарт регламентирует требования к проведению геодезического мониторинга на уникальных объектах и сооружениях промышленных предприятий

Резюмируя, в НТД отсутствуют требования к применению ГНСС для измерения деформаций, в качестве обоснования применения ГНСС оборудования следует применять формулы среднеквадратической погрешности вертикальных измерений от зависимости предельных деформаций подземного трубопровода.

3.5.3. Методика проведения мониторинга деформаций подземного трубопровода с применением ГНСС

Спутниковые системы могут работать в различных режимах, определяющих функциональные возможности и принцип проведения измерений.

Существует два фундаментальных способа работы:

1) Режим статической съемки (режим «Статика»)

Отличается субсантиметровой точностью получаемых измерений, но требователен ко времени инициализации приемника в пункте съемки. Продолжительность сеанса наблюдений зависит от длины определяемых векторов, количества одновременно наблюдаемых спутников, паспортной точности спутникового геодезического оборудования и требуемой точности определяемых пунктов, но в большинстве случаев составляет не менее 1 часа. Может использоваться в совместной работе нескольких ГНСС приемников для одновременного сбора данных в полигонах. Требует обязательной постобработки полученных данных в геодезическом программном обеспечении.

2) Режим кинематической съемки в реальном времени («real-time kinematic» или «RTK»)

Является самым быстрым способом съемки спутниковыми приемниками, в котором вся обработка получаемых со спутника данных происходит в реальном времени, непосредственно в контроллере, а обмен дифференциальными поправками между приемниками, управление съёмкой обеспечивает полевое программное обеспечение. Режим является менее точным, по сравнению со статической съемкой характеризуется субдециметровыми погрешностями съемки.

При работе в данном режиме, базовый неподвижный приемник находится на пункте с известными координатами, а подвижный приемник – ровер, перемещается по пунктам для определения местоположения. Дифференциальные поправки, формируемые опорным приемником, передаются

на подвижный приемник посредством беспроводной связи и используются для повышения точности определения координат антенны этого приемника. При этом, скорость получения данных о местоположении ровера при поддерживаемой инициализации приемника измеряется десятками секунд.

Стоит отметить, что существуют и иные современные технологии, позволяющие исключить этап создания опорной геодезической сети – это постоянно действующие базовые станции с заранее известными координатами, стационарно расположенные на определенных объектах инфраструктуры города или месторождения, где им обеспечены качественные условия обзора и стабильная связь с глобальной сетью Интернет. Данные базовые станции, являясь одним из компонентов системы, позволяют пользователю при наличии одиночного ровера выполнять высокоточные геодезические измерения, однако, требуют развития сети постоянно работающих и доступных спутниковых базовых станций [111, 112].

Также есть абсолютный метод получения местоположения - метод точного позиционирования («Precise Point Positioning»), основанный на применении спутниковой корректирующей информации, позволяющий определять пространственные координаты объектов с точностью от нескольких дециметров до нескольких сантиметров на эпоху выполнения измерений с применением только одного приемника, однако, для достижения субдециметровой точности требуется значительное время, при этом, полученные данные будут в глобальной системе координат [90].

Наиболее важными параметрами ГНСС-приемника при проведении съемочных работ являются:

1) Точность измерения.

Точность описывается для различных режимов. В среднем, у профессиональных приемников для статической съемки плановая точность составляет $2,5 \text{ мм} + 0,5 \text{ мм/км}$, а высотная точность – $5,0 \text{ мм} + 0,5 \text{ мм/км}$, для

съемки в реальном времени плановая точность составляет $8,0 \text{ мм} + 1,0 \text{ мм/км}$, а высотная точность – $15,0 \text{ мм} + 1,0 \text{ мм/км}$.

2) Каналы связи.

Информация о координатах может использоваться, только если она передается другому устройству, и чем больше возможностей передать информацию имеет приемник, тем качественнее и быстрее будут выполнены измерения. Современные приемники имеют поддержку сетей Wi-Fi, Bluetooth, УКВ модем, GSM и GPRS модуль одновременно, расширяя рабочий спектр и возможности использования.

3) Защита от воздействия окружающей среды, от механических воздействий.

ГНСС-приемники, как и любое полевое оборудование применяется в различных климатических зонах, в разное время года, и должно позволять работать при всевозможных погодных условиях. Одним из главных преимуществ спутникового геодезического оборудования перед оптическим оборудованием является возможность выполнения съемки в непригодных для применения иного геодезического оборудования условиях – пониженных температурах атмосферы, снегопад, туман, недостаточная освещенность. Также стоит отметить, что при спутниковой съемке климатические условия не влияют на точность получаемых результатов.

4) Рабочее время сессии.

Спутниковая съемка, особенно статическая съемка, в значительной степени зависит от времени работы приемника. Современное оборудование позволяет производить «горячую» замену батарей, позволяющих продлевать съемку для получения наиболее точных решений.

5) Компенсация наклона вехи приемника.

Технология, позволяющая проводить измерения без предварительной установки устройства по уровню, позволяющая ускорить рабочий процесс и уменьшить неточности съемки.

Основных этапа в спутниковых измерениях, также, как и при геометрическом нивелировании, два – создание опорной геодезической сети по грунтовым реперам при помощи статической съемки и нивелирование по деформационным маркам при помощи съемки в реальном времени.

3.5.4. Выбор объекта для проведения сравнения методов измерения деформаций

Объектом исследования был выбран подземный газопровод диаметром 630 мм с тепловой изоляцией толщиной 85 мм, протяженностью 7700 м в Ямало-Ненецком автономном округе.



Рисунок 3.6 - Спутниковый снимок местоположения подземного газопровода

Климатическая характеристика района

Климатическая характеристика района трассы составлена по ближайшей метеостанции Уренгой. Самым холодным месяцем года является январь, средняя месячная температура составляет минус 26,5°C. Температура воздуха самой

холодной пятидневки, обеспеченностью 0,98 – минус 50°C, обеспеченностью 0,92 – минус 48°C. Температура воздуха наиболее холодных суток, обеспеченностью 0,98 – минус 54 °C, обеспеченностью 0,92 – минус 52 °C. Температура воздуха обеспеченностью 0,94 – минус 36 °C. Средняя суточная амплитуда температуры воздуха наиболее холодного месяца составляет 9,4 °C. Абсолютный минимум температуры воздуха минус 56 °C.

Самым теплым месяцем является июль, средняя месячная температура составляет 15,5 °C. Температура воздуха обеспеченностью 0,95 – плюс 19 °C, обеспеченностью 0,98 – плюс 23 °C. Средняя максимальная температура воздуха наиболее теплого месяца составляет плюс 20,9 °C. Средняя суточная амплитуда температуры воздуха наиболее теплого месяца – плюс 10,4 °C Абсолютная максимальная температура воздуха составляет плюс 34°C.

В среднегодовой сумме составляют 496 мм. Количество осадков за апрель-октябрь составляет 360 мм. Количество осадков за ноябрь-март составляет 136 мм. Максимальное суточное количество осадков составляет 65 мм.

Средняя скорость ветра равна 3,7 м/с. Максимальная наблюденная скорость ветра - 40 м/с.

Из неблагоприятных атмосферных явлений отмечаются туманы, метели, грозы и град. Туманы непрерывно сохраняются от нескольких минут до нескольких суток. В холодное полугодие туманы наиболее продолжительны. Среднее число дней с туманами в году — 15, наибольшее — 31.

Грозы чаще всего наблюдаются в теплое время года (июле) и сопровождаются чаще всего сильным ветром, ливнем и градом. Общее число дней с грозой за период с мая по сентябрь – 12. Наибольшее число дней с грозой в году – 21.

Геокриологические условия

Согласно карте геокриологического районирования Западно-Сибирской равнины район исследования расположен в Надым-Пуровской геокриологической области в зоне прерывистого распространения

многолетнемерзлых грунтов. Геологическая карта местонахождения исследуемого объекта приведена на рисунке 2.25.

Криогенные процессы на данной территории имеют значительное распространение. Развитие криогенных процессов тесно связано с формированием сезоннопротаивающего и сезоннопромерзающего слоев.

На территории участка в зоне развития ММГ многолетнемерзлые грунты в вертикальном разрезе имеют непрерывное распространение и прослеживаются на всю глубину разреза: кровля вскрыта с поверхности, подошва мерзлых грунтов геологическими скважинами не вскрыта.

Многолетнемерзлые грунты представлены торфами, суглинками, глинами и песками. Торфы имеют слоистую криогенную текстуру, пески массивную криогенную текстуру, глинистые грунты массивную и слоистую криогенную текстуру. По льдистости многолетнемерзлые грунты характеризуются от слабольдистых до льдистых. Значение среднегодовой температуры многолетнемерзлых грунтов – минус $0,5^{\circ}\text{C}$.

Многолетнемерзлые грунты на участке трассы обладают высокими прочностными свойствами. Их механические характеристики соизмеримы с соответствующими показателями полускальных грунтов.

В геологическом отношении территория месторождения относится к молодой Западно-Сибирской плите. На глубоко метаморфизованном фундаменте докембрийского возраста залегают слабо дислоцированные эффузивно-осадочные образования верхнего палеозоя и триаса (промежуточный структурный этаж) и собственно платформенный чехол, сложенный мезокайнозойскими осадочными породами и четвертичными отложениями.

В геологическом строении принимают участие неоплейстоценовые озерно-аллювиальные отложения, перекрытые с поверхности мохово-растительным слоем мощностью до 0,3 м.

Экзогенные процессы на изучаемой территории представлены заболачиванием, подтоплением и морозным пучением.

3.5.5. Разработка программы мониторинга для измерения деформаций методами геометрического нивелирования и методом спутникового измерения

Всего по трассе исследуемого трубопровода располагаются 3 узла запорной арматуры – в начале на ПК0+00, на ПК56+30 и в конце трубопровода на ПК77+00. На каждом узле запорной арматуры располагается куст реперов из 3 штук для нивелирования сооружений узла, один из которых используется в общей опорной сети для нивелирования марок трубопровода, и 3 одиночных грунтовых репера, расположенных по трассе с шагом от 1,5 до 2 километров для обеспечения требуемой точности нивелирования. Для мониторинга вертикальных перемещений установлены кольцевые деформационные марки с шагом 150 метров, в общем количестве 51 штука.

Геометрическое нивелирование.

В качестве основного метода измерений вертикальных перемещений, согласно пункту 6.3.1 ГОСТ 24846-2019, следует применять геометрическое нивелирование.

Первым этапом проводится создание местной опорной геодезической сети между грунтовыми реперами, вторым этапом проводится измерение перемещений на деформационных марках. Все измерения по маркам проводятся замкнутым ходом из репера с известными высотными координатами.

Для оценки стоимости мониторинга деформаций трубопровода на период эксплуатации методом геометрического нивелирования, приняты следующие исходные данные:

- 1) Принцип использования многолетнемерзлых грунтов – II принцип;
- 2) Проектный класс точности измерения – II класс по опорной сети, II класс по деформационным маркам;
- 3) Количество грунтовых реперов опорной сети – 6 штук;
- 4) Количество деформационных марок – 51 штука;
- 5) Срок эксплуатации – 25 лет;

6) Периодичность измерения деформаций принята по СП 497.1325800.2020 - в первые три года эксплуатации - не менее двух раз в год, в дальнейшем - один раз в два года. Общее количество циклов – 17 циклов измерений.

7) Бригада для проведения измерений – 1 геодезист, 2 замерщика;

8) Оборудование – цифровой нивелир – 1 шт., рейка 2 метра – 2 шт.;

Стоимость работ по проведению геотехнического мониторинга при применении метода геометрического нивелирования принята по сборникам базовых цен на проведение инженерно-геодезических изысканий.

Спутниковая геодезическая съемка.

Для создания опорной сети, проводится одновременная статическая съемка в двух или трех точках на грунтовых реперах (зависит от количества используемых спутниковых приемников) не менее 1 часа с частотой не более 10 Гц, образуя полигоны треугольной формы (рис. 3.6, б). Таким образом, объединяются все реперы в единую опорную сеть с известными координатами, от каждого из которых можно производить дальнейшие измерения вертикальных перемещений марок [88].

Дальность спутникового метода и количество приемников позволяет объединять разный набор реперов. При работе с двумя приемниками, потребуется 8 сессий для определения высотных координат реперной сети – ГР1-ГР2, ГР1-ГР3, ГР2-ГР3, ГР3-ГР4, ГР3-ГР5, ГР4-ГР5, ГР4-ГР6, ГР5-ГР6.

При работе с тремя приемниками, будет достаточно 3 последовательных сессий: ГР1-ГР2-ГР3, ГР3-ГР4-ГР5, ГР4-ГР5-ГР6 для получения всех векторов, определения высотных координат и объединения всех реперов в опорную сеть, имея одну объединяющую точку в репере между сессиями. Однако, добавляя одну сессию ГР2-ГР3-ГР4, мы получим такую конфигурацию полигонов, в которой в каждом измерении из 3 приемников перемещается всего 1, а остальные 2 дублируют свое предыдущее положение, что позволит производить более точную постобработку измерений и свести погрешность к минимуму.

Условные обозначения:

- - полигон для уравнивания опорной сети
- - проектный подземный трубопровод
- ⊙ ГР2 - одиночный грунтовый репер
- △ ГР1 - репер из куста реперов

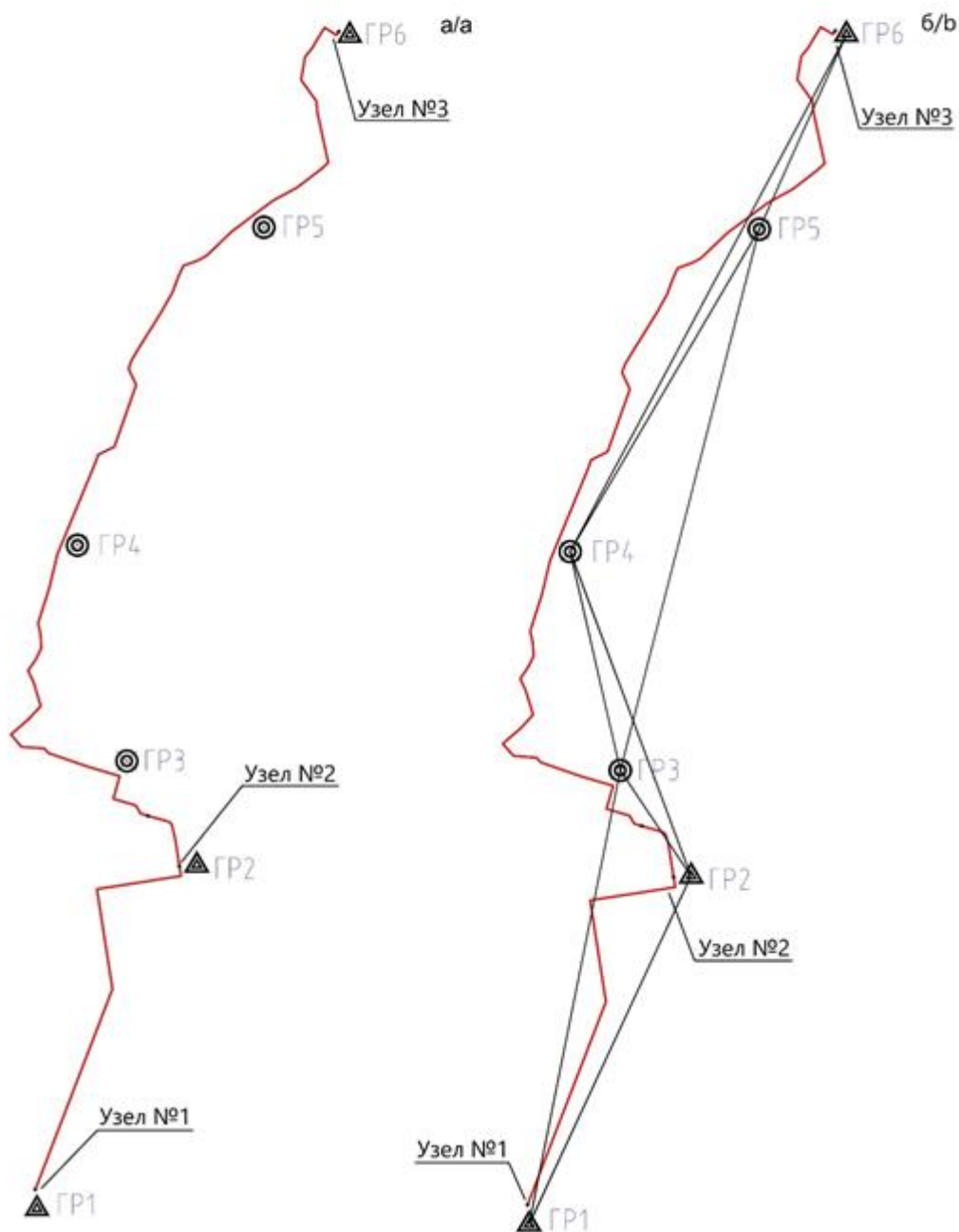


Рисунок 3.7 - Сеть элементов геотехнического мониторинга: а) план расположения элементов опорной сети объекта для геометрического нивелирования; б) полигоны для уравнивания опорной сети при использовании ГНСС оборудования в статической съемке.

Для определения возможности применения кинематической съемки в реальном времени, была рассчитана среднеквадратическая погрешность на объекте.

Максимальная расчетная просадка на трубопроводе составила 47 см, таким образом:

$$m = \frac{\Delta}{3 * 2t} = \frac{470 \text{ мм}}{3 * 2 * 2} = 39,2 \text{ мм.}$$

При применении кинематической съемки, среднеквадратическая погрешность вертикальных измерений – 15 мм + 1 мм/км. С одного репера проводится измерение на расстоянии не более 1 км, таким образом, максимальная погрешность составляет 16 мм, что меньше допускаемой расчетной СКП более, чем в 2 раза.

Таким образом, применение данного режима обосновано, проводится съемка в реальном времени с ближайшего грунтового репера по деформационным маркам. При этом, требуется обязательно производить контроль наблюдений с разных реперов в одной деформационной марке.

Для оценки стоимости мониторинга деформаций трубопровода на период эксплуатации с применением спутниковой геодезической аппаратуры, приняты следующие исходные данные:

- 1) Принцип использования многолетнемерзлых грунтов – II принцип;
- 2) Количество грунтовых реперов опорной сети – 6 штук;
- 3) Количество деформационных марок – 51 штука;
- 4) Срок эксплуатации – 25 лет;
- 5) Периодичность измерения деформаций принята по СП 497.1325800.2020 - в первые три года эксплуатации - не менее двух раз в год, в дальнейшем - один раз в два года. Общее количество циклов – 17 циклов измерений.
- 6) Бригада для проведения измерений – 2 геодезиста;

7) Оборудование – ГНСС-приемник – 3 шт.

Стоимость работ по проведению геотехнического мониторинга при применении спутникового оборудования принята по прямым трудозатратам.

Также стоит отметить, что состав элементов сети мониторинга не отличается от сети для проведения методом геометрического нивелирования, что позволит применять методы геометрического нивелирования при необходимости подтверждения высокоточными методами.

3.5.6. Экономическая эффективность предлагаемой методики

Общая стоимость примененного метода была рассчитана методом приведенных затрат. Расчет приведенных затрат позволяет сравнить между собой и выбрать оптимальный вариант использования технологий. Данный метод чаще всего используется при принятии инвестиционных решений и оценке эффективности проектов. Приведенные затраты выступают суммой капитальных и эксплуатационных вложений за период эксплуатации, с учетом инфляции и ставки дисконтирования. Результатом являются чистые приведенные затраты за весь период эксплуатации. Эффективность технологии определяется наименьшим количеством затрат между сравниваемыми вариантами.

Приведенные или дисконтированные затраты определяются по формуле:

$$Пз = \sum \frac{(Kз + Эз)}{(1 + Сд)^{СрД}},$$

где Пз – приведенные затраты, руб.; Кз – капитальные затраты на оборудование, руб.; Эз – эксплуатационные затраты на проведение мониторинга, руб.; Сд – ставка дисконтирования, %; СрД – срок дисконтирования (срок эксплуатации).

Итоговые приведенные затраты на 17 циклов измерений в период эксплуатации методом геометрического нивелирования – 4,4 миллиона рублей, спутниковым методом – 1,68 миллиона рублей.

Резюмируя, автор приводит выводы о целесообразности и экономической эффективности применения современного метода измерений деформаций подземного трубопровода при помощи ГНСС оборудования, что необходимо подтвердить практическими выводами при проведении опытно-промышленных испытаний технологии на реальном объекте эксплуатации, которое, в рамках данного исследования, не выполнялось.

3.6. Выводы по главе 3

1. Выявлено нормативное требование о необходимости проведения геотехнического мониторинга подземных трубопроводов, при этом, условия проектирования сети геотехнического мониторинга, контролируемые параметры отсутствуют.

2. Контролируемый параметр по предельным деформациям подземного трубопровода допускается получать расчетным способом, в соответствии с требованиями ГОСТ 34737-2021 и СП 305.1325800.2017.

3. Комплексная методика расчетов подземных трубопроводов позволяет получать детальные прогнозируемые осадки трубопровода, при которых обеспечиваются прочностные условия трубопровода. Результаты теплотехнических расчетов – профиль осадки, может являться расчетным предельным значением по деформации трубопровода для целей проведения геотехнического мониторинга; прогнозные температурные поля позволяют контролировать конкретные расчетные температуры и их динамику в любой точке геологического массива трассы, изменение положения кровли в термометрических скважинах, расположенных по длине трассы подземного трубопровода.

4. Применение профилей осадки в качестве предельных параметров по деформациям и температурам не зависит от применяемого способа проведения мониторинга и применима к любым конструктивным решениям по сети геотехнического мониторинга.

5. Впервые сформулированы и обоснованы основные контролируемые параметры при геотехническом мониторинге подземных трубопроводов: виды наблюдений, устройства, объем сети и расположение элементов сети геотехнического мониторинга. Сформированы рекомендации по устройству сети и проведению геотехнического мониторинга подземного трубопровода в условиях распространения многолетнемерзлых грунтов (Приложение А).

6. Обосновано применение ГНСС оборудования для измерения вертикальных перемещений подземного трубопровода в многолетнемерзлых грунтах, оценена экономическая эффективность метода.

ГЛАВА 4. АНАЛИЗ ИНЖЕНЕРНЫХ УСЛОВИЙ И ЗАЩИТНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ ДЛЯ ПОДЗЕМНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ В КРИОЛИТОЗОНЕ. ПРИМЕНЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЙ

4.1. Предпосылки для проведения анализа

При вскрытии многолетнемерзлых грунтов по трассе проектируемого трубопровода, обязательной задачей является прогнозирование изменения геокриологических условий от техногенного воздействия, а также подбор, техническое и экономическое обоснование инженерных защитных мероприятий для конкретных условий эксплуатации объекта. В рамках комплексной методики проведения расчетов, применение и назначение любых защитных инженерных мероприятий обосновывается результатами теплотехнических и прочностных расчетов трубопровода [58].

Защитные или компенсирующие инженерные мероприятия – это ряд дополнительных решений (планировочных, конструктивных, инженерных), направленных на снижение негативного воздействия на здание и сооружение, увеличивающее безопасность или обеспечивающее безопасный процесс эксплуатации с минимизацией рисков.

Защитные мероприятия можно разделить на две категории:

- мероприятия для трубопровода;
- мероприятия для основания (грунтов).

Среди защитных мероприятий, относящихся к трубопроводу можно выделить мероприятия: замена упругих изгибов на гнутые отводы, увеличение толщины стенки проектного отвода, замена проектных отводов на отводы большего радиуса гнутья, установка подземных компенсаторов, устройство компенсационных матов или амортизирующих подушек и другие.

Основная задача защитных мероприятий для трубопровода – обеспечение допустимого уровня напряженно-деформированного состояния трубопровода, удовлетворения условий прочности и устойчивости.

В качестве защитных мероприятий, относящихся к основанию, используют следующие мероприятия: тепловая изоляция трубопровода, установка георешеток и геоматов для укрепления дневной поверхности, обустройство дренажа и стока вод из полосы прокладки трубопровода, замена грунта в его основании на расчетную глубину, применение активной температурной стабилизации грунтов, технико-мелиоративные мероприятия по сохранению, восстановлению или изменению растительного и снегового покрова [5, 113, 114].

Основная задача защитных мероприятий основания от негативного отепляющего (или охлаждающего) воздействия трубопровода – уменьшение осадки (или выпучивания) основания под трубопроводом до расчетных допустимых значений, с целью уменьшения напряжений и деформаций трубопровода.

Тепловая изоляция уменьшает передачу тепловой энергии от трубопровода в окружающий грунт. Изоляция может быть нанесена в заводских условиях на трубу, может быть устроена на строительной площадке с применением различных методов нанесения или монтажа готовых теплоизоляционных изделий. Существуют и другие традиционные мероприятия по стабилизации грунтов, например, укладка тепловой изоляции на дно и стенки котлована.

Замена грунта производится при наличии под трубопроводом сильнопросадочных при оттаивании льдистых грунтов, торфов или ледогрунтов. Замена должна быть проведена на непучинистый дисперсный песок. Применение замены грунта связано с большими объемами земляных работ, поэтому является недешевым мероприятием, а также при замене грунта изменяется состав, строение и физико-механические свойства грунтов, слагающих слой сезонного оттаивания.

Применение активной температурной стабилизации способствует компенсации теплового влияния трубопровода в зимний период путем понижения температуры грунта в его основании. На данный момент

применяются энергонезависимые одиночностоящие сезоннодействующие охлаждающие устройства (СОУ). Также существуют и иные методы понижения температур, например, устройство трубок с хладагентом под трубопроводом в продольном направлении, примененных на Трансаляскинском нефтепроводе [115].

На протяжении последних 30 лет в России для защиты трубопроводов успешно разрабатываются и применяются технологии и технические средства принудительного охлаждения, температурной стабилизации, управления температурным режимом мерзлых грунтов оснований [39, 41].

Термостабилизация не является традиционным защитным мероприятием для подземных линейных трубопроводов. Помимо этого, её реализация требует значительных капитальных затрат. Термостабилизация используется при недостаточности или нецелесообразности применения других инженерных средств и способов защиты. Решение о термостабилизации мерзлых грунтов и обоснование ее применения, а также определение технической схемы устройства и характеристик сезоннодействующих охлаждающих устройств осуществляется на основе прогнозных теплотехнических расчетов с учетом конструктивных особенностей трубопровода и технико-экономической целесообразности.

В зависимости от условий по трассе трубопровода, а также интенсивности воздействия на грунт, рекомендуется выбирать либо одиночное компенсирующее мероприятие, либо их сочетание, например, совместное применение тепловой изоляции и замены грунта под трубопроводом. Вопросам обоснования и выбора технических решений по инженерной защите трубопроводов и управлению температурным режимом грунтов уделяется большое внимание в научной литературе [39, 41]. Комплексное применение инженерных средств защиты позволяет более полно обеспечивать допустимый уровень напряженно-деформированного состояния трубопровода.

Целью анализа является выявление закономерностей применения защитных мероприятий основания в различных геокриологических и климатических условиях, применяемых в проектах подземных трубопроводов.

Целью статистической обработки является выявление основных влияющих факторов на оттаивание многолетнемерзлых грунтов и применение полученного уравнения для прогнозирования изменения многолетнемерзлых грунтов с учетом разных защитных мероприятий.

Для выполнения анализа были выделены и выполнены следующие задачи:

- сбор и анализ проектной документации, результатов теплотехнических расчетов подземных трубопроводов в криолитозоне за 2020 – 2023 годы;
- установление принципов классификации трубопроводов и применяемых защитных мероприятий;
- анализ материалов инженерно-геологических и инженерно-метеорологических изысканий трасс трубопроводов на основе отчетов инженерных изысканий;
- оценка и анализ результатов классифицирования примененных защитных мероприятий;

Для выполнения статистической обработки были выполнены задачи:

- проведение многофакторного корреляционно-регрессионного анализа на основе проведенного анализа данных для выявления основных влияющих факторов на оттаивание многолетнемерзлых грунтов и составления уравнения регрессии;
- оценка применения полученных статистических данных в прогнозировании оттаивания многолетнемерзлых грунтов.

4.2. Первичный анализ инженерных условий и защитных мероприятий

4.2.1. Сбор и анализ проектной документации

Для проведения статистической и аналитической обработки проектной документации по подземным трубопроводам, была проанализирована отчетная документация по теплотехническим и прочностным расчетам, проведенным

специалистами АО «ТомскНИПИнефть» за 2020-2023 годы в двух регионах: Ямало-Ненецкий автономный округ (ЯНАО) и Иркутская область.

Данные регионы были выбраны по причине большой удаленности регионов друг от друга – почти 2 тысячи километров, разных климатических условий, что оказывает непосредственное влияние на формирование ММГ: Иркутская область находится в умеренном климатическом поясе с резко-континентальным климатом, а ЯНАО – в Арктическом и субарктическом поясах с континентальным климатом.



Рисунок 4.1 – Местоположение трубопроводов

Всего в данных регионах были выполнены теплотехнические и прочностные расчеты для 86 трубопроводов с общей протяженностью ММГ на трассах трубопроводов различного назначения более 316 километров.

4.2.2. Характеристика инженерно-геокриологических и климатических условий

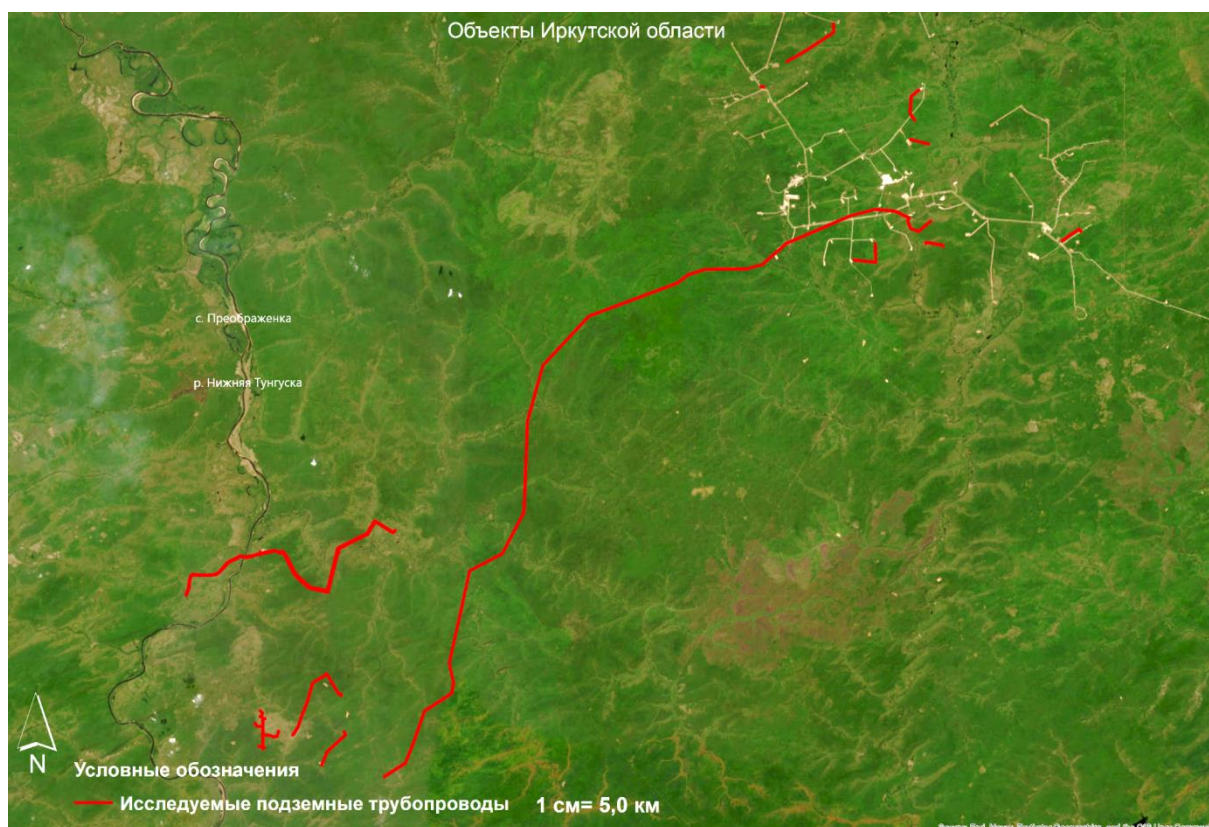


Рисунок 4.2 – Местоположение трубопроводов в Иркутской области

Климатическая характеристика объектов Иркутской области

Территория объектов, находящихся в Иркутской области, характеризуется резко континентальным климатом с холодной продолжительной зимой и коротким относительно жарким летом. Температура воздуха среднегодовая – минус 7,0 °С.

Климат территории изысканий резко континентальный; его континентальность проявляется в значительных колебаниях температуры воздуха по сезонам года. В нижних слоях атмосферы над Восточной Сибирью циркулируют воздушные массы в основном арктического происхождения, содержащие сравнительно мало влаги. Продвигаясь над континентом к югу, летом они быстро прогреваются, зимой долго сохраняют низкую температуру. В теплый период года возникает значительный температурный контраст между прогретым и вновь поступающими воздушными массами, развивается

циклоническая деятельность, в результате которой усиливается ветер, увеличивается облачность, выпадает значительное количество осадков.

Самый холодным месяцем года является январь со средней температурой воздуха минус 28,5 °С, самым теплым – июнь, средняя месячная температура воздуха которого составляет 17,3 °С. Средняя годовая температура воздуха составляет минус 5,5 °С. Самая низкая за весь период наблюдений температура воздуха минус 59,4 °С отмечалась в январе 1966 года, самая высокая 36,8 °С – в июне 2017 года.

Средняя годовая величина относительной влажности воздуха, характеризующая степень насыщения воздуха водяным паром, составляет 72 %. Минимальное значение относительной влажности (58-60 %) отмечается весной, максимальной величины (79 %) она достигает в ноябре.

Распределение осадков по месяцам, типичное для районов с континентальным климатом, характеризуется резким переходом от небольших зимних величин осадков к значительным летним. В среднем за год выпадает 363 мм осадков. Наибольшее их количество отмечается в июле-августе (53-55 мм), наименьшее – феврале-марте (12 мм). Максимальное суточное количество осадков наблюдалось в июле и составляет 68 мм.

Снежный покров появляется в сентябре, однако, чаще всего, под воздействием положительной дневной температуры воздуха, он разрушается, устойчивый снежный покров образуется в середине октября. Максимальных значений высота снежного покрова достигает в феврале-марте. Разрушение устойчивого снежного покрова происходит в первых числах мая, в течение всего месяца может образовываться временный снежный покров. Наибольшая декадная высота снежного покрова за многолетний период составляет 78 см. Наибольшая средняя декадная высота снега обеспеченностью 5 % составляет 65 см.

Режим ветра определяется характером общей циркуляции атмосферы. В районе метеостанции Преображенка вследствие особенностей рельефа

местности преобладают ветры южного направления, повторяемость их составляет 26 %.

Особо опасных климатических и метеорологических явлений в районе работ не наблюдается, по характеристикам «наводнение», «наледообразование», «русловые деформации» и «подтопление территории» – район работ относится к категории с умеренно опасными природными воздействиями.

Инженерно-геокриологическая характеристика объектов Иркутской области

Геологическая карта объектов региона отражена на рисунке 2.10.

В геокриологическом отношении район находится в области прерывистого распространения многолетнемерзлых грунтов, что способствует развитию таких опасных геокриологических процессов и явлений, как термокарст, термоэрозия, формирование многолетних бугров пучения, солифлюкция, новообразование многолетнемерзлых грунтов; преобладают процессы подтопления и болотообразования, сезонного промерзания и оттаивания грунтов, морозное пучение грунтов сезонно-талого слоя. Значительные колебания температур воздуха в сочетании с разнообразием поверхностных и грунтовых условий приводят к формированию широкого диапазона среднегодовых температур грунтов. Глубина влияния годовых изменений температур составляет 9,0-17,0 м, температура грунтов изменяется от 0 до минус 4,3°C.

Многолетнемерзлые толщи преимущественно сформированы эпигенетически. Мерзлота, в основном, сливающегося типа, прослеживается с поверхности и на всю глубину исследования – 20 м. Толща мерзлых грунтов залегает непосредственно под сезонномерзлым слоем, мощность которого зависит от литологического состава пород, их естественной влажности и геоморфологической позиции, либо граничит с надмерзлотными таликами, имеющими прерывистое локальное распространение. При этом талики являются несквозными и относятся к инфильтрационному типу. Таликовые зоны сложены глинами, суглинками, песками мелкими водонасыщенными. Наряду с сезонным

промерзанием, широкое распространение получают площади развития сезонного оттаивания грунтов. Большую роль в распространении сезонноталых и сезонномерзлых грунтов на территории месторождения, играет снежный покров.

Грунты преимущественно пластичномерзлые, реже твердомерзлые. Мерзлые породы имеют преимущественно слоистую, реже массивную криотекстуру. Показателем прочностного состояния многолетнемерзлых грунтов (ММГ) является льдистость, так как при оттаивании происходит осадка поверхности.

В районе работ по объектам отмечается глубокое сезонное промерзание грунтов. Мощность сезонно-мерзлого слоя может достигать 5,75 м. Глубина сезонного промерзания превышает сезонное оттаивание грунтов, в результате чего происходит новообразование многолетнемерзлых грунтов и увеличение их мощности.

Промерзание грунтов начинается в конце сентября и достигает своего максимума в конце марта, т.е. весь процесс продолжается в течение 6 месяцев. Наибольшая скорость промерзания (до 1 м/месяц) фиксируется в ноябре-декабре. Интенсивность промерзания грунтов в течение зимнего периода неодинакова и в значительной степени зависит от режима накопления и высоты снега. При этом, независимо от факторов подстилающей поверхности, к концу декабря промерзает 60...70%, а к концу февраля – 90...95% сезонно мерзлого слоя. Разница глубин промерзания в относительно теплые и холодные зимы достигает 50...90 см.

Максимальные глубины сезонного промерзания характерны для скальных, крупнообломочных и песчаных пород, минимальные - для обводненных глинистых и органических грунтов. В пониженных участках местности (западины, распадки, небольшие долины) глубина промерзания грунтов намного меньше, чем на открытых ровных участках.

Оттаивание грунтов начинается в первой половине апреля, вслед за сходом снежного покрова и установлением в дневное время положительных температур и продолжается в течение 2-4 месяцев. Максимальная скорость оттаивания отмечается в мае-июне, когда грунт хорошо прогревается, а средние суточные температуры воздуха достигают 5...10 °С. На незалесенных водоразделах, широких долинах и южных склонах, сложенных маловлажными грубодисперсными грунтами, полностью оттаивание происходит в конце июня – начале июля. Полное оттаивание сезонномерзлого слоя на заболоченных участках, падей и распадков таежной зоны происходит с августа до конца октября, когда начинают вновь промерзать поверхностные слои грунта. В пределах изыскиваемой территории толщина слоя сезонного протаивания достигает 3,23...5,05 м.

Криогенные процессы, в целом для района работ, играют роль ведущего фактора при дифференциации ландшафтов, выступают как рельефообразующий фактор и оказывают заметное влияние на состав, строение и свойства грунтов сезонномерзлого слоя. С криогенными процессами связано формирование: сети морозобойных трещин, бугров пучения, явлений солифлюкции и термокарста.

На всей территории рассматриваемых площадок широкое распространение получили элювиальные грунты, которые являются продуктами выветривания осадочных пород. Грунты разрушены до глыбовых грунтов и глин. Необходимо учитывать, что элювиальные грунты существенно могут изменить свои прочностные и деформационные свойства при их неоднократном замачивании, высыхании и промерзании, а также в процессе эксплуатации, в связи с их дальнейшим выветриванием. Под воздействием атмосферных осадков и грунтовых вод происходит разуплотнение и набухание элювиальных грунтов. Рекомендуется исключить возможность замачивания элювиальных грунтов в период строительства и всего срока эксплуатации, предусмотреть водорегулирующие мероприятия.

В весенне-летний период на изучаемой территории возможно появление поверхностных вод, за счет повышения количества атмосферных осадков и таяния снега. Как правило, встречаются с поверхности и приурочены к сезонноталому слою.

В теплое время года подземные воды сезонноталого слоя имеют, практически, повсеместное распространение. Эти воды характеризуются кратковременным существованием (2-2,5 месяца). Воды залегают обычно в зоне свободного водообмена. Воды являются типичной верховодкой. По продолжительности существования в летний период эти воды (в зависимости от источников питания) могут классифицироваться как периодически возникающие после выпадения дождей (на водоразделах), периодически исчезающие при длительном отсутствии дождей (верхние и средние части склонов) и постоянно существующие за счет подтока вод сезонноталого слоя с гипсометрически вышележащих участков (нижние части склонов, лога, ложбины стока). Разгрузка происходит в пониженные участки рельефа, ручьи, впадающие в озерные котловины.

Гидрогеологические условия и состав подземных вод может изменяться в результате вертикальной планировки местности и освоения территории. Степень минерализации и химический состав подземных вод может существенно изменяться в связи с попаданием в них промышленных и сточных вод. В результате этого ранее неагрессивные воды могут стать после освоения территории агрессивными, что следует учитывать при проектировании.

Опасные геологические процессы

Опасные геологические процессы в районе представлены криогенным пучением, заболачиванием, подтоплением и затоплением территории, сейсмичностью из эндогенных процессов.

На территории распространения многолетнемерзлых грунтов, грунты, залегающие в слое сезонного оттаивания и промерзания, подвержены процессам пучения. Криогенное пучение связано с интенсивной миграцией влаги к фронту

промерзания в процессе неравномерного промерзания грунтов с поверхности. Наличие водонасыщенных грунтов в слое сезонного промерзания, с одной стороны, и наличие оголенных от снега и растительности участков, способствующих быстрому промерзанию, с другой – приводит обычно к образованию бугров пучения. Многолетние и сезонные бугры пучения являются одним из наиболее важных в инженерном отношении процессов.

На участках развития интенсивного процесса пучения возможны довольно значительные деформации возводимых сооружений, такие как выпучивание, изгиб и даже разрыв трубы при подземном способе её прокладки, нарушении изоляции, перекос задвижек и другие.

Основными методами защиты от пучения грунтов является сохранение снежного и растительного покровов, дренаж территории и строительство на искусственных насыпях, сложенными хорошо фильтрующим материалом.

При обследовании территории объектов многолетние бугры пучения не отмечены. В процессе бурения скважинами до исследуемой глубины (10-17 м) ледяных ядер бугров пучения не вскрыто.

На момент обследования территории объектов отмечаются подтопленные участки, где глубина залегания или уровень установления подземных вод менее 3,0 м. Занимаемая площадь процессом заболачивания составляет не более 5% от всей территории участков объектов.

Климатическая характеристика объектов Ямало-Ненецкого автономного округа

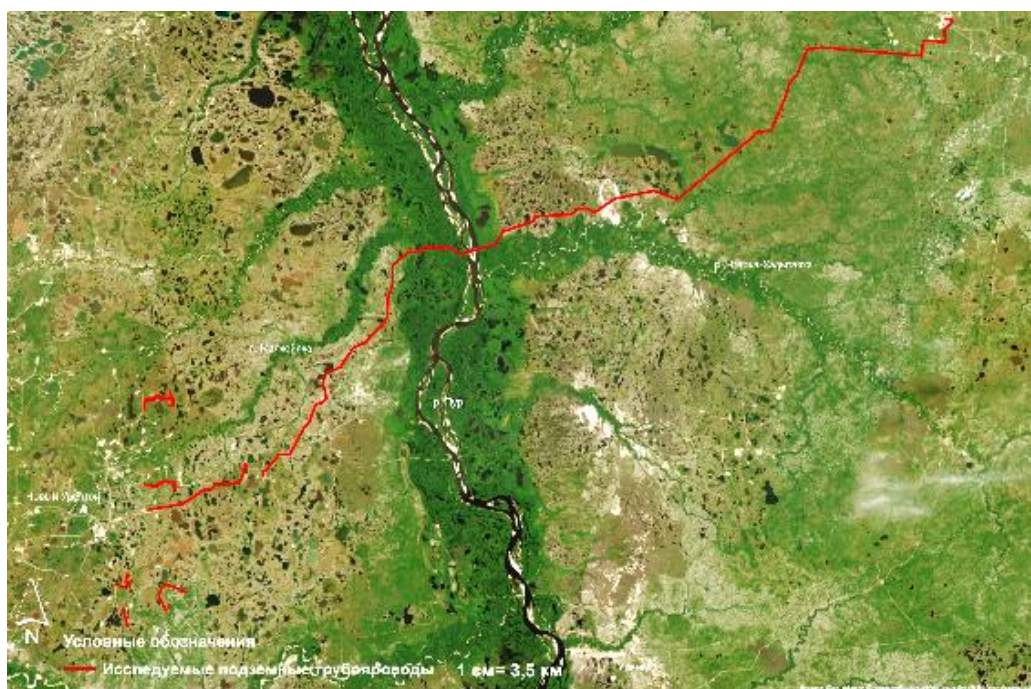


Рисунок 4.3 – Местоположение трубопроводов Ямало-Ненецкого автономного округа



Рисунок 4.4 – Местоположение трубопроводов Ямало-Ненецкого автономного округа



Рисунок 4.5 – Местоположение трубопроводов Ямало-Ненецкого автономного округа

Средняя годовая температура воздуха равна минус 5,9 °С. Средняя месячная температура самого холодного месяца - января - равна минус 24,6 °С; самого теплого - июля – (+16,2 °С). Абсолютный минимум температуры приходится на декабрь - февраль и составляет минус 55 °С, абсолютный максимум - на июль +36 °С.

Температура воздуха теплого периода обеспеченностью 0,95 составляет 20 °С, обеспеченностью 0,98 — 23 °С.

Наиболее важными факторами формирования климата является западный перенос воздушных масс и влияние континента. Взаимодействие двух противоположных факторов придает циркуляции атмосферы над рассматриваемой территорией быструю смену циклонов и антициклонов, способствует частым изменениям погоды и сильным ветрам.

Средняя годовая скорость ветра составляет 3,1 м/с. Наименьшие скорости ветра наблюдаются в августе, наибольшие в мае – 2,7 и 3,6 м/с, соответственно. Максимальная скорость ветра и порыв могут превышать 40 м/с.

Характерной чертой является преобладание циклонического типа погоды в течение всего года и, особенно, в переходные периоды.

Средняя годовая температура поверхности почвы составляет минус 7,1 °С, абсолютный максимум плюс 47,7 °С, абсолютный минимум минус 58 °С.

Средняя годовая сумма осадков составляет 521 мм. Количество осадков за теплый период (апрель-октябрь) значительно превышает количество осадков за холодный период (ноябрь-март) и составляет 371 и 150 мм.

Максимальная высота снежного покрова наблюдается чаще всего в конце марта – начале апреля. Средняя декадная высота снежного покрова из наибольших за зиму по постоянной рейке составила 84 см, максимальная – 132 см, минимальная – 38 см.

Среднее годовое значение относительной влажности воздуха составляет 77 %. Наиболее высокие значения относительной влажности воздуха в холодное время года приурочены к октябрю и составляют 86 %. К наиболее сухому периоду (июнь-июль) относительная влажность понижается до 69 %.

Водный режим рассматриваемой территории имеет ряд особенностей, связанных с наличием многолетней мерзлоты.

По характеру водного режима реки данного района относятся к типу рек с весенне-летним половодьем и паводками в теплое время года. Основное питание рек осуществляется водами снегового и дождевого происхождения. Грунтовое питание вследствие наличия вечной мерзлоты весьма незначительно.

Равнинность территории, отсутствие леса, наличие мерзлоты и большая суммарная, солнечная радиация в условиях полярного дня обуславливают интенсивное и равномерное стайвание снежного покрова с водораздельных пространств. Талые воды концентрируются в первичной ручейковой и овражно-балочной сети, почти сплошь заполненной плотными массами снега, накапливаются в отрицательных формах рельефа, за снежными плотинами в оврагах и балках. Период накопления вод весеннего снеготаяния длится около 30 суток, благодаря частым и продолжительным возвратам холодов и значительности «принимающих» сток снежных масс. В снежном покрове сосредотачивается от 25% до 50% запаса воды.

Инженерно-геокриологическая характеристика объектов Ямало-Ненецкого автономного округа

Участки расположения объектов согласно схеме общего геокриологического районирования Западно-Сибирской плиты характеризуются массивно-островным распространением многолетнемерзлых грунтов.

Мощность многолетнемерзлых пород в районе более 300 м. В пределах участка изысканий установлена подзона сплошного распространения ММГ. Не исключается наличие зон с заглубленной кровлей ММГ в межскважинном пространстве инженерно-геологических скважин.

Многолетнемерзлые отложения по типу промерзания относятся к эпигенетическим. Об этом свидетельствует закономерное уменьшение и разреживание ледяных включений и уменьшение суммарной влажности с глубиной. При этом толщина ледяных шлиров может как увеличиваться, так и сокращаться с глубиной.

Среднегодовая температура многолетнемерзлых грунтов (температура на глубине нулевых годовых колебаний температуры) составляет от минус 0,3 до минус 2,1 °С. Глубина нулевых годовых колебаний температуры достигает 10,0 м.

Тип сезонного промерзания и оттаивания пород по классификации В. А. Кудрявцева континентальный. Сезонное промерзание начинается с переходом среднесуточной температуры воздуха через 0 °С в область отрицательных значений в конце сентября - начале октября. Глубина сезонного оттаивания – от 0,5 – 4,0 м на торфяниках; и 0,3 – 4,5 м в местах выхода на дневную поверхность песчано-глинистых грунтов. При оттаивании мерзлых грунтов глинистые грунты приобретают мягкопластичную и текучую консистенцию.

Мерзлые грунты озерно-болотного генезиса представлены торфом мерзлым. Мерзлые грунты озерно-аллювиального генезиса представлены песками, супесями и суглинками. Криогенное строение грунтовых

разновидностей в разрезе тесно связано с их литологическим составом. Наибольшее количество ледяных включений разнообразных форм, размеров и ориентировки приурочено к глинистым грунтам. Пески характеризуются массивной криотекстурой. Суглинки и супеси характеризуются чаще слоистой криотекстурой. В целом, для разреза, льдистость глинистых грунтов за счет ледяных включений с глубиной уменьшается.

Поверхность равнины насыщена мерзлотными формами рельефообразования – мелкобугристые, крупнобугристые и плоскобугристые торфяники, хасыреи (заторфованные озера). В районе изысканий распространены следующие типы ландшафта: суходольные участки, талые болота и торфяники с участками распространения многолетнемерзлых грунтов, поймы и русла водотоков, техногенные формы (отсыпанные песком площадки и дороги).

Опасные геологические процессы

В числе неблагоприятных физико-геологических процессов и явлений в пределах рассматриваемой территории, следует отметить процесс заболачивания территории, многолетнее и сезонное пучение, термокарст, подтопление и затопление территории, водной эрозии. Эндогенные процессы отмечены низкой сейсмичностью.

Важнейшей гидрологической особенностью территории является замедленный поверхностный сток, что связано с плоским рельефом, небольшими уклонами и малым врезом речных долин. Значительная увлажненность и небольшое испарение обуславливают высокую водность стока в течение года, а замедленный поверхностный сток и слабый естественный дренаж грунтовых вод послужили причиной широкого распространения озёр и болот.

Большая часть района занята торфяными болотами, занимающими водораздельные пространства, меньшая часть покрыта угнетенным лесом.

Заболоченность на участке изысканий встречается повсеместно, мощность торфа составляет от 0,3 до 3,6 м.

Термокарст один из основных криогенных процессов распространенных в районе работ. Этот процесс связан с вытаиванием льда и образованием плоско— западинного рельефа, пониженные участки которого, впоследствии заполняются талыми водами или атмосферными осадками. Формируется термокарст в результате увеличения глубины сезонного оттаивания (при отрицательной среднегодовой температуре грунтов) вследствие локального изменения условий теплообмена в системе грунт – атмосфера. Эти изменения происходят вследствие саморазвития рельефа: образование отрицательных микроформ рельефа с повышенным снегонакоплением, динамикой растительности, заболачиванием территории и др. Термокарстовые формы в районе изысканий представлены термокарстовыми озерами и остаточно-полигональными образованиями (плоскобугристыми торфяниками).

На изысканной территории опасным геологическим и инженерно-геологическим процессом является процесс подтопления. Под подтоплением понимается процесс подъема уровня грунтовых вод в водообильные периоды года до дневной поверхности. В ходе оттаивания деятельного слоя (июнь–сентябрь месяц) на участках с развитием многолетнемерзлых грунтов ожидается повсеместное появление надмерзлотных вод. Максимальный прогнозируемый уровень надмерзлотных вод – до дневной поверхности.

По степени опасности морозного пучения территория объектов относится к «опасным». Бугры пучения на территории изысканий не выявлены.

4.2.3. Факторная классификация

Для проведения анализа были выделены основные отличительные характеристики трубопровода и условий расположения объекта – факторные показатели, по которым можно провести статистический анализ.

1. *Диаметр трубопровода (D , м).*

Фактор, отвечающий за площадь теплового контакта трубопровода и вмещающего грунта. В таблице приведен диаметр трубопровода с учетом толщины стенки.

2. *Температура перекачиваемого продукта (T , °C).*

Фактор, который влияет на цель проведения теплотехнического расчета при проектировании: при положительной температуре продукта, целью является выявление ореола оттаивания ММГ и расчет максимальной осадки мерзлого грунта при оттаивании, при отрицательной температуре – выявление процессов промораживания грунтов и процессов пучения ниже деятельного слоя на участках с отсутствием ММГ, а также отсутствия сезонного оттаивания на участках с ММГ, при «сложном» теплогидравлическом режиме с наличием и отрицательных, и положительных температур – выявление общей тенденции к оттаиванию или промерзанию грунта и выявлению негативных процессов оттаивания и пучения. В таблице приведена максимальная температура трубопровода, характеризующая основной температурный режим за период эксплуатации.

3. *Коэффициент теплопроводности трубы с учетом тепловой изоляции (λ , Вт/м²·°C).*

Фактор, влияющий на передачу тепловой энергии от продукта через стенку трубопровода и изоляцию во вмещающие грунты основания.

4. *Защитные мероприятия (ЗМ).*

Основной фактор, описывающий применяемые защитные мероприятия. В данном исследовании не рассматривались защитные мероприятия, относящиеся к трубопроводу, а только к основанию трубопровода.

Для определения данного фактора была проведена нормализация путем присвоения численного значения определенному мероприятию или сочетанию мероприятий. Таким образом, всего было выделено 3 значения:

1 у.е. – соответствует применению только тепловой изоляции;

2 у.е. – соответствует применению тепловой изоляции и замены грунтов;

3 у.е. – соответствует тепловой изоляции и температурной стабилизации грунтов.

5. *Средняя относительная осадка при оттаивании грунта (δ , д.е.).*

Фактор, характеризующий деформации многолетнемерзлого грунтового основания при оттаивании без нагрузки. В таблице приведено усредненное значение относительной осадки грунтов, вмещающих тело трубопровода.

6. *Температура на глубине нулевых амплитуд (T_0 , °C).*

Геологический фактор, характеризующий температуры ММГ в зоне расположения трассы трубопровода.

7. *Литологическое строение (G).*

Фактор, обозначающий литологическое строение, описание преобладающих типов грунтов, вмещающих подземный трубопровод. Для классификации геологических тел протяженного объекта, сочетающего в себе изменчивое строение тел с нестационарными режимами, принято разделение среды на монопородные геологические тела первого уровня (МГТ-1), согласно схемы разделения геологической среды на литосистемы, предложенной Г.К. Бондариком. Разделение среды проведено по наличию превалирующего литологического элемента, встреченного по результатам бурения инженерно-геологических скважин на объекте и принято единым для всего геологического разреза.

Для определения данного фактора была проведена нормализация путем присвоения численного значения определенному МГТ-1:

1 у.е. – соответствует суглинку (глине); 2 у.е. – соответствует песку (супеси); 3 у.е. – соответствует крупнообломочным грунтам; 4 у.е. – соответствует скальным грунтам.

8. *Среднегодовая температура атмосферного воздуха ($T_{в.ср}$, °C).*

Климатический фактор, характеризующий температуру атмосферы в районе расположения трассы трубопровода.

9. *Среднегодовая скорость ветра ($V_{ср}$, м/с).*

Климатический фактор, характеризующий скорость ветра в районе расположения трассы трубопровода.

10. *Средняя из наибольших за зимний период средних декадных значений высота снежного покрова (S_{cp} , см).*

Фактор, характеризующий усредненное значение высоты снега в зимний период за длительный период наблюдений на метеостанции, отражающий его многолетнее значение в зимний период.

11. *Усредненный ореол оттаивания (глубина оттаивания ММГ) (L , м).*

Фактор, характеризующий усредненное значение прогнозного ореола оттаивания по трассе трубопровода для конкретного объекта.

4.2.4. Результат первичного анализа

Результатом сбора и анализа данных является таблица 4.1, описывающая примененные в проектах защитные мероприятия для 86 трубопроводов, находящихся в двух климатических регионах.

Среди примененных защитных мероприятий тепловая изоляция разной толщины применяется на 100% трубопроводов, но применяется на участках, расположенных на многолетнемерзлых грунтах. Наибольшая толщина тепловой изоляции – 200 мм (1%), самая распространенная толщина тепловой изоляции – 150 мм (44 %), вторая по распространенности толщина изоляции – 100 мм (17%). Тепловая изоляция толщиной 115 мм встречена на 2 % объектов, различные толщины от 50 мм до 100 мм – на 22%, менее 50 мм всего на 13 % объектов. Однако, при рассмотрении мероприятий по разным климатическим условиям, распределение для каждого региона изменяется – в Иркутской области ярко выражен факт использования небольших толщин тепловой изоляции и уменьшения использования в проектах по мере увеличения толщин. В ЯНАО наоборот, более чем в половине проектов используется толщина 150 мм (таблица 4.2).

Защитные мероприятия по замене грунтов отмечены на 27 объектах из 86 (31%), причем всего 2 объекта – в Иркутской области. Мощность заменяемого грунта переменна – от 0,5 до 3,0 метров.

Мероприятия по активной температурной стабилизации грунтов (применение СОУ) установлены на 8 объектах из 86 (9,3 %), из них в Иркутской области – 2 объекта, в ЯНАО – оставшиеся 6.

На данных объектах были использованы разные схемы установки СОУ для подземных трубопроводов – сплошная установка, с установкой термостабилизаторов с обеих сторон трубопровода с определенным шагом вдоль трубопровода, а также применены намораживаемые грунтовые опоры – замороженные локально ММГ под телом трубопровода, создающие неоттаивающее основание, с установкой данных опор с расчетным шагом вдоль трубопровода.

Для поиска закономерностей между принятыми защитными мероприятиями и другими факторами, стоит отметить среднюю относительную осадку при оттаивании мерзлого грунта. Проведем анализ объектов по фактору просадочности: при относительной осадке менее 0,03 д.е. – непросадочные грунты, при относительной осадке от 0,03 до 0,1 д.е. – малопросадочные, выше 0,1 д.е. – просадочные.

В результате, просадочные грунты встречены на 50 объектах (58%), малопросадочные грунты – 33 объекта (38%), непросадочные грунты – на 3 объектах (4%). При этом, распределение между всеми типами просадочности в Иркутской области примерно равное, а вот в ЯНАО заметно преобладание просадочных грунтов – около 62 % объектов региона, что и сказывается на применяемых защитных мероприятиях.

Также дополнительным обоснованием к применяемым мероприятиям является фактор по геологической обстановке (литологическому строению) – на всех объектах в ЯНАО выделены дисперсные связные и несвязные грунты, в Иркутской области же помимо дисперсных были выделены полускальные и скальные грунты, являющиеся хорошим основанием и не требующим, в большинстве случаев, применения дополнительных защитных мероприятий.

Таблица 4.1- Факторная таблица инженерных условий, характеристик трубопроводов и примененных защитных мероприятий

№	Диаметр трубы D, м	Температура продукта T, °C	Коэффициент теплопередачи трубопровода с тепловой изоляцией λ , Вт/(м ² х°C)	Защитное мероприятие в соответствии с типизацией, ЗМ	Средняя относительная осадка при оттаивании грунта δ , д.е.	Средняя температура ММГ на глубине нулевых амплитуд T ₀ , °C	Литологическое строение соответствии с разделением на МГТ, G	Среднегодовая температура воздуха Tв.ср, °C	Среднегодовая скорость ветра Vср, м/с	Средняя из наибольших за зимний период средних декадных значений высота снежного покрова Scp, см	Усредненный ореол оттаивания L, м
1	0,325	31	0,161	1	0,098	-0,46	1	-5,5	2,2	52	3,5
2	0,219	3	0,242	1	0,051	-0,34	1	-5,5	2	52	5,1
3	0,159	45	0,135	2	0,051	-0,34	1	-5,5	2	52	4,7
4	0,219	3	0,204	1	0,06	-0,65	3	-5,5	2	52	3,4
5	0,114	11,4	0,123	2	0,06	-0,65	3	-5,5	2	52	3,7
6	0,159	26	0,135	1	0,044	-0,3	4	-5,5	2	52	7,4
7	0,168	31	0,095	1	0,044	-0,3	4	-5,5	2	52	8,5
8	0,114	31	0,214	1	0,044	-0,32	4	-5,5	2	52	5,7
9	0,114	37,5	0,593	1	0,036	-0,44	3	-5,5	2	52	3,1
10	0,114	3	0,819	1	0,063	-0,35	4	-5,5	2,2	52	1,6
11	0,114	3	0,819	1	0,063	-0,35	4	-5,5	2,2	52	1,4
12	0,114	28	0,703	1	0,063	-0,35	4	-5,5	2,2	52	3
13	0,325	2	0,442	1	0,071	-0,3	1	-5,5	2,2	52	2,1
14	0,273	30	0,435	1	0,071	-0,3	1	-5,5	2,2	52	4,9
15	0,325	1	0,442	1	0,093	-0,4	3	-5,5	2,2	52	2,8
16	0,219	30	0,417	3	0,093	-0,4	3	-5,5	2,2	52	4,1
17	0,219	3	0,576	1	0,081	-0,2	1	-5,5	2,2	52	3,7
18	0,168	30	0,663	1	0,081	-0,36	1	-5,5	2,2	52	4,4
19	0,219	50	0,576	1	0,069	-0,3	1	-5,5	2,2	52	6
20	0,377	16,3	0,306	3	0,053	-0,42	2	-6	3,5	83	0
21	0,63	26	0,345	2	0,127	-0,44	1	-4,8	2,7	65	0
22	0,273	13	0,566	1	0,05	-0,7	2	-4,8	2,7	65	1,25

№	Диаметр трубы D, м	Температура продукта T, °C	Коэффициент теплопередачи трубопровода с тепловой изоляция λ , Вт/(м ² х°C)	Защитное мероприятие в соответствии с типизацией, ЗМ	Средняя относительная осадка при оттаивании грунта δ , д.е.	Средняя температура ММГ на глубине нулевых амплитуд T ₀ , °C	Литологическое строение соответствии с разделением на МГТ, G	Среднегодовая температура воздуха Tв.ср, °C	Среднегодовая скорость ветра Vср, м/с	Средняя из наибольших за зимний период средних декадных значений высота снежного покрова Scp, см	Усредненный ореол оттаивания L, м
23	0,426	32	0,267	1	0,127	-0,54	1	-4,8	2,7	65	3,8
24	0,63	28	0,182	2	0,127	-0,54	1	-4,8	2,7	65	1,3
25	0,273	14	0,431	1	0,127	-0,67	2	-4,8	2,7	65	3,7
26	0,426	9	0,263	3	0,124	-0,4	2	-4,8	2,7	65	0
27	0,325	10	0,416	1	0,124	-0,4	2	-4,8	2,7	65	4,4
28	0,53	8	0,317	1	0,124	-0,4	1	-4,8	2,7	65	4,09
29	0,53	9	0,177	1	0,124	-0,4	1	-4,8	2,7	65	4,25
30	0,273	12	0,431	1	0,124	-0,4	1	-4,8	2,7	65	5,66
31	0,273	13	0,431	3	0,124	-0,4	1	-4,8	2,7	65	0
32	0,273	12	0,431	1	0,048	-0,8	1	-4,8	2,7	65	2,1
33	0,426	8	0,17	1	0,063	-0,55	1	-4,8	2,7	65	4,9
34	0,219	11	0,147	1	0,063	-0,55	1	-4,8	2,7	65	3,5
35	0,159	13	0,665	2	0,138	-1,1	1	-7,1	4	72	2,1
36	0,273	39	0,155	2	0,138	-1,1	1	-7,1	4	72	4,6
37	0,273	35	0,155	2	0,138	-1,1	2	-7,1	4	72	6,25
38	0,219	43	0,242	2	0,081	-0,82	1	-7,1	4	72	4,2
39	0,219	48	0,242	2	0,081	-0,53	2	-7,1	4	72	4,4
40	0,219	44	0,242	2	0,081	-0,91	2	-7,1	4	72	3,4
41	0,159	30	0,135	2	0,115	-1,63	2	-7,1	4	72	1,1
42	0,426	25	0,273	1	0,035	-0,15	2	-7,1	4	72	3,7
43	0,53	37	0,177	3	0,035	-0,35	1	-5,9	3,1	83	0,7
44	0,72	30	0,292	3	0,036	-0,35	1	-5,9	3,1	83	1
45	0,219	50	0,147	1	0,036	-0,58	1	-5,9	3,1	83	8,2
46	0,273	50	0,155	1	0,036	-0,58	1	-5,9	3,1	83	5
47	0,325	37	0,161	1	0,036	-0,58	1	-5,9	3,1	83	5,9

№	Диаметр трубы D, м	Температура продукта T, °C	Коэффициент теплопередачи трубопровода с тепловой изоляцияй λ , Вт/(м ² х°C)	Защитное мероприятие в соответствии с типизацией, ЗМ	Средняя относительная осадка при оттаивании грунта δ , д.е.	Средняя температура ММГ на глубине нулевых амплитуд T ₀ , °C	Литологическое строение соответствии с разделением на МГТ, G	Среднегодовая температура воздуха Tв.ср, °C	Среднегодовая скорость ветра Vср, м/с	Средняя из наибольших за зимний период средних декадных значений высота снежного покрова Scp, см	Усредненный ореол оттаивания L, м
48	0,325	21	0,45	1	0,078	-0,4	1	-5,9	3,1	83	3,2
49	0,53	18	0,317	1	0,078	-0,4	1	-5,9	3,1	83	4,8
50	0,426	21	0,43	1	0,078	-0,4	1	-5,9	3,1	83	3,1
51	0,219	29	0,576	1	0,078	-0,4	1	-5,9	3,1	83	2,8
52	0,426	29	0,43	1	0,078	-0,4	1	-5,9	3,1	83	3,6
53	0,219	30	0,576	1	0,078	-0,4	1	-5,9	3,1	83	4,1
54	0,53	12	0,282	1	0,089	-0,49	1	-5,9	3,1	83	4,2
55	0,53	19	0,177	1	0,089	-0,49	2	-5,9	3,1	83	6,2
56	0,325	22	0,161	2	0,089	-0,49	1	-5,9	3,1	83	5,1
57	0,426	28	0,17	1	0,089	-0,49	2	-5,9	3,1	83	5
58	0,426	28	0,17	2	0,089	-0,49	1	-5,9	3,1	83	6,8
59	0,273	25	0,155	2	0,089	-0,49	1	-5,9	3,1	83	5,7
60	0,325	20	0,161	1	0,037	-0,4	1	-5,9	3,1	83	5,6
61	0,426	17,5	0,17	1	0,037	-0,4	1	-5,9	3,1	83	5,8
62	0,219	26,5	0,147	1	0,037	-0,51	1	-5,9	3,1	83	5,4
63	0,273	26,5	0,155	1	0,037	-0,51	1	-5,9	3,1	83	6,1
64	0,273	18	0,155	2	0,042	-0,47	2	-5,9	3,1	83	1,2
65	0,426	17	0,273	1	0,059	-0,47	2	-5,9	3,1	83	1,7
66	0,63	14	0,288	1	0,036	-0,47	1	-5,9	3,1	83	3,2
67	0,53	30	0,177	1	0,031	-0,47	2	-5,9	3,1	83	4,7
68	0,325	30	0,262	1	0,03	-0,47	2	-5,9	3,1	83	4,3
69	0,219	30	0,242	1	0,041	-0,47	1	-5,9	3,1	83	3,1
70	0,53	14	0,605	1	0,033	-0,62	1	-5,9	3,1	83	7,5
71	0,72	27,2	0,292	1	0,038	-0,52	2	-5,9	3,1	83	3,9
72	0,219	26,4	0,147	2	0,056	-0,48	1	-5,9	3,1	83	1,8

№	Диаметр трубы D, м	Температура продукта T, °C	Коэффициент теплопередачи трубопровода с тепловой изоляцияй λ , Вт/(м ² х°C)	Защитное мероприятие в соответствии с типизацией, ЗМ	Средняя относительная осадка при оттаивании грунта δ , д.е.	Средняя температура ММГ на глубине нулевых амплитуд T ₀ , °C	Литологическое строение соответствии с разделением на МГТ, G	Среднегодовая температура воздуха Tв.ср, °C	Среднегодовая скорость ветра Vср, м/с	Средняя из наибольших за зимний период средних декадных значений высота снежного покрова Scp, см	Усредненный ореол оттаивания L, м
73	0,325	26,4	0,161	2	0,056	-0,52	1	-5,9	3,1	83	4,4
74	0,219	26,4	0,147	2	0,056	-0,43	1	-5,9	3,1	83	1,6
75	0,426	26,4	0,17	2	0,056	-0,57	2	-5,9	3,1	83	4,1
76	0,53	30	0,177	2	0,056	-0,53	1	-5,9	3,1	83	8,2
77	0,53	29,2	0,177	2	0,056	-0,55	1	-5,9	3,1	83	5,9
78	0,273	19	0,155	2	0,056	-0,48	1	-5,9	3,1	83	1,6
79	0,53	19,6	0,177	2	0,056	-0,48	1	-5,9	3,1	83	3,9
80	0,53	20,5	0,177	2	0,056	-0,54	1	-5,9	3,1	83	3,2
81	0,53	19,6	0,177	2	0,056	-0,57	2	-5,9	3,1	83	6,2
82	0,53	16	0,177	1	0,056	-0,62	1	-5,9	3,1	83	2,8
83	0,63	17,9	0,182	2	0,056	-0,65	1	-5,9	3,1	83	3,3
84	0,72	14,3	0,185	1	0,056	-0,58	1	-5,9	3,1	83	4,2
85	0,219	50	0,147	1	0,036	-0,5	1	-5,9	3,1	83	9,1
86	0,273	50	0,155	1	0,036	-0,59	2	-5,9	3,1	83	5,2

Таблица 4.2- Распределение мероприятий по тепловой изоляции в различных климатических условиях – в Иркутской области и ЯНАО

Толщина тепловой изоляции, мм	ЯНАО		Иркутская область	
	Количество объектов, шт.	Процент от общего числа объектов региона, %	Количество объектов, шт.	Процент от общего числа объектов региона, %
200	-	-	1	5
150	37	55	2	11
115	-	-	2	11
100	12	18	3	16
от 100 до 50	14	21	4	21
менее 50	4	6	7	37

4.3. Применение методики многофакторного корреляционно-регрессионного анализа

Данный метод представляет собой методику исследования факторов (параметров системы или их совокупностей), связь которых с результативным показателем в отличие от функциональной является неполной, вероятностной (корреляционной) [116].

Корреляционный анализ представляет собой совокупность методов статистической обработки результатов экспериментов или наблюдений, зависящих от различных одновременно действующих факторов и предназначенных для анализа существенности влияния данных факторов на результаты экспериментов или наблюдений [117-119].

Корреляционный анализ позволяет выявить наиболее значимые факторы и установить степень их влияния на интересующие показатели. Регрессионный анализ – это инструмент для количественного определения значения одной зависимой переменной на основании других независимых.

4.3.1. Теоретическая основа многофакторного корреляционного анализа

При проведении многофакторного корреляционного анализа выделяется несколько этапов:

1) формируются факторы, которые оказывают воздействие на изучаемый показатель, и отбираются наиболее существенные для корреляционного анализа;

2) исходная информация, необходимая для корреляционного анализа, оценивается на возможность применения в анализе – проводится проверка однородности выборки (распределения), соответствие закону нормального распределения;

3) моделируется связь между сформированными факторами (x) и результативным показателем (Y), изучается их характер, и обосновывается математическое уравнение, которое наиболее точно выражает сущность исследуемой зависимости;

4) проводится расчет основных показателей связи корреляционного анализа;

5) проводится статистическая оценка результатов корреляционного анализа и определяется возможность их практического применения.

При корреляционной связи вероятностная зависимость проявляется только в массе наблюдений, в которых проявляется взаимосвязь между исследуемыми факторами и результативным показателем.

Отбор факторов для корреляционного анализа является критически важным моментом, от которого зависит точность выводов, в связи с чем, при выборе факторов необходимо учитывать следующие аспекты:

1. Между показателями должна быть «физическая» связь, которая раскрывает сущность изучаемых явлений. Анализ факторов, которые имеют только математическое соотношение не имеет никакого практического смысла.

2. Необходимо отбирать самые значимые факторы, которые оказывают решающее воздействие на результативный показатель.

3. Все факторы должны быть количественно измеримы, т.е. иметь единицу измерения, либо быть нормированы, то есть приведены к численной форме, при

этом, значения экстремумов должно учитывать их соответствие выборке по нормальному закону распределения.

4. Не рекомендуется включать в корреляционную модель взаимосвязанные факторы. Если парный коэффициент корреляции между двумя факторами больше 0,85, то во избежание искажения результатов, один из них необходимо исключить.

5. Объем выборки должен быть достаточен и обширен для получения корректных результатов статистического анализа (объем выборки должен превышать число исследуемых факторов до трех раз)

После подбора факторов и формирования исходной выборки для анализа, требуется проверка ее на однородность, то есть распределение значений около среднего уровня. Критерием однородности информации служит среднеквадратическое отклонение и коэффициент вариации, которые рассчитываются по каждому факторному и результативному показателю. При коэффициенте вариации менее 50%, распределение считается неоднородным.

Также потребуется проверка исходной выборки на соответствие нормальному закону распределения, согласно которому, основная масса исследуемых сведений по каждому показателю должна быть сгруппирована около ее среднего значения, а объекты с очень маленькими значениями или с очень большими должны встречаться как можно реже. Для оценки принадлежности статистического ряда к нормальному закону распределения используются расчетные характеристики асимметрии (А) и эксцесса (Е), а также их стандартных ошибок распределения. Критерием соответствия нормальному закону является отношение показателей асимметрии и эксцесса к их стандартным ошибкам, которое не должно превышать значение 3.

Следующим этапом рассчитываются матрицы коэффициентов корреляции, уравнение множественной регрессии, а также показатели, с помощью которых

оцениваются надежность коэффициентов корреляции. Проверка достоверности коэффициентов модели осуществляется при помощи критерия Стьюдента.

Следующим этапом многофакторного анализа является расчет уравнения регрессии. Если связь всех факторных показателей с результативным носит прямолинейный характер, то для записи этих зависимостей можно использовать линейную функцию:

$$Y = a + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n$$

Если связь между результативным и факторными показателями носит криволинейный характер, то может быть использована степенная функция:

$$Y = b_0 * x_1^{b_1} * x_2^{b_2} * \dots * x_n^{b_n}$$

или логарифмическая:

$$\lg Y_x = b_0 + b_1 \lg x_1 + b_2 \lg x_2 + \dots + b_n \lg x_n$$

Адекватность разных моделей фактическим зависимостям, полнота связи проверяется по критерию Фишера, показателю средней ошибки аппроксимации и величине множественного коэффициента детерминации.

Коэффициенты регрессии в уравнении связи имеют разные единицы измерения, что делает их несопоставимыми, если возникает вопрос о сравнительной силе воздействия факторов на результативный показатель. Чтобы привести их в сопоставимый вид, рассчитывают стандартизированные коэффициенты регрессии.

Результаты регрессионного анализа могут быть использованы для прогнозирования результативного показателя. С этой целью необходимо в полученное уравнение связи подставить прогнозное значение факторных показателей.

Таким образом, многофакторный корреляционно-регрессионный анализ на основе большой выборки данных, позволяет оценить факторы, имеющие

наибольшее влияние на результативный показатель и применить реальные данные для формирования прогнозного уравнения.

4.3.2. Проведение корреляционного анализа

Исходной выборкой для проведения корреляционного анализа является таблица 4.1 – результат первичного анализа инженерных условий и защитных мероприятий для 86 подземных трубопроводов в двух климатических регионах.

Все факторы таблицы применяются при проведении теплотехнических расчетов оттаивания многолетнемерзлых грунтов и при расчете осадки ММГ в специализированном программном обеспечении, характеризуют физические параметры трубопровода, геологические или климатические параметры, совместно влияющие на единый фактор – усредненный ореол оттаивания L , в связи с чем, L принят результативным показателем (Y), а остальные показатели – факторными (x).

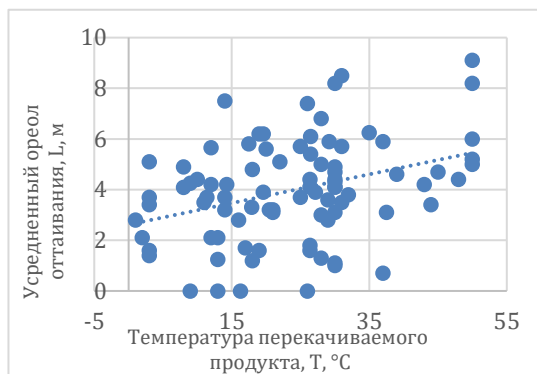
Статистическая обработка проводилась в соответствии с методикой, описанной в п. 4.3.1, с применением Microsoft Excel (модуль «Анализ данных») и STATISTICA ver.10.

На первом этапе осуществлялась проверка и анализ статистических показателей составленной выборки, формировались таблицы парной корреляции между факторами. В результате проведенных расчетов, анализа основных статистических показателей, можно отметить, что коэффициент вариации у преобладающего большинства факторов менее 50%, значит распределение является однородным.

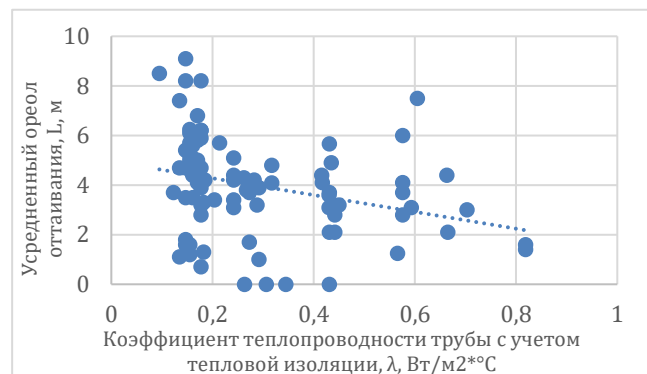
В результате проверки соответствия выборки закону нормального распределения по отношениям показателей асимметрии и эксцесса к их стандартным ошибкам (таблица 4.4), характер распределения практически всех факторов не противоречит закону нормального распределения.

Анализ матрицы коэффициентов парной корреляции (таблица 4.5) показал, что результирующий показатель «Усредненный ореол оттаивания» имеет наиболее тесную связь со следующими показателями: ЗМ (-0,379), температура продукта T (0,352), коэффициент теплопроводности трубы λ (-0,296), средняя относительная осадка при оттаивании δ (-0,22). Судя по коэффициентам корреляции, в выборке отсутствуют доминантные факторные признаки, имеющие определяющую связь на результирующий признак, выделены 4 фактора, с практически равнозначным влиянием на результирующий показатель, остальные признаки не имеют тесной связи с результирующим показателем.

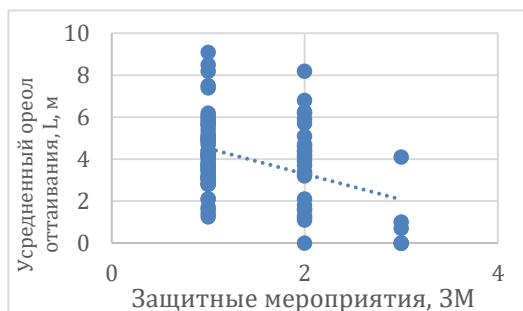
Диаграммы распределения (поля корреляции) наиболее значимых факторов представлены на рисунке 4.6.



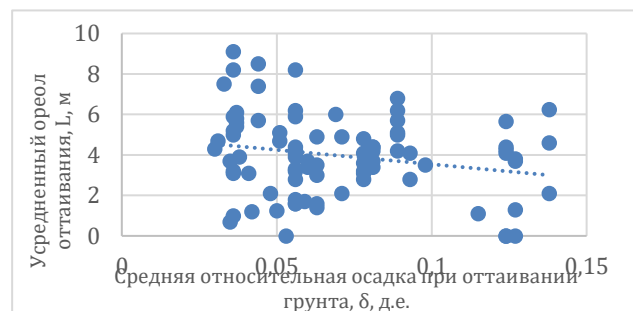
а) Температура перекачиваемого продукта, T , °C



б) Коэффициент теплопроводности трубы с учетом тепловой изоляции, λ , Вт/м²*°C



в) Защитные мероприятия, ЗМ



г) Средняя относительная осадка при оттаивании грунта, δ , д.е.

Рисунок 4.6 – Диаграммы распределения (поля корреляции) значимых факторов (а-г) и результирующего показателя

Таблица 4.3- Описательная статистика по выборке для функции «Ореол оттаивания»

	D	T	λ	3M	δ	T ₀	G	Тв.ср.	Vср.	Сср.	L
Объем выборки, N	86	86	86	86	86	86	86	86	86	86	86
Среднее арифметическое, m	0,34	23,79	0,29	1,44	0,07	-0,51	1,56	-5,75	2,91	72,20	3,97
Медиана, Me	0,30	26,00	0,21	1,00	0,06	-0,48	1,00	-5,90	3,10	83,00	4,10
Мода, Mo	0,219	30,0	0,177	1,0	0,056	-0,4	1,0	-5,9	3,10	83,00	Несколько
Сумма, Sum	29,61	2045,60	25,05	124,00	6,01	-43,71	134,00	-494,10	249,90	6209,00	341,20
Минимум, min	0,11	1,00	0,10	1,00	0,03	-1,63	1,00	-7,10	2,00	52,00	0,00
Максимум, max	0,72	50,00	0,82	3,00	0,14	-0,15	4,00	-4,80	4,00	83,00	9,10
Стандартное отклонение, δ	0,16	12,44	0,18	0,63	0,03	0,21	0,89	0,59	0,53	12,71	2,01
Асимметричность, A	0,59	0,27	1,28	1,11	0,78	-2,59	1,62	-0,47	0,09	-0,62	0,14
Стандартная ошибка асимметрии, δ_A	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26
Экссесс, E	-0,55	-0,31	0,81	0,20	-0,44	10,13	1,76	0,91	-0,03	-1,26	-0,02
Стандартная ошибка эксцесса, δ_E	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51
Коэффициент вариации, V	0,46	0,52	0,60	0,43	0,44	-0,41	0,57	-0,10	0,18	0,17	0,50

Таблица 4.4- Критерии проверки закона распределения случайных величин соответствия нормальному распределению

	D	T	λ	3M	δ	T ₀	G	Тв.ср.	Vср.	Сср.	L
$\tilde{t}_1 = \frac{A}{\delta_A}$	2,273079	1,0463882	4,936577	4,284726	2,985283	-9,98837	6,234832	-1,809648	0,328108	-2,374021	0,519919
$\tilde{t}_2 = \frac{E}{\delta_E}$	-1,708	-0,611677	1,58401	0,379744	-0,86571	19,70626	3,421885	1,7707841	-0,06327	-2,458705	-0,03652

Таблица 4.5- Матрица парных коэффициентов корреляции по выборке для функции «Ореол оттаивания»

	D	T	λ	ЗМ	δ	T ₀	G	Тв.ср	Vср.	Scp.	L
D	1										
T	-0,158	1									
λ	-0,265	-0,286	1								
ЗМ	0,129	0,126	-0,235	1							
δ	0,002	-0,192	0,175	0,204	1						
G	0,081	-0,156	0,199	-0,199	-0,303	1					
T ₀	-0,395	-0,107	0,225	-0,089	-0,108	0,087	1				
Тв.ср.	0,072	-0,426	0,196	-0,201	0,138	0,462	0,047	1			
Vср.	0,260	0,309	-0,291	0,285	0,095	-0,558	-0,386	-0,739	1		
Scp.	0,494	0,223	-0,405	0,150	-0,264	-0,183	-0,496	-0,414	0,730	1	
L	-0,064	0,352	-0,296	-0,379	-0,220	0,051	-0,018	-0,139	-0,023	0,095	1
	- значимые факторы						- незначимые факторы				

Для оценки надежности коэффициентов корреляции проведем проверку по критерию Стьюдента (t), с учетом количества степеней свободы (V=N-1=85) и при уровне доверительной вероятности, α=5% по формулам:

$$t = \frac{r}{\sigma_r}; \sigma_r = \frac{1-r^2}{\sqrt{n-1}},$$

где t – критерий Стьюдента; r – коэффициент корреляции; σ_r – среднеквадратическая ошибка коэффициента корреляции; n – объем выборки.

Табличные значения приняты в соответствии с [120]. Расчетные и табличные значения критерия Стьюдента t приведены в таблице 4.6. Расчетные значения коэффициентов корреляции для факторов T, λ, ЗМ и δ больше табличных, что значит, что величина коэффициента корреляции является значимой, а связь между результативным и факторными показателями является надежной.

Таблица 4.6- Оценка значимости коэффициентов корреляции по критерию Стьюдента

Параметр	D	T	λ	ЗМ	δ	T ₀	G	Тв.ср	Vср.	Scp.
r	-0,064	0,352	-0,296	-0,379	-0,220	0,051	-0,018	-0,139	-0,023	0,095
σ _r	0,108	0,095	0,099	0,093	0,103	0,108	0,108	0,106	0,108	0,107
t – фактический	-0,584	3,700	-2,987	-4,082	-2,129	0,475	-0,166	-1,310	-0,209	0,881
t - табличный	1,988	1,988	1,988	1,988	1,988	1,988	1,988	1,988	1,988	1,988

Следующим этапом в анализе является расчет уравнения связи. При помощи модуля «Регрессия» пакета «Анализ данных» в Microsoft Excel был использован пошаговый способ: первоначально в расчете используется фактор, имеющий наибольший коэффициент корреляции по отношению к результирующему показателю, и далее, по степени убывания значений коэффициентов корреляции в уравнение вводятся следующие факторы. На каждом из шагов рассчитывается уравнение связи, множественный коэффициент корреляции R и детерминации D, критерий Фишера F и стандартная ошибка E. Чем выше показатели R, D и F, и ниже стандартная ошибка E, тем точнее уравнение связи. Если при включении в уравнение регрессии фактора происходит ухудшение какого-либо из показателей модели, данный фактор не учитывается для дальнейшего расчета и выбирается наиболее оптимальное уравнение связи. Ранжируя факторы по значению коэффициента корреляции, произведем подбор оптимального уравнения связи, подробные шаги которого представлены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Расчет оптимального уравнения связи (пошаговый метод)

№ шага	Фактор	Уравнение связи (регрессии)	R	D	F	E	Итог
1	введен X_1	$Y=5,7221-1,2169 \cdot X_1$	0,379	0,144	14,1	1,867	включен
2	введен X_2	$Y=4,4012-1,3817 \cdot X_1+0,0655 \cdot X_2$	0,553	0,306	18,3	1,691	включен
3	введен X_3	$Y=6,0874-1,5891 \cdot X_1+0,0521 \cdot X_2-3,6642 \cdot X_3$	0,629	0,396	17,89	1,588	включен
4	введен X_4	$Y=6,0901-1,5884 \cdot X_1+0,0520 \cdot X_2-3,6624 \cdot X_3-0,0538 \cdot X_4$	0,629	0,395	13,26	1,597	исключен
5	введен X_5	$Y=5,235-1,6107 \cdot X_1+0,0489 \cdot X_2-3,6364 \cdot X_3-0,1651 \cdot X_5$	0,631	0,398	13,36	1,595	включен
6	введен X_6	$Y=5,5952-1,6105 \cdot X_1+0,0487 \cdot X_2-3,8883 \cdot X_3-0,2436 \cdot X_5-0,0101 \cdot X_6$	0,633	0,401	10,69	1,601	исключен
7	введен X_7	$Y=5,4913-1,5995 \cdot X_1+0,0476 \cdot X_2-3,7732 \cdot X_3-0,1585 \cdot X_5-0,4662 \cdot X_7$	0,632	0,399	10,61	1,604	исключен
8	введен X_8	$Y=4,8122-1,5781 \cdot X_1+0,0475 \cdot X_2-3,7771 \cdot X_3-0,3370 \cdot X_5+1,0544 \cdot X_8$	0,638	0,407	10,98	1,593	включен
9	введен X_9	$Y=4,3968-1,5129 \cdot X_1+0,0466 \cdot X_2-4,0534 \cdot X_3-0,7791 \cdot X_5+0,5434 \cdot X_8-0,8174 \cdot X_9$	0,651	0,424	9,71	1,579	включен
10	введен X_{10}	$Y=4,4360-1,5072 \cdot X_1+0,0460 \cdot X_2-4,0034 \cdot X_3-0,8540 \cdot X_5+0,4859 \cdot X_8-0,9433 \cdot X_9-0,0917 \cdot X_{10}$	0,652	0,426	8,26	1,587	исключен

где Y – результирующий показатель – усредненный ореол оттаивания, м
 X_1 – Защитное мероприятие, д.е.
 X_2 – Температура продукта, °C
 X_3 – Коэффициент теплопередачи трубопровода с тепловой изоляцией, Вт/(м² х °C)
 X_4 – Средняя относительная осадка при оттаивании грунта, д.е.
 X_5 – Среднегодовая температура воздуха, °C
 X_6 – Средняя из наибольших за зимний период средних декадных значений высота снежного покрова, см
 X_7 – Диаметр трубы, м
 X_8 – Средняя температура ММГ на глубине нулевых амплитуд, °C
 X_9 – Среднегодовая скорость ветра, м/с
 X_{10} – Литологическое строение соответствии с разделением на МГТ

В результате, исключая часть факторов, получаем оптимальное уравнение связи:

$$Y = 4,3968 - 1,5129 \cdot X_1 + 0,0466 \cdot X_2 - 4,0534 \cdot X_3 - 0,7791 \cdot X_5 + 0,5434 \cdot X_8 - 0,8174 \cdot X_9$$

Далее для формирования вывода о сравнительной степени воздействия каждого фактора на величину результирующего показателя, рассчитывают стандартизированные коэффициенты регрессии по формуле:

$$\beta_i = b_i \frac{\sigma_{x_i}}{\sigma_y}$$

где σ_{x_i} – среднеквадратическое отклонение набора данных фактора;

σ_y – среднеквадратическое отклонение набора данных результирующего показателя.

Таблица 4.8 - Стандартизованные коэффициенты

Параметр	T	λ	ЗМ	T0	Tв.ср	Vср.
σ_{x_i}	0,017	1,181	0,303	1,140	0,569	0,941
σ_y	1,579	1,579	1,579	1,579	1,579	1,579
b_i	0,047	-4,053	-1,5129	0,543	-0,779	-0,817
β_i	0,001	-3,031	-0,290	0,392	-0,281	-0,487

Рассмотрев стандартизованные коэффициенты и уравнение регрессии, можно сказать, что больше всего на значение ореола оттаивания влияет средняя относительная осадка при оттаивании грунта (δ), коэффициент теплопроводности трубы с учетом тепловой изоляции (λ), средняя скорость ветра ($V_{ср}$), средняя температура атмосферы ($T_{в.ср}$).

При помощи модуля «Регрессия» также был рассчитан множественный коэффициент корреляции $R=0,651$, который указывает на значительную связь всего набора факторов с результатом. Нескорректированный коэффициент множественной детерминации $R^2=0,424$, что свидетельствует о том, что 42,4% вариации результатов объясняется используемыми факторами.

Также проведем оценку значимости и правомерности использования для практических целей уравнения регрессии при помощи критерия Фишера. Табличное значение критерия Фишера при $k_1=6$ (количество факторов в уравнении регрессии), $k_2=81$ (разность между объемом выборки и количества факторов уравнения + 1), $F_{\text{табл.}}=2,209$; расчетное значение критерия Фишера при уровне значимости $\alpha=5\%$, $F_{\text{набл.}}=9,71$. Поскольку значение наблюдаемого значения больше табличного, делаем вывод о значимости уравнения регрессии и коэффициента множественной детерминации, таким образом, полученное уравнение может быть применимо при прогнозировании.

Верификация прогнозного уравнения

Для верификации корректности полученного уравнения регрессии, были выбраны объектов из сформированной выборки с известным значением факторных признаков и результативного показателя. В полученное уравнение связи были подставлены значения факторов и получен прогнозный результативный показатель. Результат прогнозного значения и сравнение его с реальным проектным значением указаны в таблице 4.9. График верификации фактического усредненного оттаивания и прогнозного значения представлен на рисунке 4.7.

Таблица 4.9- Таблица верификации прогнозного уравнения

Объект	D	T	λ	ЗМ	δ	T_0	$T_{\text{в.ср.}}$	$V_{\text{ср.}}$	$S_{\text{ср.}}$	$L_{\text{факт}}$	$L_{\text{прогноз}}$
1	0,325	31	0,161	1	0,098	-0,46	1	-5,5	2,2	3,5	5,9
2	0,219	3	0,242	1	0,051	-0,34	1	-5,5	2	5,1	4,5
3	0,159	45	0,135	2	0,051	-0,34	1	-5,5	2	4,7	5,4
4	0,219	3	0,204	1	0,06	-0,65	3	-5,5	2	3,4	4,5
5	0,114	11,4	0,123	2	0,06	-0,65	3	-5,5	2	3,7	3,7
6	0,159	26	0,135	1	0,044	-0,3	4	-5,5	2	7,4	6,0

Объект	D	T	λ	3M	δ	T ₀	T _{в.ср.}	V _{ср.}	S _{ср.}	L _{факт}	L _{прогноз}
7	0,168	31	0,095	1	0,044	-0,3	4	-5,5	2	8,5	6,4
8	0,114	31	0,214	1	0,044	-0,32	4	-5,5	2	5,7	5,9
9	0,114	37,5	0,593	1	0,036	-0,44	3	-5,5	2	3,1	4,6
10	0,114	3	0,819	1	0,063	-0,35	4	-5,5	2,2	1,6	2,0
11	0,114	3	0,819	1	0,063	-0,35	4	-5,5	2,2	1,4	2,0
12	0,114	28	0,703	1	0,063	-0,35	4	-5,5	2,2	3	3,6
13	0,325	2	0,442	1	0,071	-0,3	1	-5,5	2,2	2,1	3,5
14	0,273	30	0,435	1	0,071	-0,3	1	-5,5	2,2	4,9	4,8
15	0,325	1	0,442	1	0,093	-0,4	3	-5,5	2,2	2,8	3,4
16	0,219	30	0,417	3	0,093	-0,4	3	-5,5	2,2	4,1	1,8
17	0,219	3	0,576	1	0,081	-0,2	1	-5,5	2,2	3,7	3,1
18	0,168	30	0,663	1	0,081	-0,36	1	-5,5	2,2	4,4	3,9
19	0,219	50	0,576	1	0,069	-0,3	1	-5,5	2,2	6	5,2
20	0,377	16,3	0,306	3	0,053	-0,42	2	-6	3,5	0	1,0
21	0,63	26	0,345	2	0,127	-0,44	1	-4,8	2,7	0	2,5
22	0,426	32	0,267	1	0,127	-0,54	1	-4,8	2,7	3,8	4,5
23	0,273	14	0,431	1	0,127	-0,67	2	-4,8	2,7	3,7	3,0
24	0,426	9	0,263	3	0,124	-0,4	2	-4,8	2,7	0	0,5
25	0,325	10	0,416	1	0,124	-0,4	2	-4,8	2,7	4,4	3,0
26	0,53	8	0,317	1	0,124	-0,4	1	-4,8	2,7	4,09	3,3
27	0,53	9	0,177	1	0,124	-0,4	1	-4,8	2,7	4,25	3,9
28	0,273	12	0,431	1	0,124	-0,4	1	-4,8	2,7	5,66	3,0
29	0,273	13	0,431	3	0,124	-0,4	1	-4,8	2,7	0	0,0
30	0,273	12	0,431	1	0,048	-0,8	1	-4,8	2,7	2,1	2,8
31	0,426	8	0,17	1	0,063	-0,55	1	-4,8	2,7	4,9	3,8
32	0,219	11	0,147	1	0,063	-0,55	1	-4,8	2,7	3,5	4,0
33	0,159	13	0,665	2	0,138	-1,1	1	-7,1	4	2,1	0,9
34	0,273	39	0,155	2	0,138	-1,1	1	-7,1	4	4,6	4,2
35	0,273	35	0,155	2	0,138	-1,1	2	-7,1	4	6,25	4,0
36	0,219	43	0,242	2	0,081	-0,82	1	-7,1	4	4,2	4,2
37	0,219	48	0,242	2	0,081	-0,53	2	-7,1	4	4,4	4,6
38	0,219	44	0,242	2	0,081	-0,91	2	-7,1	4	3,4	4,2
39	0,426	25	0,273	1	0,035	-0,15	2	-7,1	4	3,7	5,1
40	0,219	50	0,147	1	0,036	-0,58	1	-5,9	3,1	8,2	6,4
41	0,273	50	0,155	1	0,036	-0,58	1	-5,9	3,1	5	6,3
42	0,325	37	0,161	1	0,036	-0,58	1	-5,9	3,1	5,9	5,7
43	0,325	21	0,45	1	0,078	-0,4	1	-5,9	3,1	3,2	3,9
44	0,53	18	0,317	1	0,078	-0,4	1	-5,9	3,1	4,8	4,3
45	0,426	21	0,43	1	0,078	-0,4	1	-5,9	3,1	3,1	4,0
46	0,219	29	0,576	1	0,078	-0,4	1	-5,9	3,1	2,8	3,7
47	0,426	29	0,43	1	0,078	-0,4	1	-5,9	3,1	3,6	4,3
48	0,219	30	0,576	1	0,078	-0,4	1	-5,9	3,1	4,1	3,8
49	0,53	12	0,282	1	0,089	-0,49	1	-5,9	3,1	4,2	4,1
50	0,53	19	0,177	1	0,089	-0,49	2	-5,9	3,1	6,2	4,8
51	0,325	22	0,161	2	0,089	-0,49	1	-5,9	3,1	5,1	3,5
52	0,426	28	0,17	1	0,089	-0,49	2	-5,9	3,1	5	5,3
53	0,426	28	0,17	2	0,089	-0,49	1	-5,9	3,1	6,8	3,8

Объект	D	T	λ	3M	δ	T ₀	T _{в.ср.}	V _{ср.}	S _{ср.}	L _{факт}	L _{прогноз}
54	0,273	25	0,155	2	0,089	-0,49	1	-5,9	3,1	5,7	3,7
55	0,325	20	0,161	1	0,037	-0,4	1	-5,9	3,1	5,6	5,0
56	0,426	17,5	0,17	1	0,037	-0,4	1	-5,9	3,1	5,8	4,9
57	0,219	26,5	0,147	1	0,037	-0,51	1	-5,9	3,1	5,4	5,3
58	0,273	26,5	0,155	1	0,037	-0,51	1	-5,9	3,1	6,1	5,3
59	0,63	14	0,288	1	0,036	-0,47	1	-5,9	3,1	3,2	4,2
60	0,53	30	0,177	1	0,031	-0,47	2	-5,9	3,1	4,7	5,4
61	0,325	30	0,262	1	0,03	-0,47	2	-5,9	3,1	4,3	5,0
62	0,219	30	0,242	1	0,041	-0,47	1	-5,9	3,1	3,1	5,1
63	0,53	14	0,605	1	0,033	-0,62	1	-5,9	3,1	7,5	2,8
64	0,72	27,2	0,292	1	0,038	-0,52	2	-5,9	3,1	3,9	4,7
65	0,325	26,4	0,161	2	0,056	-0,52	1	-5,9	3,1	4,4	3,7
66	0,426	26,4	0,17	2	0,056	-0,57	2	-5,9	3,1	4,1	3,7
67	0,53	30	0,177	2	0,056	-0,53	1	-5,9	3,1	8,2	3,8
68	0,53	29,2	0,177	2	0,056	-0,55	1	-5,9	3,1	5,9	3,8
69	0,53	19,6	0,177	2	0,056	-0,48	1	-5,9	3,1	3,9	3,4
70	0,53	20,5	0,177	2	0,056	-0,54	1	-5,9	3,1	3,2	3,4
71	0,53	19,6	0,177	2	0,056	-0,57	2	-5,9	3,1	6,2	3,3
72	0,53	16	0,177	1	0,056	-0,62	1	-5,9	3,1	2,8	4,6
73	0,63	17,9	0,182	2	0,056	-0,65	1	-5,9	3,1	3,3	3,2
74	0,72	14,3	0,185	1	0,056	-0,58	1	-5,9	3,1	4,2	4,5
75	0,219	50	0,147	1	0,036	-0,5	1	-5,9	3,1	6,1	6,4
76	0,273	50	0,155	1	0,036	-0,59	2	-5,9	3,1	5,2	6,3

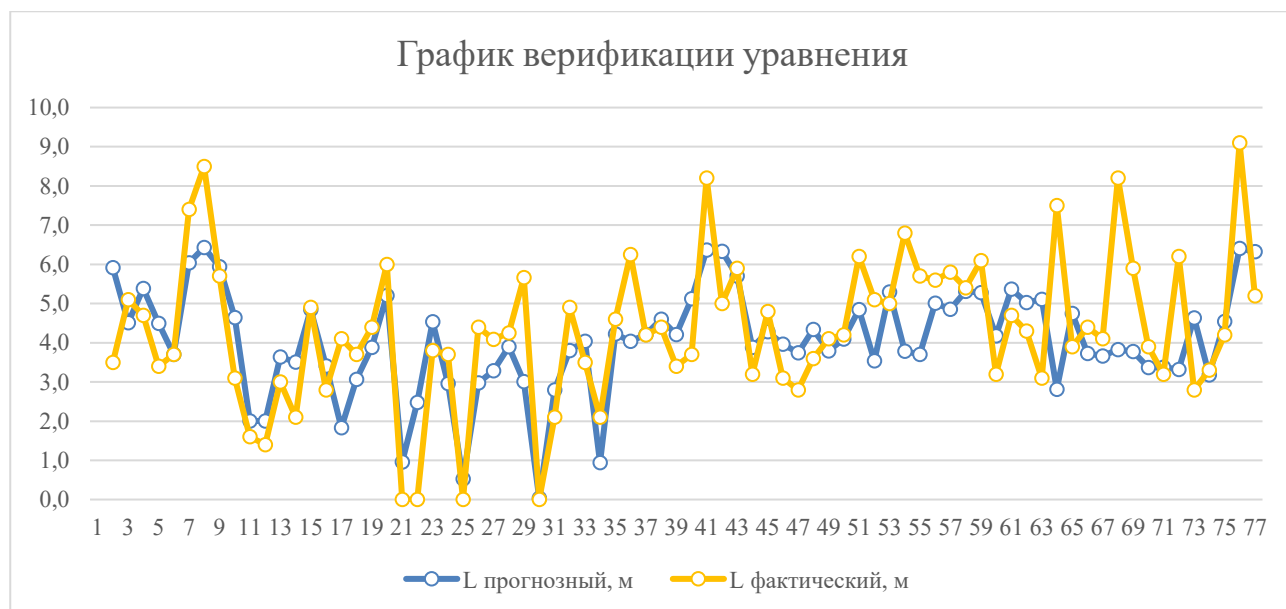


Рисунок 4.7 – График верификации прогнозного уравнения связи

Усредненная абсолютная погрешность составляет 1 метр, усредненная относительная погрешность составляет 23,1 %, что говорит о достаточно высокой точности определения результативного фактора при применении в прогнозе уравнения регрессии. В целом, полученное уравнение регрессии позволяет по заданному набору климатических (среднегодовая температура атмосферного воздуха, среднегодовая скорость ветра, средняя из наибольших за зимний период средних декадных значений высота снежного покрова) и геологических параметров (средняя относительная осадка при оттаивании грунта, температура на глубине нулевых амплитуд, литологическое строение) объекта, находящегося в исследованных регионах, а также технических параметров объекта (диаметр трубопровода, температура перекачиваемого продукта, коэффициент теплопроводности трубы с учетом тепловой изоляции, защитные мероприятия) с высокой точностью определять прогнозируемый ореол оттаивания без проведения теплотехнических расчетов. Данное уравнение имеет высокий потенциал на этапе предварительной оценки воздействия на ММГ, подбора технологического режима перекачки продукта, обоснования типа прокладки трубопровода (подземный/надземный), сравнения сочетаний разных мероприятий и условий работы трубопровода без существенных трудовых затрат.

4.3. Выводы по главе 4

1. Выявлено и статистически описано применение разных защитных мероприятий с учетом расположения объектов в разных климатических зонах, проведено сравнение применяемых мероприятий, составлена классификационная таблица, позволяющая сравнить все исходные данные по объектам.

2. На основе первичного анализа, проведен статистический анализ методом многофакторного корреляционно-регрессионного анализа. Многофакторный анализ оказался эффективным средством для формирования

прогнозного уравнения регрессии для определения ореола оттаивания, в условиях отсутствия данных многолетнего мониторинга в исследуемых регионах. Использование многофакторного корреляционного анализа для определения закономерностей в определении ореола оттаивания, позволяет определить ведущие природные факторы, оказывающие наибольшее влияние на развитие процесса оттаивания в разных районах размещения объекта.

В результате проведенного анализа можно сделать вывод о том, что значение ореола оттаивания имеет наиболее тесную связь с применяемыми защитными мероприятиями, температурой продукта, коэффициентом теплопроводности трубы с тепловой изоляцией и средней относительной осадкой при оттаивании. При этом, факторы, изменяющиеся от района расположения объекта, имеют высокое влияние на значение ореола оттаивания, в соответствии с анализом уравнения связи.

Рассчитанное уравнение связи на основании объемной выборки результатов проектной документации может быть использовано на практике для прогнозирования ореола оттаивания в обозначенных районах с высокой степенью точности: для применения на стадии подбора основных проектных решений, для обоснования возможности подземной прокладки в определенных геокриологических условиях с просадочными грунтами, для определения параметров и характеристик трубопровода.

При этом, автор отмечает, что для утверждения проектных решений требуется проведение полноценных теплотехнических расчетов с учетом всех нюансов конкретного объекта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанный и предложенный в диссертации принцип трехмерного моделирования трассы трубопровода позволяет получать исчерпывающие результаты теплового прогноза и деформаций при оттаивании всего массива многолетнемерзлых грунтов. Исследование по влиянию начальных параметров и граничных условий в трехмерных расчетных моделях на результат расчета НДС трубопровода убедительно подтверждает необходимость применения данного подхода, особенно в сложных геокриологических условиях, при наличии в основании трассы трубопровода ММГ островного распространения и переходных зон талый-мерзлый. Комплексная методика расчета подземных трубопроводов является многоцелевой, и помимо подтверждения технических решений по воздействию на ММГ, она позволяет обоснованно использовать результаты для проведения геотехнического мониторинга в течение всего жизненного цикла сооружения. Фактически, комплексная методика является принципом прогнозирования изменения ПТС с высокой детализацией результатов, основываясь на которых возможно определить критерии безопасной эксплуатации для любой точки рассчитываемой трассы, а не отдельных ее участков.

Оформленные предложения по конкретизации требований к проведению геотехнического мониторинга подземных трубопроводов могут быть использованы для дополнения нормативно-технической документации (НТД) федерального значения для формализации требований и исключения некорректного прочтения требований норм, для дальнейшего совершенствования расчетных моделей, входных параметров и граничных условий, основываясь на исчерпывающих данных ГТМ. Сформированные требования внедрены и являются основой при разработке проектных решений по геотехническому мониторингу подземных трасс трубопроводов в АО «ТомскНИПИнефть».

Эффективность и применимость комплексной методики расчета подтверждена верификационным расчетом, основанным на натурных данных эксплуатируемого объекта с разными техническими решениями (тепловая изоляция, применение СОУ).

Выявлена целесообразность применения комплексной методики расчета не только для целей прогнозирования и проектирования сети ГТМ, но и для этапа эксплуатации: обоснована возможность измерения деформаций трубопровода современными спутниковыми методами, что значительно сократит трудовые и финансовые затраты на проведение мониторинга объекта. Данный вывод основывается на опыте применения ГНСС-оборудования, а также на теоретическом исследовании автора, целью дальнейшего развития данной части исследования является проведение опытных испытаний и верификация теоретической постановки.

Систематизация и статистический анализ данных тепловых расчетов, выполненных по комплексной методике, исходных данных, проектных защитных мероприятий по разным регионам обеспечивает качество дальнейшего проектирования, являясь базой и основой для принятия будущих проектных решений в соответствующем регионе. Проведенный многофакторный и регрессионный анализ статистически обработанных данных позволяет выполнять моментальный прогноз, получая значение усредненного ореола оттаивания, вводя данные по климатическим, геологическим и техническим характеристикам объекта, что дает возможность оперативно подбирать разные технические решения, выбирая наиболее эффективное для последующего полноценного расчета по комплексной методике.

Резюмируя, цель и задачи диссертационного исследования достигнуты и выполнены, обоснованы и верифицированы различными методами. Дальнейшее развитие темы исследования состоит в смене статической расчетной геологической модели на динамическую (учет изменения ПТС во время эксплуатации), испытаниях ГНСС оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исаев, С. В. Концепция природно-технических систем и ее использование при изучении антропогенной трансформации природной среды / С. В. Исаев // Географический вестник. – 2016. – № 3(38). – С. 105-113. – DOI 10.17072/2079-7877-2016-3-105-113. – EDN WYMTON
2. Проблемы создания государственной системы мониторинга криолитозоны / А. В. Брушков, Д. С. Дроздов, В. А. Дубровин [и др.] // Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации : материалы шестнадцатой общероссийской научно-практической конференции изыскательских организаций, Москва, 01–03 декабря 2021 года / ООО «Геомаркетинг»; ООО «Институт геотехники и инженерных изысканий в строительстве»; Ассоциация «Инженерные изыскания в строительстве» - Общероссийское отраслевое объединение работодателей Союз изыскателей. – Москва: Геомаркетинг, 2021. – С. 315-319. – EDN PYBEON.
3. Российские магистральные трубопроводы на мерзлоте: практика изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации / Д. Шмелев, Ю. Станиловская, Э. Грин, П. Добуан // Материалы Пятой конференции геокриологов России : Пленарные доклады. Часть 1. Инженерная геокриология. Часть 2. Линейные сооружения в криолитозоне. Часть 3. Сезонно-действующие и охлаждающие системы в криолитозоне. Часть 4. Геофизические исследования в криолитозоне при строительстве, Москва, 14–17 июня 2016 года / МГУ имени М.В. Ломоносова. Том 1, Часть 1-4. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью Издательско-торговый дом "Университетская книга", 2016. – С. 235-240. – EDN WAKGQZ.
4. Развитие технологий и строительных решений по способам прокладки трубопровода Заполярье - Пурпе на многолетнемерзлых грунтах и их применение на подводных переходах трубопровода Кулумба - Тайшет / Ю. В. Лисин, А. Е. Сощенко, В. В. Павлов, М. Ю. Зотов // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2014. – № 3(15). – С. 68-71. – EDN SNIKYL.
5. Володченкова, О. Ю. Обеспечение проектного положения подземных магистральных нефтепроводов в зонах вечной мерзлоты : специальность 25.00.19 "Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Володченкова Оксана Юрьевна. – Москва, 2007. – 148 с. – EDN NONSSD.
6. Володченкова, О. Ю. Проектирования "теплых" магистральных трубопроводов в зонах вечной мерзлоты / О. Ю. Володченкова // Магистральные и промысловые трубопроводы:

- проектирование, строительство, эксплуатация, ремонт : Научно-технический сборник. Том №2. – Москва : Типография Московского государственного горного университета, 2005. – С. 26-30. – EDN VDFGIX.
7. Кроник Я.А. Динамика аварийности и безопасности природно-техногенных систем в криолитозоне//Материалы четвертой конференции геокриологов России. МГУ им. М.В. Ломоносова, 7-9 июня 2011 года. Т. 3. -285-292 с.
 8. Васильчук А.К., Васильчук Ю.К. Особенности инженерных изысканий для строительства трубопроводов в пределах бугристых ландшафтов зоны спорадического распространения многолетнемерзлых пород//Инженерные изыскания. 9-10/2014. 2014. -4-12 с.
 9. Железняк М.Н., Дорофеев И.В., Сериков С.И. и др. Инженерно-геокриологические условия трассы нефтепровода ВСТО на участке Алдан-Тында. Научное сопровождение мегапроектов РС(Я). Якутск: Дани Алмас, 2009. С.61-67.
 10. Шац М.М. ВСТО: проблемы реальные и мнимые // Трубопроводный транспорт: теория и практика, 2011. №2 (апрель). С.16-22.
 11. Шац М.М. Сравнительная характеристика эколого-геокриологических условий новых магистральных газопроводов Восточной Сибири // Трубопроводный транспорт: теория и практика. М., 2014. №2 (42). С. 3-8.
 12. Принципы классификации участков по прогнозируемой опасности для магистральных газопроводов, расположенных в зонах развития опасных инженерно-геокриологических процессов / О. В. Трифонов, И. Ю. Морин, П. А. Володин, А. В. Рассохина // Наука и техника в газовой промышленности. – 2021. – № 2(86). – С. 82-98. – EDN NXCCWP.
 13. Прогнозирование напряженно-деформированного состояния магистрального газопровода "Сила Сибири" на участках развития опасных инженерно-геокриологических процессов на основе математических моделей / О. В. Трифонов, В. М. Силкин, В. П. Черный [и др.] // Научно-технический сборник Вести газовой науки. – 2020. – № 2(44). – С. 34-50. – EDN DNEBPK.
 14. Российские магистральные трубопроводы на мерзлоте: практика изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации / Д. Шмелев, Ю. Станиловская, Э. Грин, П. Добуан // Материалы Пятой конференции геокриологов России : Пленарные доклады. Часть 1. Инженерная геокриология. Часть 2. Линейные сооружения в криолитозоне. Часть 3. Сезонно-действующие и охлаждающие системы в криолитозоне. Часть 4. Геофизические исследования в криолитозоне при строительстве, Москва, 14–17 июня 2016 года / МГУ имени М.В. Ломоносова. Том 1, Часть 1-4. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью Издательско-торговый дом "Университетская книга", 2016. – С. 235-240. – EDN WAKGQZ.

15. Судницына, П. А. Анализ аварийности на магистральных трубопроводах / П. А. Судницына, Л. С. Аюпова // Вестник магистратуры. – 2022. – № 12-1(135). – С. 9-11. – EDN HVVNIY.
16. Информационный бюллетень Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору. 2011 [Текст] / Ростехнадзор; НТЦ «Промышленная безопасность». – М., 2011. – Вып. 5(56). – 68 с.
17. Информационный бюллетень Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору. 2012 [Текст] / Ростехнадзор; НТЦ «Промышленная безопасность». – М., 2012. – Вып. 5(62). – 72 с.
18. Информационный бюллетень Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору. 2013 [Текст] / Ростехнадзор; НТЦ «Промышленная безопасность». – М., 2013. – Вып. 5(68). – 72 с.
19. Информационный бюллетень Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору. 2014 [Текст] / Ростехнадзор; НТЦ «Промышленная безопасность». – М., 2014. – Вып. 5(74). – 68 с.
20. Информационный бюллетень Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору. 2015 [Текст] / Ростехнадзор; НТЦ «Промышленная безопасность». – М., 2015. – Вып. 5(80). – 96 с.
21. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации : Общее резюме / Е. М. Акентьева, О. А. Анисимов, М. Ю. Бардин [и др.]. – Санкт-Петербург : Издательство «Научные технологии», 2022. – 124 с. – ISBN 978-5-907618-14-5. – EDN COSHAP.
22. Сафонова, Т. Ю. Перспективы российской нефтегазодобычи в Арктике: от обвала до развития / Т. Ю. Сафонова // Креативная экономика. – 2020. – Т. 14, № 10. – С. 2569-2590. – DOI 10.18334/ce.14.10.111085. – EDN CROOWO.
23. Степанов, С. П. Численное моделирование трехмерных задач тепло- и массопереноса в криолитозоне : специальность 05.13.18 "Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ" : диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / Степанов Сергей Павлович, 2018. – 128 с. – EDN YLIKJO.
24. Опыт эксплуатации сооружений и необходимость управления тепловым режимом грунтов в криолитозоне / А. В. Брушков, А. Г. Алексеев, С. В. Бадина [и др.] // Записки Горного института. – 2023. – Т. 263. – С. 742-756. – EDN IMQTQY.
25. Снижение устойчивости инфраструктуры ТЭК России в Арктике как следствие повышения среднегодовой температуры приповерхностного слоя криолитозоны / В. П. Мельников, В. И. Осипов, А. В. Брушков [и др.] // Вестник Российской академии наук. – 2022. – Т. 92, № 4. – С. 303-314. – DOI 10.31857/S0869587322040053. – EDN ZOVEVX.
26. Коротков, А. А. Расчет ореолов оттаивания и НДС на участках с ММГ с учетом проведения компенсирующих мероприятий / А. А. Коротков, А. Г.

- Герасимов, А. С. Кислов // Современные исследования трансформации криосферы и вопросы геотехнической безопасности сооружений в Арктике, Салехард, 03–12 ноября 2021 года. – Салехард: Б. и., 2021. – С. 210-213. – DOI 10.7868/9785604610848055. – EDN VMJLWZ.
27. Жолобов, И. А. Влияние нелинейности теплофизических свойств мерзлых грунтов на динамику теплосилового взаимодействия основания с горячим подземным трубопроводом : специальность 01.04.14 "Теплофизика и теоретическая теплотехника" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Жолобов Игорь Андреевич. – Тюмень, 2015. – 22 с. – EDN ZPUVBH.
 28. Математическое моделирование теплового взаимодействия подземного газопровода с многолетнемерзлыми грунтами полуострова Ямал // Инженерная геология. – 2009. – № 4. – С. 20-27. – EDN MNJTAB.
 29. Великоднев, В. Я. Тепловое и механическое взаимодействие подземного газопровода с многолетнемерзлыми грунтами и методы его геотехнического мониторинга / В. Я. Великоднев, С. И. Голубин, В. С. Каленский // Инженерные изыскания. – 2011. – № 9. – С. 54-60. – EDN OWHJGB.
 30. Моделирование теплового взаимодействия системы трубопроводов центрального хладоснабжения с мерзлым грунтом / А. В. Малышев, С. С. Васильев, П. П. Пермяков, К. Н. Большев // Успехи современного естествознания. – 2022. – № 12. – С. 169-174. – DOI 10.17513/use.37966. – EDN BGOOKH.
 31. Смирнов, В. В. Проблемы обеспечения надежности эксплуатации сооружений в криолитозоне / В. В. Смирнов, Ю. Д. Земенков // Инновации в науке. – 2013. – № 25. – С. 57-65. – EDN RCOYLV.
 32. Корпоративная газета «ООО «РН-Ванкор», Газета «ВАНКОР», № 2 (128) Выпуск 2, февраль 2019. Стр. 5. <https://irbis128.kraslib.ru/?id=FT/GetConvertedPdf&sid=8cab94320720b4baef51e75d7b0eb7c1>.
 33. Долгих, Г. М. Строительство на вечномерзлых грунтах: проблемы качества / Г. М. Долгих, С. П. Вельчев // Геотехника. – 2010. – № 6. – С. 23-29. – EDN OWGMDR.
 34. Shammazov, I.A.; Batyrov, A.M.; Sidorkin, D.I.; Van Nguyen, T. Study of the Effect of Cutting Frozen Soils on the Supports of Above-Ground Trunk Pipelines. Appl. Sci. 2023, 13, 3139. <https://doi.org/10.3390/app13053139>.
 35. Горохов, Е. Н. Методика и программа компьютерного моделирования температурного режима вмещающего нефтепровод грунтового массива для условий криолитозоны [Текст] / Е. Н. Горохов, В. И. Логинов, М. А. Козлов, А. А. Маленов // Приволжский научный журнал. – 2011. – № 4(20). – С. 167–175.
 36. Горохов, Е. Н. Обеспечение экологической безопасности нефтепровода «Восточная Сибирь – Тихий Океан» на участках, проложенных

- многолетнемерзлых грунтах [Текст] / Е. Н. Горохов, Е. В. Копосов, С. В. Соболев, В. И. Ларионов [и др.] // Приволжский научный журнал. – 2011. – № 3(19). – С. 158-164
37. Лисин, Ю. В. Выбор оптимальных технических решений по прокладке нефтепровода для обеспечения надежной эксплуатации трубопроводной системы «Заполярье–НПС Пурпе» на основе прогнозных теплотехнических расчетов [Текст] / 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.
 38. Лисин, Ю. В. Оценка планово-высотного положения трубопровода на участках с многолетнемерзлыми грунтами [Текст] / 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.
 39. Лисин, Ю. В. Технические решения по способам прокладки нефтепровода Заполярье – НПС «Пурпе» [Текст] / 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.
 40. Радионова, С. Г. Совершенствование методов и средств прогнозных расчетов ореолов оттаивания, просадки и величины напряженно-деформированного состояния трубопроводов, проложенных в многолетнемерзлых грунтах [Текст] / 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.
 41. 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. – № 8. – С. 71-76. – EDN NPISIW.
 42. Акимов, М. П. Численное исследование воздействия подземного трубопровода теплоснабжения на вечноммерзлые грунты методом конечных элементов / М. П. Акимов, П. Е. Захаров, О. И. Матвеева // VIII международная конференция по математическому моделированию, Якутск, 04–08 июля 2017 года / Тезисы докладов. – Якутск: Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, 2017. – С. 68. – EDN ZGWUQP.
 43. Oswell J.M. Pipelines in permafrost: geotechnical issues and lessons // Canadian Geotechnical Journal. 2011. № 48. P. 1412–1431.
 44. Новиков, П. А. Выявление опасных участков магистральных нефтепроводов на основе долгосрочного прогнозирования ореола оттаивания многолетнемерзлых грунтов: специальность 05.26.03 "Пожарная и промышленная безопасность (по отраслям)": автореферат диссертации на

- соискание ученой степени кандидата технических наук / Новиков Павел Александрович. – Уфа, 2016. – 22 с. – EDN ZQCCJZ.
45. Агафонов, А. В. Использование конечноэлементного анализа для расчета на прочность подземных трубопроводов с учетом тепловых деформаций грунтов / А. В. Агафонов, В. А. Ворков // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2010. – Т. 12, № 4-3. – С. 535-539. – EDN NXJUQD.
 46. Аналитический и численный методы решения уравнения теплопроводности / Д. С. Карпович, О. Н. Суша, Н. П. Коровкина, В. П. Кобринец // Труды БГТУ. №6. Физико-математические науки и информатика. – 2015. – № 6(179). – С. 122-127. – EDN XCSNFN.
 47. Власов, А. Н. Применение программного комплекса Abaqus к расчету линейных сооружений в районах с суровыми климатическими условиями / А. Н. Власов, Д. Б. Волков-Богородский, М. Г. Мнушкин // Труды Международной научно-практической конференции "инженерные системы - 2011", РУДН, 05–08 апреля 2011 года. Том I. – РУДН: Российский университет дружбы народов, 2011. – С. 43-49. – EDN TDMLCH.
 48. Власов, А. Н. Перспективы использования МКЭ-комплекса ANSYS и его строительного модуля civilfem в расчетах оснований сооружений, сложенных мерзлыми и оттаивающими грунтами / А. Н. Власов, М. В. Прошин, Т. В. Исайкова // Научный вестник Арктики. – 2022. – № 12. – С. 16-22. – DOI 10.52978/25421220_2022_12_16-22. – EDN NEBVMX.
 49. Борисов, В. С. Численное решение задачи о процессах промерзания и протаивания в многолетнемерзлых грунтах / В. С. Борисов // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. – 2015. – Т. 12, № 2. – С. 36-42. – EDN TZUHJJ.
 50. Зотов, М. Ю. Опыт применения программных комплексов для расчета напряженно-деформированного состояния нефтепроводов, прокладываемых на вечномерзлых грунтах [Текст] / 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.
 51. Ивакин, А. В. Применение «Программного комплекса для моделирования температурных режимов работы трубопроводного транспорта нефти» при проектировании и эксплуатации нефтепроводов [Текст] / А. В. Ивакин, В. Б. Ковалевский, В. Е. Еремеев // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2009. – № 2(14). – С. 6–9.
 52. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2016614404 Российская Федерация. QFrost / Песоцкий Д. Г.; заявитель и правообладатель Песоцкий Д. Г. – № 2016611710; заявл. 02.03.2016; опубл. 20.05.2016. – 1 с.

53. Бадина, Я. С. Расчет напряженно-деформированного состояния подземного участка трубопровода, проложенного в многолетнемерзлом грунте, в программном комплексе ANSYS / Я. С. Бадина // Проблемы геологии и освоения недр : Труды XX Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 120-летию со дня основания Томского политехнического университета: в 2 томах, Томск, 04–08 апреля 2016 года / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ), Институт природных ресурсов (ИПР); Общество инженеров-нефтяников, международная некоммерческая организация, Студенческий чептер; Под редакцией А. Ю. Дмитриева. Том 2. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2016. – С. 883-885. – EDN XAOZGL.
54. Дрынкина, Т. Н. Программный комплекс "GEO PIPE INFORM", разработанный для проектирования подземных трубопроводов в сложных геологических условиях / Т. Н. Дрынкина, В. В. Гусев // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2011. – № 3. – С. 20-24. – EDN NDUWPB.
55. Ефимов, Д. В. Применение сплайн интерполирования в вопросах моделирования процессов и прочностных расчётов линейных сооружений / Д. В. Ефимов // Проблемы геологии и освоения недр : Труды XXIII Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых учёных, посвященного 120-летию со дня рождения академика К.И. Сатпаева, 120-летию со дня рождения профессора К.В. Радугина, Томск, 08–12 апреля 2019 года. Том 2. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2019. – С. 578-579. – EDN XTZNET.
56. Геокриологические аспекты при эксплуатации трубопроводов в пределах распространения островных и прерывистых многолетнемерзлых пород / А. К. Васильчук, Н. Г. Фигаров, А. М. Усков [и др.] // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2013. – № 3(37). – С. 3-8. – EDN TUIGUV.
57. Филимонова О.М., Филимонов А.А. Проблемы прогнозных теплотехнических расчетов подземных трубопроводов, расположенных в русловой части рек, в условиях распространения многолетнемерзлых грунтов // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XXVI Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых учёных, посвященный 90-летию со дня рождения Н.М. Рассказова, 120-летию со дня рождения Л.Л. Халфина, 50-летию научных молодежных конференций имени академика М.А. Усова, Томск, 04–08 апреля 2022 года. Том 1. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2022. – С. 212-214. – EDN MKWNIC.
58. Проектирование промысловых подземных трубопроводов на многолетнемерзлых грунтах с использованием современных комплексов проектирования / А.А. Филимонов, Д.В. Липихин, А.Е. Мельников, К.В.

- Кириянова // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2021. – Т. 23. – № 4. – С. 127–137. – DOI 10.31675/1607-1859-2021-23-4-127-137. – EDN QRGQDC.
59. Филимонов, А. А. Назначение начальных параметров и граничных условий при моделировании теплового состояния подземных трубопроводов в зоне распространения островных многолетнемерзлых грунтов / А. А. Филимонов, Л. А. Строкова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334, № 12. – С. 109–124. – DOI 10.18799/24131830/2023/12/4345. – EDN QOLYSN.
 60. Попов, А. П. Геотехнический мониторинг в криолитозоне. Экологическая или промышленная безопасность / А. П. Попов // Записки Горного института. – 2010. – Т. 188. – С. 167–196. – EDN RENUKZ.
 61. Прокопюк, И. В. Современные подходы к организации мониторинга температуры многолетнемерзлых грунтов / И. В. Прокопюк, Д. Н. Кривов, Ф. А. Шевчик // День науки 2020 : материалы 5-ой конференции, Звенигород, 22–23 января 2020 года / Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова. – Звенигород: ООО "Издательский дом КДУ", 2020. – С. 63–69. – EDN MLAZCG.
 62. Лисин, Ю. В. Мониторинг магистральных нефтепроводов в сложных геологических условиях / Ю. В. Лисин, А. А. Александров // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2013. – № 2(10). – С. 22–27. – EDN QIVDJR.
 63. Великоднев В.Я., Голубин С.И., Каленский В.С. Тепловое и механическое взаимодействие подземного газопровода с многолетнемерзлыми грунтами и методы его геотехнического мониторинга // Инженерные изыскания. – 2011. – № 9. – С. 54–60. – EDN OWHJGB.
 64. Гурьев В. В., Гранев В. В., Дмитриев А. Н., Дорофеев В. М., Келасьев Н. Г., Лысов Д. А. Опыт применения автоматизированных станций мониторинга на уникальных строительных объектах // Промышленное и гражданское строительство. – 2021. – № 12. – С. 6–14. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.12.06-14.
 65. Иваницкая Е.В. Опыт мониторинга уникального Трансаляскинского нефтепровода // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2011. – № 1. – С. 96–101. – EDN NTZUUR.
 66. Марахтанов В.П., Топчиев А.Г. Технология геотехнического мониторинга магистральных газопроводов на территории криолитозоны Западной Сибири // Успехи современного естествознания. – 2016. – № 9. – С. 131–136. – EDN WKYMXD.
 67. Скапинцев А.Е. Геоэкологическое обоснование инженерной защиты и геотехнического мониторинга строительства трубопроводов в криолитозоне. Автореферат диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук / Скапинцев Александр Евгеньевич. – Москва, 2013. – 20 с. – EDN ZPBAKN.

68. Johnson E.R. Permafrost-related performance of the Trans-Alaska oil pipeline // Proc., 9th Int. Conf. on Permafrost. Fairbanks, AK, USA. – 2008. – P. 857–864.
69. Hearn G.J. Geomorphology in engineering geological mapping and modelling // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. – 2019. – V. 78. – № 2. – P. 723–742. DOI: 10.1007/s10064-017-1166-5
70. Troncone A. Numerical analysis of a landslide in soils with a strained softening behavior // Geotechnique. – 2005. – V. 55. – № 8. – P. 585–596.
71. Ingebritsen S.E., Sanford W.E., Neuzil C.E. Groundwater in geologic processes. 2nd ed. - New York: Cambridge Univ. Press, 2006. - 536 p.
72. Lee S., Thalib J.A. Probabilistic landslide susceptibility and factor effect analysis // Environmental Geology. – 2005. – V. 47. – P. 982–990. URL: 10.1007/s00254-005-1228-z (дата обращения 19.08.2023). DOI: 10.1007/s00254-005-1228-z
73. Sensitivity of rainstorm-triggered shallow mass movements on gully slopes to topographical factors on the Chinese Loess Plateau / W.-Z. Guo, L. Luo, W.-L. Wang, Z.-Y. Liu, Z.-X. Chen, H.-L. Kang, B. Yang // Geomorphology. – 2019. – V. 337. – P. 69–78. DOI: 10.1016/j.geomorph.2019.04.006
74. Active Optical Sensors (LASERS) / A. Abellán, M. Jaboyedoff, C. Michoud, M.H. Derron, T. Oppikofer // Deliverable 4.1 of the European project SafeLand: Review of Techniques for Landslide Detection, Fast Characterization, Rapid Mapping and Long-Term Monitoring / Ed. in 2010 by C. Michoud, A. Abellán, M.H. Derron, M. Jaboyedoff. - 2012. – P. 65–102. URL: <http://www.safelandfp7.eu> (дата обращения 19.11.2021).
75. Man D.C., Phan A. Digital earth: a platform for the SDGs and green transformation at the global and local level, employing essential SDGs variables // Big Earth Data. – 2021. – V.5. – №1. – P.1.-47. DOI: 10.1080/20964471.2021.1948677 EDN: MZXTVY
76. Fei Wang, Guoyu Li, Wei Ma, Qingbai Wu, Mihaela Serban, Samsonova Vera, Fedorov Alexandr, Ningshan Jiang, Bo Wang, Pipeline-permafrost interaction monitoring system along the China–Russia crude oil pipeline. – Engineering Geology. – 2019. – V 254. – P. 113-125, ISSN 0013-7952, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.03.013>.
77. Cao Y, Li G, Wu G, Chen D, Gao K, Tang L, Jia H, Che F. Proposal of a New Method for Controlling the Thaw of Permafrost around the China–Russia Crude Oil Pipeline and a Preliminary Study of Its Ventilation Capacity. – Water. – 2021. V. 13. – № 2. – P. 2908. <https://doi.org/10.3390/w13202908>.
78. ГОСТ 24846-2019 Грунты. Методы измерения деформаций оснований зданий и сооружений
79. Карнаухов М.Ю. Разработка методики мониторинга пространственного положения магистрального газопровода в сложных геологических условиях. Автореферат диссертации на соискание ученой степени

- кандидата технических наук / Карнаухов Михаил Юрьевич. – Тюмень, 2013. – 16 с. – EDN ZPCRAP.
80. Патент № 2672243 С1 Российская Федерация, МПК F17D 5/00. Устройство автоматизированного геотехнического мониторинга для подземных трубопроводов: № 2017144882: заявл. 20.12.2017: опубл. 12.11.2018 / П. А. Ревель-Муроз, А. Г. Воронов, С. Н. Чужин; заявитель Публичное акционерное общество "Транснефть" (ПАО "Транснефть"), Общество с ограниченной ответственностью "Транснефть - Восток" (ООО "Транснефть - Восток"), Общество с ограниченной ответственностью "Научно-исследовательский институт трубопроводного транспорта" (ООО "НИИ Транснефть"). – EDN GPLEMH.
 81. Экспериментальная оценка инновационного метода геотехнического мониторинга магистральных газопроводов на основе волоконнооптических систем / Р.Р. Кучумов, С.И. Голубин, М.Л. Николаев // Экспериментальная оценка инновационного метода геотехнического мониторинга магистральных газопроводов на основе волоконнооптических систем / Р.Р. Кучумов, С.И. Голубин, М.Л. Николаев // Газовая промышленность. – 2013. – № S(700). – С. 32-37. – EDN RSDMOZ.
 82. Голубин С.И., Великоднев В.Я., Николаев М.Л. Геотехнический мониторинг состояния трубопроводов с помощью волоконно-оптических кабельных систем. // Геотехника. – 2011. – №5. – С.22–29.
 83. Исламов Р.Р., Агинеи Р.В., Исупова Е.В. Анализ средств и методов мониторинга напряженного состояния подземных магистральных нефтегазопроводов, работающих в сложных инженерно-геологических условиях // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2017. – № 6. – С. 31-40. – EDN UQEANC.
 84. Исламов Р.Р., Агинеи Р.В. Стендовые испытания волоконно-оптического метода оценки напряженно-деформированного состояния трубопроводов // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2017. – № 4(62). – С. 39-42. – EDN ZRTMPV.
 85. Nikles M. Long-distance fiber optic sensing solutions for pipeline leakage, intrusion and ground movement detection. // Lightwave Technology. – 2009. – V. 15. – P. 142–151
 86. Исламов Р. Р. Совершенствование системы мониторинга технического состояния протяженных участков магистральных нефтегазопроводов применением волоконно-оптических сенсоров деформации: дис. ... канд. техн. наук. – Ухта, 2018. – 168 с. – EDN DRPTMG.
 87. Анализ точности исходных данных, используемых при моделировании рельефа и профиля трассы магистральных трубопроводов / Д. В. Долгополов, Е. И. Аврунев, В. А. Мелкий, Д.А. Веретельник, Е.В. Жидиляева// Известия Томского политехнического университета.

- Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 4. – С. 168-180. – DOI 10.18799/24131830/2022/4/3454. – EDN DAXZYR.
88. Елизаров А.С. Мониторинг надземных трубопроводов с помощью глобальных навигационных спутниковых систем / А. С. Елизаров, А. Н. Курчатова // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). – 2020. – Т. 25, № 1. – С. 28-42. – DOI 10.33764/2411-1759-2020-25-1-28-42. – EDN IULLWX.
 89. Юров Ф.Д. Особенности организации мониторинга линейных транспортных систем в криолитозоне / Ф. Д. Юров // Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации: Материалы Семнадцатой Общероссийской научно-практической конференции и выставки изыскательских организаций, Москва, 29 ноября – 02 2022 года. – Москва: Геомаркетинг, 2022. – С. 234-242. – EDN ZQCREO.
 90. Мельников А.Ю. Анализ точности метода Precise Point Positioning для оценки возможности его применения в геодинимических исследованиях // Геодезия и аэрофотосъемка. – 2018. – № 6 (62). – С. 605–615.
 91. Проблемы и перспективы развития активных спутниковых геодезических сетей в России и их интеграции в ITRF / В. С. Вдовин, В. Д. Дворкин, А. П. Карпик, Л. А. Липатников, С. Д. Сорокин, Г. М. Стеблов // Вестник СГУиТ. – 2018. – Т. 23, № 1. – С. 6–27.
 92. Соколова В.А., Морковская С.А., Науменко В.С., Куштин В.И. Создание высотного геодезического обоснования для наблюдения за осадками сооружений // Сборник научных трудов «Транспорт: наука, образование, производство» (Транспорт-2019), Том 3. Технические науки. Рост. гос. ун-т. путей сообщения. Ростов н/Д, 2019. с.176-179.
 93. Нестеренко М.Ю. Оценка возможности и точности применения GNSS-систем для мониторинга деформаций земной поверхности на разрабатываемых месторождениях углеводородов / М. Ю. Нестеренко, А. В. Цвяк // Бюллетень Оренбургского научного центра УрО РАН. – 2016. – № 4. – С. 15. – EDN YFTZSD.
 94. Нестеренко Ю.М. Методические основы геодинимического мониторинга с использованием глобальных навигационных спутниковых систем / Ю. М. Нестеренко, А. В. Цвяк, М. Ю. Нестеренко // Бюллетень Оренбургского научного центра УрО РАН. – 2017. – № 4. – С. 10. – EDN YLNLTP.
 95. Современные методы мониторинга деформаций зданий и сооружений / В. И. Куштин, А. А. Ревякин, В. А. Соколова, Н. Ф. Добрынин // Инженерный вестник Дона. – 2020. – № 11(71). – С. 27-37. – EDN OCGBHG.
 96. Фялковский А.Л. Деформационный мониторинг высотных сооружений с использованием глобальных навигационных спутниковых систем / А. Л. Фялковский // Промышленное и гражданское строительство. – 2015. – № 5. – С. 54-59. – EDN TUGOMX.

97. Гилаев Д.М. Опыт и перспективы использования ГНСС-технологий на месторождениях нефти и газа / Д. М. Гилаев, А. А. Загретдинов, Р. В. Загретдинов // Маркшейдерский вестник. – 2021. – № 2(141). – С. 21-27. – EDN ASPIEC.
98. Герко С.А. Перспективы использования ГЛОНАСС при решении специальных задач / С. А. Герко, С. С. Марков, Р. Б. Мазепа // Электросвязь. – 2021. – № 11. – С. 38-46. – DOI 10.34832/ELSV.2021.24.11.004. – EDN KTZZRD.
99. Yu J. et al. Identification of dynamic displacements and modal frequencies of a medium-span suspension bridge using multimode GNSS processing // Engineering Structures. 2014. Vol. 81. P. 432–443. DOI: 10.1016/j.engstruct.2014.10.010.
100. Jia D. et al. Vertical and horizontal displacements of a reservoir slope due to slope aging effect, rainfall, and reservoir water // Geodesy and Geodynamics. 2021. Vol. 12, № 4. P. 266–278. DOI: 10.1016/j.geog.2021.06.004.
101. Braun J., Hánek P. Geodetic monitoring methods of landslide-prone regions – application to Rabenov // AUC Geographica. 2014. Vol. 49, № 1. P. 5–19. DOI: 10.14712/23361980.2014.2.
102. Escayo J. et al. Geodetic Study of the 2006–2010 Ground Deformation in La Palma (Canary Islands): Observational Results // Remote Sensing. 2020. Vol. 12, № 16. P. 2566. DOI: 10.3390/RS12162566.
103. Susic Z. Geometric deformation analysis in free geodetic networks: case study for Fruska Gora in Serbia // Acta Geodynamica et Geomaterialia. 2017. P. 341–355. DOI: 10.13168/AGG.2017.0017.
104. Zhang Y. et al. The Current Crustal Vertical Deformation Features of the Sichuan–Yunnan Region Constrained by Fusing the Leveling Data with the GNSS Data // Remote Sensing. 2022. Vol. 14, № 5. P. 1139. DOI: 10.3390/rs14051139.
105. Xiao R. et al. Deformation Monitoring of Reservoir Dams Using GNSS: An Application to South-to-North Water Diversion Project, China // IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 54981–54992. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2912143.
106. Xu L. et al. Deformation Monitoring of Steel Structures based on Measuring Robots and Global Navigation Satellite Systems During Unloading Construction // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 783, № 1. P. 012166. DOI: 10.1088/1755-1315/783/1/012166.
107. Kall T. et al. Vertical crustal movements in Estonia determined from precise levellings and observations of the level of Lake Peipsi // Estonian Journal of Earth Sciences. 2016. Vol. 65, № 1. P. 27. DOI: 10.3176/earth.2016.03.
108. da Silva I., Ibañez W., Poleszuk G. Experience of Using Total Station and GNSS Technologies for Tall Building Construction Monitoring. 2018. P. 471–486. DOI: 10.1007/978-3-319-61914-9_36.

109. Kovačič B., Doler D., Topolšek D. Optimization and Development of the Model for Monitoring the Deformations on the Airport Runways // *Processes*. 2021. Vol. 9, № 5. P. 833. DOI: 10.3390/pr9050833.
110. França L.L.S. de et al. Optimized determination of 3D coordinates in the survey of inaccessible points of buildings — example of application implemented in free software // *Boletim de Ciências Geodésicas*. 2021. Vol. 27, № 2. DOI: 10.1590/1982-2170-2020-0057.
111. Богданец, Е. С. Анализ зависимости точности позиционирования базовых ГНСС-станций от колебаний температуры / Е. С. Богданец, А. С. Тютюков // *Master's Journal*. – 2019. – № 1. – С. 51-56. – EDN OZXHQS
112. Тютюков, А. С. Оценка стабильности работы ГНСС базовых станций, расположенных на территории деятельности ООО "РН-Юганскнефтегаз" / А. С. Тютюков // *Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых*. – 2019. – Т. 1. – С. 272-274. – EDN DIDOBD.
113. Кондратьев, В. Г. Снижение рисков потери устойчивости подземного нефтепровода на участках льдистых многолетнемерзлых грунтов путем их дополнительного охлаждения / В. Г. Кондратьев, В. А. Бронников // *Анализ, прогноз и управление природными рисками в современном мире (ГЕОРИСК-2015) : Материалы 9-й Международной научно-практической конференции, Москва, 12–14 октября 2015 года. Том 2.* – Москва: Российский университет дружбы народов, 2015. – С. 464-471. – EDN UWGXQR.
114. Кондратьев, В. Г. Управление тепловым взаимодействием подземного трубопровода с многолетнемерзлыми грунтами / В. Г. Кондратьев, В. А. Бронников // *Кулагинские чтения: техника и технологии производственных процессов : XVI международная научная-практическая конференция: в 3 ч., Чита, 28–30 ноября 2016 года. Том Часть 1.* – Чита: Забайкальский государственный университет, 2016. – С. 170-175. – EDN WZVFNN.
115. Никишин, А. А. Развитие технологий и технических средств сооружения и эксплуатации нефте- и нефтепродуктопроводов : специальность 07.00.10 "История науки и техники" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Никишин Андрей Андреевич. – Уфа, 2018. – 202 с. – EDN HXSPTP.
116. Савицкая, Г. В. Анализ хозяйственной деятельности предприятия : учебник / Г. В. Савицкая. – 6-е издание, исправленное и дополненное. – Москва : Общество с ограниченной ответственностью «Научно-издательский центр ИНФРА-М», 2020. – 378 с. – (Среднее профессиональное образование). – ISBN 978-5-16-006707-0. – EDN LHPRLK. 2, 3, 7
117. Фи, Х. Т. Использование метода многофакторного корреляционного анализа для прогноза оседания земной поверхности в городе Ханой (Вьетнам) / Х. Т. Фи // *Проблемы геологии и освоения недр : Труды XVII Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и*

молодых учёных, посвященного 150-летию со дня рождения академика В.А. Обручева и 130-летию академика М.А. Усова, основателей Сибирской горно-геологической школы, Томск, 01–06 апреля 2013 года / Национальный исследовательский Томский политехнический университет. Том 1. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2013. – С. 480-482. – EDN SFLWEJ.

118. Ишутина, А. С. Установление степени влияния факторов на осадку инженерных сооружений методом многофакторного корреляционного анализа / А. С. Ишутина // Приволжский научный вестник. – 2014. – № 6(34). – С. 138-143. – EDN SGYFZB.
119. Ежкова, А. В. Комплексная оценка карстовой опасности при проектировании магистральных газопроводов (на примере участка магистрального газопровода "Сила Сибири", "Чаянда-Ленск") : специальность 25.00.08 "Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ежкова Алёна Викторовна, 2020. – 147 с. – EDN HFFTRT.
120. Каждан А. Б., Гуськов О. И. Математические методы в геологии : учебник для вузов. Москва : Недра, 1990. 251 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО УСТРОЙСТВУ СЕТИ И ПРОВЕДЕНИЮ ГЕОТЕХНИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ПОДЗЕМНОГО ТРУБОПРОВОДА В УСЛОВИЯХ РАСПРОСТРАНЕНИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

А.1. Общие положения

А.1.1. Сеть геотехнического мониторинга для подземного трубопровода должна базироваться на требованиях современной нормативной документации федерального значения, требованиях задания на проектирование, опыте эксплуатации подземных трубопроводов аналогичных параметров в регионе проектирования.

А.1.2. Сеть геотехнического мониторинга и набор контролируемых параметров для подземного трубопровода должна проектироваться с учетом сложности геокриологических условий, проектного положения трубопровода в грунте, применяемых защитных мероприятий оснований и тела трубопровода, наличия пересекаемых объектов, конструктивных особенностей проектируемого трубопровода.

А.1.3. Расположение элементов сети геотехнического мониторинга должно позволять анализировать и оценивать состояние природно-технической системы с удовлетворительной точностью, принимая во внимание инженерно-геологические, гидрогеологические и иные условия площадки объекта, конструктивные решения, результаты прогнозных тепловых и прочностных расчетов, проведенных во время утверждения проектных решений.

А.1.4. В связи со сложностью проведения геотехнического мониторинга протяженных линейных объектов, требуется внедрять и применять наиболее современные методы измерения контролируемых параметров для экономической эффективности и снижения трудоемкости работ, рекомендуемое оборудование указывать в программе геотехнического мониторинга.

А.1.5. Программа геотехнического мониторинга должна содержать:

- обоснование выбора критериев контроля (нормативное и расчетное);

- результаты прогнозных расчетов и предельные значения контролируемых параметров для всей протяженности трубопровода, с учетом изменения геологических и геокриологических условий залегания трубопровода, для сравнения фактических значений измерений с прогнозными;
- объемы работ и периодичность измерений, сроки проведения мониторинга;
- методы измерений и оборудование (рекомендуемое и возможное к применению) в рамках конкретного объекта;
- требования к точности измерений по каждому из контролируемых параметров;
- рекомендации по составу бригады и квалификации исполнителей;
- схемы расположения сети ГТМ, рекомендуемый порядок проведения работ.

А.1.7. Рекомендуемые критерии устройства сети, применяемые методы измерения и оборудование сведены в таблице приложения А.2.

А.1.8. Периодичность измерений во время строительства и эксплуатации требуется принять согласно НТД федерального значения – СП 25.13330.2020 на период строительства, СП 497.1325800.2020 на период эксплуатации.

А.1.9. Изменение периодичности проведения измерений допускается при наличии соответствующего обоснования – наличия ухудшающихся условий, наличие тренда, стремящегося к предельному значению параметров, или наоборот, стабилизации. Изменения требуется внести в программу ГТМ.

А.2. Рекомендуемые критерии устройства сети геотехнического мониторинга и применяемых методов измерения контролируемых параметров во время строительства и эксплуатации

Контролируемый параметр	Устройство для наблюдения за контролируемым параметром	Параметры устройств контроля	Принципы использования многолетнемерзлых грунтов в качестве основания сооружений		Рекомендуемый метод проведения измерений	Рекомендуемое оборудование для проведения измерений
			I принцип	II принцип с допущением оттаивания грунтов в период эксплуатации сооружения ¹⁾		
Температура грунта	Термометрическая скважина	Количество	С шагом 100 метров	С шагом 100 метров, с уменьшением шага до 30-50 метров на участках с изменением геокриологической обстановки ²⁾	Метод полевого определения температуры (ГОСТ 25358-2020)	1. Термокосы + считыватель (контроллер) 2. Автоматизированная система мониторинга с проводным сбором данных с термометрических кос (термокосы + логгеры + распределительная сеть) 3. Автоматизированная система мониторинга с беспроводным или проводным сбором данных с термометрических кос (термокосы + беспроводные логгеры + серверное оборудование)
		Расположение	На расстоянии 1,0 - 1,5 метра от оси трубопровода			
		Глубина заложения	Не менее 10 метров	На 2 метра ниже прогнозной глубины оттаивания ММГ, но не менее 10 м		

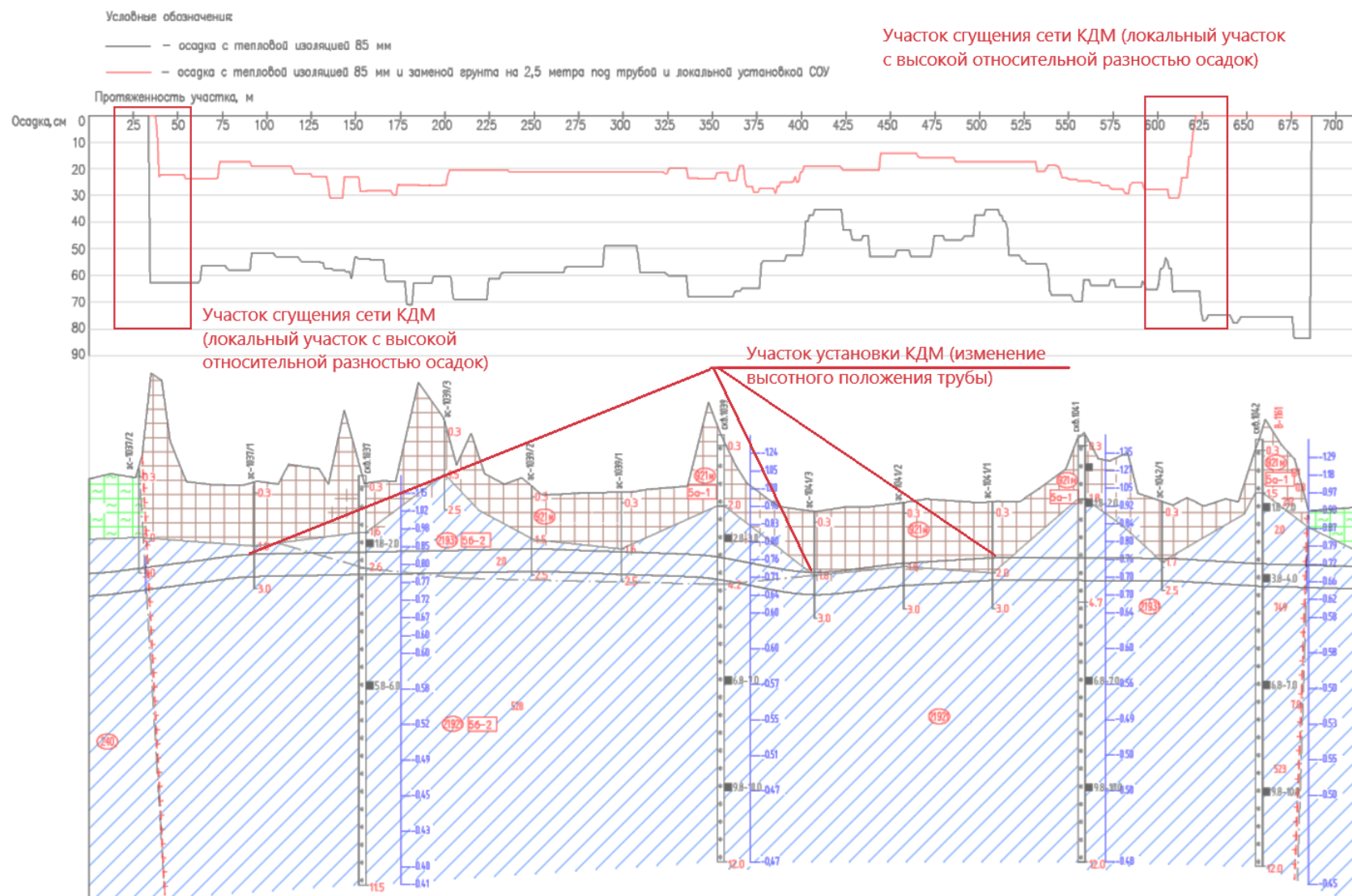
Контролируемый параметр	Устройство для наблюдения за контролируемым параметром	Параметры устройств контроля	Принципы использования многолетнемерзлых грунтов в качестве основания сооружений		Рекомендуемый метод проведения измерений	Рекомендуемое оборудование для проведения измерений
			I принцип	II принцип с допущением оттаивания грунтов в период эксплуатации сооружения ¹⁾		
Уровень подземных вод	Гидрогеологическая скважина	Количество	Допускается не устраивать	С шагом 1000-2000 метров ³⁾	Методы отбора проб и измерения подземных вод (ГОСТ Р ИСО 22475-1-2017)	1.Портативный уровнемер 2.Портативный пьезометр с электронной памятью 3.Рулетка гидрогеологическая
		Расположение	-	На расстоянии 1,0 - 1,5 метра от оси трубопровода, на расстоянии 1 метр от термометрической скважины		
		Глубина заложения	Не менее 10 метров			
Температура охлаждающих устройств	Конденсатор охлаждающих устройств	Количество	100% охлаждающих устройств	-	Метод тепловизионного контроля качества теплоизоляции ограждающих конструкций (ГОСТ Р 54852-2024)	1.Тепловизор 2. Пирометр бесконтактный
Высота и плотность снежного покрова	Снегомерная рейка, снегомерный щуп	Количество	Равное количеству термометрических скважин ⁴⁾		Инструментальный метод наблюдений за высотой и плотностью снежного покрова (РД 52.08.730-2010)	1.Рейка снегомерная 2.Щуп лавинный 3.Снегомер весовой ВС-43
		Расположение	На расстоянии не более 1,0 метра от оси трубопровода			

Контролируемый параметр	Устройство для наблюдения за контролируемым параметром	Параметры устройств контроля	Принципы использования многолетнемерзлых грунтов в качестве основания сооружений		Рекомендуемый метод проведения измерений	Рекомендуемое оборудование для проведения измерений
			I принцип	II принцип с допущением оттаивания грунтов в период эксплуатации сооружения ¹⁾		
Деформация	Марка для подземного трубопровода	Количество	С шагом 50-100 метров с уменьшением шага до 10-30 метров на участках с изменением условий залегания ⁵⁾		Геодезический метод (ГОСТ 24846-2019) Спутниковый метод (ГОСТ Р 53607-2009, ГОСТ Р 57373-2016)	1. Цифровой нивелир 2. GNSS-оборудование
	Волоконно-оптическая система	Расположение	Датчик температуры и датчик деформации в 3 направлениях (по боковым образующим трубопровода по горизонтали, на верхней образующей по вертикали) вдоль тела трубопровода		Оптико-волоконный метод (ГОСТ 24846-2019, ГОСТ Р 59088-2020)	1. Оптическое волокно
Состояние трубопровода и планово-высотное положение	Средства внутритрубно́й диагностики и дефектоскопии	Периодичность	Проведение внутритрубно́й диагностики не менее 1 раз в 5 лет ⁶⁾		Методы внутритрубно́й диагностики (ГОСТ Р 55999-2014, СП 411.1325800.2018)	1. Внутритрубно́й инспекционный прибор (дефектоскопы магнитные, магнитоакустические, ультразвуковые) 2. Трассоискатели
Состояние поверхностного слоя притраншейной зоны	Визуально-инструментальный осмотр	Периодичность	В период строительства – ежемесячно, в период эксплуатации – во время проведения цикла ГТМ		Методы визуального контроля (ГОСТ Р ЕН 13018-2014, СП 497.1325800.2020, СП 305.1325800.2017)	1. Органы зрения, фотоаппарат 2. Беспилотные летательные аппараты с фото/видеофиксацией 3. Спутниковые технологии

Примечания

- 1) II принцип использования ММГ с предварительным оттаиванием не рассматривается по причине нецелесообразности метода для линейных сооружений.
- 2) В соответствии с примечанием 1 к таблице 8.3 «СП 11-105-97 Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть IV. Правила производства работ в районах распространения многолетнемерзлых грунтов», шаг горных выработок для подземных трубопроводов, находящихся в сложных инженерно-геологических условиях, в которых производятся термометрические изыскания, назначается минимальным – 100 метров. При изменении геокриологической обстановки по трассе трубопровода: наличие вертикального фронта ММГ (переход «немерзлый грунт – мерзлый грунт»), изменение глубины кровли залегания ММГ, наличие водных преград, требуется уменьшать количество термометрических скважин до шага не менее 30-50 метров.
- 3) При строительстве по принципу I при наличии в основании сооружений многолетнемерзлых грунтов сливающегося типа, гидрогеологические скважины допускается не устраивать. При наличии в основании сооружений многолетнемерзлых грунтов несливающегося типа, в зонах оттаивания ММГ сливающегося типа, на участках с наличием подземных вод, устраивать гидрогеологические скважины с шагом 1000 – 2000 метров. При необходимости установления гидрогеологического режима в соответствии с ландшафтно-климатическими и топографическими условиями, допускается устройство как одиночных скважин, либо устройство с иным шагом при дополнительном обосновании.
- 4) Высота и плотность снежного покрова являются параметрами, влияющими на тепловое состояние грунтов. Для поверочного теплотехнического расчета во время эксплуатации, требуется фактическое значение высоты и плотности снежного покрова для сравнения прогнозного и фактического значения.
- 5) Геодезические марки устраиваются с расчетным шагом, исходя из условий 5.1-5.4, но не менее 100 метров.
 - 5.1 Расположение марок должно обеспечивать информацию о перемещении трубопровода в зонах с локальным проявлением пиковых прогнозных деформаций грунтового основания (профиля осадок) в сравнении со смежными участками;
 - 5.2 Должна обеспечиваться прямолинейность участка трубопровода между марками за счет собственной жесткости трубопровода;
 - 5.3 На участках изменений пространственного положения трубопровода, влияющих на параметры перемещения: наличие отводов, компенсаторов, участков изменения прокладки с подземной на надземную и другие, должно обеспечиваться получение информации о динамике перемещений трубопровода
 - 5.4 Выбранный метод измерения деформаций, класс точности измерений должен быть экономически обоснован в соответствии с уровнем ответственности подземного трубопровода, а также объемом сети геодезических марок.
- 6) При сложных инженерно-геокриологических условиях, повышенном уровне ответственности сооружения, рекомендуется более частое проведение исследование состояния трубопровода для своевременного обнаружения критических деформаций состояния трубопровода, а также для корреляции результатов проведения мониторинга деформаций при помощи геодезических марок или волоконно-оптических систем и результатов ВТД.

А.3. Визуальное отображение критериев выбора сгущения деформационных марок на основании результатов тепловых расчетов – профиля осадки трубопровода



А.4. Визуальное отображение сети геотехнического мониторинга подземного трубопровода на геологическом профиле трассы в соответствии с рекомендациями

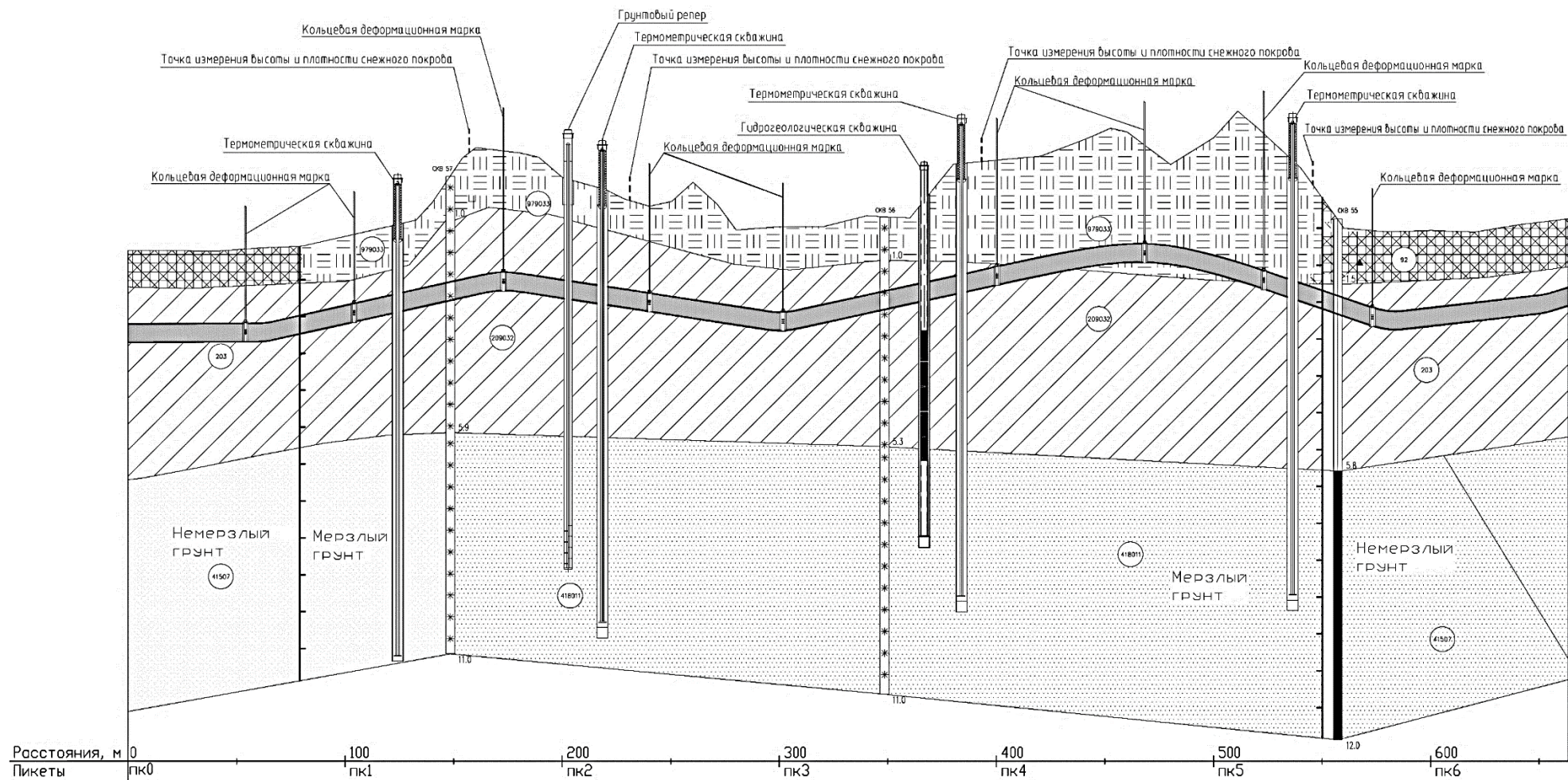
Условные обозначения:

Кольцевая деформационная марка – обозначение элемента сети ГТМ

— подземный трубопровод

○ – инженерно-геологический элемент

— граница раздела грунтов (бергштрих направлен в сторону ММГ)



ПРИЛОЖЕНИЕ Б. АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «ТОМСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ И ПРОЕКТНЫЙ ИНСТИТУТ НЕФТИ И ГАЗА»
(АО «ТомскНИПИнефть»)

634027, Российская Федерация, г. Томск, Мира пр., д. 72,
Тел.: (38251) 616-1100. Факс: (38251) 616-014

0

Ю
инженер
НИПИнефть»
И.Б. Манжол

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационной работы Филимонова А.А. по теме
**«Методика прогноза деформирования оснований подземных трубопроводов в
криолитозоне»**

Мы, нижеподписавшиеся, составили настоящий акт об использовании указанных далее результатов диссертационной работы Филимонова Андрея Алексеевича по теме **«Методика прогноза деформирования оснований подземных трубопроводов в криолитозоне»**, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.6.7. Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение.

Результаты диссертационного исследования Филимонова Андрея Алексеевича были использованы при разработке технических решений и формировании проектно-сметной документации объектов трубопроводного транспорта, расположенных в условиях распространения многолетнемерзлых грунтов для АО «РОСПАН ИНТЕРНЭШНЛ», ООО «Севкомнефтегаз», ООО «Харампурнефтегаз», АО «Верхнечонскнефтегаз», проектируемых АО «ТомскНИПИнефть» в 2020-2024 годах. Кроме того, подтверждаем, что методика прогнозирования деформирования мерзлых грунтов в основании подземных трубопроводов и критерии устройства сети мониторинга применяются при проектировании текущих объектов.

Ученый секретарь, к.т.н.

Ю.С. Захаревич

И.о. начальника управления
промышленного строительства

М.С. Барышников