

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ТЮМЕНСКИЙ ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

*На правах рукописи*



**МАРКОВ ЕВГЕНИЙ ВИКТОРОВИЧ**

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОЕКТНОГО ПОЛОЖЕНИЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ  
ТРУБОПРОВОДОВ В УСЛОВИЯХ ПУЧИНИСТЫХ ГРУНТОВ**

Специальность 25.00.19 - Строительство и эксплуатация  
нефтегазопроводов, баз и хранилищ

**Диссертация**

на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
кандидат технических наук, доцент  
Пульников Сергей Александрович

Тюмень - 2020

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
Глава 1. МОРОЗООПАСНОСТЬ ПУЧИНИСТЫХ ГРУНТОВ КАК ФАКТОР ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ ТРУБОПРОВОДОВ.....	11
1.1 Динамика геологических процессов как основной фактор эксплуатационной надежности трубопроводов в Западной Сибири.....	11
1.2 Влияние климатических и геологических условий на пучинистость грунтов Западной Сибири .....	17
1.3 Анализ степени разработанности вопроса о расчете инженерной защиты холодных подземных трубопроводов в условиях пучинистых грунтов .....	25
Выводы по главе 1.....	37
Глава 2. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МОРОЗНОГО ПУЧЕНИЯ.....	39
2.1 Математическая модель тепломассопереноса в грунте. Законы сохранения вещества и энергии.....	39
2.2 Эмпирические параметры тепломассопереноса .....	43
2.3 Методика решения системы дифференциальных уравнений тепломассопереноса в грунте.....	49
2.4 Расчет параметров пучинистого грунта.....	55
Выводы по главе 2.....	61
Глава 3. ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТРУБОПРОВОДА С ПУЧИНИСТЫМ ГРУНТОМ.....	62
3.1 Разработка математической модели для расчета параметров силового взаимодействия холодного подземного трубопровода с пучинистым грунтом.....	62
3.2 Математическая модель напряженно-деформированного состояния трубопровода на участке пучинистого грунта .....	68
3.3 Алгоритм расчета НДС трубопровода на участке пучинистого грунта..	73
3.4 Апробация математической модели для расчета параметров силового взаимодействия трубопровода с пучинистым грунтом.....	81

3.5 Исследование НДС трубопровода на участке пучинистого грунта .....	87
Выводы по главе 3.....	96
Глава 4. РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБОВ ИНЖЕНЕРНОЙ ЗАЩИТЫ ПОДЗЕМНОГО ТРУБОПРОВОДА ОТ МОРОЗНОГО ПУЧЕНИЯ ГРУНТА .....	98
4.1 Разработка расчетных схем теплосилового взаимодействия подземного трубопровода с пучинистым грунтом с учетом комбинированной инженерной защиты .....	98
4.2 Область применения кольцевой теплоизоляции поверхности трубопровода для защиты от морозного пучения .....	100
4.3 Область применения комбинированной инженерной защиты.....	105
4.4 Методика расчетного обоснования конструктивных решений по обеспечению стабильности проектного положения магистрального трубопровода в условиях пучинистых грунтов .....	112
Выводы по главе 4.....	114
ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ .....	115
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	117
СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ.....	118
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	119
Приложение А (справочное) Акт внедрения методики расчётного обоснования конструктивных решений по обеспечению стабильности проектного положения магистрального трубопровода на участках морозного пучения с применением комплексной инженерной защиты.....	132
Приложение Б (справочное) Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Pipeline Mechanics v.1.0».....	133

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы.** Головная часть Единой трубопроводной системы нефтегазоснабжения Российской Федерации, расположенная в Западносибирской нефтегазоносной провинции, обеспечивает поставки до 85% объёмов добываемого природного газа и 75% газового конденсата потребителям и экспортёрам в разных частях страны. Вектор развития газовой промышленности региона направлен в отдалённые территории полуостровов Ямал и Гыдан, где расположены перспективные залежи углеводородного сырья (Штормовое, Малыгинское, Солетско-Ханавейское газоконденсатные месторождения, Западно-Сеяхинское и Верхнетиутейское нефтегазоконденсатные месторождения и Тамбейская группа месторождений). Доставка энергоносителей от месторождений до потребителей планируется по строящимся и существующим трубопроводам. Поэтому в ближайшие десятилетия Западная Сибирь останется ключевым регионом газовой промышленности.

От месторождений первые тысячи километров магистральных газо- и конденсатопроводов (МГ и МК) проектируются и эксплуатируются по первому принципу строительства на мерзлых грунтах - с отрицательной температурой продукта. В сложных гидро- и геокриологических условиях в холодное время года наблюдаются интенсивные процессы морозного пучения, приводящие к недопустимому отклонению МГ и МК от проектного положения. Практически во всех аварийных случаях, связанных с разрушением стенки трубопровода под воздействием пучения промерзающего грунта, основной причиной являлись процессы резкого растепления многолетнемёрзлых грунтов, обусловленные климатическими аномалиями последнего десятилетия, сформировавшие дополнительный приток поровой воды к фронту промерзания.

В соответствии с распоряжением Президента РФ от 17 декабря 2009 г. № 861-рп «О Климатической доктрине Российской Федерации» основной задачей в отношении адаптации к климатическим изменениям является усиление научно-технического потенциала РФ. При решении задачи теплосилового взаимодействия

трубопровода с пучинистым грунтом необходимо учитывать все известные неблагоприятные сочетания климатических и геологических факторов, эксплуатационные и конструктивные параметры геотехнической системы. Обеспечение проектного положения МГ и МК возможно только с применением комплексной инженерной защиты, направленной на исключение неблагоприятного воздействия морозного пучения. Комплексное решение по инженерной защите от морозного пучения, состоящее из теплоизоляции поверхности трубопровода и грунтовой подушки из непучинистого грунта, требует обоснования и дополнительных исследований. Актуальные математические модели, применяемые на практике и известные в научной среде, не позволяют решить эту задачу в совместной постановке.

Надёжность газотранспортной системы закладывается на этапе её проектирования, на котором необходимо выявить потенциально-опасные участки трассы с морозным пучением грунта, обосновать конструктивные решения по обеспечению стабильности проектного положения трубопровода с помощью комбинированной инженерной защиты, определить границы защищаемого участка. Поэтому разработка методики обеспечения проектного положения магистральных трубопроводов в условиях пучинистых грунтов актуальна.

**Степень разработанности темы исследования.** Исследованию закономерностей морозного пучения посвящены труды отечественных и зарубежных ученых геокриологов и геотехников: Н. И. Быкова, Я. Б. Горелика, Б. В. Григорьева, Ю. С. Даниэляна, Б. В. Дерягина, Б. И. Долматова, Д. С. Дроздова, Э. Д. Ершова, И. А. Золотаря, И. Л. Калюжного, М. Ф. Киселева, В. С. Колунина, И. А. Комарова, С. А. Кудрявцева, С. Я. Кушнера, В. П. Мельникова, П. Ю. Михайлова, В. О. Орлова, В. И. Пускова, О. И. Финка, Н. А. Цытовича, А. Б. Шабарова, П. А. Яницкого, Y. Mualem, K. Terzaghi. Исследованиями напряженно-деформированного состояния трубопроводов с учетом взаимодействия с грунтовыми основаниями занимались Х. А. Азметов, А. Б. Айнбиндер, Р. И. Аронов, Л. А. Бабин, В. Л. Березин, П. П. Бородавкин,

Л. И. Быков, С. В. Виноградов, В. Я. Волохов, В. В. Гайдамак, А. К. Галлямов, А. И. Горковенко, Р. С. Гумеров, Л. А. Димов, Р. М. Зарипов, А. Г. Камерштейн, Г. Е. Коробков, Г. К. Клейн, Ф. М. Мустафин, В. Д. Таран, В. В. Харионовский, В. А. Чичелов, Э. М. Ясин.

В работах А. Б. Айнбиндера, Я. Б. Горелика, А. И. Горковенко, П. Ю. Михайлова, В. В. Харионовского отмечается, что замена грунта под трубопроводом до границы фронта промерзания является достаточным условием для обеспечения стабильности его проектного положения на участке морозного пучения. Однако это решение остается не обоснованным с позиции силового взаимодействия трубопровода с пучинистым грунтом. Кроме того, недостаточно изученным остается вопрос о выборе протяженности применяемой инженерной защиты в условиях дефицита информации о геологическом строении основания.

**Цель работы:** обеспечение проектного положения подземных магистральных газопроводов и конденсатопроводов в условиях пучинистых грунтов путем совершенствования расчётных методик и оптимизации параметров инженерной защиты.

**Основные задачи исследования:**

1. Разработать математическую модель, описывающую процесс силового взаимодействия подземного магистрального газо- или конденсатопровода с пучинистым грунтом с учётом комплексных решений по защите от морозного пучения.

2. Установить зависимость изгибающего напряжения в наиболее опасном сечении подземного магистрального трубопровода от протяжённости пересекаемого участка пучинистого грунта с учётом возникающих сил морозного пучения для определения протяжённости применяемой инженерной защиты.

3. Разработать методику расчётного обоснования комбинированных конструктивных решений по обеспечению стабильности проектного положения участка подземного магистрального газо- или конденсатопровода в зоне пучинистых грунтов.

**Объектом исследования** является магистральный трубопровод с отрицательной температурой продукта, проложенный подземно в пучинистых грунтах.

**Предметом исследования** является теплосиловое взаимодействие подземного магистрального трубопровода и элементов инженерной защиты с пучинистым грунтом.

**Методология и методы исследования.** При выполнении диссертационного исследования применялся комплексный подход, включающий научный анализ, планирование и проведение экспериментальных исследований, измерение и сравнение. В диссертации использованы методы математического и регрессионного анализа, классические положения теории тепломассопереноса в пористых средах, теории упругости, механики грунтов и строительной механики.

**Научная новизна результатов работы:**

1. Разработана математическая модель, описывающая силовое взаимодействие магистрального газо- или конденсатопровода с пылевато-глинистыми водонасыщенными пучинистыми грунтами с учетом влияния комбинированной инженерной защиты от морозного пучения в виде противопучинистой грунтовой подушки из строительного песка крупного или средней крупности и кольцевой теплоизоляции из пенополиуретана в металлополимерной оболочке.

2. Установлена зависимость дополнительных изгибных напряжений в стенке магистрального трубопровода от протяжённости пересекаемого участка пучинистого грунта с учётом возникающих сил морозного пучения, имеющая характерный максимум в диапазоне длин от 1,5 до 21,0 м.

3. Разработана методика расчётного обоснования комбинированных конструктивных решений по обеспечению стабильности проектного положения участка подземного магистрального газо- или конденсатопровода с температурой продукта от 0 °С до -8 °С в зоне пылевато-глинистых водонасыщенных пучинистых грунтов для различных типоразмеров труб.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Применение математической модели упруго-деформируемого тела для расчёта параметров силового взаимодействия подземного трубопровода с пучинистым грунтом возможно при нагрузках ниже несущей способности основания.

2. Длинные участки трубопровода, подверженные пучению, отличаются от коротких характерным плато и имеют четкую границу между этими состояниями, характеризующуюся снижением изгибных напряжений до 2 раз.

3. Применение оптимизированной противопучинистой грунтовой конструкции выше границы фронта промерзания пучинистого грунта обеспечивает проектное положение теплоизолированного подземного газо- или конденсатопровода диаметром от 530 до 1420 мм с температурой продукта от  $-5^{\circ}\text{C}$  до  $-8^{\circ}\text{C}$ .

**Теоретическая и практическая значимость работы:**

1. Разработанный алгоритм решения задачи оптимизации геометрических параметров противопучинистой грунтовой конструкции позволяет сократить объём замены грунта на величину до 50%.

2. Предложенное к применению правило, регламентирующее обоснование границ участка трубопровода, подлежащего инженерной защите от морозного пучения, позволяет в перспективе исключить возможные эксплуатационные риски появления аварийно-опасных критических зон морозного пучения протяжённостью от 1,5 до 21,0 м, что повысит надёжность транспортной системы в целом.

3. Разработанная на основе методики программа для ЭВМ «Pipeline Mechanics v.1.0» может быть использована проектными организациями для обоснования конструктивных решений по обеспечению стабильности проектного положения подземного магистрального газо- или конденсатопровода с отрицательной температурой продукта в зоне пучинистых грунтов. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018665130.



4. Разработанная методика расчётного обоснования комбинированных конструктивных решений внедрена в ООО «Газпром трансгаз Сургут» (акт внедрения от 15.01.2020) и апробирована на ГКС «Заполярная», что позволило обеспечить стабильность проектного положения подземных газопроводов и крановых узлов на участках пучинистых грунтов.

**Личный вклад автора** заключается в формировании методического подхода к проведению численных и натурных экспериментов и обработке их результатов; получении математических моделей и зависимостей; разработке методики обеспечения стабильности проектного положения участка подземного магистрального газо- или конденсатопровода в зоне пучинистых грунтов; формулировании положений научной новизны, теоретической и практической значимости; анализе, обобщении и внедрении результатов исследования.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность результатов работы обеспечена применением известных достижений строительной механики, теорий упругости, тепломассопереноса, численного решения дифференциальных уравнений и сходимостью с результатами экспериментальных исследований. Основные положения, результаты и научная новизна диссертационной работы были доложены на 7 международных и всероссийских научно-практических конференциях, форумах и семинарах: II Российская учебно-практическая молодёжная конференция по геотехнике, г. Москва, 2016 г.; Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Транспорт и хранение углеводородного сырья», г. Тюмень, 2017 г.; Германо-Российский студенческий форум по природному газу, г. Фрайберг, 2017 г.; IV Международная научно-практическая молодёжная конференция по геотехнике, г. Тюмень, 2018 г.; Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Транспорт и хранение углеводородного сырья», г. Тюмень, 2018 г.; Международная научная конференция «Транспортное строительство в холодных регионах», г. Санкт-Петербург, 2019 г.; Международная научно-техническая конференция «Транспорт

и хранение углеводородного сырья - Нефтегазовый терминал», г. Тюмень, 2019 г.

**Публикации.** Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 10 научных трудах, в том числе 3-х статьях в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

**Соответствие диссертации паспорту заявленной специальности.** Тема и содержание диссертационной работы соответствуют паспорту специальности 25.00.19 - Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ, а именно п. 1 «Напряжённое состояние и взаимодействие с окружающей средой трубопроводов, резервуаров и оборудования при различных условиях эксплуатации с целью разработки научных основ и методов прочностного, гидравлического и теплового расчётов нефтегазопроводов и газонефтехранилищ» и п. 2 «Разработка и оптимизация методов проектирования, сооружения и эксплуатации сухопутных и морских нефтегазопроводов, нефтебаз и газонефтехранилищ с целью усовершенствования технологических процессов с учетом требований промышленной экологии».

**Структура и объем работы.** Диссертация изложена на 133 страницах машинописного текста, состоит из введения, четырёх глав, выводов, списка сокращений, словаря терминов и списка литературы, включает 24 таблицы, 45 рисунков и два приложения. Библиографический список включает 112 наименований, в том числе 16 иностранных.

# **ГЛАВА 1. МОРОЗОПАСНОСТЬ ПУЧИНИСТЫХ ГРУНТОВ КАК ФАКТОР ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ ТРУБОПРОВОДОВ**

## **1.1 Динамика геологических процессов как основной фактор эксплуатационной надежности трубопроводов в Западной Сибири**

Единая система газоснабжения Российской Федерации насчитывает около 180 тыс. км магистральных газопроводов и 20 тыс. км конденсатопроводов и нефтепродуктопроводов. На долю Западной Сибири приходится около 85% добычи природного газа и 75% добычи газового конденсата. В ближайшее десятилетие развитие топливно-энергетической отрасли страны связано с освоением перспективных залежей углеводородов на территории полуостровов Ямал и Гыдан (Штормовое, Малыгинское и Солетско-Ханавейское газоконденсатные месторождения, Западно-Сеяхинское и Верхнетиутеское нефтегазоконденсатные месторождения и Тамбейская группа месторождений) и транспортировкой нефти, газа и газового конденсата до потребителей трубопроводным транспортом.

На рассматриваемой территории находятся в эксплуатации подземные магистральные газо- и конденсатопроводы с отрицательной температурой продукта: МГ Ямбург-Ныда (185 км), МГ Бованенково-Ухта (2 нитки, 2400 км), МК Ямбург-Уренгой (2 нитки, 457 км) и МК Уренгой-Сургут (2 нитки, 1397 км) общей протяженностью более 4400 км. По статистике аварийность МГ и МК за последние 15 лет на этих трубопроводах в 2 раза выше, чем в среднем по всем магистралям России: 0,39 аварий в год на 1000 км (2 аварии в год на 4400 км). Причем половина всех аварий связана с воздействием морозного пучения грунтов основания.

Трубопроводы северных регионов Западной Сибири сооружаются и эксплуатируются в непрерывно изменяющихся климатических и инженерно-геологических условиях, характеризующихся низкими температурами воздуха, обильными осадками при отсутствии стока, высоким уровнем грунтовых вод, заболоченностью и заторфованностью грунтов, глубоким сезонным промерзанием и подтоплением территорий во время весеннего и осеннего паводков. Усугубляют

ситуацию повышение среднегодовой температуры воздуха, которое ускоряет процессы деградации многолетнемерзлых грунтов (ММГ), увеличивает площади подтопленных и заболоченных территорий, усиливает опасные для трубопроводов геологические процессы: эрозию, дефляцию, суффозию, термокарст и морозное пучение.

В общем виде взаимодействие трубопроводов с геологической средой представляется следующим образом. В зимнее время касательные силы морозного пучения нарушают устойчивость балластирующих устройств и свайных опор, смещение которых повреждает антикоррозионное покрытие. Балластирующие устройства, смещенные морозным пучением, теряют связь с трубопроводом и балластирующую способность, что приводит к локальным всплываниям и изгибам с приходом весеннего паводка. Нормальные силы морозного пучения, действующие на нижний полупериметр подземных трубопроводов, приводят к неравномерным деформациям трубопровода в вертикальной плоскости [16]. Изменение напряженно-деформированного состояния (НДС) способствует развитию стресс-коррозии. Поврежденное антикоррозионное покрытие становится очагом язвенной коррозии. Увеличение льдистости грунта при морозном пучении приводит к разрушению его структуры, увеличению пористости, проницаемости и скорости эрозии, суффозии и дефляции во время весеннего паводка. После половодья в осенне-летний период оголенные трубопроводы и грунты с разрушенной структурой и повышенной кислородной проницаемостью формируют коррозионные макропары.

Таким образом, морозное пучение оказывает пагубное влияние как на сам трубопровод, так и на балластирующие конструкции и грунты обвалования и основания. Прокладка трубопроводов в таких условиях требует специального комплекса мероприятий по инженерной защите.

Широкая распространенность морозного пучения на территории Западной Сибири (более 65% площади территорий) связана с наличием всех необходимых для этого условий: низкие температуры воздуха, высокая обводненность грунтов и

их пылевато-глинистый состав. Морозное пучение влияет на большинство сооружений: мелкозаглубленные фундаменты, свайные опоры, дороги и трубопроводы. Но если на площадных объектах борьба с пучением вполне успешна, то на линейных объектах разнообразие геологических условий, сменяющихся каждые 50-100м, делает задачу по устройству инженерной защиты особенно трудоёмкой и сложной. Для газо- и конденсатопроводов важность этой задачи связана еще и с повышенным классом опасности таких объектов из-за высокого внутреннего давления, пожароопасности и токсичности перекачиваемого продукта для окружающей среды.

В настоящее время количественная оценка воздействия морозного пучения на трубопроводы с учетом инженерной защиты на стадии проектирования осуществляется в недостаточной степени, что приводит к низкой эффективности технических решений. Свидетельством тому являются многочисленные аварии и недопустимые отклонения, происходящие как на магистральных, так и на промысловых газо- и конденсатопроводах ежегодно.

Инцидент №1. При обследовании трассы магистрального газопровода диаметром 1020x16 мм автор стал свидетелем множественного смещения балластирующих конструкций и повреждения антикоррозионного покрытия в результате пучения грунтов, которое случилось за один зимний сезон (рисунок 1.1).



Рисунок 1.1 - Инцидент №1. Смещение утяжелителей морозным пучением грунтов (слева) и связанное с этим повреждение антикоррозионного покрытия (справа) на магистральном газопроводе диаметром 1020x16 мм

В результате устойчивость МГ против всплытия была нарушена и образовалась арка без разгерметизации внутренней полости. Ежегодно диагностируемая протяженность магистральных газопроводов со схожими ненормативными состояниями линейной части составляет десятки километров в Западной Сибири [41].

Инцидент №2. Другим примером является выявленное автором при обследовании трассы недопустимое вертикальное перемещение свайной опоры на магистральном газопроводе диаметром 720x9 мм в результате воздействия касательных сил пучения на боковую поверхность свай (рисунок 1.2).



Рисунок 1.2 - Инцидент №2. Выпучивание свайных опор надземного участка магистрального газопровода диаметром 720x9 мм, сопровождающееся разрушением скользящей опоры

Этот случай характерен для трубопроводов на талых слабонесущих грунтах, где касательная сила пучения значительно больше сил сцепления свай с нижележащим грунтом. Морозное пучение сопровождается разрушением конструкций опор, повреждением теплоизоляционного и антикоррозионного покрытия. Такие инциденты обычно хорошо диагностируются визуально, что позволяет своевременно предпринять меры по инженерной защите.

Инцидент №3. Вертикальное перемещение продувочной свечи под воздействием касательных сил пучения привело к разрыву стенки в районе

тройника основной магистрали промышленного конденсатопровода диаметром 426x15 мм (рисунок 1.3). Этот случай характерен для трубопроводов с околонулевой или отрицательной температурой продукта, а также для трубопроводов с переменным режимом эксплуатации (вытяжные и продувочные свечи). Защемление трубопровода грунтом и невозможность диагностирования повреждений без системы мониторинга планово-высотного положения (ПВП) обуславливает их высокую опасность.

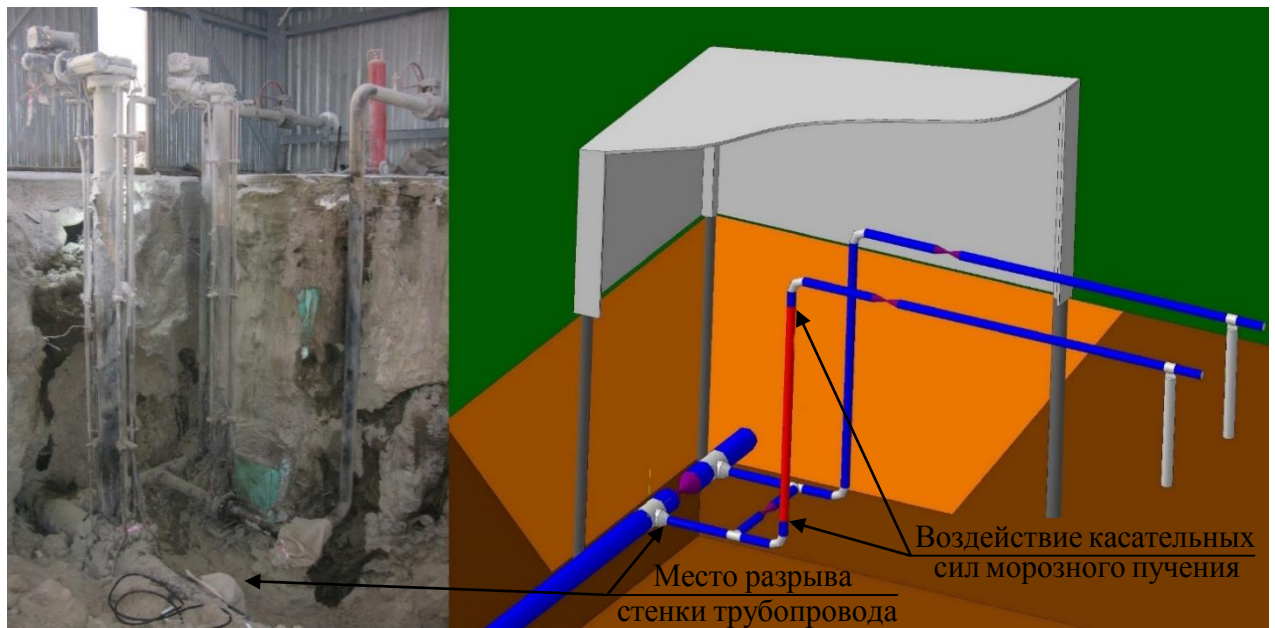


Рисунок 1.3 - Инцидент №3. Крановый узел в момент ремонта (слева) и геометрическая модель обвязки кранового узла промышленного конденсатопровода диаметром 426x15 мм (справа)

Инцидент №4. Кроме усилий, направленных по касательной к поверхности смерзания, воздействие морозного пучения может быть реализовано посредством усилий, направленных по нормали к поверхности. При этом нормальные силы превышают касательные в десятки раз и достигают величин порядка 1 МПа на каждый градус Цельсия отрицательной температуры, многократно превосходя расчетные значения по теории предельного равновесия для талых грунтов [15; 77]. При отрицательной температуре перекачиваемого продукта происходит промораживание грунта вокруг трубопровода и увеличение сил морозного пучения. Давление грунта приводит к сильным изгибам трубопровода в

вертикальной плоскости на коротких участках и разгерметизации внутренней полости. Именно поэтому трубопроводы с отрицательной температурой продукта являются наиболее подверженными морозному пучению. На рисунке 1.4 показан пример аварии, спровоцированной силовым воздействием разрастающихся скоплений шлирового льда под нижней образующей холодного магистрального конденсатопровода диаметром 530x7,1мм. Скопления шлирового льда сформировались в талом грунте под влиянием отрицательной температуры продукта. Талый грунт и приток воды к фронту промерзания явились следствием оттаивания ММГ за период времени от инженерных изысканий до ввода в эксплуатацию МК.

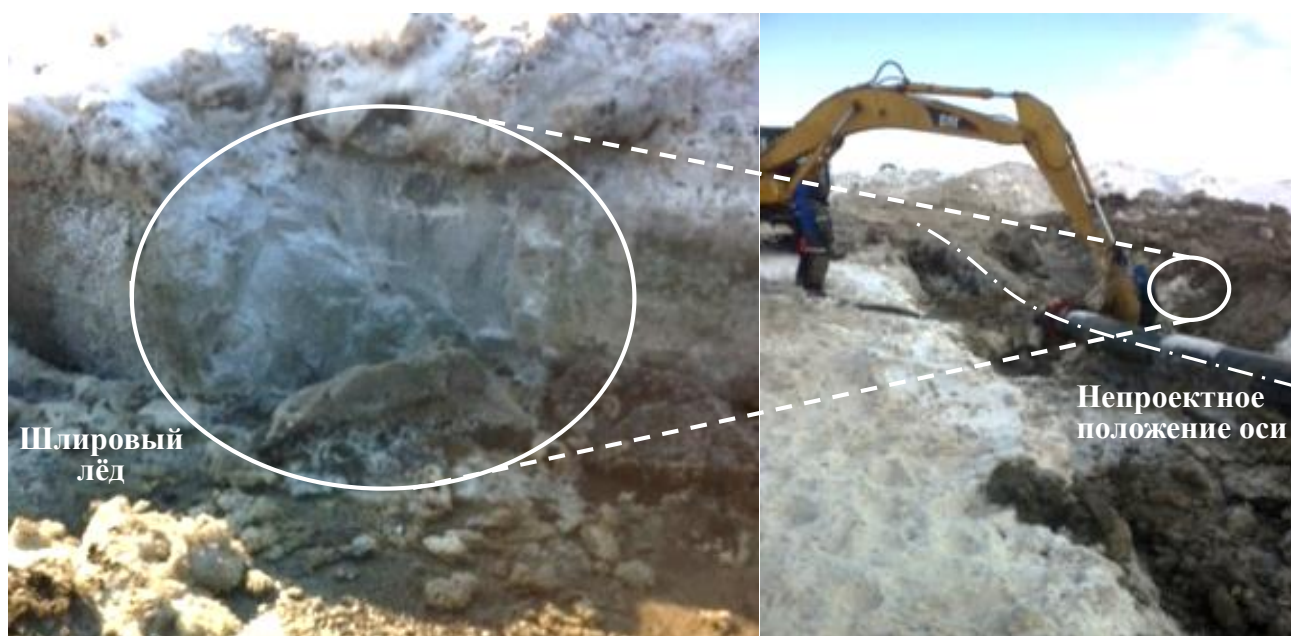


Рисунок 1.4 - Инцидент №4. Скопления шлирового льда (слева) в основании МК диаметром 530x7,1мм (справа)

Дополнительная опасность таких повреждений связана с малой величиной предельно допустимых перемещений (10 - 20 см) и практической неосуществимостью их своевременного диагностирования без системы мониторинга ПВП. Следует отметить, что на сегодняшний день оснащенность магистральных и промысловых трубопроводов системами мониторинга ПВП в Западной Сибири на участках со сложными инженерно-геологическими условиями не превышает 1,5% от их протяженности, в то время как протяженность участков с



морозным пучением составляет порядка 60% от протяженности трубопроводов.

Надежность трубопроводной системы закладывается на стадии проектирования. Рассмотренные четыре примера аварийных инцидентов доказывают, что на сегодняшний день проектный уровень надежности в условиях пучинистых грунтов не обеспечивает безопасную эксплуатацию магистральных трубопроводов с отрицательной температурой продукта. Об этом также свидетельствует и вдвое более высокий уровень аварийности магистральных трубопроводов на участках со сложными геокриологическими условиями по сравнению с простыми условиями, отмеченный в работе [58]. Поэтому повышение уровня надежности трубопроводов в сложных геокриологических условиях до уровня, сравнимого с простыми условиями, является актуальной задачей.

## **1.2 Влияние климатических и геологических условий на пучинистость грунтов Западной Сибири**

Эксплуатационная надежность трубопроводных систем в условиях севера Западной Сибири определяется преимущественно способностью конструкции трубопровода сопротивляться неблагоприятной динамике геологической среды. Трубопровод подвержен воздействию атмосферных и геологических процессов, колебаний добычи, переработки и потребления сырья. В тоже время трубопровод сам оказывает воздействие на грунты, изменяя их температурно-влажностный режим. В целом геотехническая система трубопровод - грунт - атмосфера находится в постоянном динамическом изменении. Наибольшие воздействия на подземный трубопровод оказывает геологическая среда, поэтому рассмотрим в начале её.

Инженерно-геологические условия Западной Сибири формировались в четвертичный период в процессах многократных оледенений и морских трансгрессий, связанных с опусканием поверхности земли. Это послужило причиной преимущественного накопления морских и ледниковых отложений на севере, толщина которых составляет до 200 - 250 м. На юге аккумуляровались в основном рыхлые аллювиальные и озерные осадки, толщиной от 5 до 10 м.

Основные элементы рельефа Западно-Сибирской равнины - это широкие плоские междуречья и речные долины. Во многих местах уклоны поверхности земли почти отсутствуют (порядка 0,0004), что обуславливает незначительный сток выпадающих атмосферных осадков, сильную заболоченность междуречий, выход грунтовых вод на поверхность земли. Заболоченные и заторфованные территории занимают более 50% площади [16; 34]. Коэффициент водонасыщенности  $S_r$  изменяется в пределах 0,9 - 1, реже 0,8. От периода весеннего половодья до начала промерзания грунтов уровень подземных вод может изменяться на 2 - 5 метров.

Анализ свойств грунтов показывает, что суглинки и глины характеризуются высоким содержанием глинистых и пылеватых фракций и большой деформируемостью даже в мерзлом состоянии (таблицы 1.1 и 1.2) [34; 78]. Условные обозначения в таблице 1.2:  $\rho_{sk}$  - плотность твердых частиц грунта, кг/м<sup>3</sup>;  $e$  - коэффициент пористости, д.ед.;  $\varphi_{тал}$  - угол внутреннего трения талого грунта, °;  $c_{тал}$  - сцепление талого грунта, Па;  $E_{тал}$  - модуль деформации талого грунта, Па;  $E_{мер}$  - модуль деформации мерзлого грунта, Па.

Таблица 1.1 - Зерновой состав минеральных грунтов Западной Сибири

Вид грунта	Зерновой состав, %									
	Глинистые		Пылеватые		Песчаные					Кр.обл
	< 0,001	0,001 - 0,005	0,005 - 0,010	0,01 - 0,05	0,05 - 0,10	0,10 - 0,25	0,50 - 0,25	1,0 - 0,5	2,0 - 1,0	> 2,0
Пески	0,0-5,0	5,0-15	10-20	20-60	20-60	20-60	0,0-3,0	0,0-10	< 2,0	10
Супеси	0,0-10	5,0-15	2,0-10	30-50	20-60	20-60	0,0-3,0	0,0-10	< 2,0	10
Суглинки и глины	-	10-40	5-10	20-55	10-30	0,0-0,6	< 1,0	-	Редко	

Таблица 1.2 - Физико-механические характеристики минеральных грунтов Западной Сибири

Вид грунта	$\rho_{sk} \cdot 10^{-3}$ , кг/м <sup>3</sup>	$e$ , д.ед.	$\varphi_{тал}$ , °	$c_{тал} \cdot 10^{-3}$ , Па	$E_{тал} \cdot 10^{-6}$ , Па	$E_{мер} \cdot 10^{-6}$ , Па
Пески	2,6 - 3,0	0,60-0,80	18-32	-	5 - 20	6,1 - 100
Супеси	2,7 - 2,8	0,60-0,80	16-28	10 - 30	4 - 12	5,5 - 55
Суглинки и глины	2,6 - 2,8	0,75-1,02	14-22	20 - 50	2 - 10	2,2 - 55

Глинистые грунты, как правило, находятся в текучей или текучепластичной

консистенции. Аллювиальные пески в большинстве своём мелкие, реже крупные или пылеватые, водонасыщенные, иногда с прослойками глинистых грунтов. Молекулярные отношения  $\text{SiO}_2:\text{K}_2\text{O}_3$  (для суглинков в среднем 6,6) позволяют сделать вывод, что основной составляющий минерал глинистых грунтов - монтморрилонит [16].

Динамика климатических условий оказывает воздействие на подземный трубопровод в основном через изменение свойств геологической среды. Поэтому геологические условия следует рассматривать совместно с климатическими.

Климат севера Западной Сибири резко континентальный с суровой продолжительной зимой и теплым коротким летом. Максимальная положительная температура воздуха составляет более  $+30\text{ }^\circ\text{C}$ , а минимальная до  $-60\text{ }^\circ\text{C}$ . Средняя продолжительность безморозного периода не превышает 90 суток.

Основные климатические характеристики региона по метеостанции г. Уренгой, использованные в последующих главах при моделировании тепло и массообменных процессов, приведены в таблицах 1.3 и 1.4. Условные обозначения в таблицах 1.3 и 1.4:  $Q_{sun}$  - сумма прямой и рассеянной солнечной радиации при ясном небе,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;  $A_{гр}$  - альbedo деятельной поверхности по ближайшей метеостанции с замерами - г. Тарко-Сале (удаление 140 км), д.ед.;  $U$  - скорость ветра на высоте флюгера (10 м),  $\text{м}/\text{с}$ ;  $T_{в}$  - температура воздуха,  $^\circ\text{C}$ ;  $\varphi_{в}$  - относительная влажность воздуха, д.ед.;  $h_{pr}$  - сумма смешанных и жидких осадков, м;  $\bar{c}$  - балл общей облачности;  $\rho_{sn}$  - плотность снежного покрова в лесу по снегосъемкам,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $h_{sn}$  - высота снежного покрова в лесу по снегосъемкам, м.

Климатические условия Западной Сибири стремительно изменяются на протяжении последних десятилетий, о чем свидетельствуют последние исследования [46]. На протяжении последних трёх десятилетий наблюдается повышение температуры воздуха на севере Западной Сибири (рисунок 1.5): в районе Обской и Тазовской губы на  $1,5\text{ }^\circ\text{C}$ . Количество осадков изменилось неравномерно, в районе Обской губы уменьшилось на 30 мм, в районе Тазовской губы увеличилось на 90 мм, т.е. более чем на 40% [46].

В соответствии с распоряжением Президента РФ от 17 декабря 2009 г. № 861-п «О Климатической доктрине Российской Федерации» основной задачей в отношении адаптации к климатическим изменениям является усиление научно-технического потенциала РФ. Поэтому учет возможных последствий от климатических и геологических изменений является актуальной задачей [74].

Таблица 1.3 - Среднемесячное и годовое распределение солнечной радиации, температуры и влажности воздуха, скорости ветра, осадков.

Месяц	$Q_{sun}$ , Вт/м <sup>2</sup>	$\bar{c}$	$A_{гр}$ , д.ед.	$U$ , м/с	$T_{в}$ , °С	$\varphi_{в}$ , д.ед.	$h_{пр}$ , м
I	6,72	6,2	0,80	3,9	-26,4	0,76	0
II	50,60	5,6	0,79	3,8	-26,4	0,75	0
III	128,36	6,0	0,78	3,4	-19,2	0,74	0,002
IV	222,92	6,0	0,69	4,6	-10,3	0,73	0,07
V	305,11	7,3	0,43	5,0	-2,6	0,74	0,17
VI	333,33	7,6	0,24	5,0	8,4	0,9	0,48
VII	325,94	6,4	0,24	4,0	15,4	0,68	0,64
VIII	239,25	7,2	0,24	3,8	11,3	0,77	0,67
IX	83,33	8,3	0,26	4,2	5,2	0,82	0,6
X	55,11	8,2	0,62	4,6	-6,3	0,84	0,21
XI	17,36	7,0	0,79	4,1	-18,2	0,80	0,02
XII	0,00	6,4	0,80	3,9	-24	0,77	0,002

Таблица 1.4 - Плотность и высота снежного покрова в лесу

Месяц	Декада	$h_{sn}$ , м	$\rho_{sn}$ , кг/м <sup>3</sup>	Месяц	Декада	$h_{sn}$ , м	$\rho_{sn}$ , кг/м <sup>3</sup>
X	1	-	-	II	1	0,75	210
	2	0,16	140		2	0,77	210
	3	0,26	140		3	0,80	210
XI	1	0,34	150	III	1	0,84	220
	2	0,40	170		2	0,83	220
	3	0,47	170		3	0,89	230
XII	1	0,51	180	IV	1	0,87	240
	2	0,55	190		2	0,75	240
	3	0,61	190		3	0,73	250
I	1	0,67	190	V	1	0,67	270
	2	0,67	200		2	0,51	310
	3	0,73	200		3	0,21	330

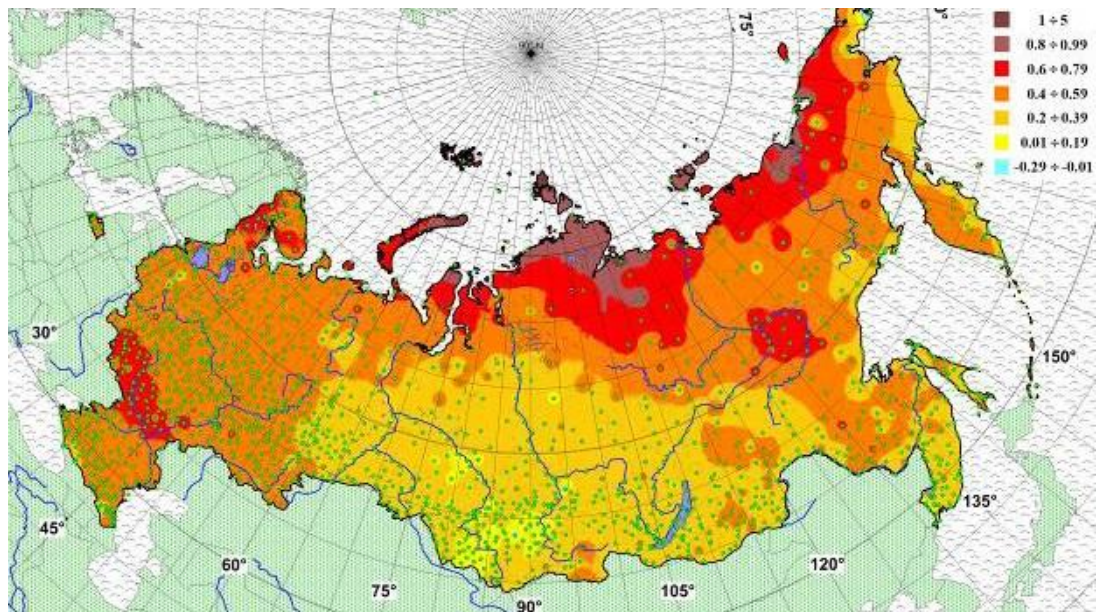


Рисунок 1.5 - Распределение коэффициентов линейного тренда среднегодовой температуры воздуха за 1976 - 2014 гг. ( $^{\circ}\text{C}$  за 10 лет) [46]

По прогнозам В. А. Кокорева существующие климатические тренды сохранятся в ближайшие 30 - 50 лет [46]. Ожидается увеличение среднегодовой температуры воздуха на полуостровах Ямал и Гыдан на  $5^{\circ}\text{C}$  (рисунок 1.6), что приведет к ускорению деградации многолетнемерзлых грунтов. Годовые суммы осадков увеличатся на 240 - 360 мм, т.е. более чем на 100%.

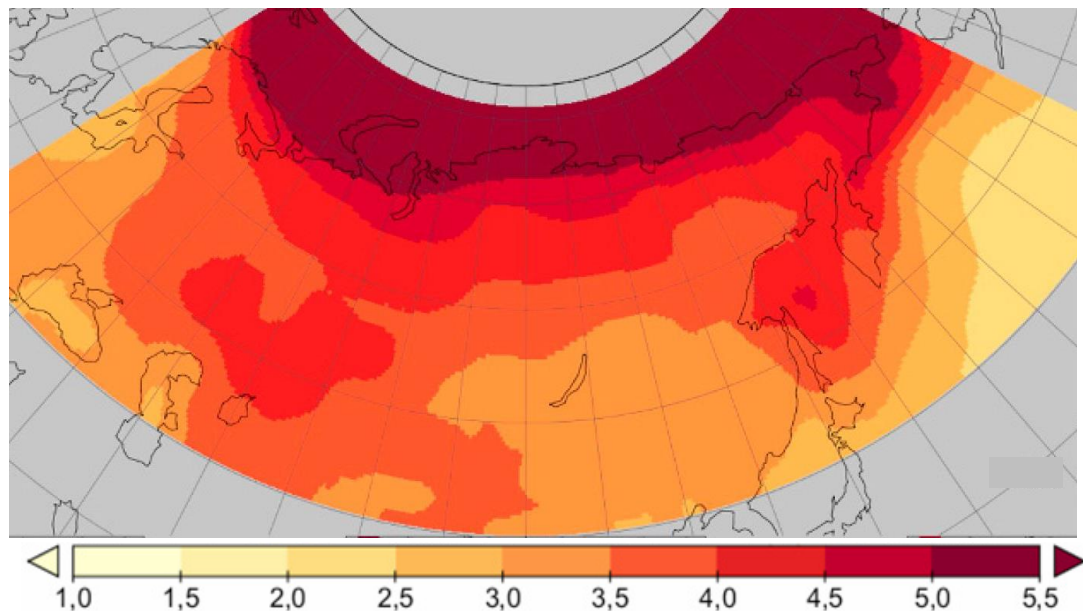


Рисунок 1.6 - Прогнозируемые на период 2035-2064 гг. аномалии среднегодовой температуры воздуха на территории России ( $^{\circ}\text{C}$ ) [46]

Увеличение объема осадков и деградация многолетнемерзлых грунтов приведут к увеличению количества озер и болот, повышению уровня грунтовых

вод, площади подтопляемых территорий, интенсивности весеннего паводка за счет обильного снеготаяния. Таким образом, в период до 2060 года негативные гидрогеологические и геокриологические процессы будут гораздо резче выражены, чем это наблюдалось ранее. Увеличится интенсивность термокарстовых явлений, образования линейных и овражных эрозий. Особенно благоприятные условия создадутся для увеличения интенсивности морозного пучения, которое в ближайшие 40 лет останется одним из наиболее распространенных и опасных геокриологических процессов на севере Западной Сибири и будет захватывать новые территории.

Морозное пучение - это процесс увеличения объема грунта, вызванный переносом влаги из талых слоев грунта в промерзающие, с последующим её замерзанием и расширением. Исследование процесса перераспределения влаги в промерзающих грунтах начато еще в конце прошлого века. Впервые причину морозного пучения за счет миграции влаги из талых в промерзающие слои грунта объяснил в 1885 г. Российский ученый В. И. Штукенбергер [95], а экспериментальное подтверждение дал С. Г. Войслав [7]. Дальнейшие исследования отечественных ученых Н. И. Быкова и П. Н. Каптерева [5], М. Н. Гольдштейна [12], Б. И. Долматова [29; 30], В. Ф. Жукова [32], И. А. Золоторя [33], М. Ф. Киселева [43; 44; 45], В. О. Орлова [60; 61], Н. В. Орнатского [62], Н. А. Пузакова [69], А. М. Пчелинцева [73], М. И. Сумгина [81], И. А. Тютюнова [83; 84], А. Е. Федосова [86], О. И. Финка [87], Н. А. Цытовича [89; 90; 91] и др., а также зарубежных исследователей G. J. Vouyoucos [97] и R. Ruckli [110], подтвердили, что в промерзающих грунтах миграция влаги в сторону более низких отрицательных температур является основной причиной морозного пучения грунтов.

Перенос влаги в сторону мёрзлых грунтов с позиций термодинамики объясняется стремлением системы к равновесному состоянию с максимумом энтропии или минимумом свободной энергии Гиббса. Отклонение любого термодинамического параметра от равновесного значения под действием внешних

сил сопровождается стремлением системы скомпенсировать эти силы. Таким образом, массоперенос стремится скомпенсировать градиент температуры.

На интенсивность морозного пучения влияет множество факторов. Среди геологических факторов выделяют: дисперсность минерального скелета, плотность грунта, уровень грунтовых вод, минеральный состав глинистых частиц и состав обменных катионов. Среди климатических выделяют: количество осадков в предзимний период, средняя зимняя температура и скорость промерзания.

Дисперсность определяет удельную поверхность минерального скелета, которая является проводящей средой при плёночном механизме миграции влаги в промерзающих грунтах. Изучением влияния дисперсности на морозное пучение занимались А. Касагранде, А. Дюкер, Н. Я. Хархута и Ю. М. Васильев, М. Мартон, М. Ф. Киселев, В. О. Орлов, Ю. Д. Дубнов, Н. Д. Меренков. Результаты их исследований показывают, что наибольшее пучение свойственно пылеватым грунтам с размером частиц от 0,05 до 0,005 мм. При размерах частиц более 0,1 мм или менее 0,002 мм пучение существенно снижается.

Изучением влияния плотности на морозное пучение занимались Н. Я. Хархута и Ю. М. Васильев. Обнаружено значение оптимальной плотности грунта, при котором морозное пучение максимально. Оно составляет 0,8 - 0,9 от максимальной плотности при использовании стандартного уплотнения в соответствии с ГОСТ 22733-77.

Грунтовые воды участвуют во влагонакоплении, начиная от их границы и до верхней каймы капиллярного поднятия. Поэтому пучение максимально ниже уровня грунтовых вод (УГВ) и постепенно снижается по мере отдаления от верхней границы. Практически любой грунт, находящийся ниже УГВ, является пучинистым. Выше уровня грунтовых вод интенсивность пучения спадает в следующей последовательности: глина > суглинки > супеси > пылеватые пески.

В зависимости от типа глинистого материала пучинистость грунтов снижается в следующей последовательности: каолинит - иллит - монтмориллонит. Насыщение глинистых грунтов многовалентными катионами (например  $Al^{3+}$ ,  $Fe^{3+}$ )

приводит к уменьшению количества прочносвязанной воды и увеличению величины пучения.

Морозное пучение активно проявляется при определенных температурно-влажностных условиях. При скорости промерзания порядка 0,1 - 0,13 см/ч пучение максимально, а при скорости промерзания более 0,2 см/ч в большинстве случаев формируется массивная криогенная текстура. Предзимнее увлажнение грунтов атмосферными осадками значительно увеличивает интенсивность пучения.

Сопоставление климатических и инженерно-геологических условий севера Западной Сибири и основных факторов морозного пучения показывает, что существуют все необходимые условия для развития морозного пучения грунтов:

- обводненность грунтов региона и дополнительное предзимнее увлажнение;
- наличие пылеватой фракции от 20 до 60 % по массе обеспечивает плёночный массоперенос;
- средняя пористость грунтов обеспечивает оптимальную упаковку минеральных частиц грунта для плёночного переноса воды и морозного пучения;
- низкие среднегодовые температуры способствуют глубокому сезонному промерзанию грунтов и пучению на больших глубинах;

С учетом прогнозируемых климатических трендов следует ожидать ухудшения геокриологической обстановки в связи с оттаиванием мерзлых грунтов, увеличением площади обводненных и заболоченных территорий на севере Западной Сибири в ближайшие 20 - 30 лет. Это приведет к увеличению количества повреждений трубопроводов от воздействия морозного пучения. Невозможность своевременной диагностики морозного пучения на подземных трубопроводах приведет к увеличению количества аварий, что нанесет существенный урон экономике и экологии региона. Поэтому обеспечение инженерной защиты трубопроводов в условиях пучинистых грунтов останется актуальной задачей в ближайшие десятилетия [37].



### 1.3 Анализ степени разработанности вопроса о расчете инженерной защиты холодных подземных трубопроводов в условиях пучинистых грунтов

Проектирование трубопроводов можно условно разделить на два основных этапа: инженерные изыскания и разработка проекта. Для расчета инженерной защиты трубопроводов в условиях пучинистых грунтов необходимо последовательно решить 9 основных задач (таблица 1.5). На этапе инженерных изысканий решаются задачи №1 - №3, суть которых состоит в определении физико-механических, теплофизических и фильтрационных свойств грунтов, гидрогеологических и геокриологических условий местности. На сегодняшний день для решения этих задач выработаны научно обоснованные методики, закрепленные нормативно-технической документацией (НТД).

Таблица 1.5 - Анализ степени разработанности вопроса о проектировании инженерной защиты холодных подземных трубопроводов от морозного пучения

Задачи, решаемые при расчете инженерной защиты		Методики решения задач	
		НТД	Научная литература
1	Определение физико-механических свойств грунтов	[18; 23]	[8; 59]
2	Определение теплофизических свойств грунтов и распределения температур по глубине	[19; 22]	[17; 31]
3	Определение фильтрационных свойств грунтов и положения уровня грунтовых вод	[20]	[10; 42]
4	Решение тепловой задачи и определение положения фронта промерзания	[38]	[17; 38; 58]
5	Решение задачи массопереноса в грунте и определение параметров пучения	-	[40; 42; 55; 103]
6	Расчет нагрузок на теплоизолированный трубопровод от пучинистого грунта	-	[1; 16; 55]
7	Расчет напряженно-деформированного состояния трубопровода	[9; 24; 39; 53; 75]	[1; 3; 5; 16; 55; 88]
8	Определение границ инженерной защиты на потенциально опасных участках	-	-
9	Оптимизация конструкции комбинированной инженерной защиты	-	-

На этапе проектирования для оценки опасности от воздействия морозного пучения решаются задачи тепломассопереноса и расчета нагрузок на трубопровод (задачи №4 - №6). Методика решения тепловой задачи с определением положения

фронта промерзания (задача №4) на сегодняшний день закреплена нормативной документацией и хорошо исследована в научной литературе.

Иначе обстоит дело с решением задачи массопереноса в грунте, прогнозированием параметров пучения и расчетом нагрузок на трубопровод (задачи №5 и №6). Выполнено множество натуральных, лабораторных и численных исследований, однако методика решения задачи не закреплена в нормативной документации. Здесь требуется внедрение результатов научных исследований в инженерную практику.

Расчет напряженно-деформированного состояния трубопровода (задача №7) один из наиболее хорошо исследованных аспектов проектирования трубопроводов. После решения задачи №7 по уровню напряженного состояния становится возможным оценить необходимость применения инженерной защиты подземного трубопровода от морозного пучения грунта. При напряжении в стенке трубопровода выше допустимого значения в проект добавляются мероприятия по инженерной защите.

Степень разработанности вопроса о выборе участка для устройства инженерной защиты и определения его границ остаётся низкой (задача №8). По данным С. Н. Чернышева и А. М. Мартынова погрешность интерполяции высотной отметки границы между пучинистым и непучинистым грунтом составляет более 1,2 м при выдерживании расстояния между геологическими скважинами 50 м. Соответствующая погрешность интерполяции границы по латерали лежит в диапазоне от 23 до 45 м при характерных углах выклинивания пластов порядка  $3^\circ - 6^\circ$ . Эта погрешность закладывается в протяженность участка, подлежащего инженерной защите. Поэтому необходимо выполнить исследование влияния протяженности участка морозного пучения на НДС трубопровода и разработать правило, регламентирующее протяженность инженерной защиты. Кроме того, инженерная защита может быть применена на двух участках - непосредственно на участке пучения для уменьшения сил морозного пучения или на участках, прилегающих к участку пучения, для уменьшения защемлённости трубопровода

грунтом засыпки. Второй вариант ранее не исследовался.

На сегодняшний день вопрос о расчете и оптимизации комбинированной инженерной защиты исследован недостаточно (задача №9). Сначала рассмотрим возможные принципы инженерной защиты холодных подземных трубопроводов от морозного пучения грунтов в условиях Западной Сибири (таблица 1.6): физико-химический (гидрофобизация или засоление грунтов), инженерно-мелиоративный (вдольтрассовое понижение УГВ), тепловой активный (обогрев окружающего трубопровод грунта греющим кабелем или теплоспутником), конструктивно-механический (устройство грунтовой подушки под трубопроводом), тепловой пассивный (кольцевая теплоизоляция трубопровода). Кроме того, возможна прокладка наземно в обваловании или надземно на свайных опорах.

Таблица 1.6 - Анализ принципов и способов инженерной защиты холодных подземных трубопроводов от морозного пучения грунтов основания

Физико-химический	Инженерно-мелиоративный	Тепловой активный	Конструктивно-механический	Тепловой пассивный
Засоление и гидрофобизация вдольтрассовых грунтов	Вдольтрассовое понижение УГВ	Обогрев пучинистого грунта электрическим кабелем	Противопучинистая грунтовая подушка под трубопроводом	Кольцевая теплоизоляция поверхности трубопровода
Уплотнение грунта под трубопроводом		Обогрев пучинистого грунта теплоспутником		
<b>Ограничения</b>				
Отсутствие доступных технологий	Равнинный бессточный рельеф местности	Удаленность источника электричества	Отсутствие доступного источника грунта-наполнителя подушки	Низкая температура перекачиваемого продукта
Низкопроницаемые пылеватые и глинистые грунты		Удаленность источника тепловой энергии		

Инженерно-геологические условия Западной Сибири обладают рядом специфических особенностей, которые приводят к практической невозможности или высокой себестоимости применения определенных способов инженерной защиты. Поэтому далее каждый способ инженерной защиты рассмотрен детально.

В работах А. И. Горковенко было показано, что химическое воздействие на грунт основания трубопровода для защиты от морозного пучения (засоление и гидрофобизация) может быть успешно реализовано. Однако на сегодняшний день разработанность этих способов остаётся на уровне научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, а на рынке товаров и услуг отсутствует возможность закупки материалов и технологий, что приводит к невозможности применения в инженерной практике.

Уплотнение грунтов сначала увеличивает пучение до точки с оптимальной упаковкой частиц скелета и при дальнейшем уплотнении пучение снижается [65]. Следовательно, уплотнение грунта должно быть контролируемым процессом. Консолидация глинистых водонасыщенных грунтов Западной Сибири требует продолжительного времени, что исключает возможность применения уплотнения на линейной части МГ и МК при поточном методе строительства.

Для понижения уровня грунтовых в условиях равнинного рельефа Западной Сибири в большинстве случаев отсутствует техническая возможность.

Тепловой активный принцип подразумевает принудительный обогрев грунта. Обогрев возможен при помощи теплоспутника - трубопровода или электрического греющего кабеля. Способ обогрева грунта при помощи теплоспутника - трубопровода имеет ряд существенных недостатков. Большие потери тепла на начальных участках трассы, где греющая жидкость имеет максимальную температуру, снижают общую эффективность системы. Как следствие, на конечных участках температуры может быть недостаточно. Использование теплоспутника - трубопровода на участках прерывистых просадочных многолетнемерзлых грунтов (ММГ) ограничено невозможностью полной теплоизоляции горячей жидкости. Применение электрического греющего кабеля требует источника электроснабжения и прокладки линий электропередач, сложной системы регулирования температуры и мощности нагрева. Обе системы требуют затрат энергоресурсов на нагрев грунта. Область их применения это площадные объекты. Поэтому данные способы в работе не рассматриваются.

Таким образом, физико-химический, инженерно-мелиоративный и тепловой активный принципы ограничения воздействия морозного пучения неприменимы на линейной части МГ и МК в инженерно-геологических условиях Западной Сибири.

В условиях равнинного рельефа Западной Сибири поднятие трубопровода выше уровня грунтовых вод требует строительства обвалования, которое, как показали многие годы эксплуатации, крайне неустойчиво к паводковым и эрозионным процессам в Западной Сибири и потому не рекомендуется к применению [41].

Прокладка трубопровода на сваях в целом не решает проблему морозного пучения, а лишь переносит силовое воздействие с поверхности трубопровода на поверхность свай. Воздействие пучения на свайный фундамент приводит к последствиям, приведенным на рисунке 1.2.

Способы инженерной защиты должны отвечать критериям экологической безопасности, устойчивости к воздействиям внешней среды и технологичности в инженерно-геологических условиях Западной Сибири. Автором сделан выбор в пользу проверенных временем и широко применяемых на практике способов инженерной защиты: кольцевая теплоизоляции поверхности трубопровода и противопучинистая грунтовая подушка.

Теплоизоляция относится к пассивному тепловому принципу ограничения воздействия морозного пучения. Высокая технологичность, надежность и низкая себестоимость привели к широкому распространению в инженерной практике. Однако применение теплоизоляции увеличивает выталкивающую силу воды и расходы на балластировку. Поэтому максимальная толщина теплоизоляции обычно не превышает 50 - 100 мм. Такой толщины недостаточно при существенно отрицательной температуре продукта. В работе будет показано, что границей применимости теплоизоляции является диапазон температур перекачиваемого продукта от 0 °С до -5 °С. При более низкой температуре необходимо применить комбинированную инженерную защиту, состоящую из теплоизоляции и противопучинистой грунтовой конструкции (рисунок 1.7:  $E_{гр}$  - модуль деформации

грунта основания, Па;  $E_{\text{под}}$  - модуль деформации грунта подушки, Па;  $\varepsilon_{fn}$  - степень пучинистости грунта, д.ед.;  $\alpha$  - угол откоса траншеи, рад).

Грунтовая конструкция относится к конструктивно-механическому принципу ограничения воздействия морозного пучения. Она состоит из обсыпки толщиной 200 мм над верхней образующей трубы, подсыпки толщиной 200 мм под нижней образующей трубы и грунтовой подушки. Все элементы грунтовой конструкции выполняются из одного и того же крупно- или среднезернистого непучинистого строительного песка. Обсыпка исключает сцепление трубопровода с пучинистым грунтом по боковой поверхности. Подсыпка и подушка снижают величину вертикальных перемещений трубопровода за счет уменьшения размера области пучения и перераспределения усилий. Обратную засыпку выполняют местным грунтом по обычной схеме.

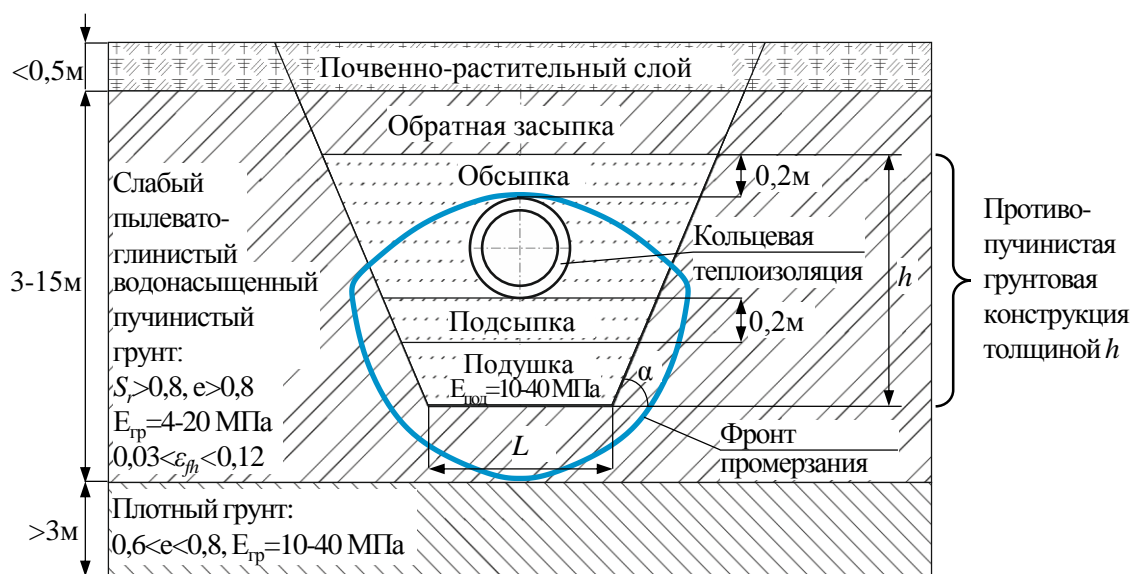


Рисунок 1.7 - Схема комбинированной инженерной защиты: кольцевая теплоизоляция и противопучинистая грунтовая конструкция

На севере Западной Сибири толщина слоя слабого пылевато-глинистого водонасыщенного пучинистого грунта составляет от 3 до 15 м. С учетом глубины промерзания под трубопроводом порядка 1 - 2 м, можно считать, что грунт вокруг трубопровода однородный. Грунт основания находится в водонасыщенном состоянии, поэтому замененный грунт также можно считать насыщенным водой. Угол откоса траншеи  $\alpha$  определяется нормативной документацией и зависит от

глубины траншеи и вида грунта основания. Ширина траншеи по дну  $L$  не может быть меньше  $D_n+0,3$  м для трубопроводов диаметром менее 0,7 м и  $1,5D_n$  для трубопроводов от 0,7 м и более ( $D_n$  - наружный диаметр трубопровода, м) [53]. Ширина траншеи по дну  $L$  и толщина замененного слоя грунта  $h$  определяется решением оптимизационной задачи, которая описана в следующих параграфах.

Кроме рассмотренных автором технологий теплоизоляции трубопровода и устройства грунтовых подушек возможны и другие. В любом случае выбор способа инженерной защиты представляет собой технико-экономическую оптимизационную задачу для конкретных трассовых условий.

Обобщая информацию, приведенную в НТД [9; 24; 39; 53; 75], по проектированию инженерной защиты трубопроводов в условиях пучинистых грунтов (задача №9), следует отметить: отсутствуют указания по выбору математических моделей и расчетных схем для описания силового взаимодействия трубопровода с пучинистым грунтом и инженерной защитой; отсутствуют методики расчета оптимальных с экономической позиции параметров инженерной защиты. Таким образом, нормативная документация по технологическому и конструктивному проектированию трубопроводов не может быть использована для расчета инженерной защиты в условиях пучинистых грунтов.

В научной литературе методика решения задачи №9 разработана частично - только для прогнозирования тепломассопереноса в грунте и определения параметров пучения [55]. Расчет усилий, действующих на трубопровод, по известным параметрам пучения разработан лишь для одного способа инженерной защиты - кольцевая теплоизоляция поверхности. Для противопучинистой грунтовой конструкции методика расчета не разработана, что связано с ограничениями на применение современных математических моделей для расчета параметров силового взаимодействия трубопровода с пучинистым грунтом.

В моделях большинства авторов принимается линейная связь между усилиями и перемещениями конструкций под воздействием морозного пучения [1; 3; 16; 34; 61]:

$$q_{fh} = q_{fh}^{\max} \left( 1 - \frac{w}{H_{\max}} \right), \quad (1.1)$$

где  $q_{fh}$  - погонное усилие от морозного пучения, действующее на трубопровод, Н/м;  $q_{fh}^{\max}$  - максимальное погонное усилие, действующее на трубопровод, от стеснённого морозного пучения, Н/м;  $H_{\max}$  - максимальное перемещение трубопровода при свободном пучении, м;  $w$  - перемещение трубопровода, м.

Величины  $q_{fh}^{\max}$  и  $H_{\max}$  являются параметрами силового взаимодействия трубопровода с пучинистым грунтом, которые связывают решение задач тепломассопереноса в грунте и определения НДС трубопровода. Для расчета величины максимального усилия от морозного пучения предлагались различные методики, авторами которых, в основном, являются специалисты-геотехники в области проектирования фундаментов зданий и сооружений. Одна из первых теоретических работ по определению усилий морозного пучения, действующих на фундаменты, принадлежит М. Ф. Киселеву [44; 45]. В работе предложено рассчитывать силы пучения только в пластичномерзлом слое интенсивного льдообразования. В. И. Пусковым опубликованы теоретические исследования действия нормальных сил морозного пучения грунтов на подошве жесткой твердомерзлой полосы с ограниченной податливостью и сжимаемостью нижележащих слоев грунта [72]. На основании комплексных полевых и лабораторных исследований В. Б. Швец предложил линейно-упругую расчетную схему устойчивости мелкозаглубленного фундамента [94]. Коллектив под руководством В. О. Орлова разработал ВСН 29-85 [71] и рекомендации по учету и предупреждению деформаций и сил морозного пучения грунтов [76], в основу которых положены результаты многолетних экспериментальных исследований морозного пучения грунтов и его воздействия на фундаменты. Нормативный документ предусматривает линейную связь усилий и перемещений, что соответствует формуле (1.1).

Исследованиями морозного пучения занимались специалисты по трубопроводному транспорту. А. Б. Айнбиндером разработана расчетная схема для



определения максимального погонного усилия, действующего на подземный трубопровод, от стесненного морозного пучения (рисунок 1.8:  $T_{гр}$  - температура грунта, °C;  $T_{газа}$  - температура газа, °C). В расчетной схеме грунт ниже глубины промерзания  $z < z_M$  считается несжимаемым, давление морозного пучения  $p_{fh}$  соответствует несущей способности основания. Максимальное погонное усилие от стесненного морозного пучения  $q_{fh}^{max}$  рассчитывается интегрированием давления, равного несущей способности основания, по нижнему полупериметру трубопровода:

$$q_{fh}^{max} = q_{fh}^{пред} = p_{fh} D_H; \quad (1.2)$$

$$p_{fh} = p_{пред} = \min(R_{гр}, p_{пас}); \quad (1.3)$$

$$p_{пас} = g \rho_{гр} h_M \operatorname{tg}^2(45^\circ + 0,5\varphi_{тал}) + 2c_{тал} \operatorname{tg}(45^\circ + 0,5\varphi_{тал}), \quad (1.4)$$

где  $q_{fh}^{пред}$  - предельное значение усилия, ограниченное несущей способностью основания, Н/м;  $p_{fh}$  - давление морозного пучения, действующее на нижний полупериметр трубопровода, Па;  $p_{пред}$  - несущая способность основания, Па;  $p_{пас}$  - пассивное давление грунта, Па;  $R_{гр}$  - сопротивление основания, Па;  $\rho_{гр}$  - плотность грунта основания, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  - ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $h_M$  - толщина сезонно промерзающего слоя, м;  $\varphi_{тал}$  - угол внутреннего трения талого грунта, °;  $c_{тал}$  - сцепление талого грунта, Па;  $z_M$  - глубина сезонного промерзания, м.

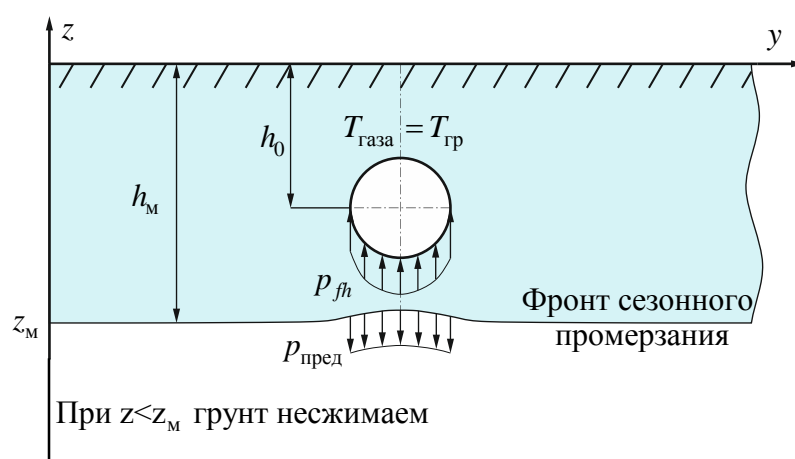


Рисунок 1.8 - Расчетная схема А. Б. Айнбиндера для определения максимального погонного усилия, действующего на подземный трубопровод, от стесненного морозного пучения [1]

Расчетная схема и формулы А. Б. Айнбиндера могут быть использованы

только в случае если температура грунта и перекачиваемого газа равны  $T_{\text{газа}} = T_{\text{гр}}$ , что не соответствует холодным трубопроводам.

А. И. Горковенко предложил расчетную схему для определения максимального погонного усилия, действующего на трубопровод, от стесненного морозного пучения при температуре перекачиваемого продукта ниже температуры начала замерзания грунта  $T_{\text{газа}} < T_{\text{нз}}$ ,  $T_{\text{гр}} > T_{\text{нз}}$  (рисунок 1.9:  $T_{\text{нз}}$  - температура начала замерзания грунта, °С;  $\alpha_f$  - угол между  $\vec{n}_f$  и осью  $y$ , рад;  $\vec{n}_f$  - вектор нормали к  $L_f$ ). В расчетной схеме мерзлый грунт вокруг трубопровода принимается абсолютно твердым телом, а талый грунт основания - идеально жесткопластическим.

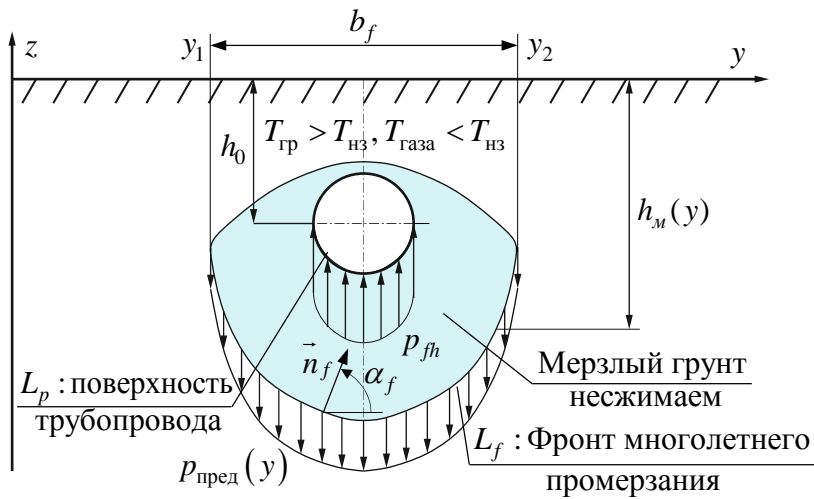


Рисунок 1.9 - Расчетная схема А. И. Горковенко для определения максимального погонного усилия, действующего на подземный трубопровод, от стесненного морозного пучения [16]

Максимальное погонное усилие от стесненного морозного пучения  $q_{fh}^{\text{max}}$  рассчитывается интегрированием давления, равного несущей способности основания, по поверхности фронта промерзания:

$$q_{fh}^{\text{max}} = q_{fh}^{\text{пред}} = p_{fh} D_{\text{н}}; \quad (1.5)$$

$$p_{fh} = \frac{-1}{D_{\text{н}} L_f} \int (\vec{p}, \vec{n}_f) dl = \left. \begin{array}{l} \vec{p} = (0, 0, -p_{\text{пред}}) \\ \vec{n}_f = (0, \cos(\alpha_f), \sin(\alpha_f)) \\ \alpha_f = \arctan\left(\frac{dy}{dh_{\text{м}}}\right) \\ \sin(\alpha_f) dl = dy \end{array} \right| = \frac{1}{D_{\text{н}}} \int_{y_1}^{y_2} p_{\text{пред}} dy, \quad (1.6)$$

П. Ю. Михайлов предложил расчетную схему для оценки величины максимального перемещения холодного подземного трубопровода при свободном пучении  $H_{\max}$  (рисунок 1.10). В расчетной схеме принимается, что температура газа ниже температуры начала замерзания грунта. Сами грунты являются абсолютно твердыми телами. Перемещение  $H_{\max}$  рассчитывается путем интегрирования одной трети объемных деформаций пучения  $\varepsilon_v/3$  по области  $D$  внутри сектора непосредственно под нижним полупериметром трубопровода:

$$H_{\max} = \frac{1}{D_n} \iint_D (\varepsilon_v(y, z) / 3) dy dz; \quad (1.7)$$

$$D: \begin{cases} y_3 \leq y \leq y_4; \\ L_f \leq z \leq L_p, \end{cases} \quad (1.8)$$

где  $\varepsilon_v(y, z)$  - пространственное распределение объемной деформации морозного пучения, рассчитываемой как превышение объема внутрипоровых веществ над объемом пор, д.ед.;  $H_{\max}$  - максимальное перемещение холодного подземного трубопровода при свободном пучении, м.

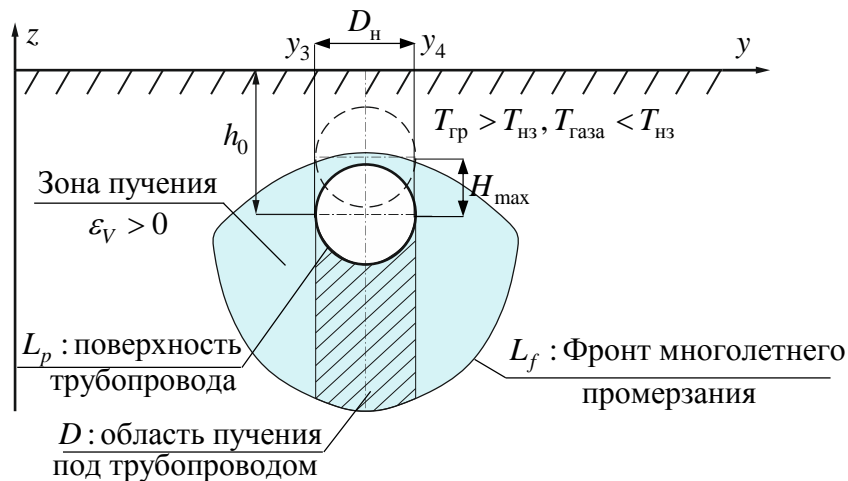


Рисунок 1.10 - Расчетная схема П. Ю. Михайлова для определения максимального перемещения подземного трубопровода при свободном морозном пучении [55]

Допущения моделей П. Ю. Михайлова и А. И. Горковенко о том, что мерзлый грунт вокруг трубопровода является абсолютно твердым телом, приводят к невозможности расчета и оптимизации противопучинистой грунтовой конструкции. Грунтовая подушка, находящаяся внутри абсолютно твердого тела, никак не влияет на результат расчета - модели не чувствительны к подобным

элементам грунтовой конструкции.

Однако грунтовая подушка может сжиматься и перераспределять усилия. Поэтому в работе принята гипотеза, что мерзлый и талый грунты вокруг трубопровода являются упругими телами (таблица 1.7). Это позволяет выполнить расчет тех же параметров силового взаимодействия, что и в моделях П. Ю. Михайлова и А. И. Горковенко:  $H_{\max}$  и  $q_{fh}^{\max}$ . Преимуществом упругой модели, по сравнению с упомянутыми, является более широкая область применения. Упругая модель позволяет рассчитывать кольцевую теплоизоляцию и противопучинистую грунтовую конструкцию в совместной постановке, т.е. комбинированную инженерную защиту, что недоступно для моделей П. Ю. Михайлова и А. И. Горковенко.

Таблица 1.7 - Область применения современных моделей. Гипотеза для построения новой модели

Модель П. Ю. Михайлова	Модель А. И. Горковенко	Рабочая гипотеза
Мерзлый грунт - абсолютно твёрдое тело	Мерзлый грунт - абсолютно твёрдое тело	Мерзлый грунт - упругое тело
Талый грунт - абсолютно твёрдое тело	Талый грунт - идеально жесткопластическое тело	Талый грунт - упругое тело
-	Давление пучения равно несущей способности основания	$H_{\max}$ и $q_{fh}^{\max}$ - находятся из решения уравнений равновесия упруго-деформируемого тела
$H_{\max}$ - интеграл ( $\epsilon_V/3$ ) по области под трубопроводом	$q_{fh}^{\max}$ - интеграл давления пучения по фронту промерзания	
Область применения математических моделей		
Кольцевая теплоизоляция трубопровода	Кольцевая теплоизоляция трубопровода	Кольцевая теплоизоляция трубопровода
-	-	Противопучинистая грунтовая конструкция

Подводя итог, следует отметить, что на сегодняшний день в научной литературе и нормативной документации отсутствуют методики, позволяющие рассчитывать конструкцию инженерной защиты и её протяженность. Надежность трубопроводной системы в условиях пучинистых грунтов закладывается на стадии

проектирования при выполнении расчетов инженерной защиты. Поэтому целью работы является совершенствование математической модели и методики расчета теплосилового взаимодействия холодных подземных газопроводов и конденсатопроводов с пучинистым грунтом для обеспечения инженерной защиты.

Достижение цели видится в последовательном решении следующих задач: разработка математической модели, описывающей процесс теплосилового взаимодействия холодного подземного трубопровода с пучинистым грунтом с учетом влияния инженерной защиты, и её апробация; анализ НДС трубопровода в зависимости от участка для устройства инженерной защиты (прилегающий к участку пучения или непосредственно на нём); разработка правила, регламентирующего протяженность применяемой инженерной защиты; исследование способов инженерной защиты с учетом особенностей инженерно-геологических условий Западной Сибири; разработка методики расчетного обоснования вида, протяженности и конструктивно-технологических параметров инженерной защиты холодного подземного трубопровода на участке пучинистого грунта.

### **Выводы по главе 1**

1. Исследование динамики геологических процессов в основании трубопроводов севера Западной Сибири позволило установить, что наиболее неблагоприятным является морозное пучение грунтов. Именно оно запускает большинство процессов постепенной деградации геотехнического состояния конструкции трубопровода, что выражается в опрокидывании балластирующих устройств, образовании арок и выпучивании в зимнее время.

2. На основании анализа инженерно-геологических условий, текущих и прогнозируемых климатических трендов в Западной Сибири установлено, что в ближайшие 20 - 30 лет ожидается ухудшение геокриологической обстановки, которое выразится в увеличении интенсивности морозного пучения и количества охваченных им территорий в связи с увеличением количества осадков и

деградацией многолетнемерзлых грунтов.

3. Современные методики расчета подземных трубопроводов с отрицательной температурой продукта в условиях пучинистых грунтов, описанные в научных работах, не позволяют решить задачу оптимизации комбинированной инженерной защиты, состоящей из кольцевой теплоизоляции и противопучинистой грунтовой конструкции. Неисследованным остается вопрос о выборе протяженности применяемой инженерной защиты в условиях дефицита информации о геологическом строении основания. Поэтому дальнейшее исследование направлено на совершенствование методики расчетного обоснования конструктивных решений по обеспечению стабильности проектного положения магистрального трубопровода в условиях пучинистых грунтов.

## ГЛАВА 2. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МОРОЗНОГО ПУЧЕНИЯ

### 2.1 Математическая модель тепломассопереноса в грунте. Законы сохранения вещества и энергии

Во второй главе приведена математическая модель тепломассопереноса для расчета пространственного распределения объемных деформаций грунта от морозного пучения и методика решения системы дифференциальных уравнений этой модели. В завершении рассчитаны параметры модели, соответствующие чрезмернопучинистым грунтам по классификации ГОСТ 28622-2012.

В соответствии с существующими представлениями о морозном пучении основной причиной увеличения объема грунта является перенос влаги от более теплых слоёв грунта к более холодным [65]. При этом величина морозного пучения может иметь практически неограниченную величину. Влияние объемного распучивания обычно не велико и не может превысить 9% от объема пор [36].

Перенос воды в зону промерзания связан с неравновесными температурно-влажностными условиями [7; 95]. Исходя из современных представлений, вся вода в грунтах, исключая гравитационную, имеет связь с минералами скелета грунта с энергией  $U_{св}$  [65; 77]. Энергия связей обусловлена силами различной природы: внутримолекулярными, молекулярными, капиллярными, электростатическими и магнитными. Зная градиент энергии связи, можно рассчитать силу, которая действует на воду и растворенные в ней соли. На практике расчет  $U_{св}$  выполняется с использованием обобщенного термодинамического подхода, основоположниками которого являются R. A. Buckingham, L. A. Richards, E. C. Childs, N. Collis-George [100]. Основу этого подхода составляет сведение разнородных сил, вызывающих перемещение почвенной влаги, к единой обобщенной силе - градиенту капиллярно-сорбционного потенциала внутрипоровой воды [4; 10; 47; 65; 68; 92]. Этот потенциал еще называют «потенциал влаги» [48] или «основная гидрофизическая характеристика» [42]:

$$\psi_w = \Omega_{wzp} - \Omega_{w0}, \quad (2.1)$$

где  $\psi_w$  - капиллярно-сорбционный потенциал (КСП) воды, Дж/кг;  $\Omega_{w0}$  - термодинамический потенциал свободной воды, Дж/кг;  $\Omega_{wgp}$  - термодинамический потенциал воды в грунте, Дж/кг.

Величина КСП изменяется от  $-10^6$  Дж/кг в сухом грунте до близкого к нулю в водонасыщенном [26]. Некоторые исследователи выражают термодинамический потенциал через давление, которое имеет различные названия: «всасывающее давление» [48], «сосущая сила» [68], «отрицательное давление» [10].

В диссертационной работе использована математическая модель капиллярно-пористой среды И. Л. Калюжного, Ю. С. Даниэляна и П. А. Яницкого, в которой формирование шлировой криогенной текстуры минеральных пучинистых грунтов рассматривается как совокупность процессов фазового перехода воды в неравновесных термодинамических условиях и переноса воды под действием градиентов капиллярно-сорбционного потенциала и концентрации порового раствора [27; 42]. Следующие основополагающие допущения использованы в этой модели:

- массоперенос компонентов в жидкой фазе преобладает над газообразной фазой, что справедливо для обводненных грунтов [65];
- минеральная компонента грунта постоянна по массе;
- рассматривается только совокупный перенос солей, т.е. раствор бинарный;
- принимается, что раствор в каждый момент времени остается электронейтральным, т.е. коэффициенты диффузии ионов одного вещества остаются равными;
- перенос солей в грунте рассматривается аналогично свободному раствору, что обосновывается размером адсорбционного слоя не более 10 нм [28], в то время как размер пор, влияющих на пучение, составляет 5 - 50 мкм [65; 77].

В работе И. Л. Калюжного для моделирования динамики грунтовой влаги использован закон Дарси-Букингема в следующей форме [42]:

$$\vec{j}_{ws} = -\frac{\lambda_p}{g} \rho_{ws} (\omega_w \vec{\nabla} \psi_w - \vec{g}), \quad (2.2)$$



где  $\vec{j}_{ws}$  - вектор конвективного потока водно-солевого раствора, кг/(с·м<sup>2</sup>);  $\lambda_p$  - коэффициент влагопроводности грунта, м/с;  $\rho_{ws}$  - плотность водно-солевого раствора, кг/м<sup>3</sup>;  $g, \vec{g}$  - константа и вектор ускорения свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $\omega_w$  - концентрация воды в поровом растворе, д.ед.

В работе использовано преобразованное выражение (2.2), позволяющее избежать моделирование газовой фазы в грунте без потери в точности. Поскольку в обводнённых грунтах массоперенос в жидкой фазе преобладает над газообразной фазой, уравнение динамики газа можно заменить на уравнение состояния. При заполнении пор водой иммобилизованная газовая фаза сжимается, повышая давление в поровой системе, и при механическом равновесии градиент порового давления компенсирует силу тяжести. Поэтому гравитацию необходимо «отключить» при полном насыщении пор грунта водой, например, с помощью множителя  $(1 - hav(\varepsilon_V))$ :

$$\vec{j}_{ws} = -\frac{\lambda_p}{g} \rho_{ws} \left( \omega_w \vec{\nabla} \psi_w - (1 - hav(\varepsilon_V)) \vec{g} \right); \quad (2.3)$$

$$\varepsilon_V = \frac{\rho_{ws}}{\rho_{ws}} + \frac{\rho_i}{\rho_i} + \frac{\rho_{ns}}{\rho_{ns}} - \frac{e}{e+1}, \quad (2.4)$$

где  $hav(\varepsilon_V)$  - функция Хэвисайда от аргумента  $\varepsilon_V$ , д.ед.;  $\rho_{ws}$ ,  $\rho_i$ ,  $\rho_{ns}$  - масса водно-солевого раствора, льда и нерастворенной соли в единице объема грунта, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_i$ ,  $\rho_{ns}$  - плотность льда и нерастворенной соли, кг/м<sup>3</sup>.

Результаты физического моделирования тепломассопереноса в основании трубопроводов П. Ю. Михайлова позволяют сделать вывод о малом вкладе НДС грунта в величину потока раствора [55]. Таким образом, в первом приближении можем рассматривать НДС грунтового массива отдельно от тепломассопереноса.

С учетом принятых ранее допущений о бинарности раствора выражения для диффузионных потоков соли и воды имеют вид закона Фика:

$$\vec{j}_w = -D_{ws} \rho_{ws} \vec{\nabla} \omega_w; \quad (2.5)$$

$$\vec{j}_s = -D_{ws} \rho_{ws} \vec{\nabla} \omega_s, \quad (2.6)$$

где  $\omega_s$  - концентрация соли в поровом растворе, д.ед.;  $\vec{j}_w, \vec{j}_s$  - векторы диффузионных потоков воды и соли, кг/(с·м<sup>2</sup>);  $D_{ws}$  - коэффициент диффузии, м<sup>2</sup>/с;

Законы сохранения массы воды и соли записаны по методу А. В. Лыкова с учетом фазовых переходов вода-лёд и растворенная-нерастворенная соль [52]:

$$\frac{\partial \wp_w}{\partial t} = -\nabla \cdot (\vec{j}_w + \omega_w \vec{j}_{ws}) - \frac{\partial \wp_i}{\partial t}; \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial \wp_s}{\partial t} = -\nabla \cdot (\vec{j}_s + \omega_s \vec{j}_{ws}) - \frac{\partial \wp_{ns}}{\partial t}, \quad (2.8)$$

где  $\wp_w, \wp_s$  - масса воды и растворенной соли в единице объема грунта, кг/м<sup>3</sup>;  $\omega_w \vec{j}_{ws}$  - конвективный поток воды, кг/(с·м<sup>2</sup>);  $\omega_s \vec{j}_{ws}$  - конвективный поток соли, кг/(с·м<sup>2</sup>);  $t$  - время, с.

Скорости фазовых переходов вода-лёд и растворенная соль-нерастворенная соль описаны кинетическими уравнениями химической реакции первого порядка:

$$\frac{\partial \wp_i}{\partial t} = \frac{\wp_w - \wp_w^{eq}}{\tau_w}; \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial \wp_{ns}}{\partial t} = \frac{\wp_{ws} (\omega_s - \omega_s^{max})}{\tau_s}, \quad (2.10)$$

где  $\wp_w^{eq}$  - масса незамерзшей воды в единице объема грунта в равновесном состоянии при отрицательной температуре, кг/м<sup>3</sup>;  $\tau_w$  - время релаксации фазового перехода вода-лёд, с;  $\tau_s$  - время релаксации фазового перехода растворенная соль - нерастворенная соль, с;  $\omega_s^{max}$  - максимальная равновесная концентрация соли при данной температуре, д.ед.

Экспериментальная оценка времени релаксации показала, что для льдообразования оно составляет от нескольких минут до нескольких десятков минут. Для процесса оттаивания время релаксации практически не фиксируется, т.е. очень мало [27].

Далее запишем уравнение закона сохранения тепловой энергии для случая малых термического расширения грунта (незначительное количество газовой фазы в обводнённых грунтах и низкие давления) и тепловыделения при трении (низкие

скорости движения воды в пылевато-глинистых грунтах):

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\rho_w h_w + \rho_i h_i + \rho_s h_s + \rho_{ns} h_{ns} + \rho_{sk} h_{sk}) = \\ & = -\nabla \cdot (-\lambda_T \vec{\nabla} T) - \nabla \cdot (\vec{j}_{ws} (\omega_w h_w + \omega_s h_s)) - \\ & - \nabla \cdot \vec{j}_w h_w - \nabla \cdot \vec{j}_s h_s, \end{aligned} \quad (2.11)$$

где  $\rho_{sk}$  - плотность скелета грунта, кг/м<sup>3</sup>;  $h_w, h_i, h_s, h_{ns}, h_{sk}$  - энтальпия воды, льда, растворенной соли, нерастворенной соли, скелета грунта, Дж/кг;  $\lambda_T$  - коэффициент теплопроводности грунта, Вт/(м·°C);  $T$  - температура, °C.

Преобразовывая (2.11) с помощью (2.7) - (2.8) и раскрывая энтальпию через изобарные теплоемкости, которые в области температур от -30 °C до +30 °C с погрешностью не более 5% можно считать постоянными, получаем:

$$\begin{aligned} & (\rho_w c_w + \rho_i c_i + \rho_s c_s + \rho_{ns} c_{ns} + \rho_{sk} c_{sk}) \frac{\partial T}{\partial t} = \\ & = \nabla \cdot (\lambda_T \vec{\nabla} T) - \left\{ \vec{j}_w (c_w - c_s) + \vec{j}_{ws} (\omega_w c_w + \omega_s c_s) \right\} \vec{\nabla} T + \\ & + (L_w + (c_w - c_i) T) \frac{\partial \rho_i}{\partial t} + L_s \frac{\partial \rho_{ns}}{\partial t}, \end{aligned} \quad (2.12)$$

где  $c_w, c_i, c_s, c_{ns}, c_{sk}$  - изобарная теплоемкость воды, льда, растворенной соли, нерастворенной соли и скелета грунта, Дж/(кг·°C);  $L_w$  - скрытая теплота плавления льда, Дж/кг;  $L_s$  - теплота кристаллизации соли из раствора, Дж/кг.

## 2.2 Эмпирические параметры теплопереноса

В уравнениях (2.3) - (2.12) используется эмпирический подход для описания сложнейших молекулярных процессов: фазовые переходы вода → лёд и растворенная соль → нерастворенная соль; перенос тепла посредством теплопроводности; перенос воды под действием градиентов потенциала и концентрации раствора. Поэтому далее будут приведены соответствующие эмпирические закономерности, которые аппроксимируют результаты многочисленных лабораторных исследований.

Существует огромное множество эмпирических законов, связывающих КСП и количество воды в грунте [98; 102; 106; 109]. В работе И. Л. Калюжного и

С. А. Лаврова показано, что удовлетворительную точность в диапазоне потенциала  $\psi_w$  от 0 Дж/кг до -5000 Дж/кг обеспечивает показательная функция, аппроксимирующая экспериментальные данные по двум точкам [42]:

$$\psi_w = \psi_{\theta_3} \left( \frac{\theta_{\theta_3}}{\theta_w} \right)^\gamma; \quad (2.13)$$

$$\gamma = \log \left( \frac{\theta_{\theta_3}}{\theta_{\theta_6}} \right) \left( \frac{\psi_{\theta_6}}{\psi_{\theta_3}} \right), \quad (2.14)$$

где  $\gamma$  - показатель степени капиллярно-сорбционного потенциала воды;  $\theta_{\theta_3}$ ,  $\theta_{\theta_6}$  - масса воды в единице объема грунта (кг/м<sup>3</sup>) при потенциалах завядания  $\psi_{\theta_3} \approx -1500$  Дж/кг и наименьшей влагоемкости  $\psi_{\theta_6} \approx -33$  Дж/кг, соответственно.

Учет фазовых превращений вода-лёд в грунтах делает задачу прогнозирования тепломассопереноса существенно нелинейной. Первоначально учет фазовых превращений производился на основании энтальпийных моделей, которые вносят добавку в теплоемкость в заданном диапазоне температур, например, модель Я. А. Кроника [16]. Энтальпийные модели обладают существенным недостатком - они не могут описать экспериментально регистрируемое переохлаждение воды ниже точки замерзания с последующим поднятием температуры до нулевого значения в момент начала кристаллизации. Поэтому на смену энтальпийным моделям пришли модели гетерогенного фазового перехода, подразумевающие существование размытой кристаллической структуры у воды (неустойчивые ассоциаты). При понижении температуры воды ассоциаты служат естественными центрами кристаллизации. В соответствии с теорией спонтанного зарождения рост кристалла должен сопровождаться уменьшением свободной энергии Гиббса. Согласно теории М. Фольмера энергия, необходимая для спонтанного зарождения устойчивого кристалла, изыскивается системой за счет флуктуаций. Минимальная масса зародыша кристалла составляет 460 молекул H<sub>2</sub>O, что эквивалентно сфере объемом  $1,57 \cdot 10^{-26}$  м<sup>3</sup> или радиусом  $1,56 \cdot 10^{-9}$  м<sup>3</sup>. При быстром охлаждении в воде не успевают сформироваться устойчивые кристаллы льда, и она переохлаждается [65; 25].

Использование уравнения (2.9) в исходном виде является не вполне удобным, т.к. требуется постоянно решать дополнительное уравнение для равновесного значения массы воды в единице объема грунта. Можно преобразовать уравнение (2.9) к форме, зависящей от термодинамических потенциалов:

$$\frac{\partial \wp_i}{\partial t} = H_i (\Omega_w - \Omega_i); \quad (2.15)$$

$$H_i = \frac{1}{\tau_{\Omega 1}} \text{hav}(\Omega_w - \Omega_i) \text{hav}(\wp_w) + \frac{1}{\tau_{\Omega 2}} (1 - \text{hav}(\Omega_w - \Omega_i)) \text{hav}(\wp_i), \quad (2.16)$$

где  $\Omega_w, \Omega_i$  - полные термодинамические потенциалы воды и льда, Дж/кг;  $H_i$  - параметр скорости фазовых переходов воды,  $\text{кг}^2/(\text{Дж} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^3)$ ;  $\tau_{\Omega 1}$  - параметр скорости кристаллизации воды,  $\text{Дж} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^3/\text{кг}^2$ ;  $\tau_{\Omega 2}$  - параметр скорости плавления льда,  $\text{Дж} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^3/\text{кг}^2$ .

При такой форме записи параметр скорости кристаллизации воды будет оцениваться величинами  $\tau_{\Omega 1} \in [1000; 100000]$   $\text{Дж} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^3/\text{кг}^2$ . Для обратного фазового перехода лёд  $\rightarrow$  вода характерно время релаксации  $\tau_{\Omega 2} \rightarrow 0$ . Функция Хэвисайда позволяет учесть невозможность отрицательных значений количества незамерзшей воды и льда. Разница полных термодинамических потенциалов воды и льда с погрешностью не более 10% в диапазоне температур от  $-30^\circ\text{C}$  до  $0^\circ\text{C}$  описывается следующими формулами:

$$\Omega_w - \Omega_i = \psi_w + \mu_w - L_w \frac{T}{T_0}; \quad (2.17)$$

$$\mu_w = \frac{R(T + T_0)}{M_w} \ln(f(\omega_w - 1) + 1), \quad (2.18)$$

где  $\mu_w$  - изобарно-изотермическое понижение потенциала Гиббса воды в растворе, Дж/кг;  $M_w$  - молярная масса воды, кг/моль; коэффициент  $f$  для водного раствора хлорида натрия с погрешностью не более 3,2% при температуре от  $+20^\circ\text{C}$  до  $-21^\circ\text{C}$  можно принимать равным 0,86;  $T_0 = 273,15$  К - коэффициент перевода из  $^\circ\text{C}$  в К;  $R = 8,31$  Дж/(моль·К) - универсальная газовая постоянная.

Аналогично можно преобразовать уравнение (2.10). Учтем, что растворение

и кристаллизация протекают с разной скоростью:

$$\frac{\partial \varphi_{ns}}{\partial t} = H_s (\varphi_s + \varphi_w) (\omega_s - \omega_s^{max}); \quad (2.19)$$

$$H_s = \frac{1}{\tau_{s1}} hav(\omega_s - \omega_s^{max}) hav(\varphi_s) + \frac{1}{\tau_{s2}} (1 - hav(\omega_s - \omega_s^{max})) hav(\varphi_{ns}), \quad (2.20)$$

где  $H_s$  - параметр скорости кристаллизации и растворения соли, учитывающий невозможность отрицательных значений количества растворенной и нерастворенной соли,  $c^{-1}$ ;  $\tau_{s1}$  - время релаксации кристаллизации соли из раствора, с;  $\tau_{s2}$  - время релаксации растворения соли из кристаллического состояния, с.

Максимальную концентрацию порового раствора, как функцию температуры, для хлорида натрия можно описать следующей кусочно-непрерывной кривой:

$$\omega_s^{max} = \frac{T + 5523}{21000} hav(T) + \frac{(T + 21) + 163.1}{700} hav(T + 21) (1 - hav(T)). \quad (2.21)$$

Для описания коэффициента влагопроводности грунта существует большое количество формул [99; 105; 107; 112]. В работе Y. Mualem было показано, что наилучшую точность обеспечивает вероятностная модель, описывающая последовательность соединенных друг с другом пор различного размера [108]. Надежность формулы Y. Mualem за последние 50 лет была неоднократно подтверждена экспериментальными исследованиями [42; 92; 103]:

$$\lambda_p = \frac{\lambda_{p0}}{S_\phi^2} \left( \frac{\varphi_w}{\varphi_w^{max}} \right)^{0.5} \left( \frac{\int_0^{\varphi_w} \frac{d\varphi_w}{\psi_w}}{\int_0^{\varphi_w^{max}} \frac{d\varphi_w}{\psi_w}} \right)^2, \quad (2.22)$$

где  $\lambda_{p0}$  - коэффициент фильтрации, м/с;  $S_\phi$  - отношение удельных поверхностей фильтрующих каналов в талом и мерзлом состоянии грунта;  $\varphi_w^{max}$  - масса воды в единице объема полностью водонасыщенного грунта, кг/м<sup>3</sup>.

Удельная поверхность мерзлого грунта примерно вдвое выше удельной поверхности талого грунта [42]. Тогда отношение удельных поверхностей фильтрующих каналов может быть найдено по следующей формуле:

$$S_{\phi} = 1 + \frac{(e+1)\vartheta_i}{e\rho_i} + \frac{(e+1)\vartheta_{ns}}{e\rho_{ns}}. \quad (2.23)$$

Используя (2.13), (2.22), (2.23) и коэффициент блокирования потока воды линзами шлирового льда  $10^{-10\vartheta_i/\rho_i}$  из [111], получаем для влагопроводности окончательное выражение:

$$\lambda_p = 10^{-10\vartheta_i/\rho_i} \lambda_{p0} \left( \frac{\vartheta_w}{\vartheta_w^{max}} \right)^{2\gamma+2,5} \left( 1 + \frac{(e+1)\vartheta_i}{e\rho_i} + \frac{(e+1)\vartheta_{ns}}{e\rho_{ns}} \right)^{-2}. \quad (2.24)$$

Начальный коэффициент пористости выражается через плотность скелета и плотность твердых частиц:

$$e = \rho_{sk} / \vartheta_{sk} - 1. \quad (2.25)$$

Коэффициент теплопроводности грунта  $\lambda_T$  вычисляется по формуле:

$$\lambda_T = \lambda_{fr} - (\lambda_{fr} - \lambda_{th})(\vartheta_w - \vartheta_w^{fr}) / (\vartheta_w + \vartheta_i - \vartheta_w^{fr}); \quad (2.26)$$

$$\vartheta_w^{fr} = \vartheta_{\epsilon 3} \left( \frac{L_w T_{fr}}{T_0 \psi_{\epsilon 3}} \right)^{-1/\gamma}, \quad (2.27)$$

где  $\lambda_{th} = f(\vartheta_{sk}, \vartheta_w, \omega_s)$ ,  $\lambda_f = f(\vartheta_{sk}, \vartheta_w, \omega_s)$  - теплопроводности талого и мерзлого грунта, как функции плотности скелета грунта, количества воды и концентрации порового раствора, рассчитываемые в соответствии с рекомендациями СП 25.13330.2012 (приложение Б8), Вт/(м·°С);  $\vartheta_w^{fr}$  - масса незамерзшей воды в единице объема грунта при температуре  $T_{fr}$ , кг/м<sup>3</sup>;  $T_{fr} = -15$  °С.

Плотность раствора можно аппроксимировать линейной функцией концентрации:

$$\rho_{ws} = \rho_w + \beta_{ws} \omega_s, \quad (2.28)$$

где  $\beta_{ws}$  - эмпирический коэффициент, который для раствора хлорида натрия можно принять равным 757,7 кг/м<sup>3</sup>.

В связи с особенностями задания начальных и граничных условий значительно удобнее выразить количество воды через капиллярно-сорбционный потенциал, а количество соли через концентрацию порового раствора. Тогда получаем окончательную систему дифференциальных уравнений

тепломассопереноса в потенциально-концентрационной форме:

$$\begin{aligned} & (\varrho_w c_w + \varrho_i c_i + \varrho_s c_s + \varrho_{ns} c_{ns} + \varrho_{sk} c_{sk}) \frac{\partial T}{\partial t} = \\ & = \nabla \cdot (\lambda_T \vec{\nabla} T) + \frac{\lambda_p}{g} \rho_{ws} (\omega_w \vec{\nabla} \psi_w - (1 - hav(\varepsilon_V)) \vec{g}) (\omega_w c_w + \omega_s c_s) \vec{\nabla} T + \quad (2.29) \\ & + \left\{ -D_{ws} \varrho_{ws} \vec{\nabla} \omega_s (c_w - c_s) \right\} \vec{\nabla} T + (L_w + (c_w - c_i) T) \frac{\partial \varrho_i}{\partial t} + L_s \frac{\partial \varrho_{ns}}{\partial t}; \end{aligned}$$

$$\frac{\partial \varrho_w}{\partial \psi_w} \frac{\partial \psi_w}{\partial t} = -\frac{\partial \varrho_i}{\partial t} + \nabla \cdot \left( \omega_w \frac{\lambda_p}{g} (\rho_w \vec{\nabla} \psi_w - \rho_{ws} (1 - hav(\varepsilon_V)) \vec{g}) - D_{ws} \varrho_{ws} \vec{\nabla} \omega_s \right); \quad (2.30)$$

$$\begin{aligned} & \left( \frac{\varrho_s + \varrho_w}{\omega_w} \right) \frac{\partial \omega_s}{\partial t} = -\frac{\omega_s}{\omega_w} \left( \frac{\partial \varrho_w}{\partial \psi_w} \right) \frac{\partial \psi_w}{\partial t} - \frac{\partial \varrho_{ns}}{\partial t} + \\ & + \nabla \cdot \left( \omega_s \frac{\lambda_p}{g} (\rho_w \vec{\nabla} \psi_w - \rho_{ws} (1 - hav(\varepsilon_V)) \vec{g}) + D_{ws} \varrho_{ws} \vec{\nabla} \omega_s \right); \quad (2.31) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial \varrho_i}{\partial t} = H_i \left( \psi_w + \mu_w - L_w \frac{T}{T_0} \right); \quad (2.32)$$

$$\frac{\partial \varrho_{ns}}{\partial t} = H_s (\varrho_s + \varrho_w) (\omega_s - \omega_s^{max}); \quad (2.33)$$

$$\varepsilon_V = \frac{\varrho_{ws}}{\rho_{ws}} + \frac{\varrho_i}{\rho_i} + \frac{\varrho_{ns}}{\rho_{ns}} - \frac{e}{e+1}. \quad (2.34)$$

Граничные условия для уравнений (2.29) - (2.31) и начальные условия для уравнений (2.29) - (2.33) будут приведены далее для каждой задачи отдельно. Для уравнения переноса тепловой энергии (2.29) в граничных условиях необходимо учесть тренд среднегодовой температуры воздуха на повышение. Соответствующий коэффициент приведен в третьей главе.

Основной целью решения системы уравнений (2.29) - (2.34) является расчет пространственного распределения объемной деформации грунта от морозного пучения  $\varepsilon_V(y, z)$  по выражению (2.34) с целью дальнейшего использования в расчетах напряженно-деформированного состояния грунта и трубопровода.

Таким образом, в данном параграфе автором записаны выражения для скорости образования льда (2.15) - (2.18), скорости образования нерастворенной



соли (2.19) - (2.21), капиллярно-сорбционного потенциала воды (2.13) - (2.14), коэффициента влагопроводности (2.24), коэффициента теплопроводности (2.26) - (2.27) и плотности раствора (2.28).

Кроме того, приведена модель тепломассопереноса в капиллярно-пористой среде И. Л. Калюжного, Ю. С. Даниэляна и П. А. Яницкого (2.29) - (2.34), описывающая формирование шлировой криогенной текстуры минеральных пучинистых грунтов как результат процессов фазового перехода в неравновесных термодинамических условиях и переноса воды в грунтах под действием градиентов капиллярно-сорбционного потенциала, силы тяжести и концентрации порового раствора. Модель позволила решить задачу силового взаимодействия трубопровода с пучинистым грунтом с учётом комплексных решений по его защите и динамики климатических изменений в долгосрочной перспективе.

### **2.3 Методика решения системы дифференциальных уравнений тепломассопереноса в грунте**

Получение общего аналитического решения системы дифференциальных уравнений тепломассопереноса (2.29) - (2.34) весьма затруднительно, что обусловлено нелинейностью уравнений, заключенной в эмпирических коэффициентах тепломассопереноса. Поэтому для решения задачи тепломассопереноса разработана методика численного решения системы дифференциальных уравнений, приведенная в этом параграфе.

Система (2.29) - (2.34) содержит три дифференциальных уравнения в частных производных параболического типа (2.29) - (2.31), два обыкновенных дифференциальных уравнения (2.32) - (2.33) и одно обычное уравнение (2.34). Для параболических дифференциальных уравнений решается задача Робена, а для обыкновенных дифференциальных уравнений задача Коши.

Задачи Коши для обыкновенных дифференциальных уравнений решена с использованием А-стабильного, L-стабильного обобщённого альфа-метода [101; 104]. Сначала запишем выражение для скорости изменения количества льда:

$$\begin{aligned}
& (1 - \alpha_m)(\dot{m}_i)_{j,k}^\tau + \alpha_m(\dot{m}_i)_{j,k}^{\tau-1} = \\
& = (1 - \alpha_f)(H_i)_{j,k}^\tau \left( (\psi_w)_{j,k}^\tau + (\mu_w)_{j,k}^\tau - L_w \frac{T_{j,k}^\tau}{T_0} \right) + \\
& + \alpha_f (H_i)_{j,k}^{\tau-1} \left( (\psi_w)_{j,k}^{\tau-1} + (\mu_w)_{j,k}^{\tau-1} - L_w \frac{T_{j,k}^{\tau-1}}{T_0} \right),
\end{aligned} \tag{2.35}$$

где  $j$  - номер точки по оси  $z$ ,  $k$  - номер точки по оси  $y$ ,  $\tau$  - номер шага по времени;  $\dot{m}_i$  - алгоритмическая скорость изменения массы льда в единице объема грунта (кг/(с·м<sup>3</sup>)), связанная с обычной скоростью ( $\dot{\varphi}_i$ , кг/(с·м<sup>3</sup>)) рекуррентным соотношением:

$$(1 - \alpha_m)(\dot{m}_i)_{j,k}^\tau + \alpha_m(\dot{m}_i)_{j,k}^{\tau-1} = (1 - \alpha_f)(\dot{\varphi}_i)_{j,k}^\tau + \alpha_f(\dot{\varphi}_i)_{j,k}^{\tau-1}. \tag{2.36}$$

Изменение массы льда в единице объема грунта связано с алгоритмической скоростью выражением:

$$\frac{(\dot{\varphi}_i)_{j,k}^\tau - (\dot{\varphi}_i)_{j,k}^{\tau-1}}{\theta} = (1 - \gamma)(\dot{m}_i)_{j,k}^{\tau-1} + \gamma(\dot{m}_i)_{j,k}^\tau, \tag{2.37}$$

где  $\theta$  - шаг по времени, с;

Подставляя (2.35) в (2.37) получаем:

$$\begin{aligned}
& \frac{(\dot{\varphi}_i)_{j,k}^\tau - (\dot{\varphi}_i)_{j,k}^{\tau-1}}{\theta} = \left( (1 - \gamma) - \gamma \frac{\alpha_m}{(1 - \alpha_m)} \right) (\dot{m}_i)_{j,k}^{\tau-1} + \\
& + \frac{\gamma(1 - \alpha_f)}{(1 - \alpha_m)} (H_i)_{j,k}^\tau \left( (\psi_w)_{j,k}^\tau + (\mu_w)_{j,k}^\tau - L_w \frac{T_{j,k}^\tau}{T_0} \right) + \\
& + \frac{\gamma\alpha_f}{(1 - \alpha_m)} (H_i)_{j,k}^{\tau-1} \left( (\psi_w)_{j,k}^{\tau-1} + (\mu_w)_{j,k}^{\tau-1} - L_w \frac{T_{j,k}^{\tau-1}}{T_0} \right).
\end{aligned} \tag{2.38}$$

Коэффициенты альфа-метода определяются следующими выражениями:

$$\alpha_m = \frac{3\rho_\infty - 1}{2\rho_\infty + 2}; \alpha_f = \frac{\rho_\infty}{\rho_\infty + 1}; \gamma = 0,5 - \alpha_m + \alpha_f, \tag{2.39}$$

где  $\rho_\infty = 0,75$  - безразмерный параметр, принимающий значение в диапазоне от 0 (сильное затухание высокочастотных осцилляций) до 1 (отсутствие затухания).

Для скорости изменения количества нерастворенной соли (2.33) можем

записать аналогичное выражение:

$$\begin{aligned} \frac{(\wp_{ns})_{j,k}^\tau - (\wp_{ns})_{j,k}^{\tau-1}}{\theta} &= \left( (1-\gamma) - \gamma \frac{\alpha_m}{(1-\alpha_m)} \right) (\dot{m}_{ns})_{j,k}^{\tau-1} + \\ &+ \frac{\gamma(1-\alpha_f)}{(1-\alpha_m)} (H_s)_{j,k}^\tau (\wp_{ws})_{j,k}^\tau \left( (\omega_s)_{j,k}^\tau - (\omega_s^{max})_{j,k}^\tau \right) + \\ &+ \frac{\gamma\alpha_f}{(1-\alpha_m)} (H_s)_{j,k}^{\tau-1} (\wp_{ws})_{j,k}^{\tau-1} \left( (\omega_s)_{j,k}^{\tau-1} - (\omega_s^{max})_{j,k}^{\tau-1} \right), \end{aligned} \quad (2.40)$$

где  $\dot{m}_{ns}$  - алгоритмическая скорость изменения массы нерастворённой соли в единице объема грунта, кг/(с·м<sup>3</sup>).

Алгоритмическую  $\dot{m}_{ns}$  и обычную скорость  $\dot{\wp}_{ns}$  (кг/(с·м<sup>3</sup>)) изменения количества нерастворенной соли можем найти аналогично уравнениям для льда:

$$\frac{(\wp_{ns})_{j,k}^\tau - (\wp_{ns})_{j,k}^{\tau-1}}{\theta} = (1-\gamma)(\dot{m}_{ns})_{j,k}^{\tau-1} + \gamma(\dot{m}_{ns})_{j,k}^\tau; \quad (2.41)$$

$$(1-\alpha_m)(\dot{m}_{ns})_{j,k}^\tau + \alpha_m(\dot{m}_{ns})_{j,k}^{\tau-1} = (1-\alpha_f)(\dot{\wp}_{ns})_{j,k}^\tau + \alpha_f(\dot{\wp}_{ns})_{j,k}^{\tau-1}. \quad (2.42)$$

Далее рассмотрим параболические дифференциальные уравнения (2.29) - (2.31) с краевой задачей Робена. Для их решения был использован неявный метод конечных разностей (МКР) с центральными разностями по пространственным переменным. Этот метод обеспечивает первый порядок аппроксимации по времени и второй по пространству, абсолютную устойчивость и сходимости к решению дифференциальной краевой задачи [11; 79].

Запишем конечно - разностные аппроксимации уравнений (2.29) - (2.31). Для этого направим ось  $z$  вверх и ось  $y$  вдоль поверхности земли в плоскости чертежа. Тогда  $\vec{g} = -g$ . Далее запишем уравнение закона сохранения тепловой энергии (2.29) в коэффициентной форме:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = A_T \nabla \cdot (B_T \vec{\nabla} T) + \vec{C}_T \vec{\nabla} T + E_T \frac{\partial \wp_i}{\partial t} + F_T \frac{\partial \wp_{ns}}{\partial t}; \quad (2.43)$$

$$A_T = 1 / (\wp_w c_w + \wp_i c_i + \wp_s c_s + \wp_{ns} c_{ns} + \wp_{sk} c_{sk}); \quad (2.44)$$

$$B_T = \lambda_T; \quad (2.45)$$

$$\vec{C}_T = -A_T \left( \vec{j}_w (c_w - c_i) + \vec{j}_{ws} (\omega_w c_w + \omega_s c_s) \right); \quad (2.46)$$

$$E_T = A_T \left( L_w + (c_w - c_i) T \right); \quad (2.47)$$

$$F_T = A_T L_s. \quad (2.48)$$

Конечно-разностный аналог уравнения (2.43) для двумерного случая:

$$\begin{aligned} \frac{T_{j,k}^\tau - T_{j,k}^{\tau-1}}{\theta} &= (E_T)_{j,k}^\tau \frac{(\wp_i)_{j,k}^\tau - (\wp_i)_{j,k}^{\tau-1}}{\theta} + (F_T)_{j,k}^\tau \frac{(\wp_{ns})_{j,k}^\tau - (\wp_{ns})_{j,k}^{\tau-1}}{\theta} + \\ &+ (C_{Tz})_{j,k}^\tau \frac{T_{j+1,k}^\tau - T_{j-1,k}^\tau}{z_{j+1} - z_{j-1}} + (C_{Ty})_{j,k}^\tau \frac{T_{j,k+1}^\tau - T_{j,k-1}^\tau}{y_{k+1} - y_{k-1}} + \\ &+ \frac{2(A_T)_{j,k}^\tau}{z_{j+1} - z_{j-1}} \left( (B_T)_{j+\frac{1}{2},k}^\tau \frac{T_{j+1,k}^\tau - T_{j,k}^\tau}{z_{j+1} - z_j} - (B_T)_{j-\frac{1}{2},k}^\tau \frac{T_{j,k}^\tau - T_{j-1,k}^\tau}{z_j - z_{j-1}} \right) + \\ &+ \frac{2(A_T)_{j,k}^\tau}{y_{k+1} - y_{k-1}} \left( (B_T)_{j,k+\frac{1}{2}}^\tau \frac{T_{j,k+1}^\tau - T_{j,k}^\tau}{y_{k+1} - y_k} - (B_T)_{j,k-\frac{1}{2}}^\tau \frac{T_{j,k}^\tau - T_{j,k-1}^\tau}{y_k - y_{k-1}} \right), \end{aligned} \quad (2.49)$$

где  $C_{Ty}$ ,  $C_{Tz}$  - проекции вектора  $\vec{C}_T$  на оси  $y$ ,  $z$ .

Далее запишем уравнение закона сохранения массы воды (2.30) в коэффициентной форме:

$$\frac{\partial \psi_w}{\partial t} = A_w \nabla \cdot (B_w \vec{\nabla} \psi_w) + A_w \nabla \cdot (D_w \vec{\nabla} \omega_s) + A_w \nabla \cdot \vec{C}_w - A_w \frac{\partial \wp_i}{\partial t}; \quad (2.50)$$

$$A_w = 1 / \left( \frac{\partial \wp_w}{\partial \psi_w} \right); \quad (2.51)$$

$$B_w = \frac{\omega_w \lambda_P \rho_w}{g}; \quad (2.52)$$

$$D_w = -D_{ws} \wp_{ws}; \quad (2.53)$$

$$\vec{C}_w = \omega_w \lambda_P \rho_w (1 - hav(\varepsilon_V)) \vec{e}_z. \quad (2.54)$$

Конечно-разностный аналог уравнения закона сохранения воды (2.50) выглядит следующим образом:

$$\frac{(\psi_w)_{j,k}^\tau - (\psi_w)_{j,k}^{\tau-1}}{\theta} = -(A_w)_{j,k}^\tau \frac{(\wp_i)_{j,k}^\tau - (\wp_i)_{j,k}^{\tau-1}}{\theta} + (A_w)_{j,k}^\tau \frac{(C_{wz})_{j+1,k}^\tau - (C_{wz})_{j-1,k}^\tau}{z_{j+1} - z_{j-1}} +$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{2(A_w)_{j,k}^\tau}{z_{j+1} - z_{j-1}} \left( (B_w)_{j+\frac{1}{2},k}^\tau \frac{(\psi_w)_{j+1,k}^\tau - (\psi_w)_{j,k}^\tau}{z_{j+1} - z_j} - (B_w)_{j-\frac{1}{2},k}^\tau \frac{(\psi_w)_{j,k}^\tau - (\psi_w)_{j-1,k}^\tau}{z_j - z_{j-1}} \right) + \\
& + \frac{2(A_w)_{j,k}^\tau}{y_{k+1} - y_{k-1}} \left( (B_w)_{j,k+\frac{1}{2}}^\tau \frac{(\psi_w)_{j,k+1}^\tau - (\psi_w)_{j,k}^\tau}{y_{k+1} - y_k} - (B_w)_{j,k-\frac{1}{2}}^\tau \frac{(\psi_w)_{j,k}^\tau - (\psi_w)_{j,k-1}^\tau}{y_k - y_{k-1}} \right) + (2.55) \\
& + \frac{2(A_w)_{j,k}^\tau}{z_{j+1} - z_{j-1}} \left( (D_w)_{j+\frac{1}{2},k}^\tau \frac{(\omega_s)_{j+1,k}^\tau - (\omega_s)_{j,k}^\tau}{z_{j+1} - z_j} - (D_w)_{j-\frac{1}{2},k}^\tau \frac{(\omega_s)_{j,k}^\tau - (\omega_s)_{j-1,k}^\tau}{z_j - z_{j-1}} \right) + \\
& + \frac{2(A_w)_{j,k}^\tau}{y_{k+1} - y_{k-1}} \left( (D_w)_{j,k+\frac{1}{2}}^\tau \frac{(\omega_s)_{j,k+1}^\tau - (\omega_s)_{j,k}^\tau}{y_{k+1} - y_k} - (D_w)_{j,k-\frac{1}{2}}^\tau \frac{(\omega_s)_{j,k}^\tau - (\omega_s)_{j,k-1}^\tau}{y_k - y_{k-1}} \right),
\end{aligned}$$

где  $C_{wz}$  - проекция на ось  $z$  вектора  $\vec{C}_w$ .

Далее запишем уравнение закона сохранения массы соли (2.31) в коэффициентной форме:

$$\frac{\partial \omega_s}{\partial t} = A_s \nabla \cdot (B_s \vec{\nabla} \omega_s) + A_s \nabla \cdot (D_s \vec{\nabla} \psi_w) + A_s \nabla \cdot (\vec{C}_s \omega_s) - A_s \frac{\partial \wp_{ns}}{\partial t} + G_s \frac{\partial \psi_w}{\partial t}; (2.56)$$

$$A_s = (1 - \omega_s) / (\wp_s + \wp_w); (2.57)$$

$$B_s = D_{ws} \wp_{ws}; (2.58)$$

$$D_s = \frac{\omega_s \lambda_p \rho_w}{g}; (2.59)$$

$$\vec{C}_s = \omega_s \lambda_p \rho_{ws} (1 - \text{hav}(\varepsilon_V)) \vec{e}_z; (2.60)$$

$$G_s = -A_s \frac{\omega_s}{\omega_w} \frac{\partial \wp_w}{\partial \psi_w}. (2.61)$$

Конечно-разностный аналог уравнения закона сохранения соли (2.56) выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned}
& \frac{(\omega_s)_{j,k}^\tau - (\omega_s)_{j,k}^{\tau-1}}{\theta} = - (A_s)_{j,k}^\tau \frac{(\wp_{ns})_{j,k}^\tau - (\wp_{ns})_{j,k}^{\tau-1}}{\theta} + \\
& + (G_s)_{j,k}^\tau \frac{(\psi_w)_{j,k}^\tau - (\psi_w)_{j,k}^{\tau-1}}{\theta} + (A_s)_{j,k}^\tau \frac{(C_{sz} \omega_s)_{j+1,k}^\tau - (C_{sz} \omega_s)_{j-1,k}^\tau}{z_{j+1} - z_{j-1}} +
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{2(A_s)_{j,k}^\tau}{z_{j+1} - z_{j-1}} \left( (B_s)_{j+\frac{1}{2},k}^\tau \frac{(\omega_s)_{j+1,k}^\tau - (\omega_s)_{j,k}^\tau}{z_{j+1} - z_j} - (B_s)_{j-\frac{1}{2},k}^\tau \frac{(\omega_s)_{j,k}^\tau - (\omega_s)_{j-1,k}^\tau}{z_j - z_{j-1}} \right) + \\
& + \frac{2(A_s)_{j,k}^\tau}{y_{k+1} - y_{k-1}} \left( (B_s)_{j,k+\frac{1}{2}}^\tau \frac{(\omega_s)_{j,k+1}^\tau - (\omega_s)_{j,k}^\tau}{y_{k+1} - y_k} - (B_s)_{j,k-\frac{1}{2}}^\tau \frac{(\omega_s)_{j,k}^\tau - (\omega_s)_{j,k-1}^\tau}{y_k - y_{k-1}} \right) + \\
& + \frac{2(A_s)_{j,k}^\tau}{z_{j+1} - z_{j-1}} \left( (D_s)_{j+\frac{1}{2},k}^\tau \frac{(\psi_w)_{j+1,k}^\tau - (\psi_w)_{j,k}^\tau}{z_{j+1} - z_j} - (D_s)_{j-\frac{1}{2},k}^\tau \frac{(\psi_w)_{j,k}^\tau - (\psi_w)_{j-1,k}^\tau}{z_j - z_{j-1}} \right) + \\
& + \frac{2(A_s)_{j,k}^\tau}{y_{k+1} - y_{k-1}} \left( (D_s)_{j,k+\frac{1}{2}}^\tau \frac{(\psi_w)_{j,k+1}^\tau - (\psi_w)_{j,k}^\tau}{y_{k+1} - y_k} - (D_s)_{j,k-\frac{1}{2}}^\tau \frac{(\psi_w)_{j,k}^\tau - (\psi_w)_{j,k-1}^\tau}{y_k - y_{k-1}} \right),
\end{aligned} \tag{2.62}$$

где  $C_{sz}$  - проекция на ось  $z$  вектора  $\vec{C}_s$ .

Применение МКР сводит систему дифференциальных уравнений к системе нелинейных алгебраических уравнений, которая решается методом Гаусса и методом последовательных приближений. Устойчивость разностной схемы обеспечила возможность выбора произвольного шага по времени в независимости от шага по пространству.

Алгоритм решения системы уравнений тепломассопереноса следующий. Сначала для каждой точки расчетной схемы составляется система уравнений (2.49), (2.55), (2.62) для температуры, потенциала и концентрации соли. Для количества льда и нерастворенной соли используются выражения (2.38) и (2.40), которые после подстановки в (2.49), (2.55), (2.62), замыкают систему уравнений. После решения системы уравнений методом Гаусса становится возможным обновить значения количества льда и нерастворенной соли с помощью тех же выражений (2.38) и (2.40). Затем обновляются значения алгоритмической и обычной скорости изменения количества льда и нерастворенной соли с помощью выражений (2.36) - (2.37), (2.41) - (2.42). После выполняется подстановка обновленных значений температуры, потенциала, концентраций, количества воды и нерастворенной соли в уравнения (2.49), (2.55), (2.62) и цикл итераций повторяется. Итерации прекращаются, когда искомые переменные изменяются не более, чем на 0,01% от

текущего значения. На криволинейной границе расчетная сетка строится несогласованным способом. Пример показан на рисунке 2.1 ( $h_y$ ,  $h_z$  - размеры конечно-разностной сетки, м).

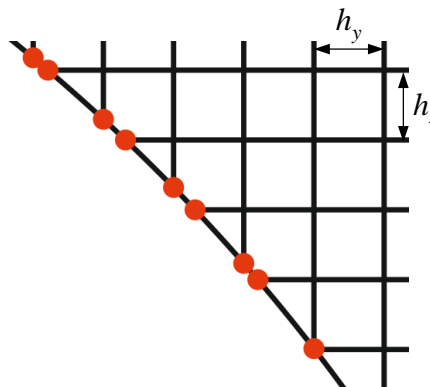


Рисунок 2.1 - Пример построения несогласованной конечно-разностной сетки на криволинейной границе

Таким образом, автором разработана методика решения системы уравнений тепломассопереноса (2.29) - (2.34) методом конечных разностей и обобщённым альфа-методом.

#### 2.4 Расчет параметров пучинистого грунта

При проектировании инженерной защиты трубопроводов неизбежно возникают трудности, связанные с дефицитом исходных данных о свойствах грунтов для математической модели (2.29) - (2.34). В инженерной практике наибольшая сложность связана с расчетом зависимости капиллярно-сорбционного потенциала от количества воды в грунте (2.13) - (2.14). Эта зависимость не входит в комплекс стандартных инженерных изысканий и обычно отсутствует в итоговом отчете. В рамках текущего параграфа решена задача расчёта параметров влагопроводности грунта ( $\beta_{вз}$  и  $\gamma$ ) по результатам косвенных измерений на примере чрезмернопучинистого суглинка, который был вскрыт на участке аварийного инцидента №4.

В таблице 2.1 приведены тепло- и влагопроводные свойства суглинка, полученные по результатам стандартных инженерных изысканий. Используются следующие условные обозначения:  $W_p$  - влажность на пределе пластичности, д.ед.;

$I_p$  - число пластичности, д.ед.;  $\wp_w^{\max}$  - масса воды в единице объема полностью водонасыщенного грунта, кг/м<sup>3</sup>;  $\omega_s^{\text{ест}}$  - концентрация соли в поровом растворе, соответствующая естественному состоянию грунта, д.ед.

Таблица 2.1 - Тепло- и влагопроводные свойства суглинка

$\rho_w$ , кг/м <sup>3</sup>	$\rho_s = \rho_{ns}$ , кг/м <sup>3</sup>	$\rho_i$ , кг/м <sup>3</sup>	$f$	$\beta_{ws}$ , кг/м <sup>3</sup>	$L_w$ , Дж/кг
1000	2165	917	0,86	757,7	$3,33 \cdot 10^5$
$c_w$ , Дж/(кг·°C)	$c_s = c_{ns}$ , Дж/(кг·°C)	$c_i$ , Дж/(кг·°C)	$\tau_{s1}$ , с	$\tau_{s2}$ , с	$\omega_s^{\text{ест}}$ , д.ед.
4190	870	917	5000	5000	0
$\tau_{\Omega 1}$ , Дж·с·м <sup>3</sup> /кг <sup>2</sup>	$\tau_{\Omega 2}$ , Дж·с·м <sup>3</sup> /кг <sup>2</sup>	$M_w$ , кг/моль	$D_{ws}$ , м <sup>2</sup> /с	$\rho_{sk}$ , кг/м <sup>3</sup>	$\wp_{sk}$ , кг/м <sup>3</sup>
$10^4$	1	0,018	$5 \cdot 10^{-11}$	2700	1450
$c_{sk}$ , Дж/(кг·°C)	$\lambda_{po}$ , м/с	$\varepsilon_{fn}$ , д.ед.	$W_p$ , д.ед.	$I_p$ , д.ед.	$\wp_w^{\max}$ , кг/м <sup>3</sup>
950	$10^{-7}$	0,11	0,132	0,135	463
$e$ , д.ед.	$\lambda_{th}$ , Вт/(м·°C)				
0,862	1,35				

Значение изобарной теплоемкости скелета грунта  $c_{sk}$  соответствует рекомендациям СП 25.13330.2012 (приложение Б6). Значения плотности скелета грунта и твердых частиц соответствуют инженерно-геологическим изысканиям. Значение коэффициента диффузии  $D_{ws}$  соответствует среднему из диапазона для талых грунтов  $D_{ws} \in [10^{-10}; 10^{-12}]$  м<sup>2</sup>/с и мерзлых грунтов  $D_{ws} \in [10^{-9}; 10^{-11}]$  м<sup>2</sup>/с [47]. Значение параметра релаксации при кристаллизации льда соответствует среднелогарифмическому из диапазона  $\tau_{\Omega 1} \in [1000; 100000]$  Дж·с·м<sup>3</sup>/кг<sup>2</sup> [27]. Время релаксации растворения соли составляет около 5000 с. Коэффициенты  $f$  и  $\beta_{ws}$  соответствуют водному раствору хлорида натрия. Влияние концентрации раствора  $\omega_s^{\text{ест}}$  на пучинистость грунта будет исследовано отдельно. На начальном этапе концентрация принята равной к нулю. Прочие характеристики в таблице 2.1 не требуют специальных обоснований.

Масса воды в единице объема полностью водонасыщенного грунта рассчитана по следующей формуле:

$$\wp_w^{\max} = \rho_w e / (1 + e). \quad (2.63)$$



Далее приведена постановка задачи расчета влагопроводных свойств грунта. Зависимость (2.13) строится по двум точкам, поэтому необходимо составить два уравнения для определения недостающих параметров  $\wp_{вз}$  и  $\gamma$ . Первую точку можно получить расчетным путем с использованием формулы Б.4 СП 25.13330.2012:

$$\wp_1 = \wp_{sk} W_p k_w (T_1, I_p), \quad (2.64)$$

где  $k_w(T_1, I_p)$  - коэффициент, определяемый при температуре  $T_1 = -1$  °С по [64].

В таком случае потенциал рассчитывается по следующей формуле:

$$\psi_1 = L_w \frac{T_1}{T_0}. \quad (2.65)$$

Вторая точка соответствует потенциалу наименьшей влагоёмкости  $\psi_2 = \psi_{нв} = -33$  Дж/кг. Количество воды при наименьшей влагоёмкости  $\wp_2 = \wp_{нв}$  рассчитывается путем численного моделирования с использованием уравнений (2.29) - (2.34). При этом необходимо найти такое значение  $\wp_2$ , которое обеспечивает равенство расчетного значения степени пучинистости  $\bar{\epsilon}_V$  измеренному  $\epsilon_{fh}$  при лабораторном испытании по методике ГОСТ 28622-2012 [21]:

$$\epsilon_{fh} = \bar{\epsilon}_V. \quad (2.66)$$

Расчетная схема для определения параметра  $\wp_{нв}$  приведена на рисунке 2.1. Задача является одномерной. Эквивалент начальных и граничных условий методики ГОСТ 28622-2012 в численном эксперименте приведен на рисунке 2.2 и в таблице 2.2.

По известному значению  $\wp_{нв}$  расчет  $\wp_{вз}$  и  $\gamma$  не представляет существенных трудностей:

$$\gamma = \log_{\left(\frac{\wp_1}{\wp_{нв}}\right)} \left( \frac{\psi_{нв}}{\psi_1} \right); \quad (2.67)$$

$$\wp_{вз} = \wp_1 \left( \frac{\psi_1}{\psi_{вз}} \right)^{1/\gamma}. \quad (2.68)$$

Методика ГОСТ 28622-2012 устанавливает требования к определению степени пучинистости грунта по результатам лабораторных испытаний в

установке, схематично изображенной на рисунке 2.2 ( $H_{гр}$  - высота образца грунта, м;  $d_{гр}$  - диаметр образца грунта, м). Грунт промораживается в цилиндрической обойме от верхнего края и имеет гидравлическую связь с резервуаром воды снизу. В конце эксперимента производится расчет относительной деформации морозного пучения  $\varepsilon_{fh}$  по формуле (2.69).

$$\varepsilon_{fh} = h_{fh} / H_{fr}, \quad (2.69)$$

где  $h_{fh}$  - прирост высоты образца грунта, м;  $H_{fr}$  - толщина промерзшего слоя в образце грунта, м.

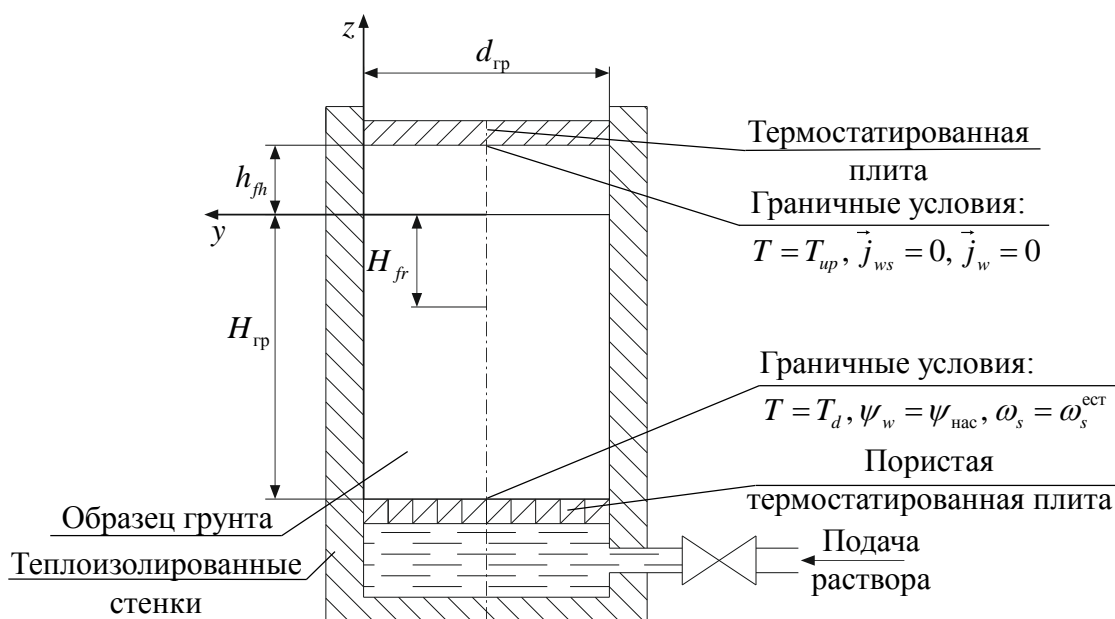


Рисунок 2.2 - Расчетная схема для определения параметра  $\wp_{нв}$

В начальном условии №2 и граничном условии №10 (таблица 2.2) величина  $\psi_{нас}$  обозначает потенциал, который соответствует полностью водонасыщенному состоянию и рассчитывается по формуле:

$$\psi_{нас} = \psi_{вз} \left( \frac{\wp_{вз}}{\wp_w^{max}} \right)^\gamma. \quad (2.70)$$

Из таблицы 2.2 видны отличия в сравнении с ГОСТ 28622-2012 в задании начальных и граничных значений температуры. Методика ГОСТ 28622-2012 требует установления температуры на верхнем торце образца грунта  $-4$  °С для незасоленных грунтов и  $-2,5$  °С для засоленных. При этом эксперимент должен останавливаться при глубине промерзания равной 0,1 м. Однако смещение точки

замерзания в засоленных грунтах однозначно приведет к ситуации, когда промерзание на эту глубину будет невозможно, т.к. температура на нижнем конце установки остается неизменной. Поэтому для численного эксперимента температура всей системы понижалась на величину температуры начала замерзания свободного грунтового раствора, что позволило исключить неоднозначности в определении условий останова эксперимента.

Таблица 2.2 - Начальные, граничные и остановочные условия численного эксперимента

№	Параметр	Численный эксперимент	ГОСТ 28622-2012 [21]
Начальные условия			
1	$T$	$T_{нз} + 1$	+1 °С
2	$\psi_w$		$\psi_w = \psi_{нас} - gz$
3	$\omega_s$		$\omega_s = \omega_s^{ест}$
4	$\rho_i$		$\rho_i = 0 \text{ кг/м}^3$
5	$\rho_{ns}$		$\rho_{ns} = 0 \text{ кг/м}^3$
Граничные условия, верхняя граница			
6	$T$	$T_{ур} = T_{нз} - 4$	незасоленные грунты: -4 °С засоленные грунты: -2,5 °С
7	$\psi_w$	$\vec{j}_{ws} = 0, \vec{j}_w = 0, \vec{j}_s = 0, \text{ кг/(с}\cdot\text{м}^2)$	
8	$\omega_s$		
Граничные условия, нижняя граница			
9	$T$	$T_d = T_{нз} + 2$	+2 °С
10	$\psi_w$		$\psi_w = \psi_{нас}$
11	$\omega_s$		$\omega_s = \omega_s^{ест}$
Геометрические параметры			
12	$H_{гр}$		0,15 м
13	$d_{гр}$		0,10 м
Условия останова эксперимента: $T = T_{нз}$ при глубине промерзания $H_{fr}$			
14	$H_{fr}$		0,10 м

Результатом численного эксперимента по расчетной схеме на рисунке 2.1 является средняя объемная деформация грунта от морозного пучения  $\bar{\varepsilon}_V$ , отражающая степень пучинистости грунта  $\varepsilon_{fh}$ :

$$\varepsilon_{fh} = \bar{\varepsilon}_V = \frac{1}{H_{fr}} \int_{-H_{fr}}^0 \varepsilon_V dz. \quad (2.71)$$

По результатам расчета были получены значения параметров влагопроводности суглинка, приведенные в таблице 2.3. Эти параметры использованы при апробации предложенной в 3-й главе математической модели

упруго-деформируемого пучинистого грунта.

Таблица 2.3 - Расчетные параметры влагопроводности суглинка

$\rho_1, \text{кг/м}^3$	$\rho_2, \text{кг/м}^3$	$\rho_{\text{нв}}, \text{кг/м}^3$	$\rho_{\text{вз}}, \text{кг/м}^3$	$\gamma$	$\rho_{\text{вз}}/\rho_w^{\text{max}}$
124	258	258	119	4,95	0,258

В соответствии с обзором свойств грунтов в работах У. Mualem [108], И. Л. Калюжного [42] и В. А. Королёва [48] показатель степени  $\gamma$  лежит в диапазоне от 0,08 до 2,7 для песков и от 0,4 до 7 для глинистых грунтов, а соотношение  $\rho_{\text{вз}}/\rho_w^{\text{max}}$  лежит в диапазоне от 0,01 до 0,08 для песков и от 0,04 до 0,45 для суглинков и глин. Таким образом, полученные характеристики ( $\rho_{\text{вз}}, \gamma$ ) расположены внутри диапазона возможных значений.

Далее исследован вопрос о влиянии концентрации растворенных солей на пучинистость грунтов. Известно, что засоленность грунтов может изменяться в очень широких пределах [4]. Поэтому необходимо определить её влияние на пучинистость, чтобы корректно учесть в последующих расчетах трубопроводов. На рисунке 2.3 представлен график зависимости степени пучинистости грунта от концентрации раствора, из которого следует, что пучинистые свойства грунтов близки к максимуму при нулевой концентрации раствора. Следовательно, достаточно рассматривать только незасоленные грунты.

Максимум пучинистых свойств приходится на концентрацию раствора около 3,5%, и лишь при более высокой концентрации пучинистые свойства снижаются. Зависимость показывает, что неправильно подобранная концентрация раствора может лишь усугубить влияние морозного пучения. Точно выдержать концентрацию при смешивании больших объемов грунта с солью или при введении жидкого раствора технологически сложная задача. Кроме того, в условиях паводковых процессов на территории севера Западной Сибири высока вероятность вымывания солей из грунта, что наносит существенный урон экологии на обширных территориях. Поэтому в работе такой способ инженерной защиты, как засоление, не рассматривался.

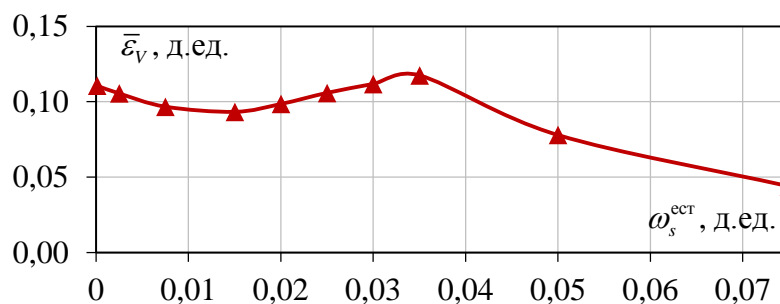


Рисунок 2.3 - Зависимость степени пучинистости грунта от концентрации раствора  $\omega_s^{\text{ест}}$

Таким образом, в данном параграфе рассчитаны параметры пучинистого суглинка (таблица 2.3), которые будут использованы в третьей и четвертой главах при исследовании инженерной защиты подземных трубопроводов.

## Выводы по главе 2

1. Приведена модель тепломассопереноса в капиллярно-пористой среде, позволившая решить задачу расчёта силового взаимодействия трубопровода с пучинистым грунтом с учётом комплексных решений по его защите и динамики климатических изменений в долгосрочной перспективе.

2. Разработана методика решения системы дифференциальных уравнений нестационарного тепломассопереноса в грунте, использующая неявный метод конечных разностей для уравнений параболического типа и обобщенный альфа-метод для обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка.

3. Разработана расчетная схема и выполнено численное исследование, позволившее установить параметры влагопроводности пучинистого суглинка. Полученные параметры влагопроводности использованы в следующих главах при оценке напряженно-деформированного состояния трубопровода в условиях пучинистых грунтов.

### ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТРУБОПРОВОДА С ПУЧИНИСТЫМ ГРУНТОМ

#### 3.1 Разработка математической модели для расчета параметров силового взаимодействия холодного подземного трубопровода с пучинистым грунтом

В третьей главе описываются предложенные автором расчетная схема и математическая модель для определения нагрузок на трубопровод, учитывающие влияние применяемой инженерной защиты. Представлены результаты сравнения фактического и расчетного высотного положения аварийного участка трубопровода, образовавшегося по причине воздействия морозного пучения. Исследован вопрос о выборе участка для устройства инженерной защиты. Установлено правило, регламентирующее выбор протяженности участка трубопровода, подлежащего инженерной защите.

Расчет НДС холодного теплоизолированного трубопровода, проложенного подземно в пучинистых грунтах, производится с учетом сил морозного пучения по результатам решения задачи тепломассопереноса. Сложность задачи повышается при учете конструктивных и технологических элементов применяемой инженерной защиты в виде грунтовой подушки.

Математические модели А. И. Горковенко и П. Ю. Михайлова, моделирующие мерзлый грунт как абсолютно твердое тело, не чувствительны к элементам инженерной защиты внутри него. Как следствие, значимый вклад сжимаемости грунтовой подушки не может быть учтен в расчете. В диссертационной работе для расчета силового взаимодействия трубопровода с пучинистым грунтом предложена математическая модель упруго-деформируемого грунта, описывающая сжимаемость грунтовой подушки модулем деформации и коэффициентом поперечной деформации. Предпосылкой к использованию модели упруго-деформируемого грунта является линейная связь между усилиями и перемещениями в исследованиях [15; 16] и нормативном документе [9].

Линейная теория упругости представляется следующими группами уравнений. Система уравнений равновесия:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} = 0; \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} = 0; \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} = 0. \end{cases} \quad (3.1)$$

Уравнения обобщенного закона Гука с учетом объемной деформации грунта от морозного пучения:

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= 2G_{\text{гр}} \left( \varepsilon_{xx} - \frac{\varepsilon_V}{3} \right) + \lambda_{\text{гр}} (\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz} - \varepsilon_V); \\ \sigma_{yy} &= 2G_{\text{гр}} \left( \varepsilon_{yy} - \frac{\varepsilon_V}{3} \right) + \lambda_{\text{гр}} (\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz} - \varepsilon_V); \\ \sigma_{zz} &= 2G_{\text{гр}} \left( \varepsilon_{zz} - \frac{\varepsilon_V}{3} \right) + \lambda_{\text{гр}} (\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz} - \varepsilon_V). \end{aligned} \quad (3.2)$$

Уравнения связи между касательными напряжениями и сдвиговыми деформациями:

$$\begin{aligned} \tau_{xy} &= \tau_{yx} = G_{\text{гр}} \varepsilon_{xy}; \\ \tau_{yz} &= \tau_{zy} = G_{\text{гр}} \varepsilon_{yz}; \\ \tau_{zx} &= \tau_{xz} = G_{\text{гр}} \varepsilon_{zx}. \end{aligned} \quad (3.3)$$

Геометрические соотношения между деформациями и перемещениями:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xx} &= \frac{\partial u_x}{\partial x}; \quad \varepsilon_{xy} = \frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y}; \\ \varepsilon_{yy} &= \frac{\partial u_y}{\partial y}; \quad \varepsilon_{yz} = \frac{\partial u_z}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial z}; \\ \varepsilon_{zz} &= \frac{\partial u_z}{\partial z}; \quad \varepsilon_{zx} = \frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x}. \end{aligned} \quad (3.4)$$

где  $u_x, u_y, u_z$  - компоненты вектора перемещений точек грунта, м.

Параметры Ламе:

$$2G_{\text{гр}} = \frac{E_{\text{гр}}}{(1 + \nu_{\text{гр}})}; \quad (3.5)$$

$$\lambda_{\text{гр}} = \frac{\nu_{\text{гр}} E_{\text{гр}}}{(1 + \nu_{\text{гр}})(1 - 2\nu_{\text{гр}})}. \quad (3.6)$$

где  $\nu_{\text{гр}}$  - коэффициент поперечной деформации грунта.

Модуль деформации грунта  $E_{\text{гр}}$  и коэффициент поперечной деформации грунта  $\nu_{\text{гр}}$  зависят от координаты (различны для грунта основания и подушки) и представляются кусочно-линейными функциями температуры:

$$E_{\text{гр}} = \begin{cases} E_{\text{мер}}, T < T_E^{\text{мер}}; \\ E_{\text{тал}} + \frac{(T - T_{\text{нз}})}{(T_E^{\text{мер}} - T_{\text{нз}})}(E_{\text{мер}} - E_{\text{тал}}), T \in [T_{\text{нз}}, T_E^{\text{мер}}]; \\ E_{\text{тал}}, T > T_{\text{нз}}; \end{cases} \quad (3.7)$$

$$\nu_{\text{гр}} = \begin{cases} \nu_{\text{мер}}, T < T_V^{\text{мер}}; \\ \nu_{\text{тал}} + \frac{(T - T_{\text{нз}})}{(T_V^{\text{мер}} - T_{\text{нз}})}(\nu_{\text{мер}} - \nu_{\text{тал}}), T \in [T_{\text{нз}}, T_V^{\text{мер}}]; \\ \nu_{\text{тал}}, T > T_{\text{нз}}, \end{cases} \quad (3.8)$$

где  $\nu_{\text{мер}}$ ,  $\nu_{\text{тал}}$  - коэффициенты поперечной деформации талого и мерзлого грунта;  $T_E^{\text{мер}}$ ,  $T_V^{\text{мер}}$  - реперные значения температуры, °С.

В расчетах используется плоско-деформированное состояние (деформация  $\varepsilon_{xx}$  отсутствует). Подставляя (3.2) - (3.4) в (3.1), получаем систему уравнений (3.9) - (3.11) для расчета НДС грунтового массива:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial y} \left( 2G_{\text{гр}} \frac{\partial u_y}{\partial y} + \lambda_{\text{гр}} \left( \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( G_{\text{гр}} \left( \frac{\partial u_z}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial z} \right) \right) = \frac{\partial}{\partial y} \left( \left( \frac{2}{3} G_{\text{гр}} + \lambda_{\text{гр}} \right) \varepsilon_V \right); \quad (3.9) \\ \frac{\partial}{\partial z} \left( 2G_{\text{гр}} \frac{\partial u_z}{\partial z} + \lambda_{\text{гр}} \left( \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( G_{\text{гр}} \left( \frac{\partial u_z}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial z} \right) \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left( \left( \frac{2}{3} G_{\text{гр}} + \lambda_{\text{гр}} \right) \varepsilon_V \right); \quad (3.10) \\ \lambda_{\text{гр}} = \nu_{\text{гр}} E_{\text{гр}} (1 + \nu_{\text{гр}})^{-1} (1 - 2\nu_{\text{гр}})^{-1}; \quad 2G_{\text{гр}} = E_{\text{гр}} (1 + \nu_{\text{гр}})^{-1}. \quad (3.11) \end{array} \right.$$

В уравнениях (3.9) - (3.10) левая часть является классической теорией упругости. В правой части предлагается добавка, отвечающая за расширение пучинистого грунта при замерзании и определяемая решением задачи тепломассопереноса по уравнениям (2.29) - (2.34). Соответственно, правая часть



является функцией координат  $y$ ,  $z$  и позволяет учесть неоднородность пространственного распределения морозного пучения по объему грунта. Предложенная модель позволяет определить только предельные значения вертикального перемещения трубопровода  $H_{\max}$  и усилия  $q_{fh}^{\max}$ , действующего со стороны пучинистого грунта. Поэтому для математической модели (3.9) - (3.11) использованы две группы граничных условий на поверхности трубопровода  $L_p$  (рисунок 3.1).

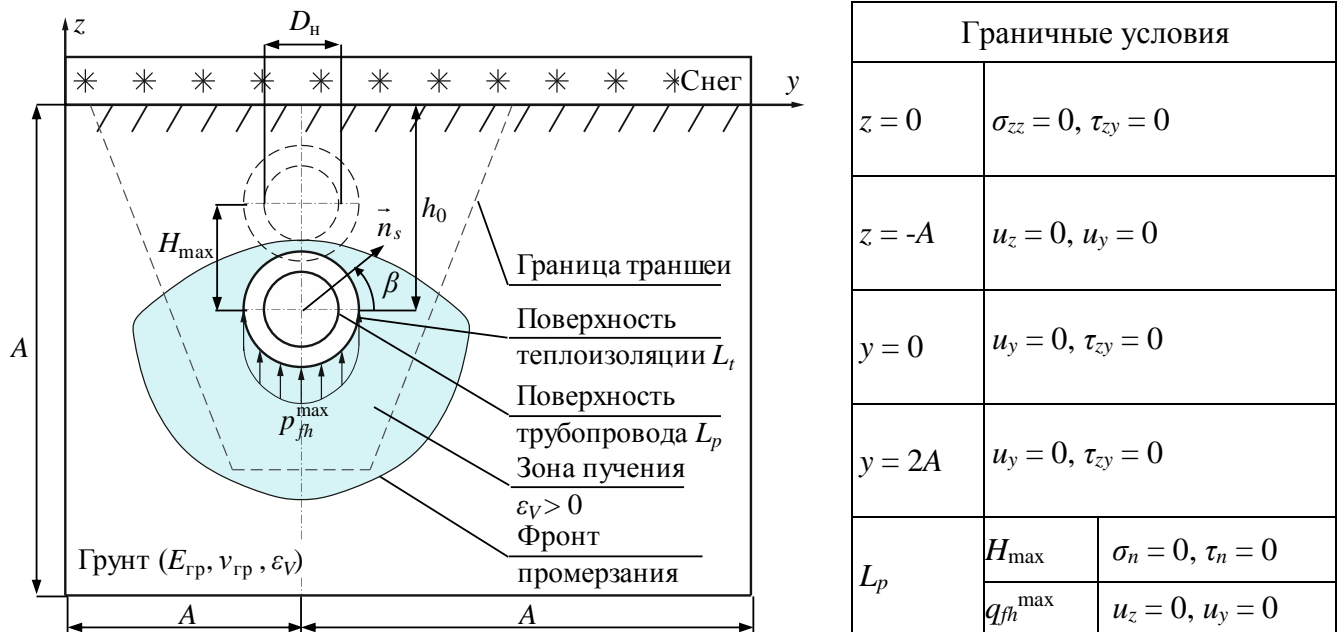


Рисунок 3.1 - Расчетная схема для определения параметров силового взаимодействия подземного трубопровода с пучинистым грунтом ( $H_{\max}$  и  $q_{fh}^{\max}$ )

Труба жестко зафиксирована ( $u_z = 0$  м,  $u_y = 0$  м) - рассчитывается максимальное погонное усилие при стесненном пучении  $q_{fh}^{\max}$ :

$$q_{fh}^{\max} = \frac{D_n}{2} \int_0^{2\pi} \left( \tau_{zy}|_{L_p} \cos(\beta) + \sigma_{zz}|_{L_p} \sin(\beta) \right) d\beta; \quad (3.12)$$

$$q_{fh}^{\max} \leq q_{fh}^{\text{пред}}, \quad (3.13)$$

где  $\beta$  - угол между  $\vec{n}_s$  и осью  $y$ , рад.

Труба не зафиксирована ( $\sigma_n = 0$  Па,  $\tau_n = 0$  Па) - рассчитывается максимальное вертикальное перемещение трубопровода при свободном пучении  $H_{\max}$ :

$$H_{\max} = u_z(A \pm 0,5D_n; -h_0), \quad (3.14)$$

где  $h_0$  - глубина заложения оси трубопровода, м.

Условие (3.13) ограничивает максимальное усилие предельным значением, равным несущей способности основания и определяемым по формуле (1.5).

Граничные условия на других поверхностях приведены на рисунке 3.1. На свободной поверхности грунта задаются нулевые нормальные и касательные напряжения ( $\sigma_{zz} = 0$  Па,  $\tau_{zy} = 0$  Па). На боковых границах задаются нулевые касательные напряжения и нулевые нормальные перемещения:  $\tau_{yz} = 0$  Па,  $u_y = 0$  м. На нижней границе грунта задаются нулевые перемещения, что соответствует неподвижному состоянию грунтового массива:  $u_y = 0$  м,  $u_z = 0$  м. Размер расчетной области  $A$  (м) определяется сжимаемой толщей.

Итогом решения задачи силового взаимодействия трубопровода с пучинистым грунтом являются формулы (3.15) - (3.16), связывающие усилия, действующие на подземный трубопровод  $q_{fh}$ , с его перемещениями  $w$ :

$$q_{fh} = k_{fh} (H_{\max} - w); \quad (3.15)$$

$$k_{fh} = q_{fh}^{\max} / H_{\max}. \quad (3.16)$$

где  $q_{fh}$  - погонное усилие, действующее на подземный трубопровод, от морозного пучения грунта, Н/м;  $w$  - вертикальное перемещение подземного трубопровода, м.

Уравнения (3.9) - (3.10) решены методом конечных разностей на девятиточечном шаблоне:

$$\begin{aligned} & \frac{4}{y_{k+1} - y_{k-1}} \left( (G_{\text{гр}})_{k+\frac{1}{2},j} \frac{(u_y)_{k+1,j} - (u_y)_{k,j}}{y_{k+1} - y_k} - (G_{\text{гр}})_{k-\frac{1}{2},j} \frac{(u_y)_{k,j} - (u_y)_{k-1,j}}{y_k - y_{k-1}} \right) + \\ & + \frac{2}{y_{k+1} - y_{k-1}} \left( (\lambda_{\text{гр}})_{k+\frac{1}{2},j} \left( \frac{(u_y)_{k+1,j} - (u_y)_{k,j}}{y_{k+1} - y_k} + \frac{(u_z)_{k+1,j+1} + (u_z)_{k,j+1} - (u_z)_{k+1,j-1} - (u_z)_{k,j-1}}{2(z_{j+1} - z_{j-1})} \right) \right) + \\ & + \frac{2}{y_{k+1} - y_{k-1}} \left( -(\lambda_{\text{гр}})_{k-\frac{1}{2},j} \left( \frac{(u_y)_{k,j} - (u_y)_{k-1,j}}{y_k - y_{k-1}} + \frac{(u_z)_{k,j+1} + (u_z)_{k-1,j+1} - (u_z)_{k,j-1} - (u_z)_{k-1,j-1}}{2(z_{j+1} - z_{j-1})} \right) \right) + \\ & + \frac{2}{z_{j+1} - z_{j-1}} \left( (G_{\text{гр}})_{k,j+\frac{1}{2}} \left( \frac{(u_z)_{k+1,j+1} + (u_z)_{k+1,j} - (u_z)_{k-1,j+1} - (u_z)_{k-1,j}}{2(y_{k+1} - y_{k-1})} + \frac{(u_y)_{k,j+1} - (u_y)_{k,j}}{(z_{j+1} - z_j)} \right) \right) + \end{aligned} \quad (3.17)$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{2}{z_{j+1} - z_{j-1}} \left( - \left( G_{\text{rp}} \right)_{k,j-\frac{1}{2}} \left( \frac{(u_z)_{k+1,j} + (u_z)_{k+1,j-1} - (u_z)_{k-1,j} - (u_z)_{k-1,j-1}}{2(y_{k+1} - y_{k-1})} + \frac{(u_y)_{k,j} - (u_y)_{k,j-1}}{(z_j - z_{j-1})} \right) \right) - \\
& \frac{\left( \left( \frac{2}{3} G_{\text{rp}} + \lambda_{\text{rp}} \right) \varepsilon_V \right)_{k+1,j} - \left( \left( \frac{2}{3} G_{\text{rp}} + \lambda_{\text{rp}} \right) \varepsilon_V \right)_{k-1,j}}{y_{k+1} - y_{k-1}} = 0; \\
& \frac{2}{z_{j+1} - z_{j-1}} \left( 2 \left( G_{\text{rp}} \right)_{k,j+\frac{1}{2}} \frac{(u_z)_{k,j+1} - (u_z)_{k,j}}{z_{j+1} - z_j} - 2 \left( G_{\text{rp}} \right)_{k,j-\frac{1}{2}} \frac{(u_z)_{k,j} - (u_z)_{k,j-1}}{z_j - z_{j-1}} \right) + \\
& + \frac{2}{z_{j+1} - z_{j-1}} \left( \left( \lambda_{\text{rp}} \right)_{k,j+\frac{1}{2}} \left( \frac{(u_y)_{k+1,j+1} + (u_y)_{k+1,j} - (u_y)_{k-1,j+1} - (u_y)_{k-1,j}}{2(y_{k+1} - y_{k-1})} + \frac{(u_z)_{k,j+1} - (u_z)_{k,j}}{z_{j+1} - z_j} \right) \right) + \\
& + \frac{2}{z_{j+1} - z_{j-1}} \left( - \left( \lambda_{\text{rp}} \right)_{k,j-\frac{1}{2}} \left( \frac{(u_y)_{k+1,j} + (u_y)_{k+1,j-1} - (u_y)_{k-1,j} - (u_y)_{k-1,j-1}}{2(y_{k+1} - y_{k-1})} + \frac{(u_z)_{k,j} - (u_z)_{k,j-1}}{z_j - z_{j-1}} \right) \right) + \\
& + \frac{2}{y_{k+1} - y_{k-1}} \left( \left( G_{\text{rp}} \right)_{k+\frac{1}{2},j} \left( \frac{(u_z)_{k+1,j} - (u_z)_{k,j}}{y_{k+1} - y_k} + \frac{(u_y)_{k+1,j+1} + (u_y)_{k,j+1} - (u_y)_{k+1,j-1} - (u_y)_{k,j-1}}{2(z_{j+1} - z_{j-1})} \right) \right) + \\
& + \frac{2}{y_{k+1} - y_{k-1}} \left( - \left( G_{\text{rp}} \right)_{k-\frac{1}{2},j} \left( \frac{(u_z)_{k,j} - (u_z)_{k-1,j}}{y_k - y_{k-1}} + \frac{(u_y)_{k,j+1} + (u_y)_{k-1,j+1} - (u_y)_{k,j-1} - (u_y)_{k-1,j-1}}{2(z_{j+1} - z_{j-1})} \right) \right) - \\
& \frac{\left( \left( \frac{2}{3} G_{\text{rp}} + \lambda_{\text{rp}} \right) \varepsilon_V \right)_{j+1} - \left( \left( \frac{2}{3} G_{\text{rp}} + \lambda_{\text{rp}} \right) \varepsilon_V \right)_{j-1}}{z_{j+1} - z_{j-1}} = 0.
\end{aligned} \tag{3.18}$$

Применение модели упруго-деформируемого тела для расчета параметров силового взаимодействия трубопровода с пучинистым грунтом, по сравнению с моделями А. И. Горковенко и П. Ю. Михайлова, позволяет учесть неоднородность пространственного распределения объемных деформаций морозного пучения и комбинированную инженерную защиту, состоящую из противопучинистой грунтовой конструкции и кольцевой теплоизоляции.

### 3.2 Математическая модель напряженно-деформированного состояния трубопровода на участке пучинистого грунта

Напряженно-деформированное состояние определяет возможность безопасной эксплуатации трубопровода и может значительно изменяться на участках пучинистых грунтов. Расчет напряжений в стенке трубопровода является заключительным этапом оценки работоспособности применяемой инженерной защиты. Для расчета НДС подземного магистрального трубопровода использовано уравнение продольно-поперечного изгиба балки на упругом основании [1]:

$$E_{ст} I_y \frac{d^4 w_i}{dx^4} - N \left( \frac{d^2 w_i}{dx^2} + \frac{1}{R_{нач}} \right) = q_i(w_i) + q_{св}; \quad (3.19)$$

$$N = N_0 + E_{ст} \frac{\pi}{4} [D_{н}^2 - D_{вн}^2] \left( \sqrt{1 + \left( \frac{dw_i}{dx} \right)^2} - 1 \right), \quad (3.20)$$

где  $R_{нач}$  - начальный радиус изгиба, м;  $N, N_0$  - действующее и начальное продольные усилия, Н;  $I_y$  - осевой момент инерции сечения трубы относительно оси  $y$ , м<sup>4</sup>;  $E_{ст}$  - модуль упругости стали, Па;  $q_i(w_i)$  - функция внешней распределенной нагрузки на  $i$ -м участке, Н/м;  $q_{св}$  - собственный вес трубопровода, Н/м;  $i$  - номер характерного участка,  $i \in [1; 7]$ .

Граничные условия соответствуют расчетной схеме А. И. Горковенко [16] (рисунок 3.2:  $Q_z$  - перерезывающее усилие в поперечном сечении трубопровода, Н;  $M_y$  - изгибающий момент в поперечном сечении трубопровода, Н·м). На участках морозного пучения 3 - 5 на трубопровод действует сила морозного пучения, вызывающая перемещения трубопровода вверх и реакцию со стороны непучинистых грунтов на участках заземления 1, 2, 6, 7. Соответственно, в расчетной схеме выделены следующие характерные участки: 1, 7 - участки упругого отпора непучинистого грунта,  $x \in [x_1; x_2] \cup [x_7; x_8]$ ; 2, 6 - участки пластического отпора непучинистого грунта,  $x \in [x_2; x_3] \cup [x_6; x_7]$ ; 3, 5 - участки переменной интенсивности пучения,  $x \in [x_3; x_4] \cup [x_5; x_6]$ ; 4 - участок постоянной интенсивности пучения,  $x \in [x_4; x_5]$ ;

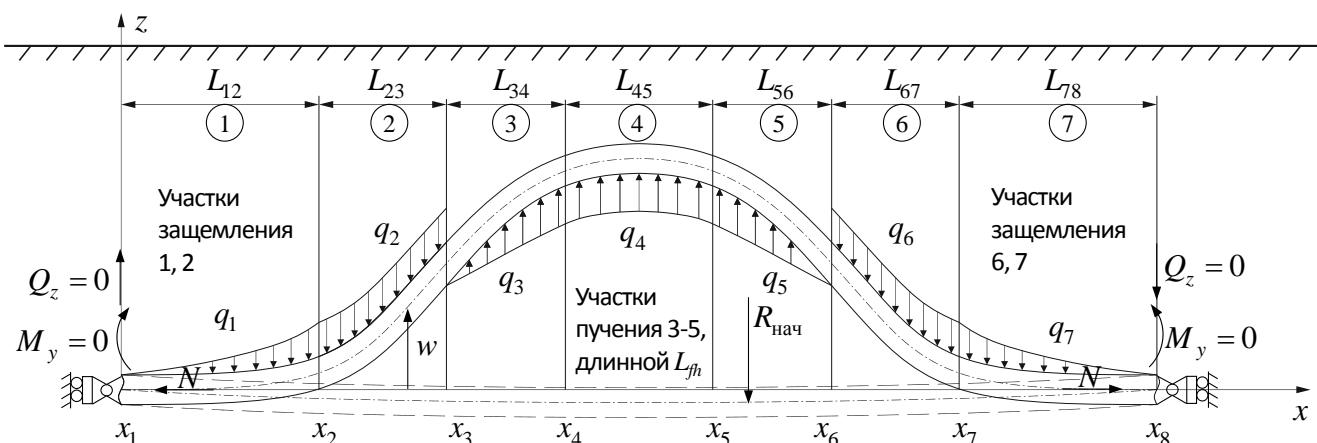


Рисунок 3.2 - Расчетная схема для определения НДС трубопровода на участке пучинистого грунта

В точках 1 и 8 задаются граничные условия, характеризующие защемление трубопровода непучинистым грунтом: нулевой изгибающий момент и нулевая перерезывающая сила. В точках 2 - 7 задаются граничные условия сопряжения: непрерывность перерезывающего усилия, изгибающего момента, угла поворота и перемещения:

$$\left\{ \begin{array}{l} M_y(x_1) = 0; \\ Q_z(x_1) = 0; \\ w_{i-1}(x_i) = w_i(x_i), i \in [2; 7]; \\ w'_{i-1}(x_i) = w'_i(x_i), i \in [2; 7]; \\ w''_{i-1}(x_i) = w''_i(x_i), i \in [2; 7]; \\ w'''_{i-1}(x_i) = w'''_i(x_i), i \in [2; 7]; \\ M_y(x_8) = 0; \\ Q_z(x_8) = 0. \end{array} \right. \quad (3.21)$$

Распределенная нагрузка, характеризующая взаимодействие с грунтом, задается уравнениями (3.22). На участках защемления использована упруго-пластическая модель грунта А. Б. Айнбиндера [1]. На участках морозного пучения использована формула (3.15) с расчетом параметров силового взаимодействия по предложенной автором модели упруго-деформируемого пучинистого грунта (3.9) - (3.11):

$$q_i(x) = \begin{cases} -C_z w_1, x \in [x_1; x_2]; \\ -q_{\text{пред}}^{\text{в}} \left( 1 - \frac{w_2 - w_{\text{пред}}^{\text{в}}}{h_0 - w_{\text{пред}}^{\text{в}}} \right), w_2 \geq w_{\text{пред}}^{\text{в}}, x \in [x_2; x_3]; \\ q_{\text{фт}}^{\text{макс}} \left( \frac{(x - x_3)}{L_{34}} - \frac{w_3}{H_{\text{макс}}} \right), x \in [x_3; x_4]; \\ q_{\text{фт}}^{\text{макс}} (1 - w_4 / H_{\text{макс}}), x \in [x_4; x_5]; \\ q_{\text{фт}}^{\text{макс}} \left( \frac{(x_6 - x)}{L_{56}} - \frac{w_5}{H_{\text{макс}}} \right), x \in [x_5; x_6]; \\ -q_{\text{пред}}^{\text{в}} \left( 1 - \frac{w_6 - w_{\text{пред}}^{\text{в}}}{h_0 - w_{\text{пред}}^{\text{в}}} \right), w_6 \geq w_{\text{пред}}^{\text{в}}, x \in [x_6; x_7]; \\ -C_z w_7, x \in [x_7; x_8], \end{cases} \quad (3.22)$$

где  $C_z$  - коэффициент постели трубопровода на участке заземления, Н/м<sup>2</sup>;  $q_{\text{в}}^{\text{пред}}$  - предельное сопротивление грунта перемещениям трубопровода вертикально вверх, Н/м;  $w_{\text{в}}^{\text{пред}}$  - перемещение трубопровода, соответствующее предельному сопротивлению грунта, м.

Коэффициент постели, предельное сопротивление грунта и соответствующее ему перемещение рассчитываются по формулам из работы [1]:

$$w_{\text{в}}^{\text{пред}} = f_{\text{в}}^{\text{пред}} / C_z; \quad (3.23)$$

$$C_z = C_z^{\text{тал}} (h_{\text{тал}} / h_0) + C_z^{\text{мер}} (1 - h_{\text{тал}} / h_0); \quad (3.24)$$

$$C_z^{\text{тал}} = \frac{0,12 E_{\text{тал}}^{\text{зас}} \eta_{\text{тал}}^{\text{зас}} \sqrt{D_{\text{пов}}}}{(1 - (\nu_{\text{тал}}^{\text{зас}})^2)} [1 - \exp(-2h_{\text{тал}} / D_{\text{пов}})]; \quad (3.25)$$

$$C_z^{\text{мер}} = \frac{0,12 E_{\text{мер}}^{\text{зас}} \sqrt{D_{\text{пов}}}}{(1 - (\nu_{\text{мер}}^{\text{зас}})^2)}; \quad (3.26)$$

$$f_{\text{в}}^{\text{пред}} = f_{\text{в,тал}}^{\text{пред}} (h_{\text{тал}} / h_0) + f_{\text{в,мер}}^{\text{пред}} (1 - h_{\text{тал}} / h_0); \quad (3.27)$$

$$f_{\text{в,тал}}^{\text{пред}} = g \rho_{\text{зас}} h_{\text{тал}} (D_{\text{пов}} + h_{\text{тал}} \tan(0,7 \varphi_{\text{тал}}^{\text{зас}})) + \frac{0,7 c_{\text{тал}}^{\text{зас}} h_{\text{тал}}}{\cos(0,7 \varphi_{\text{тал}}^{\text{зас}})}; \quad (3.28)$$

$$f_{в,мер}^{пред} = R_{мер}^{зас} D_{пов}, \quad (3.29)$$

где  $h_{тал}$  - расстояние от поверхности грунта до слоя мерзлого грунта, м;  $E_{тал}^{зас}$ ,  $E_{мер}^{зас}$  - модули деформации грунта засыпки в талом и мерзлом состоянии, Па;  $\nu_{тал}^{зас}$ ,  $\nu_{мер}^{зас}$  - коэффициенты поперечной деформации грунта засыпки в талом и мерзлом состоянии;  $\eta_{тал}^{зас}$  - коэффициент понижения модуля деформации грунта в талом состоянии (1 - грунт ненарушенной структуры; 0,6 - насыпной грунт; 0,3 - обводненный грунт);  $\varphi_{тал}^{зас}$  - угол внутреннего трения грунта засыпки в талом состоянии, °;  $c_{тал}^{зас}$  - сцепление грунта засыпки в талом состоянии, Па;  $R_{мер}^{зас}$  - расчетное сопротивление грунта засыпки в мерзлом состоянии, Па;  $D_{пов}$  - диаметр трубопровода по поверхности антикоррозионной изоляции или теплоизоляции, м.

Осевой момент инерции, растягивающие усилия и собственный вес:

$$I_y = \frac{\pi}{64} [D_n^4 - D_{вн}^4]; \quad (3.30)$$

$$N_0 = \sigma_{прод,0} \frac{\pi}{4} [D_n^2 - D_{вн}^2]; \quad (3.31)$$

$$\sigma_{прод,0} = \frac{2\nu_{ст} P_{вн} D_{вн}^2}{D_n^2 - D_{вн}^2} - \alpha_{ст} E_{ст} \Delta T; \quad (3.32)$$

$$q_{св} = 0,25\pi g \rho_{ст} (D_n^2 - D_{вн}^2) + 0,25\pi D_{вн}^2 g \rho_{прод} + m_{ут} g / L_{ут}, \quad (3.33)$$

где  $D_{вн}$  - внутренний диаметр трубопровода, м;  $\sigma_{прод,0}$  - продольные растягивающие напряжения, Па;  $\alpha_{ст}$  - коэффициент температурного расширения стали, °С<sup>-1</sup>;  $\Delta T$  - температурный перепад между температурой монтажа и температурой эксплуатации, °С;  $\nu_{ст}$  - коэффициент Пуассона стали;  $\rho_{ст}$  - плотность стали, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{прод}$  - плотность перекачиваемого продукта, кг/м<sup>3</sup>;  $m_{ут}$  - масса утяжелителей с учетом взвешивающего действия воды, кг;  $L_{ут}$  - шаг расстановки утяжелителей, м.

Для минимизации влияния краевых эффектов на результаты расчета длина прилегающих участков непучинистых грунтов  $L_{12}$  и  $L_{78}$  принята 200 м.

Для расчета изгибных и касательных напряжений определяется изгибающий момент  $M_y$  и перерезывающее усилие  $Q_z$  в рассматриваемом поперечном сечении:

$$M_y = EI_y \frac{d^2 w}{dx^2}; \quad (3.34)$$

$$Q_z = EI_y \frac{d^3 w}{dx^3}. \quad (3.35)$$

Затем рассчитываются изгибные и касательные напряжения:

$$\sigma_{\text{изг}} = -n_z \frac{M_y}{I_y}; \quad (3.36)$$

$$\tau_z = \frac{4|m_y|}{\pi D_{\text{cp}}^2 \delta_T} Q_z; \quad (3.37)$$

$$D_{\text{cp}} = (D_{\text{н}} + D_{\text{вн}}) / 2, \quad (3.38)$$

где  $n_z$  - расстояние от оси трубопровода вдоль положительного направления оси  $z$  в плоскости поперечного сечения, м;  $m_y$  - расстояние от оси трубопровода вдоль положительного направления оси  $y$  в плоскости поперечного сечения, м.

Затем рассчитываются кольцевые напряжения  $\sigma_{\text{кц}}$ , суммарные продольные напряжения от изгиба и растяжения  $\sigma_{\text{пр.сум.}}$ , главные напряжения  $\sigma_1^{\text{гл}}$ ,  $\sigma_2^{\text{гл}}$  и эквивалентные напряжения по энергетической теории прочности  $\sigma_{\text{экр}}$ , что соответствует требованиям [53]:

$$\sigma_{\text{кц}} = 2P_{\text{вн}} \frac{D_{\text{вн}}^2}{D_{\text{н}}^2 - D_{\text{вн}}^2}; \quad (3.39)$$

$$\sigma_{\text{пр.сум.}} = \sigma_{\text{прод}} + \sigma_{\text{изг}}; \quad (3.40)$$

$$\sigma_1^{\text{гл}} = \frac{\sigma_{\text{пр.сум.}} + \sigma_{\text{кц}}}{2} + 0,5 \sqrt{(\sigma_{\text{пр.сум.}} - \sigma_{\text{кц}})^2 + 4(\tau_z)^2}; \quad (3.41)$$

$$\sigma_2^{\text{гл}} = \frac{\sigma_{\text{пр.сум.}} + \sigma_{\text{кц}}}{2} - 0,5 \sqrt{(\sigma_{\text{пр.сум.}} - \sigma_{\text{кц}})^2 + 4(\tau_z)^2}; \quad (3.42)$$

$$\sigma_{\text{экр}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1^{\text{гл}} - \sigma_2^{\text{гл}})^2 + (\sigma_1^{\text{гл}})^2 + (\sigma_2^{\text{гл}})^2}; \quad (3.43)$$

$$\sigma_{\text{экр}} \leq \bar{R}; \quad (3.44)$$

$$\bar{R} = mR_2^{\text{н}} / (k_{\text{н}} k_2), \quad (3.45)$$

где  $R_2^{\text{н}}$  - нормативный предел текучести, Па;  $m$  - коэффициент условий работы;  $k_2$  -



коэффициент надежности по материалу;  $k_n$  - коэффициент надежности по ответственности.

Выполнение условия (3.44) подтверждает отсутствие недопустимых пластических деформаций, что позволяет сделать вывод о возможности эксплуатации трубопровода на участке пучинистого грунта при выбранной конструкции инженерной защиты. Таким образом, весь расчет НДС трубопровода сводится к проверке условия (3.44).

Решение уравнения продольно-поперечного изгиба (3.19) выполнено методом конечных разностей. Для каждого  $i$ -го узла сетки записывается следующее уравнение:

$$E_{ст} I_y \frac{w_{i+2} - 4w_{i+1} + 6w_i - 4w_{i-1} + w_{i-2}}{l^4} - N_i \frac{w_{i+1} - 2w_i + w_{i-1}}{l^2} + \alpha_{zi} w_i - \beta_{zi} = 0, \quad (3.46)$$

где  $l$  - шаг сетки, м;  $\alpha_{zi}$  - коэффициент постели в  $i$ -й точке;  $\beta_{zi}$  - погонное усилие в  $i$ -й точке.

Продольное усилие рассчитывается по следующей формуле:

$$N_i = \frac{\pi}{2} \nu_{ст} P_{вн} D_{вн}^2 + \frac{\pi (D_n^2 - D_{вн}^2)}{4} \left[ -\alpha_{ст} E_{ст} \Delta T + E_{ст} \left( \sqrt{1 + \left( \frac{w_{i+1} - w_{i-1}}{2l} \right)^2} - 1 \right) \right]. \quad (3.47)$$

Продольное усилие (3.47) является нелинейной частью уравнения (3.46), поэтому система уравнений, составленная для каждого  $i$ -го узла трубопровода, решается методом последовательных приближений.

### 3.3 Алгоритм расчета НДС трубопровода на участке пучинистого грунта

В текущем параграфе описан алгоритм расчета НДС трубопровода, объединяющий все описанные ранее модели: тепломассопереноса в грунте, напряженного состояния грунта и напряженного состояния трубопровода.

В общем случае алгоритм расчета НДС трубопровода (с инженерной защитой или без неё) включает в себя 4 этапа (рисунок 3.3).



Рисунок 3.3 - Алгоритм расчета НДС холодного подземного трубопровода на участке пучинистого грунта

**Этап I.** Суть этапа состоит в воспроизведении фактически обнаруженных геологических условий: распределения температуры, количества воды, соли и льда в грунте по глубине путем решения системы дифференциальных уравнений (2.29)-(2.34) и корректировки исходных данных.

Продолжительность расчета должна обеспечивать стабилизацию температурно-влажностного режима моделируемого грунта и рекомендуется не менее 50 лет ( $t_a = 1,58 \cdot 10^9$  с). Температура грунта  $T_{гр}$  корректируется путем изменения толщины снежного покрова в связи с её высокой чувствительностью к рельефу местности. На открытых территориях (в поле) толщина снежного покрова может быть вдвое меньше, чем на закрытых (в лесу) [56]. Таким образом, допустимый диапазон корректировки толщины снежного покрова лежит в пределах от 0,5 до 1,0 от толщины снежного покрова в лесу.

Суммарное количество воды в грунтовом массиве можно корректировать путем добавления или уменьшения величины стока поверхностных вод, т.к. эта величина сильно зависит от рельефа местности, которая находится за границами моделирования. Распределение температуры, количества воды и соли можно корректировать изменением теплопроводности, влагопроводности и функции капиллярно-сорбционного потенциала. Расчетная схема для первого этапа приведена на рисунке 3.4 ( $q_T$  - входящий поток тепла, Вт/м<sup>2</sup>;  $J_w$  - входящий поток воды, кг/(с·м<sup>2</sup>)) и представляет собой массив грунта, находящийся в естественном температурно-влажностном режиме.



Рисунок 3.4 - Схема для расчета естественного температурно-влажностного режима грунта

На подошве и боковых поверхностях задаются граничные условия, характеризующие нулевые входящие потоки тепла, воды и растворенных солей. На поверхности грунта граничные условия для входящего теплового потока (3.48), потока воды (3.49) и потока солей (3.50) описываются следующими выражениями:

$$\left( -\lambda_T \vec{\nabla} T + h_w \left\{ \omega_w \vec{j}_{ws} + \vec{j}_w \right\} + h_s \left\{ \vec{j}_{ws} \omega_s + \vec{j}_s \right\} \right) \cdot (-\vec{n}) = q_T + h_r J_w + h_{rs} J_s; \quad (3.48)$$

$$\left(\vec{j}_w + \omega_w \vec{j}_{ws}\right) \cdot \left(-\vec{n}\right) = J_w, \quad (3.49)$$

$$\left(\vec{j}_s + \omega_s \vec{j}_{ws}\right) \cdot \left(-\vec{n}\right) = J_s, \quad (3.50)$$

где  $J_s = 0$  кг/(с·м<sup>2</sup>) - входящий поток соли;  $h_r$  - энтальпия воды в жидких осадках, Дж/кг;  $h_{rs}$  - энтальпия растворенной соли в жидких осадках, Дж/кг;  $\vec{n}$  - внешний вектор нормали к границам моделируемого массива грунта.

Обычно температура формирования жидких осадков ниже температуры воздуха у поверхности земли. Однако при движении в сторону поверхности земли жидкие осадки нагреваются более теплым воздухом. Принимая, что верхний слой грунта содержит пренебрежимо малое количество соли, которое быстро вымывается водой при выпадении атмосферных осадков, и несущественной разницу температур жидких осадков и поверхности грунта, получаем для входящего теплового потока:

$$\left(-\lambda_T \vec{\nabla} T\right) \cdot \left(-\vec{n}\right) = q_T. \quad (3.51)$$

В выражении (3.51) тепловой поток  $q_T$  описывает конвекцию по закону Ньютона, ИФ-излучение по закону Стефана-Больцмана [96], поглощение солнечной радиации с учетом облачности и альбедо поверхности [54]. Испарение и конденсация описываются законом Дальтона по формулам из [57] для не заснеженной поверхности, а для поверхности со снежным покровом из [50]. Входящий поток воды это сумма осадков и снеготаяния за вычетом испарения и стока поверхностных вод. Динамика будущих климатических изменений учтена предложенным в работе коэффициентом температурного тренда 0,03 °С/год (на 45-летний период). В зависимости от наличия снега на поверхности земли или льда в порах грунта использовано три варианта граничных условий.

а) При отсутствии льда в порах и отсутствии снега ( $\rho_i = 0$  кг/м<sup>3</sup>,  $h_{sn} = 0$  м) необходимо учитывать эффекты замедления испарения из капиллярно-пористой среды и порового раствора [48]:

$$q_T = \alpha_K \left( (T_B + k_B t) - T \right) + \varepsilon \sigma_0 \left( b_{air} (T_B + T_0 + k_B t)^4 - (T + T_0)^4 \right) + \\ + (1 - A_{гр}) (1 - \theta_c \bar{c}) Q_{sun} + 8,49 \times 10^{-11} \rho_w L_{исп} \mathcal{U}^{0,8} \left( P_B \varphi_B - P_{гр} \exp \left( \frac{(\psi_w + \mu_w) M_w}{R(T + T_0)} \right) \right); \quad (3.52)$$

$$J_w = \rho_w \frac{h_{pr}}{t_{мес}} - j_{out} + 8,49 \times 10^{-11} \rho_w \mathcal{U}^{0,8} \left( P_B \varphi_B - P_{гр} \exp \left( \frac{(\psi_w + \mu_w) M_w}{R(T + T_0)} \right) \right), \quad (3.53)$$

где  $\alpha_K$  - коэффициент конвективного теплообмена, Вт/(м<sup>2</sup>·°C);  $\varepsilon$  - степень черноты подстилающей поверхности грунта в инфракрасной области спектра, д.ед.;  $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(К<sup>4</sup>·м<sup>2</sup>) - постоянная Стефана-Больцмана;  $L_{исп} = 2,26 \cdot 10^6$  Дж/кг - теплота испарения воды;  $P_B$  - давление насыщенного пара при температуре воздуха, Па;  $P_{гр}$  - давление насыщенного пара при температуре поверхности грунта, Па;  $\theta_c$  - коэффициент отражения солнечной радиации от облаков, зависящий от широты и принимаемый по таблице 3.1, д.ед.;  $t_{мес}$  - количество секунд в месяце, с;  $k_B$  - коэффициент температурного тренда среднегодовой температуры воздуха, °C/с.

б) При наличии льда в порах и отсутствии снега ( $\rho_i > 0$  кг/м<sup>3</sup>,  $h_{sn} = 0$  м) испаряется лёд, т.к. жидкая вода скрыта под его слоем:

$$q_T = \alpha_K \left( (T_B + k_B t) - T \right) + \sigma_0 \varepsilon \left( b_{air} (T_B + T_0 + k_B t)^4 - (T + T_0)^4 \right) + \\ + (1 - A_{гр}) (1 - \theta_c \bar{c}) Q_{sun} + 8,49 \times 10^{-11} \rho_w (L_w + L_{исп}) \mathcal{U}^{0,8} (P_B \varphi_B - P_{гр}); \quad (3.54)$$

$$J_w = \rho_w h_{pr} / t_{мес} - j_{out} + 8,49 \times 10^{-11} \rho_w \mathcal{U}^{0,8} (P_B \varphi_B - P_{гр}). \quad (3.55)$$

в) При наличии снежного покрова ( $h_{sn} > 0$  м) испаряется снег, а в расчетах используется температура поверхности снежного покрова  $T_{sn}$  (°C):

$$q_T = \alpha_K \left( (T_B + k_B t) - T_{sn} \right) + \sigma_0 \varepsilon \left( b_{air} (T_B + T_0 + k_B t)^4 - (T_{sn} + T_0)^4 \right) + \\ + (1 - A_{гр}) (1 - \theta_c \bar{c}) Q_{sun} + 1,157 \cdot 10^{-11} (1,8 + \mathcal{U}) \rho_w (L_w + L_{исп}) (P_B \varphi_B - P_{sn}); \quad (3.56)$$

$$J_w = \rho_w \frac{h_{pr}}{t_{мес}} - \frac{\partial (h_{sn} \rho_{sn})}{\partial t} \left( \frac{\partial (h_{sn} \rho_{sn})}{\partial t} < 0 \right) - j_{out} + \\ + 1,157 \cdot 10^{-11} (1,8 + \mathcal{U}) \rho_w (P_B \varphi_B - P_{sn}), \quad (3.57)$$

где  $P_{sn}$  - давление насыщенного пара при температуре поверхности снега, Па.

Для расчета температуры поверхности снега  $T_{sn}$  решается еще одно уравнение для эквивалентного термического сопротивления снежного покрова:

$$\left(-\lambda_T \vec{\nabla} T\right) \cdot \left(-\vec{n}\right) = \frac{\lambda_{sn} (T_{sn} - T)}{h_{sn}}. \quad (3.58)$$

где  $\lambda_{sn}$  - коэффициент теплопроводности снега, Вт/(м·°С).

Приравнявая (3.56) и (3.58), получаем следующее нелинейное уравнение, из которого можем найти температуру поверхности снега:

$$\begin{aligned} \frac{\lambda_{sn} (T_{sn} - T)}{h_{sn}} = & \alpha \left( (T_B + k_B t) - T_{sn} \right) + \sigma_0 \varepsilon \left( b_{air} (T_B + T_0 + k_B t)^4 - (T_{sn} + T_0)^4 \right) + \\ & + (1 - A_{гр}) (1 - \theta_c) Q_{sum} + 1,416 \cdot 10^{-11} \rho_w (L_w + L_{исп}) \mathcal{U} (P_B \varphi_B - P_{sn}). \end{aligned} \quad (3.59)$$

При этом обратного движения воды нет:

$$J_w \geq 0. \quad (3.60)$$

Таблица 3.1 - Коэффициент отражения солнечной радиации от облаков на различных широтах [54]

Широта, °	0	10	20	30	40	50	60	70	75
$\theta_c$	0,65	0,65	0,67	0,68	0,67	0,64	0,60	0,50	0,45

Коэффициент противоизлучения атмосферы [96]:

$$b_{air} = \left( 0,89 - 0,2 \cdot 10^{-0,0007 P_B} \right). \quad (3.61)$$

Коэффициент конвективного теплообмена для подстилающей поверхности без снежного покрова [67]:

$$\alpha = 0,93 \sqrt{\mathcal{U}} (6 + 6,2/\mathcal{U}^2), \quad (3.62)$$

при наличии снежного покрова [80]:

$$\alpha = 6,16 + 4,19 \mathcal{U}. \quad (3.63)$$

Теплопроводность снега рассчитана по формуле Б. В. Проскурякова [66]:

$$\lambda_{sn} = 0,018 + 8,7 \cdot 10^{-4} \rho_{sn}. \quad (3.64)$$

Начальные условия в момент времени  $t_1$  однородные и характеризуют талый водонасыщенный грунт в усредненном по времени состоянии:

$$\begin{cases} T(t_1, z) = T_{гр}; \\ \wp_w(t_1, z) = \wp_w^{\max}; \\ \omega_s(t_1, z) = \omega_s^{\text{ест}}; \\ \wp_i(t_1, z) = 0; \\ \wp_{ns}(t_1, z) = 0, \end{cases} \quad (3.65)$$

где  $t_1 = 0$  с - начальное время для этапа I.

**Этап II.** Задачей второго этапа является расчет пространственного распределения относительной объемной деформация грунта от морозного пучения  $\varepsilon_V$  вокруг трубопровода путем решения системы уравнений тепломассопереноса в грунтах (2.29) - (2.34). Расчетная схема приведена на рисунке 3.5 ( $K_{тр}$  - коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>·°C)).

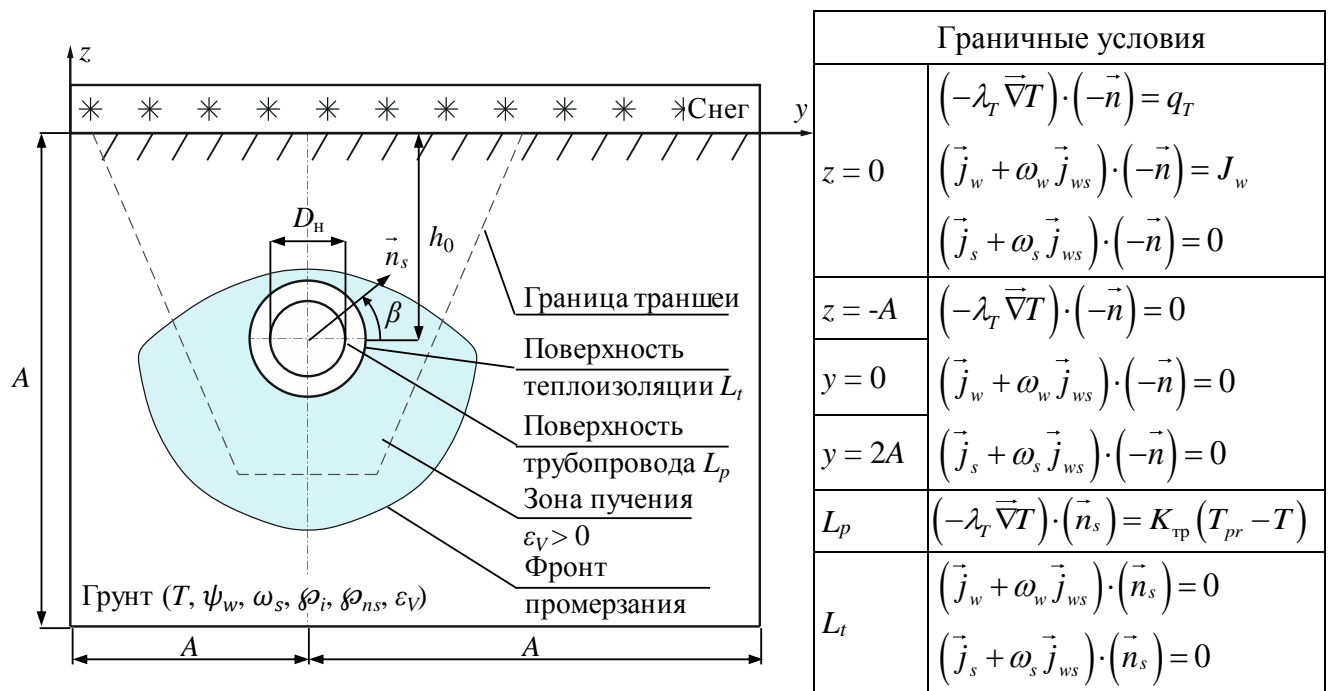


Рисунок 3.5 - Расчетная схема для определения пространственного распределения объемных деформаций грунта от морозного пучения вокруг трубопровода

Граничные условия на верхней, нижней и боковых границах грунта совпадают с граничными условиями на этапе I. На поверхности теплоизоляции трубопровода  $L_t$  задаются граничные условия, соответствующие нулевому потоку воды и солей. На поверхности трубопровода  $L_p$  задаются граничные условия Ньютона-Рихмана с температурой перекачиваемого продукта  $T_{pr}$  на данном

участке. Коэффициент теплопередачи  $K_{тр}$  рассчитан без учета конвективной составляющей, которая несущественна в МГ и МК:

$$K_{тр} = \frac{2\lambda_{ст}}{D_H \ln(D_H / D_{вн})}, \quad (3.66)$$

где  $\lambda_{ст}$  - теплопроводность стали, Вт/(м·°С).

На этапе II значения  $T$ ,  $\psi_w$ ,  $\wp_i$ ,  $\omega_s$ ,  $\wp_{ns}$ , полученные на этапе I, используются как начальные:

$$\left\{ \begin{array}{l} T(t_{II}, z) = T(t_I + t_a, z); \\ \psi_w(t_{II}, z) = \psi_w(t_I + t_a, z); \\ \omega_s(t_{II}, z) = \omega_s(t_I + t_a, z); \\ \wp_i(t_{II}, z) = \wp_i(t_I + t_a, z); \\ \wp_{ns}(t_{II}, z) = \wp_{ns}(t_I + t_a, z), \end{array} \right. \quad (3.67)$$

где  $t_{II} = t_I + t_a$  - начальное время для этапа II.

**Этап III.** Выполняется расчет параметров силового взаимодействия подземного трубопровода с пучинистым грунтом: максимального вертикального перемещения при свободном пучении  $H_{max}$  и максимального усилия от стесненного морозного пучения  $q_{fh}^{max}$ . Для этого используются уравнения (3.9) - (3.14) и расчетная схема на рисунке 3.1. Величина относительной объемной деформации от морозного пучения  $\varepsilon_V$  рассчитана на этапе II, что позволяет учесть в расчете усилий и перемещений неравномерность пространственного распределения морозного пучения и конструкцию инженерной защиты.

**Этап IV.** Выполняется НДС трубопровода по уравнениям (3.19) - (3.47) с учетом  $H_{max}$  и  $q_{fh}^{max}$ , определенных на этапе III. Расчетная схема соответствует рисунку 3.2.

После завершения алгоритма проверяется условие прочности (3.44). При проектировании трубопровода выполнение условия прочности подтверждает, что инженерная защита трубопровода обеспечена. Невыполнение условия прочности требует возврата на этап II и пересмотра конструктивных решений.



### 3.4 Апробация математической модели для расчета параметров силового взаимодействия трубопровода с пучинистым грунтом

Апробация предложенной автором математической модели для расчета параметров силового взаимодействия холодного подземного трубопровода с пучинистым грунтом была выполнена при анализе результатов обследования участка аварийной разгерметизации МК диаметром 530x7,1 мм (аварийный инцидент №4, рисунок 1.4). Аварийная разгерметизация была зафиксирована в апреле на 11-м году эксплуатации. Продольный профиль МК на участке аварийной разгерметизации приведен на рисунке 3.6. При проведении вскрышных работ были обнаружены следующие свидетельства воздействия морозного пучения на трубопровод: изгиб в вертикальной плоскости; разгерметизация по нижней образующей; скопления шлирового льда толщиной до 1,0 м под нижней образующей МК.

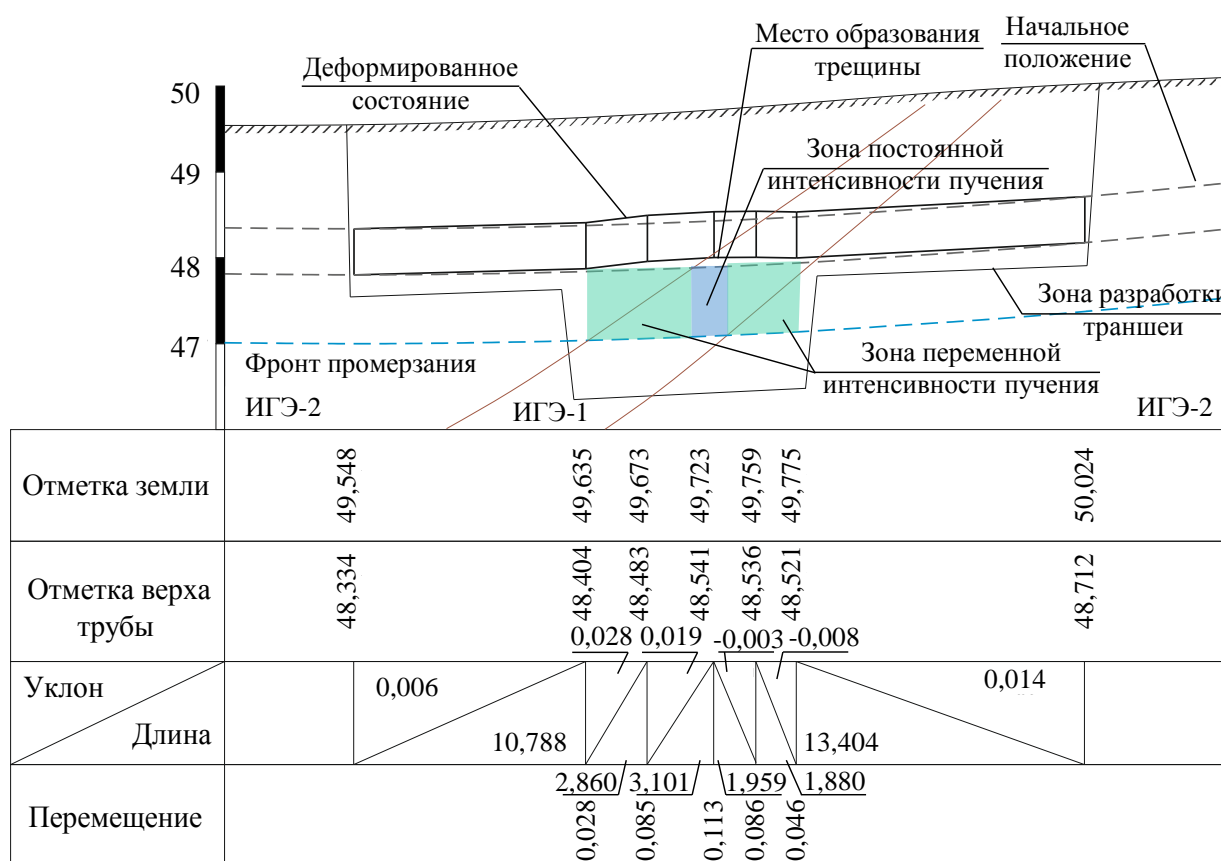


Рисунок 3.6 - Продольный профиль МК на участке аварийной разгерметизации

Во время ликвидации аварии вскрышные работы проводились до средней линии в стороны от места трещины участками по 2 - 3 м с замером ПВП МК.

Замеры выполнены по шести точкам на окружности, что позволило построить положение верхней образующей трубопровода под постоянным воздействием нагрузок от морозного пучения. Съёмка выполнена тахеометром класса Та2 с привязкой к государственной геодезической сети. Погрешность измерений незначительная: по расстоянию  $\pm 2,1$  мм, по высотным отметкам  $\pm 1,4$  мм.

В работе выполнено сравнение фактического высотного положения МК с расчетным по предлагаемой математической модели упруго-деформируемого пучинистого грунта и по моделям Горковенко-Михайлова. Расчет высотного положения трубопровода был выполнен в соответствии с алгоритмом, приведенным на рисунке 3.3. Эксплуатационные характеристики магистрального конденсатопровода приведены в таблице 3.2. Начальное положение МК восстановлено с использованием исполнительной документации, согласно которой на всем вскрытом участке радиус изгиба в вертикальной плоскости  $R_{нач} = 2990$  м. Поэтому кривая начального положения была построена по двум точкам на границах вскрытой области и с радиусом изгиба 2990 м. Толщина талого слоя грунта над трубой была принята равной нулю ( $h_{тал} = 0$  м), т.к. фронт сезонного промерзания смыкается с фронтом промерзания вокруг трубопровода. Конденсатопровод проложен без теплоизоляции.

Таблица 3.2 - Эксплуатационные характеристики МК

$D_n$ , м	$\delta_{ст}$ , м	$E_{ст}$ , Па	$\nu_{ст}$	$\alpha_{ст}$ , °C <sup>-1</sup>	$\rho_{ст}$ , кг/м <sup>3</sup>
0,530	0,0071	$2,06 \cdot 10^{11}$	0,3	$1,2 \cdot 10^{-5}$	7850
$R_1^H$ , Па	$R_2^H$ , Па	$\Delta T$ , °C	$P_{вн}$ , Па	$\rho_{прод}$ , кг/м <sup>3</sup>	$T_{пр}$ , °C
$6,00 \cdot 10^8$	$4,75 \cdot 10^8$	30	$6,0 \cdot 10^6$	750	-0,5
$m$	$k_1$	$k_2$	$k_n$	$\delta_{из}$ , м	$h_0$ , м
0,99	1,40	1,15	1,10	0	1,545

Физико-механические свойства грунтов ИГЭ-1 и ИГЭ-2 (таблицы 3.3 - 3.4) и теплофизические свойства грунта ИГЭ-1 (таблица 2.1) взяты из материалов инженерных изысканий. Недостающие влагопроводные свойства рассчитаны и приведены в таблице 2.3. Климатические условия соответствуют метеостанции Новый Уренгой и приведены в таблицах 1.3, 1.4, 3.1.

В соответствии с алгоритмом на рисунке 3.3, на этапе I выполнен расчет естественного температурно-влажностного режима грунта. Начальные условия соответствовали полностью водонасыщенному незасоленному суглинку:  $\theta_w = \theta_w^{max}$ ,  $\theta_i = 0$  кг/м<sup>3</sup>,  $\theta_{ns} = 0$  кг/м<sup>3</sup>,  $\omega_s = 0$  д.ед. По результатам адаптации температура грунта на уровне трубопровода 0,5 °С возможна при толщине снежного покрова 0,76 от толщины в лесном массиве, что соответствует возможному диапазону значений.

Таблица 3.3 - Деформационные и прочностные свойства суглинка (ИГЭ-1) на участке пучения

$E_{мер}$ , Па	$\nu_{мер}$	$R_{мер}$ , Па	$T_E^{мер}$ , °С	$E_{тал}$ , Па	$\nu_{тал}$
$2,3 \cdot 10^7$	0,28	$3,0 \cdot 10^5$	-1,5	$9 \cdot 10^6$	0,35
$R_{тал}$ , Па	$T_v^{мер}$ , °С	$\rho_{гр}$ , кг/м <sup>3</sup>	$c_{тал}$ , Па	$\varphi_{тал}$ , °	
$1,8 \cdot 10^5$	-1,5	1921	$2,5 \cdot 10^4$	19	

Таблица 3.4 - Деформационные и прочностные свойства непучинистой супеси (ИГЭ-2) на участках заземления

$E_{мер}$ , Па	$\nu_{мер}$	$R_{мер}$ , Па	$T_E^{мер}$ , °С	$E_{тал}$ , Па	$\nu_{тал}$
$2,9 \cdot 10^7$	0,26	$3,0 \cdot 10^5$	-1,5	$1,1 \cdot 10^7$	0,35
$R_{тал}$ , Па	$T_v^{мер}$ , °С	$\rho_{гр}$ , кг/м <sup>3</sup>	$c_{тал}$ , Па	$\varphi_{тал}$ , °	
$2,0 \cdot 10^5$	-1,5	1971	$1,1 \cdot 10^4$	21	

На этапе II продолжительность расчета составила 11 лет - от пуска МК в эксплуатацию до аварийной разгерметизации. По результатам моделирования получено распределение объемных деформаций пучения  $\varepsilon_V$  (рисунок 3.7).

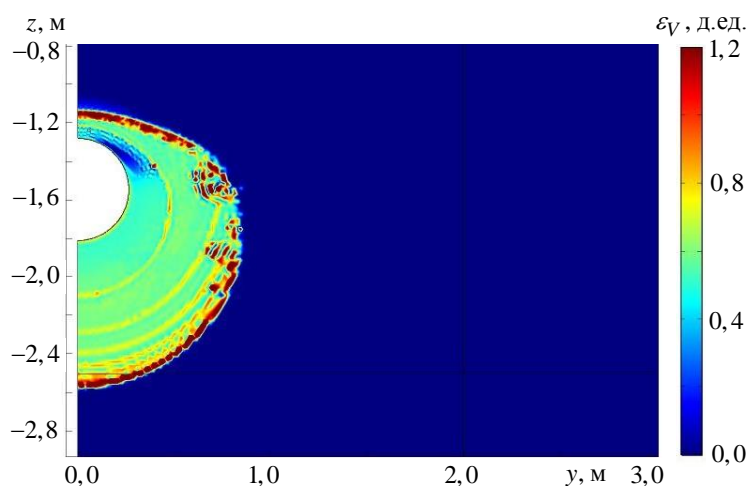


Рисунок 3.7 - Объемные деформации грунта от морозного пучения

На этапе III были рассчитаны параметры силового взаимодействия конденсаторпровода с пучинистым грунтом  $H_{\max}$  и  $q_{fh}^{\max}$  по предложенной модели и модели Горковенко-Михайлова.

На этапе IV рассчитаны вертикальные перемещения и эквивалентные напряжения в стенке трубопровода с учетом параметров  $H_{\max}$  и  $q_{fh}^{\max}$ , определенных по предложенной модели и модели Горковенко-Михайлова.

При выполнении расчетов была проверена сходимость численного метода. В соответствии с результатами расчета  $H_{\max}$ , приведенными на рисунке 3.8 ( $S_H$  - среднеквадратичная погрешность аппроксимации значения  $H_{\max}$ , м;  $\bar{H}_{\max}$  - аппроксимированное значение  $H_{\max}$ , м), погрешность расчета пропорциональна квадрату размера сетки, что соответствует теории метода конечных разностей [11]. При шаге сетки 1,5 см погрешность численного метода не превышает 5%. Шаг по времени выбран 2000 с. Аналогичная зависимость существует для максимального погонного усилия  $q_{fh}^{\max}$ .

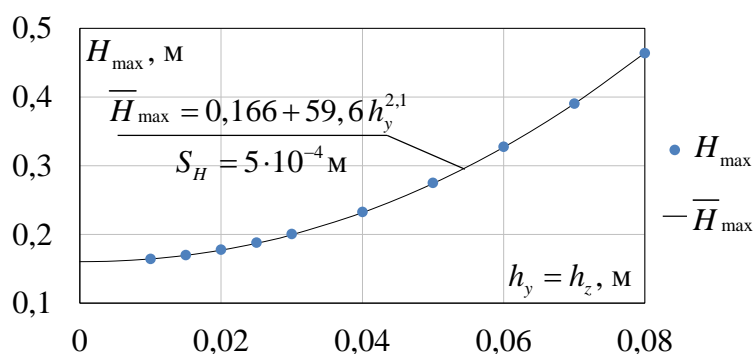


Рисунок 3.8 - Зависимость расчетного значения  $H_{\max}$  от плотности сетки

Расчетные и фактические вертикальные перемещения МК приведены в таблице 3.5 в реперных точках и показаны на рисунке 3.9. Обе модели позволили с хорошей точностью описать кривую высотного положения МК на участке воздействия морозного пучения. Среднеквадратичная погрешность расчета вертикальных перемещений ( $W$ ) по модели Горковенко-Михайлова составляет 10 мм или 5,8% от максимальных вертикальных перемещений. Аналогичный уровень достоверности обеспечивает предлагаемая модель: среднеквадратичная погрешность составляет 6 мм или 3,6% от максимальных вертикальных

перемещений (таблица 3.6).

На рисунке 3.10 показаны расчетные величины эквивалентных напряжений в стенке трубопровода. Из результатов расчетов видно, что максимальные эквивалентные напряжения приближаются к пределу прочности стали  $R_1^H$  и находятся близко к месту образования трещины. Для обеих моделей погрешность определения точки разгерметизации составила 29 см или 3% от протяженности участка пучения. Таким образом, обе модели позволили с хорошей точностью предсказать место разгерметизации.

Таблица 3.5 - Расчетные и фактические значения вертикальных перемещений магистрального конденсатопровода

Координата X, м	Перемещения, мм			Разница, мм	
	Модель автора ( $w_a$ )	Модель Горковенко- Михайлова, ( $w_{gm}$ )	Измеренные значения, ( $w_m$ )	( $w_a - w_m$ )	( $w_{gm} - w_m$ )
0	-2,3	-2,4	0	-	-
10,788	37,3	39,4	28	9,30	11,40
13,648	89,5	94,7	85	4,50	9,70
16,749	110,1	116,8	113	-2,90	3,80
18,708	87,1	92,2	86	1,10	6,20
20,588	51,9	55,3	46	5,90	9,30
33,992	-1,3	-1,4	0	-	-

Таблица 3.6 - Результаты расчета среднеквадратичной погрешности и параметров силового взаимодействия  $H_{max}$  и  $q_{fh}^{max}$

Модель	$H_{max}$ , м	$q_{fh}^{max}$ , Н/м	Среднеквадратичная погрешность $W$ , мм	Относительная погрешность $W/H_{max} \cdot 100\%$
Горковенко-Михайлова	0,173	$4,57 \cdot 10^5$	10	5,8
Предложенная автором	0,166	$4,32 \cdot 10^5$	6	3,6

Результаты расчетов по обеим моделям сходятся не только между собой, но и с результатами натурных измерений, несмотря на принципиальные различия самих моделей: в модели автора грунты являются упругими телами; в модели А. И. Горковенко мерзлый грунт - абсолютно твердое тело, а талый грунт - идеально жесткопластическое тело. Полученный результат является свидетельством того, что нагрузки на участке пучения достигли величины близкой

к несущей способности основания. Это видно уже из значения максимального усилия при стесненном пучении  $q_{fn}^{\max}$ , которое по модели автора составило 95% от значения по модели А. И. Горковенко (таблица 3.6). Следовательно, предложенная математическая модель достоверно описывает силовое взаимодействие холодного подземного трубопровода с пучинистым грунтом вплоть до нагрузки от морозного пучения, равной несущей способности основания.

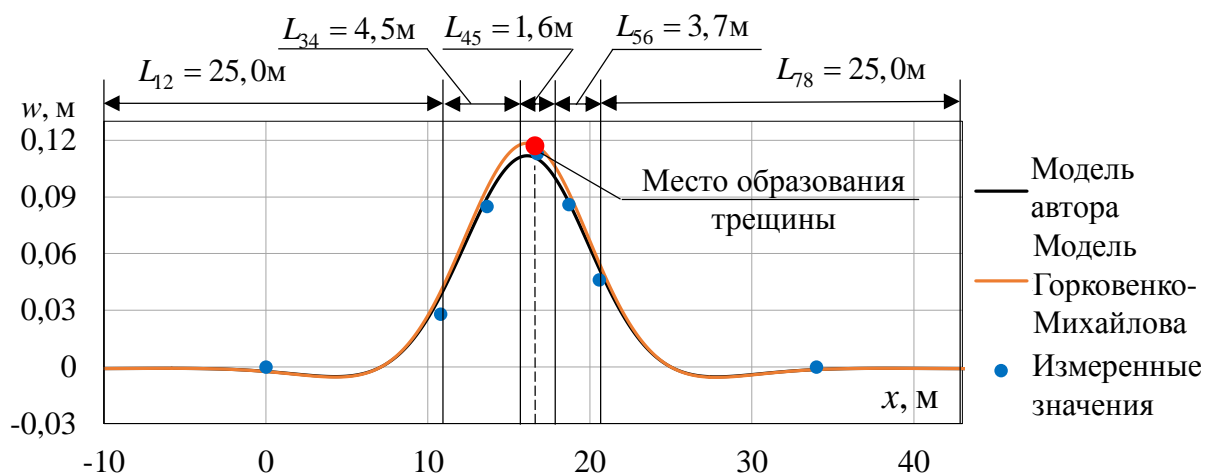


Рисунок 3.9 - Вертикальные перемещения МК

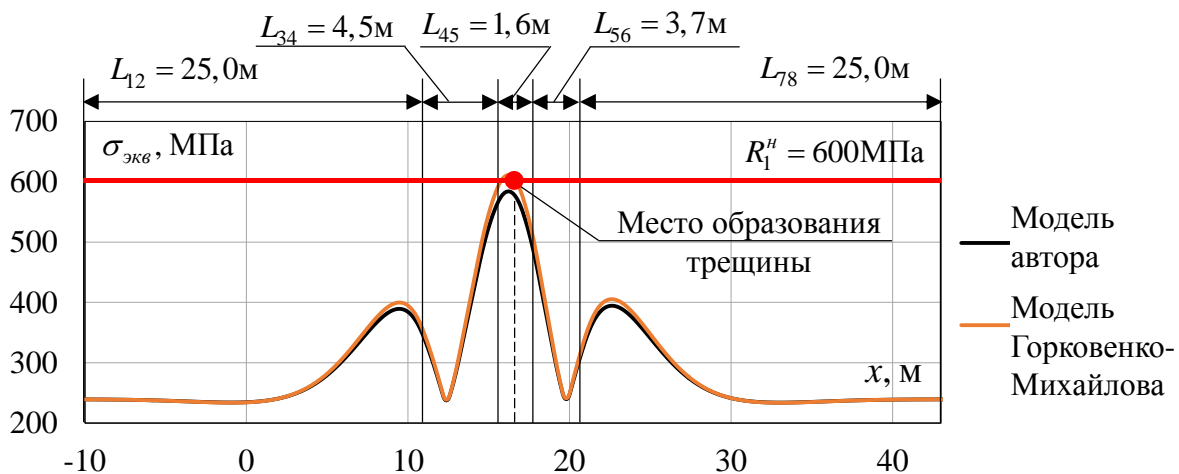


Рисунок 3.10 - Эквивалентные напряжения в стенке МК

Таким образом, обе модели позволяют рассчитывать НДС холодного подземного трубопровода на участке пучинистого грунта с удовлетворительной погрешностью. Однако, предлагаемая модель упруго-деформируемого пучинистого грунта имеет более широкую область применения, по сравнению с моделью Горковенко-Михайлова, и позволяет рассчитывать комбинированную инженерную защиту, состоящую из противопучинистой грунтовой конструкции и

кольцевой теплоизоляции (таблица 1.7).

### 3.5 Исследование НДС трубопровода на участке пучинистого грунта

В параграфе приведены результаты многофакторного исследования НДС холодного подземного трубопровода на участке пучинистого грунта с целью определения участка для устройства инженерной защиты и его протяженности.

По данным С. Н. Чернышева и А. М. Мартынова погрешность интерполяции высотной отметки границы между пучинистым и непучинистым грунтом составляет более 1,2 м при выдерживании расстояния между геологическими скважинами 50 м [93]. Соответствующая погрешность интерполяции границы по латерали лежит в диапазоне от 23 до 45 м при характерных углах выклинивания пластов порядка  $3^\circ - 6^\circ$ . Представленная на рисунке 3.11 схема является типичным примером геологического разреза, когда один из пластов выклинивается: в скважине №1 пучинистый грунт вскрыт при проведении изысканий, а в скважине №2 - не вскрыт.

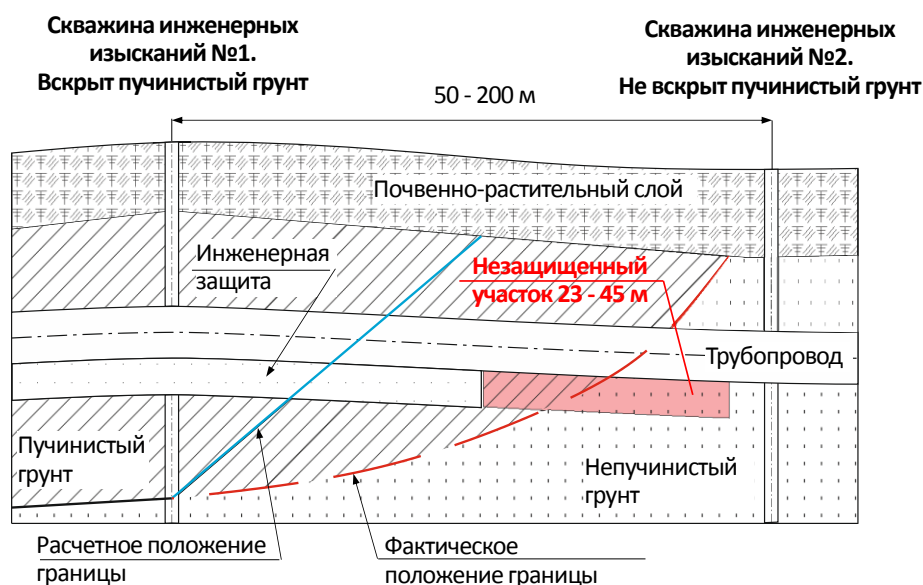


Рисунок 3.11 - Погрешность определения границы инженерной защиты

В случае, когда инженерная защита применяется только в пределах расчетных границ пучинистого грунта, короткий участок длиной от 23 до 45 м может остаться незащищенным от морозного пучения. В диссертационной работе проведено многофакторное численное исследование влияния протяженности

незащищенного от морозного пучения участка на НДС трубопровода. По результатам исследования установлено правило, регламентирующее протяженность участка трубопровода, подлежащего инженерной защите. Численное исследование выполнено в следующей последовательности. Этапы I и II в алгоритме на рисунке 3.3 опускаются, а значения перемещения при свободном пучении  $H_{\max}$  считаются заранее известными. Этап III алгоритма реализован только для расчета  $q_{fh}^{\max}$ . Этап IV алгоритма реализован в полном объеме.

В таблице 3.7 представлен диапазон изменения семи факторов. Выполнено 490 560 численных экспериментов, что соответствует числу комбинаций факторов. Изменялись следующие параметры: наружный диаметр  $D_n$  и толщина стенки  $\delta_{ст}$ ; перепад температуры после замыкания  $\Delta T$ ; модуль деформации грунта основания на участке пучения  $E_{гр}$ ; модуль деформации грунта засыпки на участке заземления  $E_{зас}$ ; толщина теплоизоляции  $\delta_{из}$ ; длина участка пучения  $L_{fh} = L_{45}$ ; перемещение трубопровода при свободном пучении  $H_{\max}$ .

Таблица 3.7 - Диапазон исследования в многофакторном эксперименте

Фактор	Исследованные значения						
$D_n$ , м;	0,530;	0,530;	1,020;	1,020;	1,420;	1,420;	
$\delta_{ст}$ , м;	0,006;	0,012;	0,012;	0,023;	0,015;	0,035;	
$P_{вн}$ , Па	$1,2 \cdot 10^6$	$1,0 \cdot 10^7$	$1,2 \cdot 10^6$	$1,0 \cdot 10^7$	$1,2 \cdot 10^6$	$1,0 \cdot 10^7$	
$\Delta T$ , °C	-30	-20	-10	0	10	20	30
$E_{гр}$ , Па	$4,0 \cdot 10^6$		$1,0 \cdot 10^7$		$2,0 \cdot 10^7$		$4,0 \cdot 10^7$
$E_{зас}$ , Па	$4,0 \cdot 10^6$		$1,0 \cdot 10^7$		$2,0 \cdot 10^7$		$4,0 \cdot 10^7$
$\delta_{из}$ , м	0			0,1			
$H_{\max}$ , м	0,03	0,06	0,15		0,30		0,50
$L_{fh}$ , м	$0,5+0,5n_1, n_1 \in [1; 49]; 26+2n_2, n_2 \in [0; 2]; 33+3n_3, n_3 \in [0; 9];$ $70+10n_4, n_4 \in [0; 8]; 175+25n_5, n_5 \in [0; 1] (73 \text{ значения})$						

В таблице 3.8 приведены параметры, которые оставались неизменными. Упругие свойства стали задавались в соответствии с требованиями нормативной документации [53]. Начальная кривизна принята равной нулю. Толщина слоя талого грунта над мерзлым принята равной нулю, в связи с тем, что расчет ведется по наихудшему случаю. По той же причине участки переменной интенсивности пучения  $L_{34}$  и  $L_{56}$  отсутствовали в расчете. Коэффициенты поперечной деформации



грунтов на участках пучения и защемления приняты 0,35. Однако это значение не принципиально, т.к. конечная формула учитывает возможное изменение коэффициента поперечной деформации по известной из [1] зависимости. Прочностные свойства грунта не изменяются, т.к. переход в зону пластического отпора недопустим по требованиям [63; 64].

Таблица 3.8 - Постоянные величины в численном эксперименте

$E_{ст}, \text{Па}$	$\nu_{ст}$	$\alpha_{ст}, \text{°C}^{-1}$	$\rho_{ст}, \text{кг/м}^3$	$l/R_{нач}, \text{м}^{-1}$	$h_{тал}, \text{м}$	$\nu_{зас}$	$\nu_{осн}$
$2,06 \cdot 10^{11}$	0,3	$1,2 \cdot 10^{-5}$	7850	0	0	0,35	0,35

Результаты расчетов максимального изгибного напряжения в наиболее опасном сечении были аппроксимированы кусочно-непрерывной функцией:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{изг}^{max} = \sigma_{изг}^{cr} \frac{L_{fh}}{L_{cr}} \exp\left(\frac{1}{C} - \frac{1}{C} \left(\frac{L_{fh}}{L_{cr}}\right)^C\right), L_{fh} < L_{cr}; \\ \sigma_{изг}^{max} = \left(\sigma_{изг}^{cr} - \sigma_{изг}^{inf}\right) \frac{L_{fh}}{L_{cr}} \exp\left(\frac{1}{B} - \frac{1}{B} \left(\frac{L_{fh}}{L_{cr}}\right)^B\right) + \sigma_{изг}^{inf}, L_{fh} \geq L_{cr}; \end{array} \right. \quad (3.68)$$

$$C = 0,038 \ln^2(\gamma_1) + 0,360 \ln(\gamma_1) + 1,144; \quad (3.69)$$

$$B = 0,060 \ln^3(\gamma_1) + 0,313 \ln^2(\gamma_1) + 0,809 \ln(\gamma_1) + 2,672; \quad (3.70)$$

$$\sigma_{изг}^{inf} = \frac{D_H E_{st} H_{max}}{2L_{inf}^2} K_{изг}^{inf}; \quad (3.71)$$

$$\begin{aligned} K_{изг}^{inf} = & S_1^{inf} + S_2^{inf} \ln(\alpha_1) + S_3^{inf} \ln(\beta_1) + S_4^{inf} \ln(\gamma_1) + \\ & + S_5^{inf} \ln(\alpha_1) \ln(\beta_1) + S_6^{inf} \ln(\alpha_1) \ln(\gamma_1) + S_7^{inf} \ln(\beta_1) \ln(\gamma_1) + \\ & + S_8^{inf} \ln^2(\beta_1) + S_9^{inf} \ln^2(\gamma_1) + S_{10}^{inf} \sqrt{\alpha_1} + S_{11}^{inf} \sqrt{\beta_1} + S_{12}^{inf} \sqrt{\gamma_1}; \end{aligned} \quad (3.72)$$

$$\sigma_{изг}^{cr} = \frac{D_H E_{st} H_{max}}{2L_{cr}^2} K_{изг}^{cr}; \quad (3.73)$$

$$\begin{aligned} K_{изг}^{cr} = & S_1^{cr} + S_2^{cr} \ln(\alpha_1) + S_3^{cr} \ln(\beta_1) + S_4^{cr} \ln(\gamma_1) + \\ & + S_5^{cr} \ln(\alpha_1) \ln(\beta_1) + S_6^{cr} \ln(\alpha_1) \ln(\gamma_1) + S_7^{cr} \ln(\beta_1) \ln(\gamma_1) + \\ & + S_8^{cr} \ln^2(\beta_1) + S_9^{cr} \ln^2(\gamma_1) + S_{10}^{cr} \sqrt{\alpha_1} + S_{11}^{cr} \sqrt{\beta_1} + S_{12}^{cr} \sqrt{\gamma_1}; \end{aligned} \quad (3.74)$$

$$L_{cr} = l_1 + l_2 \alpha_2 + l_3 \gamma_1^{0,4} + l_4 \alpha_2 \gamma_1^{0,4} + l_5 \alpha_2^2 + l_6 \gamma_1^{0,9}; \quad (3.75)$$

$$\alpha_1 = E_{cr} I_y / (L_{fn}^4 C_z); \quad (3.76)$$

$$\alpha_2 = \sqrt[4]{E_{cr} I_y / C_z}; \quad (3.77)$$

$$\beta_1 = |N_0| / (L_{fn}^2 C_z); \quad (3.78)$$

$$\gamma_1 = 0,41 E_{зас} (1 - \nu_{гр}^2) / E_{гр} (1 - \nu_{зас}^2), \quad (3.79)$$

где  $L_{cr}$  - критическая длина участка морозного пучения, соответствующая экстремальному значению максимальных изгибных напряжений, м;  $\sigma_{изг}^{cr}$  - экстремальное значение максимальных изгибных напряжений, Па;  $\sigma_{изг}^{inf}$  - значение максимальных изгибных напряжений при бесконечной протяженности участка пучения, Па;  $L_{inf} = 200$  м; значения коэффициентов  $S_i^{cr}$ ,  $S_i^{inf}$ ,  $l_i$  приведены в таблице 3.9.

Таблица 3.9 - Значения коэффициентов  $S_i^{cr}$ ,  $S_i^{inf}$ ,  $l_i$

$i$	$S_i^{cr}$		$S_i^{inf}$		$l_i$	
	$N_0 \geq 0$	$N_0 < 0$	$N_0 \geq 0$	$N_0 < 0$	$N_0 \geq 0$	$N_0 < 0$
1	-1,454	-1,116	-2,644	-2,941	-0,116	-0,105
2	-0,489	-0,519	-0,412	-0,543	-0,137	-0,138
3	-0,086	0,035	-0,091	0,032	0,352	0,279
4	-0,466	-0,361	-0,785	-0,753	2,296	2,298
5	0,001	-0,003	0,007	-0,003	0,002	0,003
6	0,004	0,000	0,003	0,000	-0,294	-0,218
7	-0,016	0,003	-0,004	0,002		
8	-0,007	0,003	-0,008	0,003		
10	-0,045	-0,034	-0,077	-0,075		
11	0,006	0,009	-13,056	9,844		
12	0,023	-0,006	0,949	0,925		

Формулы (3.68) - (3.79) аппроксимируют значения изгибного напряжения в наиболее опасном сечении со среднеквадратичным отклонением 1,6% и максимальным отклонением 5,7% для трубопроводов диаметром от 530 до 1420 мм, при давлении от 1,2 до 10 МПа, температурном перепаде от -30 °С до +30 °С, модуле деформации грунтов от 4 до 40 МПа, толщине теплоизоляции от 0 до 100 мм и перемещении при свободном пучении не более 0,5 м.

Соответствующее значение максимального эквивалентного напряжения в наиболее опасном сечении  $\sigma_{\text{ЭКВ}}^{\text{max}}$  рассчитывается по формуле (3.43) с учетом следующего выражения для суммарного продольного напряжения:

$$\sigma_{\text{пр.сум.}} = \sigma_{\text{прод}} \pm \sigma_{\text{изг}}^{\text{max}} \quad (3.80)$$

Далее приведены результаты исследования полученной зависимости с целью определения участка для устройства инженерной защиты. Известно, что наиболее опасные сечения расположены вблизи зоны перехода от пучинистого грунта к непучинистому [16]. Для снижения изгибающих моментов в этой зоне существует два основных метода: 1) снижение защемляющей способности засыпки на участке защемления; 2) уменьшение силового воздействия пучинистого грунта.

Метод 1. Реализация основополагающей идеи этого метода достигается уменьшением модуля деформации непучинистых грунтов засыпки на участках защемления (участки 1 и 7 по расчетной схеме на рисунке 3.2). На рисунке 3.12 приведены результаты расчета изгибных напряжений в наиболее опасных сечениях трубопроводов в зависимости от модуля деформации грунтов засыпки на участке защемления. Модуль деформации грунта на участке пучения принят 10 МПа, перепад температур 30 °С, давление 6,5 МПа, длина участка пучения 50 м, максимальное перемещение при свободном пучении 10 см.

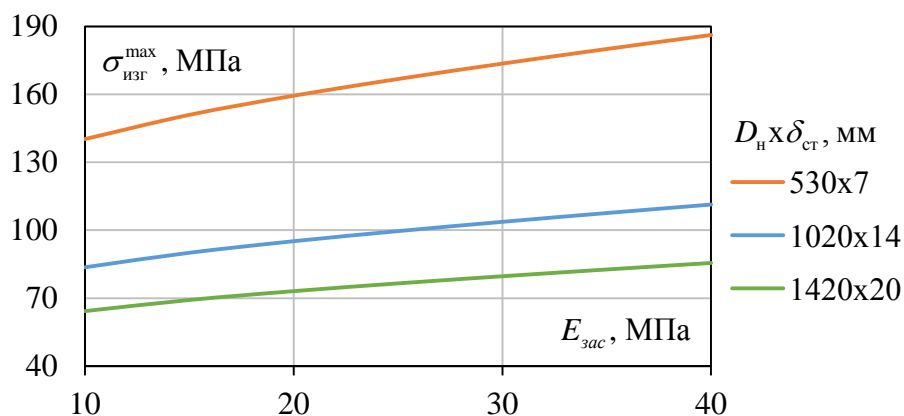


Рисунок 3.12 - Зависимость максимальных изгибных напряжений в наиболее опасных сечениях трубопроводов 530x7 мм, 1020x14 мм и 1420x20 мм от модуля деформации грунта засыпки на участке защемления

Анализ результатов показывает, что уменьшение модуля деформации непучинистых грунтов засыпки на участках защемления приводит к

несущественному снижению напряжений в стенке трубопровода. Так, уменьшение модуля деформации с 40 до 10 МПа (замена крупнозернистого песка на суглинок) приводит к снижению изгибного напряжения только на 25% от начального значения для трубопроводов всех трёх диаметров. Кроме того, снижение заземляющей способности грунтов в инженерно-геологических условиях Западной Сибири, где, наряду с морозным пучением, распространены линейная и овражная эрозии, дефляция и обводнение, увеличивает риски всплытия и аркообразования [2; 41; 51; 85]. Поэтому снижение заземляющей способности засыпки на участках заземления не рекомендуется к применению.

Метод 2. Реализация основополагающей идеи этого метода достигается уменьшением величины вертикальных перемещений трубопровода на участке пучения (участок 4 по расчетной схеме на рисунке 3.2) с помощью теплоизоляции поверхности трубопровода и противопучинистой грунтовой конструкции.

На рисунке 3.13 приведены результаты расчета изгибных напряжений в наиболее опасных сечениях трубопроводов в зависимости от максимальных перемещений при свободном пучении  $H_{\max}$ . Модуль деформации грунта на всех участках принят 10 МПа, перепад температур 30 °С, давление 6,5 МПа, длина участка пучения 50 м. Анализ результатов показывает, что снижение величины максимального перемещения при свободном пучении  $H_{\max}$  вдвое (с 0,2 до 0,1 м) во столько же раз снижает изгибные напряжения, т.к. связь между этими величинами близка к линейной в пределах исследованного диапазона  $H_{\max}$ . Это также говорит о малом вкладе растяжения при изгибе в НДС трубопровода при  $H_{\max} \leq 0,5$  м.

Таким образом, устройство инженерной защиты из кольцевой теплоизоляции и противопучинистой грунтовой конструкции непосредственно на участке морозного пучения позволяет регулировать НДС трубопровода в значительно более широком диапазоне, по сравнению со способом снижения заземляющей способности грунтов засыпки на участке заземления. Детальное описание конструкции инженерной защиты на участке пучинистого грунта рассмотрено в следующей главе.

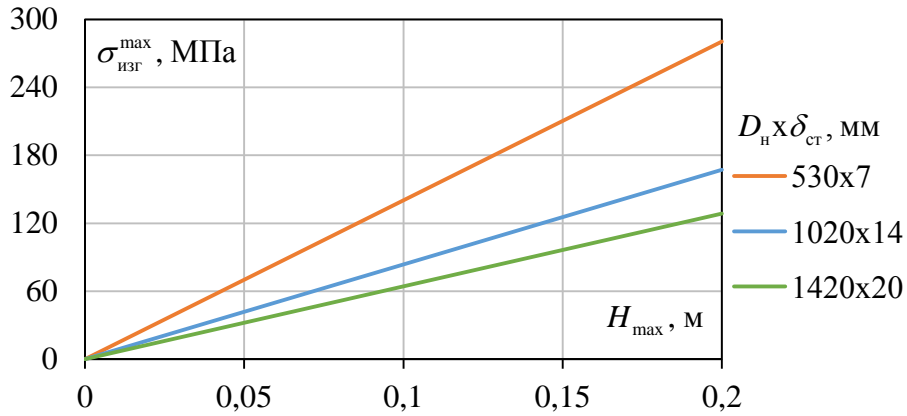


Рисунок 3.13 - Зависимость максимальных изгибных напряжений в наиболее опасных сечениях трубопроводов 530x7 мм, 1020x14 мм и 1420x20 мм от максимальных перемещений при свободном пучении  $H_{\max}$

Далее рассмотрен вопрос о выборе протяженности инженерной защиты. Для этого исследовано влияние протяженности участка морозного пучения на НДС трубопровода. На рисунке 3.14 приведены результаты расчета максимальных изгибных напряжений в наиболее опасных сечениях  $\sigma_{\text{изг}}^{\text{max}}$  для трубопроводов 530x7 мм и 1420x20 мм для различной протяженности участка пучения. Сплошная линия - аппроксимация по формулам (3.68) - (3.79), точки - расчетные значения для следующего случая: внутреннее давление 6,5 МПа, толщина теплоизоляции 0 мм, температурный перепад 30 °С, модуль деформации грунтов 10 МПа, вертикальное перемещение при свободном пучении 10 см.

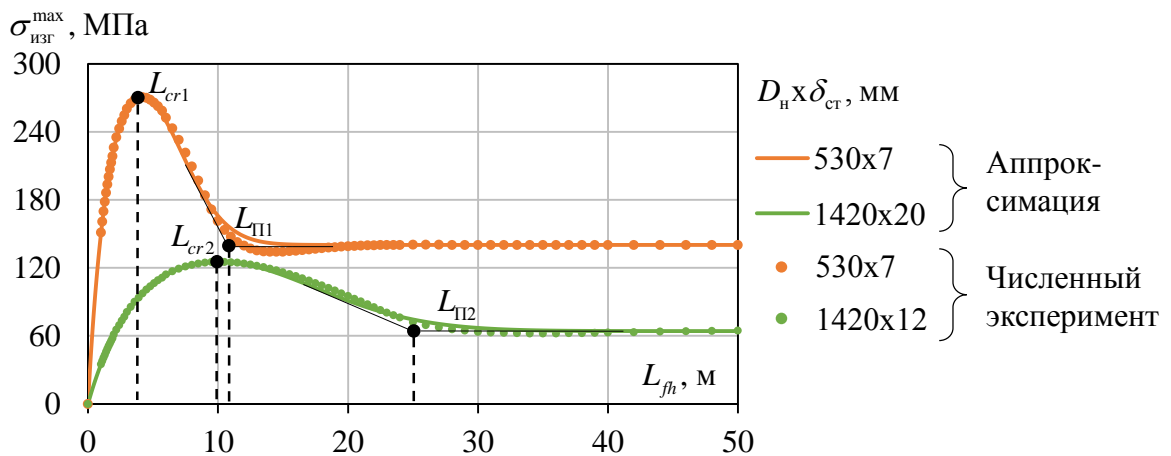


Рисунок 3.14 - Зависимость максимальных изгибных напряжений в наиболее опасных сечениях трубопроводов 530x7 мм и 1420x20 мм от протяженности участка пучения  $L_{fh}$

Зависимости характеризуются экстремумом напряжений при критической

протяженности участка морозного пучения ( $L_{fh} = L_{cr}$ ). При длине участка пучения больше переходной ( $L_{fh} \geq L_{\Pi}$ ) изгибные напряжения уменьшаются в 2 раза по сравнению с критическими. Графики на рисунках 3.15 - 3.16 объясняют это снижение: при  $L_{fh} \geq L_{\Pi}$  высотный профиль трубопровода имеет характерное плато, что приводит к снижению радиуса изгиба трубопровода. Длину участка пучения, при которой образуется плато, можно оценить по формуле:

$$L_{\Pi} \approx 2,35L_{cr} \quad (3.81)$$

Погрешность расчета по формуле (3.81) не превышает 2 м в пределах исследованного диапазона (таблица 3.7). Для трубопроводов 530x7 мм и 1420x20 мм длина участка пучения, при которой образуется плато, равна 10,5 м и 24,0 м, соответственно.

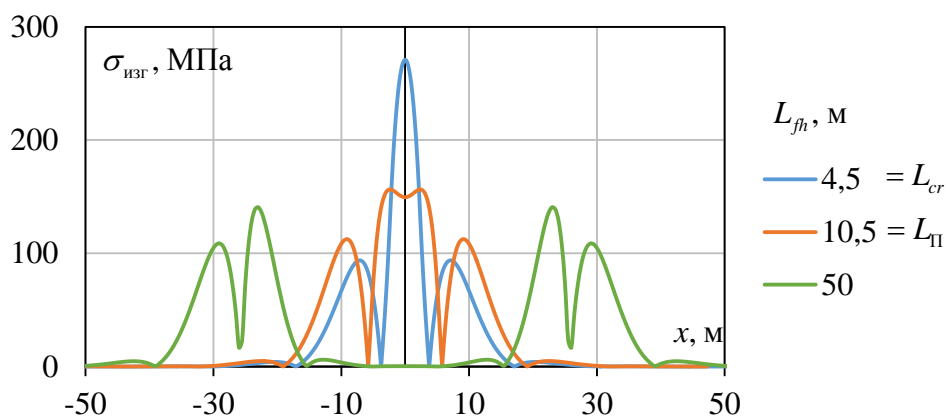


Рисунок 3.15 - Зависимость изгибных напряжений в стенке трубопровода 530x7 мм от координаты  $x$  при длинах участка пучения 4,5; 10,5 и 50 м

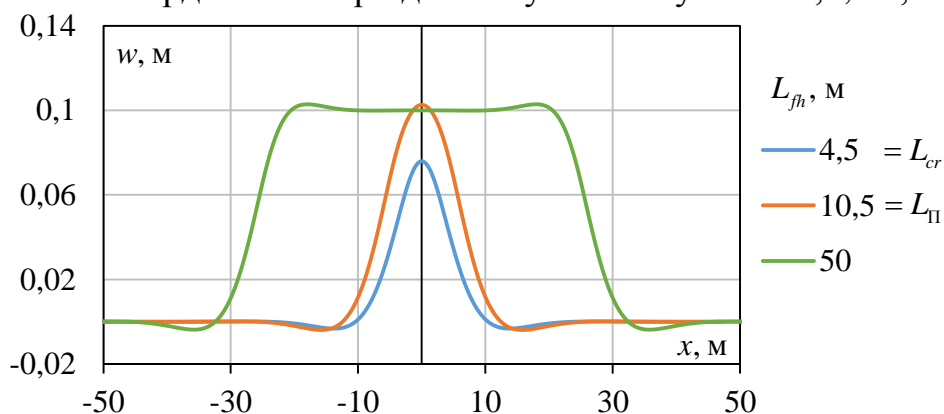


Рисунок 3.16 - Зависимость вертикальных перемещений трубопровода 530x7 мм от координаты  $x$  при длинах участка пучения 4,5; 10,5 и 50 м

В пределах исследованного диапазона характеристик трубопроводов

(диаметр от 530 до 1420 мм, давление от 1,2 до 10 МПа, модуль деформации грунтов от 4 до 40 МПа, толщина теплоизоляции от 0 до 100 мм, перепад температур от -30 °С до +30 °С) критическая протяженность участка пучения  $L_{cr}$  принимает значения от 1,5 до 21 м, т.е. принадлежит интервалу погрешности интерполяции границы между пучинистым и непучинистым грунтом по латерали. Отношение экстремального значения изгибного напряжения к изгибному напряжению при бесконечной протяженности участка пучения  $\sigma_{изг}^{cr}/\sigma_{изг}^{inf}$  лежит в диапазоне от 1,5 до 2, т.е. изгибное напряжение при критической длине участка пучения (локальное морозное пучение протяженностью от 1,5 до 21 м) существенно выше, чем на участке с образованием плато (протяженностью более 50 м).

Таким образом, протяженность применяемой инженерной защиты, выбранная без учета погрешности интерполяции границ между геологическими элементами основания (погрешность составляет от 23 до 45 м), приводит к увеличению изгибных напряжений в 1,5 - 2 раза по сравнению со случаем прокладки трубопровода без применения инженерной защиты. Для исключения влияния ошибки интерполяции границ между инженерно-геологическими элементами на надежность трубопроводной системы в диссертационной работе предлагается правило, регламентирующее обоснование протяженности участка трубопровода, подлежащего инженерной защите (рисунок 3.17): инженерная защита холодного подземного трубопровода на участке пучинистого грунта должна на всём протяжении перекрывать участок от геологической скважины, вскрывшей пучинистый грунт (скв. №1), до скважины, его не вскрывшей (скв. №2).

При соблюдении предложенного правила будет полностью исключены эксплуатационные риски появления аварийно-опасных коротких участков морозного пучения длиной от 1,5 до 21 м, связанных с погрешностью построения границ между геологическими элементами, что повысит надежность газотранспортной системы в целом.

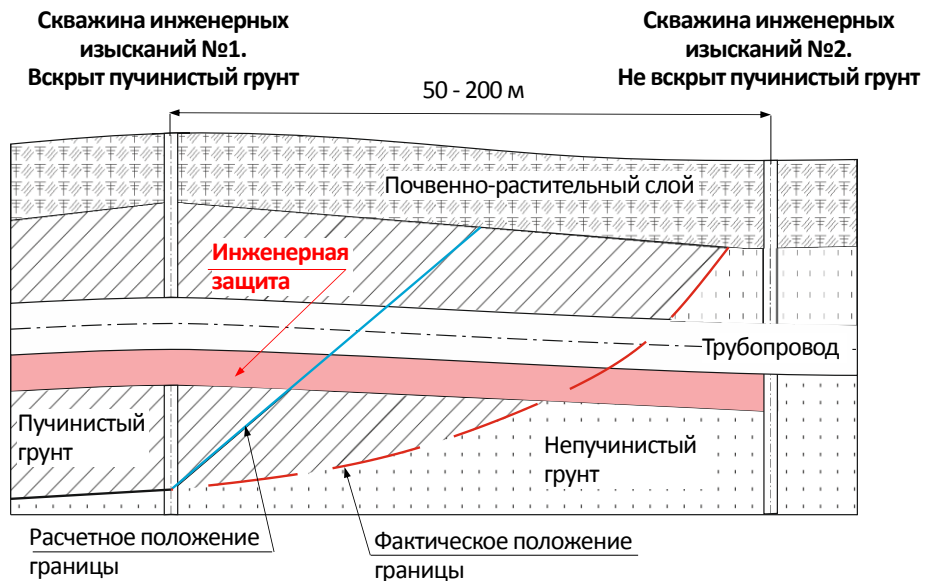


Рисунок 3.17 - Правило определения протяженности инженерной защиты

Кроме того, полученные результаты могут использоваться проектирующими организациями для обоснования необходимости уточнения границ между геологическими элементами с помощью геофизических методов.

Следует отметить, что в подобных условиях особую значимость приобретает необходимость геотехнического мониторинга объектов трубопроводного транспорта после ввода в эксплуатацию, о чем свидетельствуют также работы [6; 35; 70].

### Выводы по главе 3

1. Предложена метаматематическая модель упруго-деформируемого пучинистого грунта для расчета параметров силового взаимодействия трубопровода с пучинистым грунтом. Модель позволяет учитывать неоднородность пространственного распределения морозного пучения по объему грунта и влияние комбинированной инженерной защиты в виде противопучинистой грунтовой конструкции и кольцевой теплоизоляции, что исключительно важно для расчетного обоснования проектных решений.

2. Предложенная математическая модель прошла апробацию при исследовании аварийного случая на линейности части МК диаметром 530x7,1 мм. Модель позволила с хорошей точностью описать кривую высотного положения



МК на участке воздействия морозного пучения при нагрузках, равных 95% несущей способности основания: среднеквадратичная погрешность расчета вертикальных перемещений составила 6 мм или 3,6% от максимальных вертикальных перемещений; местоположение точки разгерметизации внутренней полости определено с погрешностью 29 см, равной 3% от протяженности участка пучения. Следовательно, математическая модель достоверно описывает силовое взаимодействие холодного подземного трубопровода с пучинистым грунтом вплоть до нагрузки от морозного пучения, равной несущей способности основания.

3. Уменьшение заземляющей способности засыпки из непучинистых грунтов на участках заземления несущественно влияет на напряжения в трубопроводе, увеличивает риски всплытия и аркообразования и потому не может быть рекомендовано для инженерно-геологических условий Западной Сибири в качестве способа инженерной защиты.

4. Уменьшение силового воздействия пучинистого грунта на трубопровод с помощью кольцевой теплоизоляции и противопучинистой грунтовой конструкции непосредственно на участке морозного пучения позволяет существенно снизить напряжения в стенке трубопровода.

5. Максимальное напряжение в трубопроводе существенно зависит от длины участка пучения и при критической длине участка пучения (от 1,5 до 21 м) в 1,5 - 2 раза выше, чем на участке с образованием плато (более 50 м). Поскольку определение границ участка пучения с точностью до 1,5 м при отборе грунта из геологических скважин с шагом от 50 до 200 м практически невозможно, подземная прокладка трубопровода должна выполняться с учетом следующего правила: инженерная защита холодного подземного трубопровода на участке пучинистого грунта должна полностью перекрывать участок от геологической скважины, вскрывшей пучинистый грунт, до скважины, его не вскрывшей, на всём протяжении.

## ГЛАВА 4. РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБОВ ИНЖЕНЕРНОЙ ЗАЩИТЫ ПОДЗЕМНОГО ТРУБОПРОВОДА ОТ МОРОЗНОГО ПУЧЕНИЯ ГРУНТА

### 4.1 Разработка расчетных схем теплосилового взаимодействия подземного трубопровода с пучинистым грунтом с учетом комбинированной инженерной защиты

В четвертой главе представлены результаты численных исследований комбинированной инженерной защиты на основе кольцевой теплоизоляции и противопучинистой грунтовой конструкции. Разработана методика расчетного обоснования конструктивных решений по обеспечению стабильности проектного положения магистрального трубопровода в условиях пучинистых грунтов.

Обязательным этапом проектирования инженерной защиты на участке пучинистого грунта является проверка НДС трубопровода. Инженерная защита должна обеспечивать снижение напряжений в стенке до нормативных значений. В данном параграфе будут описаны тепловые и силовые расчетные схемы, учитывающие влияние применяемой инженерной защиты.

В предыдущих параграфах было обосновано применение инженерной защиты от морозного пучения, состоящей из кольцевой теплоизоляции поверхности трубопровода и противопучинистой грунтовой конструкции. В соответствии с алгоритмом на рисунке 3.3, эти способы инженерной защиты должны быть учтены в расчетных схемах на этапе II (расчет пространственного распределения объемных деформаций грунта от морозного пучения вокруг подземного трубопровода) и этапе III (расчет параметров силового взаимодействия подземного трубопровода с пучинистым грунтом  $H_{\max}$  и  $q_{fh}^{\max}$ ).

Расчетные схемы для трубопровода с инженерной защитой способом «кольцевая теплоизоляция» приведены на рисунках 3.5 и 3.1. Для комбинированной инженерной защиты, состоящей из кольцевой теплоизоляции и противопучинистой грунтовой конструкции, расчётные схемы приведены на рисунках 4.1 и 4.2. Граничные условия совпадают с описанными ранее на рисунках 3.5 и 3.1.

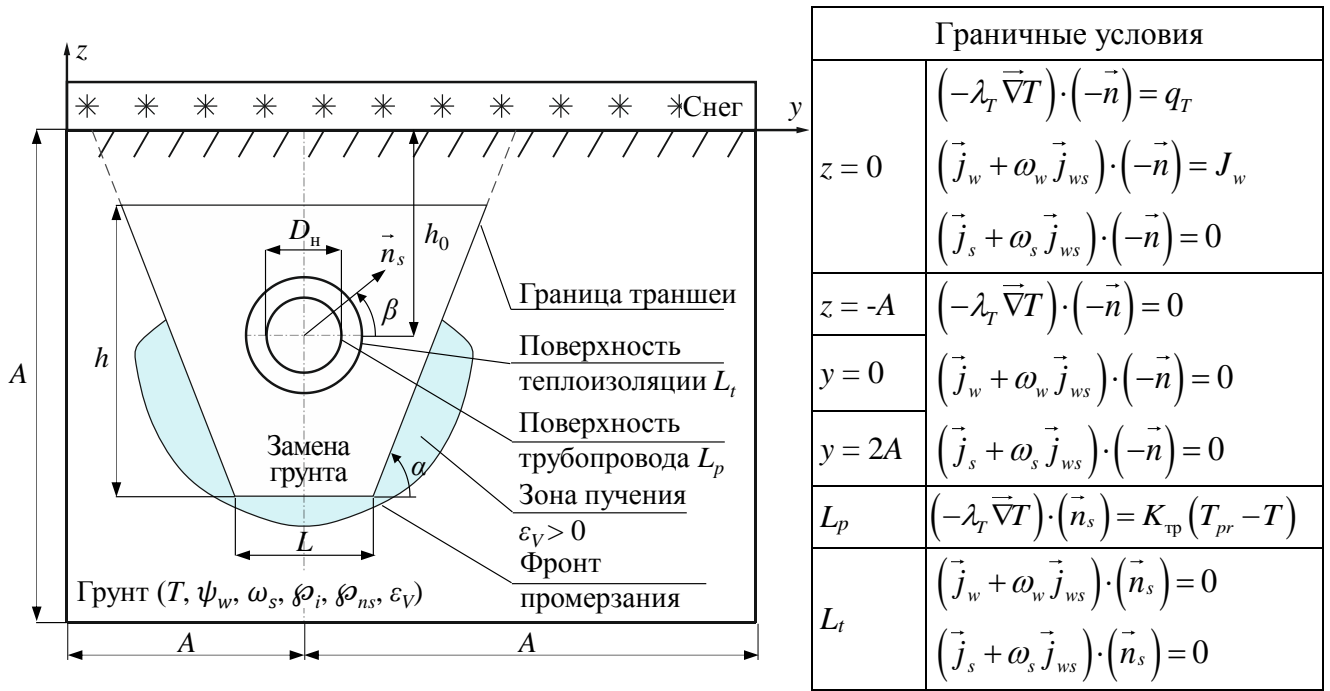


Рисунок 4.1 - Расчетная схема для определения пространственного распределения объемных деформаций грунта от морозного пучения вокруг подземного трубопровода с комбинированной инженерной защитой (этап II)

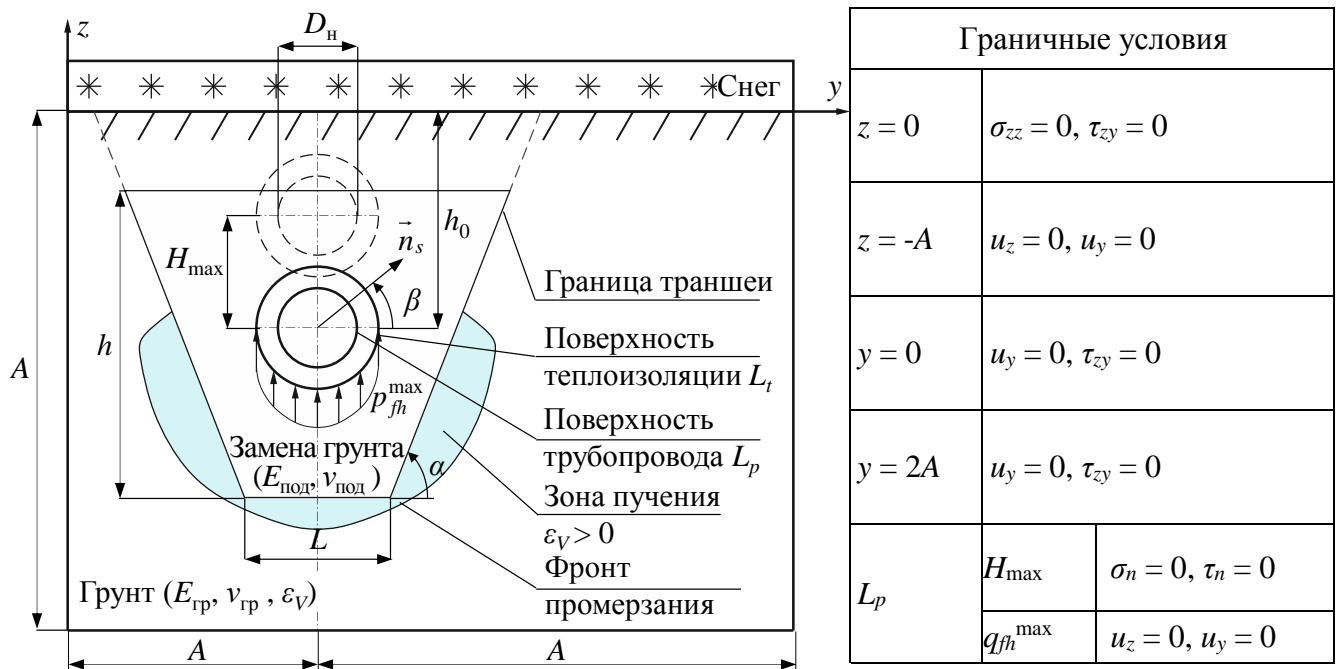


Рисунок 4.2 - Расчетная схема для определения параметров силового взаимодействия подземного трубопровода с пучинистым грунтом (\$H\_{max}\$ и \$q\_{fh}^{max}\$) при наличии комбинированной инженерной защиты (этап III)

Наполнитель грунтовой конструкции (крупно- или среднезернистый строительный песок) моделировался как упруго-деформируемое водонасыщенное водонепроницаемое тело в связи с расположением ниже уровня грунтовых вод,

низкой влагопроводностью при отрицательной температуре и малым коэффициентом фильтрации окружающих пылевато-глинистых грунтов. Объемные деформации морозного пучения в таком теле связаны только с замерзанием изначально содержащейся в нём воды:

$$\varepsilon_{V,под} = \left(1 - \frac{\rho_{sk}}{\rho_w}\right) \left(\frac{\rho_w}{\rho_i} - 1\right) \text{ при } T < T_{нз}. \quad (4.1)$$

где  $\varepsilon_{V,под}$  - объемная деформация морозного пучения грунта подушки при замерзании.

Таким образом, в данном параграфе автором разработаны расчетные схемы теплосилового взаимодействия холодного подземного трубопровода с пучинистым грунтом с учетом комбинированной инженерной защиты.

#### **4.2 Область применения кольцевой теплоизоляции поверхности трубопровода для защиты от морозного пучения**

Параграф посвящен определению границ применимости инженерной защиты от морозного пучения способом теплоизоляции поверхности трубопровода (тепловой пассивный принцип инженерной защиты).

Кольцевая теплоизоляция поверхности трубопровода с отрицательной температурой продукта является одним из наиболее дешёвых и широко распространённых способов инженерной защиты от морозного пучения. Теплоизоляция повышает температуру грунта и уменьшает размер области пучения. В современном строительстве используются изделия на основе газонаполненных пластмасс с теплопроводностью около 0,03 Вт/(м·°С): экструзионный пенополистирол (ЭППС) и пенополиуретан (ППУ). Такая теплоизоляция обладает структурной прочностью достаточной, чтобы выдержать давление от морозного пучения (от 0,5 до 1 МПа). Теплоизоляцию покрывают защитной оболочкой, состоящей из оцинкованной стали, полиэтилена или их комбинации. Оболочка защищает теплоизоляцию от механических повреждений и проникновения воды и пара к холодной поверхности трубы. Срок службы такой

теплоизоляции составляет около 35 лет.

В работе исследовалось применение теплоизоляции для защиты от морозного пучения подземного магистрального трубопровода с отрицательной температурой продукта. Расчет выполнен в соответствии с алгоритмом на рисунке 3.3. На этапе I использована расчетная схема на рисунке 3.4 для определения начального распределения температуры и воды в грунте. Начальные условия соответствовали талому полностью водонасыщенному незасоленному грунту в состоянии близком к фазовому переходу:  $T_{гр} = 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$ ,  $\rho_w = \rho_w^{max}$ ,  $\rho_i = 0 \text{ кг/м}^3$ ,  $\rho_{ns} = 0 \text{ кг/м}^3$ ,  $\omega_s = 0 \text{ д.ед.}$  Параметры грунта соответствуют чрезмернопучинистому суглинку (таблицы 2.1 и 2.3). Климатические условия соответствуют таблицам 1.3, 1.4, 3.1. На этапе II использована расчетная схема на рисунке 3.5 с целью определения пространственного распределения объемных деформаций пучения грунта  $\varepsilon_V$  вокруг подземного трубопровода. На этапе III использована расчетная схема на рисунке 3.1 с целью определения параметров силового взаимодействия подземного трубопровода с пучинистым грунтом ( $H_{max}$  и  $q_{fh}^{max}$ ). На этапе IV для расчета НДС трубопровода использована схема на рисунке 3.2.

Исследование выполнено для трубопроводов 530x7 мм, 1020x14 мм и 1420x20 мм. Прочие характеристики трубопроводов приведены в таблице 4.1. Деформационные характеристики грунтов, принятые в расчетах, приведены в таблице 4.2. Характеристики теплоизоляции соответствуют ППУ и приведены в таблице 4.3. Толщина теплоизоляции для диаметров 530, 1020 и 1420 мм составляет 80, 100 и 100 мм, соответственно (максимальная толщина доступная на рынке). Коэффициент надежности по ответственности  $k_n$  равен 1,1, 1,1 и 1,21, соответственно, при внутреннем давлении 6,5 МПа. Длина участка пучинистого грунта была принята  $L_{fh} = L_{45} = 8 \text{ м}$ . Расчеты выполнены на 15 лет эксплуатации трубопровода.

В таблицах 4.1 - 4.3 использованы следующие условные обозначения:  $h_{up}$  - расстояние от поверхности земли до верхней образующей трубопровода, м;  $\rho_{ппу}$  - плотность ППУ, кг/м<sup>3</sup>;  $c_{ппу}$  - изобарная теплоемкость ППУ, Дж/(кг·°C);

$\lambda_{\text{ппу}}$  - теплопроводность ППУ, Вт/(м·°C);  $E_{\text{ппу}}$  - модуль деформации ППУ, Па;  
 $\nu_{\text{ппу}}$  - коэффициент поперечной деформации ППУ.

На рисунке 4.3 представлено характерное распределение объемных деформаций морозного пучения грунта вокруг трубопровода диаметром 530 мм.

Таблица 4.1 - Эксплуатационные характеристики трубопроводов

$E_{\text{ст}}$ , Па	$\nu_{\text{ст}}$	$\alpha_{\text{ст}}$ , °C <sup>-1</sup>	$\rho_{\text{ст}}$ , кг/м <sup>3</sup>	$\Delta T$ , °C	$P_{\text{вн}}$ , Па
$2,06 \cdot 10^{11}$	0,3	$1,2 \cdot 10^{-5}$	7850	30	$6,5 \cdot 10^6$
$\rho_{\text{прод}}$ , кг/м <sup>3</sup>	$h_{\text{ур}}$ , м	$m$	$k_2$	$R_2^{\text{H}}$ , Па	
750	1,2	0,99	1,15	$4,75 \cdot 10^8$	

Таблица 4.2 - Деформационные свойства грунтов

Участок пучения		Участок защемления	
$E_{\text{гр}}$ , Па	$\nu_{\text{гр}}$	$E_{\text{зас}}$ , Па	$\nu_{\text{зас}}$
$1,0 \cdot 10^7$	0,35	$1,0 \cdot 10^7$	0,35

Таблица 4.3 - Характеристики ППУ

$\rho_{\text{ппу}}$ , кг/м <sup>3</sup>	$c_{\text{ппу}}$ , Дж/(кг·°C)	$\lambda_{\text{ппу}}$ , Вт/(м·°C)	$E_{\text{ппу}}$ , Па	$\nu_{\text{ппу}}$
42	1110	0,03	$1,5 \cdot 10^7$	0

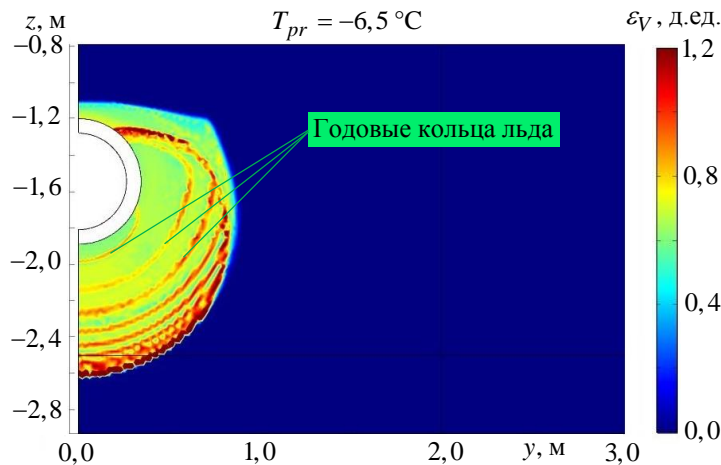


Рисунок 4.3 - Распределение объемных деформаций грунта от морозного пучения

Следует отметить особенность накопления льда в зоне морозного пучения - отмечаются полосы повышенного содержания льда, которые автор назвал годовыми кольцами льда. Эти кольца являются свидетельством интенсивного шпирового льдовыделения и формируются в летнее время вследствие снижения скорости промерзания [65]. По мере удаления от поверхности трубопровода кольца

располагаются друг к другу все ближе и через 10 лет практически сливаются в одно кольцо, что свидетельствует о приближении температурного режима грунта к стационарному значению.

На рисунках 4.4 - 4.5 представлены результаты расчета максимальных вертикальных перемещений от морозного пучения теплоизолированных и не теплоизолированных трубопроводов в условиях чрезмернопучинистого суглинка. Из результатов расчетов видно, что теплоизоляция позволяет существенно уменьшить величину вертикальных перемещений трубопровода.

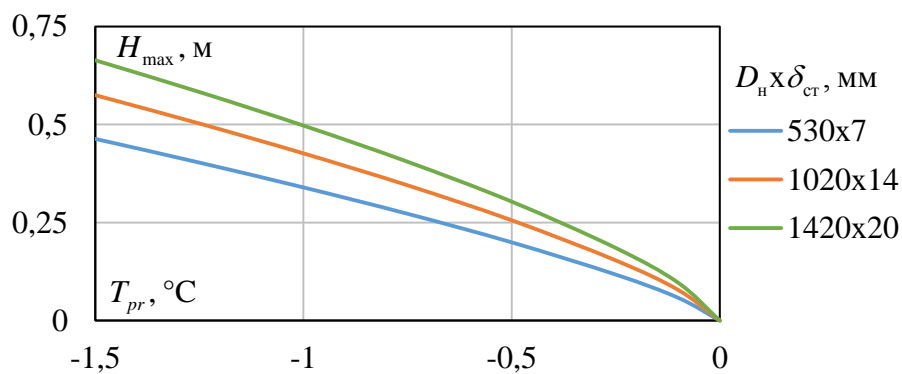


Рисунок 4.4 - Зависимость максимальных вертикальных перемещений не теплоизолированных трубопроводов в условиях чрезмернопучинистого суглинка

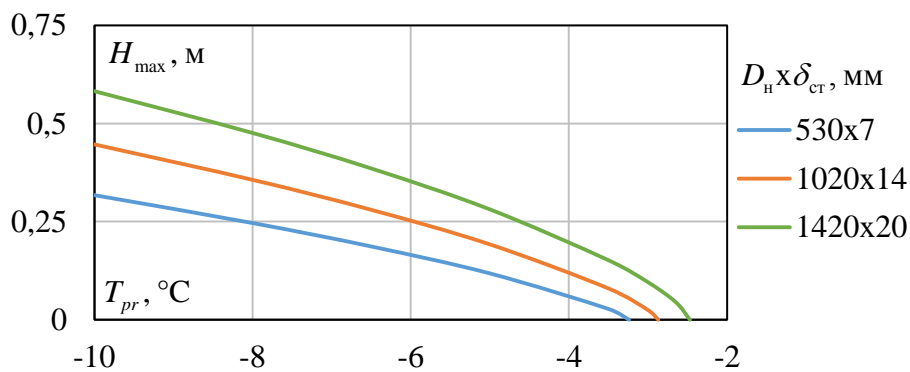


Рисунок 4.5 - Зависимость максимальных вертикальных перемещений теплоизолированных трубопроводов в условиях чрезмернопучинистого суглинка

Область применения теплоизоляции оценивается по напряженно-деформированному состоянию подземного трубопровода, которое приведено на рисунках 4.6 - 4.8 ( $R_{ins}$  – линейное термическое сопротивление кольцевой теплоизоляции из ППУ,  $м \cdot °C/Вт$ ). Анализ результатов показывает, что кольцевая теплоизоляция обеспечивает проектное положение трубопроводов диаметром 530 мм при температуре от 0 °C до -4,5 °C, диаметром 1020 мм - от 0 °C до -3,9 °C,

диаметром 1420 мм - от 0 °С до -3,4 °С в условиях чрезмернопучинистого суглинка. Указанные диапазоны температур существенно ниже допустимых температур без теплоизоляции. При более низкой температуре перекачиваемого продукта кольцевая теплоизоляция не обеспечивает нормативный уровень НДС и проектное положение трубопровода. В этом случае необходимо применение комбинированной инженерной защиты, которая описана в следующем параграфе.

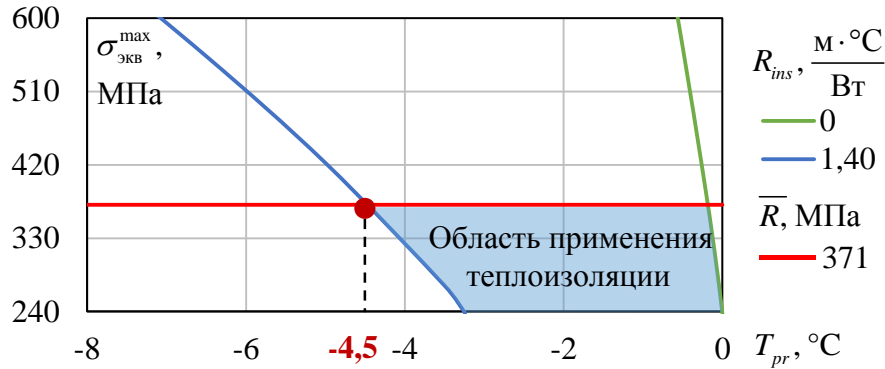


Рисунок 4.6 - Область применения кольцевой теплоизоляции для защиты от морозного пучения трубопровода диаметром 530x7 мм

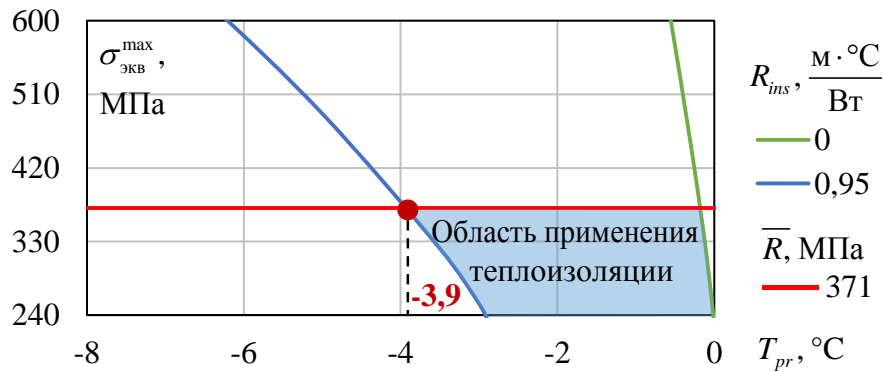


Рисунок 4.7 - Область применения кольцевой теплоизоляции для защиты от морозного пучения трубопровода диаметром 1020x14 мм

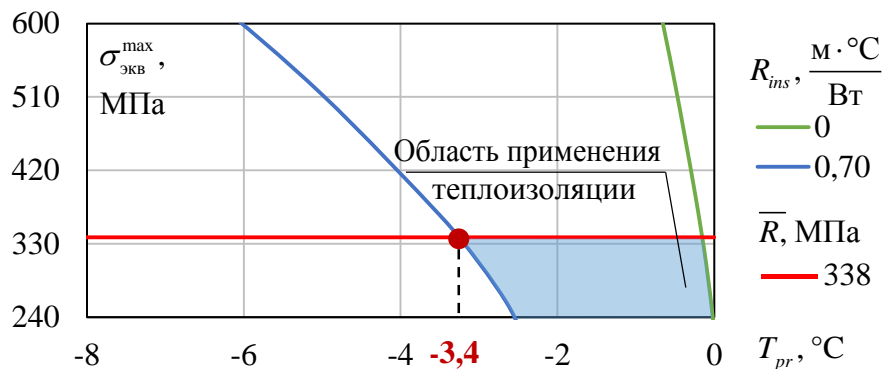


Рисунок 4.8 - Область применения кольцевой теплоизоляции для защиты от морозного пучения трубопровода диаметром 1420x20 мм



Таким образом, в текущем параграфе установлено, что при температуре перекачиваемого по трубопроводу продукта ниже  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  в условиях чрезмернопучинистых грунтов требуется применение комбинированной инженерной защиты.

#### **4.3 Область применения комбинированной инженерной защиты**

В параграфе приведены результаты исследования области применения комбинированной инженерной защиты: противопучинистой грунтовой конструкции совместно с кольцевой теплоизоляцией трубопровода. Разработан алгоритм оптимизации геометрических размеров противопучинистой грунтовой конструкции для минимизации объема замены грунта.

В инженерной практике в случае невозможности обеспечения НДС трубопровода с помощью кольцевой теплоизоляции грунт траншеи заменяется на крупно- или среднезернистый строительный песок до глубины промерзания. Однако это техническое решение остается необоснованным с позиции силового взаимодействия трубопровода с пучинистым грунтом основания и замененным грунтом. Далее будет показана возможность обеспечения нормативного НДС трубопровода и стабильности его проектного положения при меньшей глубине замены грунта.

К геометрическим размерам противопучинистой грунтовой конструкции относятся: ширина траншеи по дну  $L$ , толщина  $h$  и угол откоса  $\alpha$ , равный углу откоса траншеи при её разработке (рисунок 1.7). Совершенно очевидно, что существует бесконечное множество вариантов геометрических размеров противопучинистой грунтовой конструкции, которые обеспечивают нормативный уровень НДС трубопровода. Однако на практике важен лишь один вариант, обеспечивающий минимальный объем замены грунта. Поэтому задача расчета противопучинистой грунтовой конструкции сводится к оптимизационной задаче (4.2) с целевой функцией  $S$  (площадь поперечного сечения грунтовой конструкции,  $\text{м}^2$ ) и ограничениями на максимальное эквивалентное напряжение

(ограничение №1), минимальную ширину траншеи по дну (ограничение №2) и минимальную толщину грунтовой конструкции (ограничение №3):

$$\begin{cases} S \rightarrow \min; \\ \sigma_{\text{экв}}^{\max}(S, k) \leq \bar{R}; \text{ - ограничение №1} \\ L \geq L_{\min}; \text{ - ограничение №2} \\ h \geq h_{\min}; \text{ - ограничение №3} \end{cases} \quad (4.2)$$

$$k = \ln\left(\frac{h}{L + h \operatorname{ctg}(\alpha)}\right); \quad (4.3)$$

$$S = Lh + h^2 \operatorname{ctg}(\alpha). \quad (4.4)$$

где  $k$  - логарифмическое отношение толщины к средней ширине противоположной грунтовой конструкции;  $L_{\min}$  - минимальная ширина траншеи по дну ( $L_{\min} = D_{\text{н}} + 0,3$  при  $D_{\text{н}} < 0,7$  м;  $L_{\min} = 1,5D_{\text{н}}$  при  $D_{\text{н}} \geq 0,7$  м), м;  $h_{\min} = D_{\text{н}} + 0,4$  - минимальная толщина грунтовой конструкции, м.

Для решения оптимизационной задачи (4.2) разработан алгоритм, основанный на методах градиентного спуска и дихотомии (рисунок 4.9). В алгоритме используется допущение об унимодальности целевой функции, что будет доказано далее. Точкой начального приближения является минимально возможная площадь поперечного сечения грунтовой конструкции  $S_{\min}$  и соответствующее логарифмическое отношение толщины к средней ширине  $k_{\min}$ :

$$S_{\min} = h_{\min} L_{\min} + h_{\min}^2 \operatorname{ctg}(\alpha); \quad (4.5)$$

$$k_{\min} = -\ln(L_{\min} / h_{\min} + \operatorname{ctg}(\alpha)). \quad (4.6)$$

Из точки начального приближения при фиксированном значении  $k_2 = k_{\min}$  методом градиентного спуска рассчитывается площадь сечения подушки  $S_i$ , обеспечивающая нормативный НДС трубопровода. Параметр  $i$ , в соответствии с методом дихотомии, изменяется в диапазоне от 1 до 3. Среди трёх значений  $S_1$ ,  $S_2$  и  $S_3$  выбирается  $S_j$ , имеющее наименьшее значение. Для полученных значений  $S_j$  и  $k_j$  выполняется расчет толщины противоположной грунтовой конструкции и ширины траншеи по дну по следующим формулам:

$$h_j = \sqrt{S_j / \exp(-k_j)}; \quad (4.7)$$

$$L_j = \sqrt{S_j (\exp(-k_j) - \operatorname{ctg}(\alpha))^2 / \exp(-k_j)}. \quad (4.8)$$

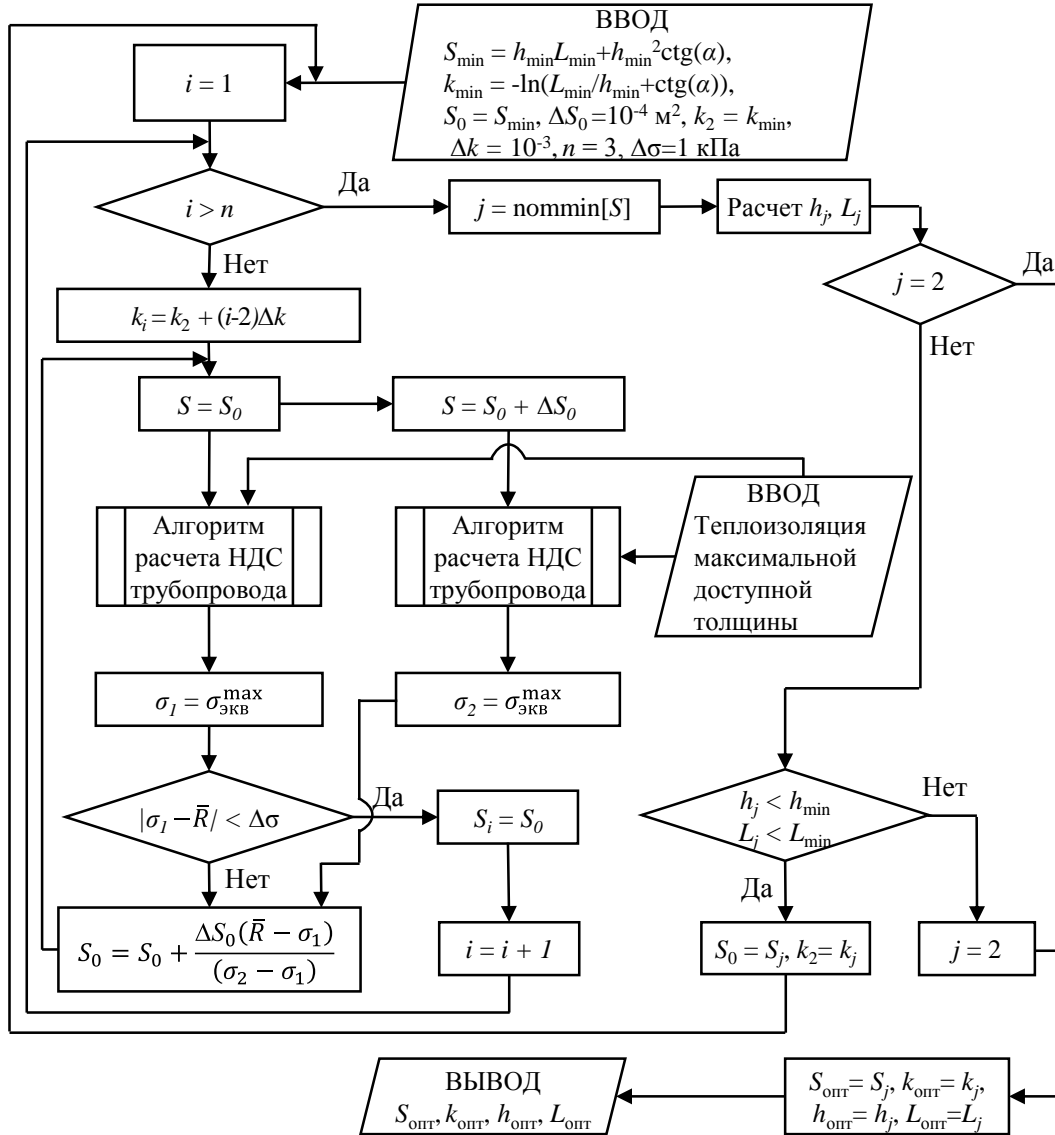


Рисунок 4.9 - Алгоритм решения задачи оптимизации геометрических размеров поперечного сечения противопучинистой грунтовой конструкции

В случае, если  $j = 2$ , оптимальная площадь равна:  $S_{\text{опт}} = S_2$ . В противном случае выполняется проверка ограничений №2 и №3. Если хотя бы одно из ограничивающих условий не выполняется, то оптимальное значение площади  $S_{\text{опт}} = S_2$ . В противном случае точка  $S_0 = S_j, k_2 = k_j$  является точкой нового начального приближения и процесс итераций повторяется. Результатом решения оптимизационной задачи является оптимальная ширина траншеи по дну  $L_{\text{опт}}$ ,

оптимальная толщина противопучинистой грунтовой конструкции  $h_{\text{опт}}$ , оптимальное логарифмическое отношение толщины к средней ширине конструкции  $k_{\text{опт}}$  и оптимальная площадь поперечного сечения конструкции  $S_{\text{опт}}$ .

Решение оптимизационной задачи было выполнено для трубопроводов 530x7 мм и 1420x20 мм. Характеристики чрезмернопучинистого грунта и прочие условия совпадают с приведенными в предыдущем параграфе. Температура продукта варьировалась в пределах от -5 °С до -8 °С. Грунтовая подушка моделировалась как упруго-деформируемое водонасыщенное водонепроницаемое тело, расширяющееся при замерзании только за счет изначально содержащейся в нём воды. Характеристики грунта подушки (кроме модуля деформации) приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 - Характеристики грунта подушки

$\nu_{\text{под}}$	$\rho_{sk}, \text{ кг/м}^3$	$\rho_{sk}, \text{ кг/м}^3$	$\varepsilon_{V, \text{под}}, \text{ Д. ед.}$
0,35	1450	2700	0,042

Модули деформации грунтовой подушки  $E_{\text{под}}$  и грунта основания  $E_{\text{гр}}$  являются исследуемыми параметрами. Расчетные схемы для определения пространственного распределения объемных деформаций грунта от морозного пучения (этап II) и параметров силового взаимодействия трубопровода с пучинистым грунтом (этап III) представлены на рисунках 4.1 и 4.2.

На рисунке 4.10 представлены результаты расчета эквивалентных напряжений в стенке трубопровода 530x7 мм в зависимости от площади и логарифмического отношения сторон противопучинистой грунтовой конструкции при модуле деформации грунта основания 4 МПа, модуле деформации грунта подушки 40 МПа, температуре продукта -6,5 °С и тангенсе угла откосов траншеи 1:0,25. Из результатов расчета видно, что зависимость площади от соотношения сторон имеет единственный минимум. Таким образом, допущение об унимодальности целевой функции является корректным.

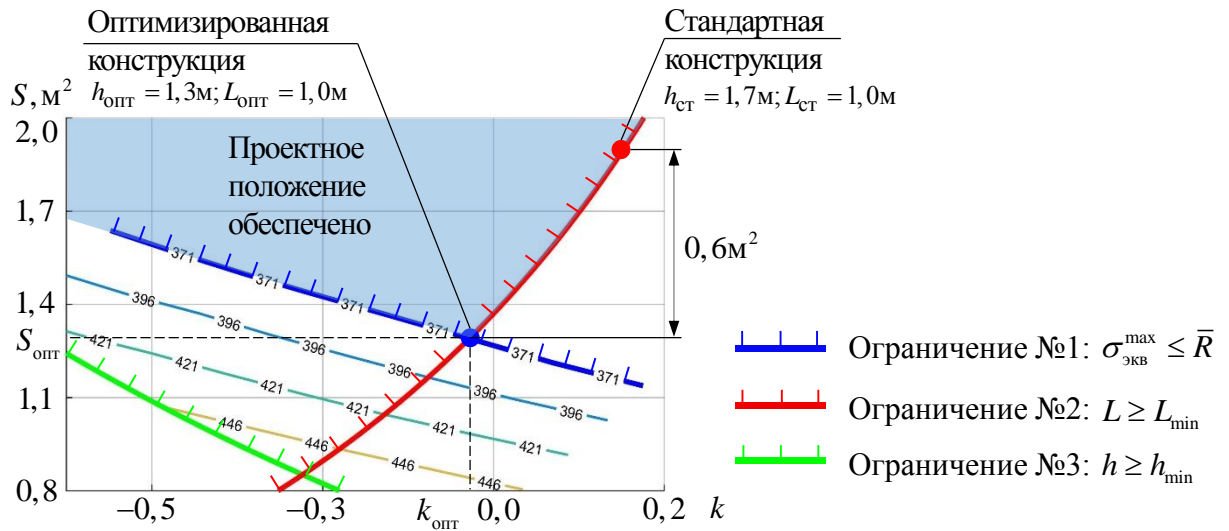


Рисунок 4.10 - Зависимость эквивалентных напряжений  $\sigma_{\text{ЭКВ}}^{\text{max}}$  (изолинии, МПа) в трубопроводе 530x7 мм от параметров грунтовой конструкции  $S$  и  $k$

При допустимом напряжённом состоянии стенки трубопровода 530x7 мм (ограничение №1) наименьший объём замены грунта обеспечивает оптимизированная противопучинистая грунтовая конструкция толщиной  $h_{\text{опт}} = 1,3$  м (рисунок 4.11), что на 0,4 м меньше, чем для стандартной грунтовой конструкции ( $h_{\text{ст}} = 1,7$  м) с заменой грунта до фронта промерзания (рисунок 4.12). Последнее приводит к снижению объёма замены грунта величиной  $0,6 \text{ м}^3$  (32%) на один метр трассы трубопровода. Полученные результаты подтверждают работоспособность оптимизированной противопучинистой грунтовой конструкции при глубине замены грунта выше границы фронта промерзания.

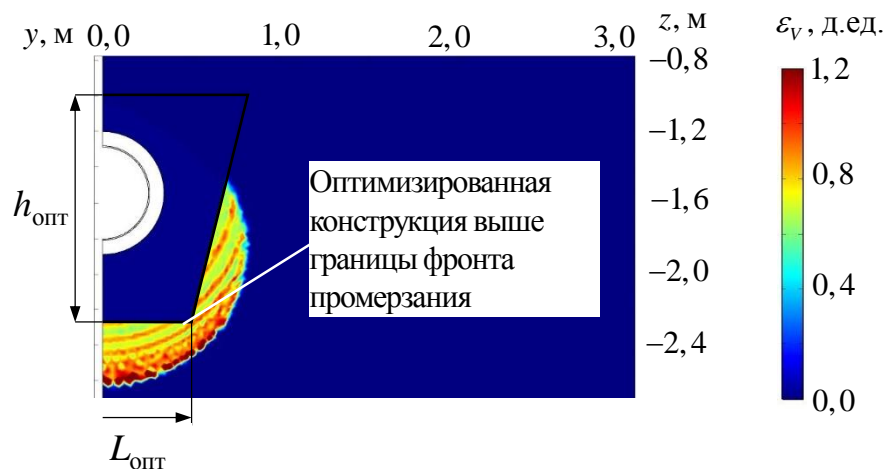


Рисунок 4.11 - Оптимизированная противопучинистая грунтовая конструкция для трубопровода 530x7 мм

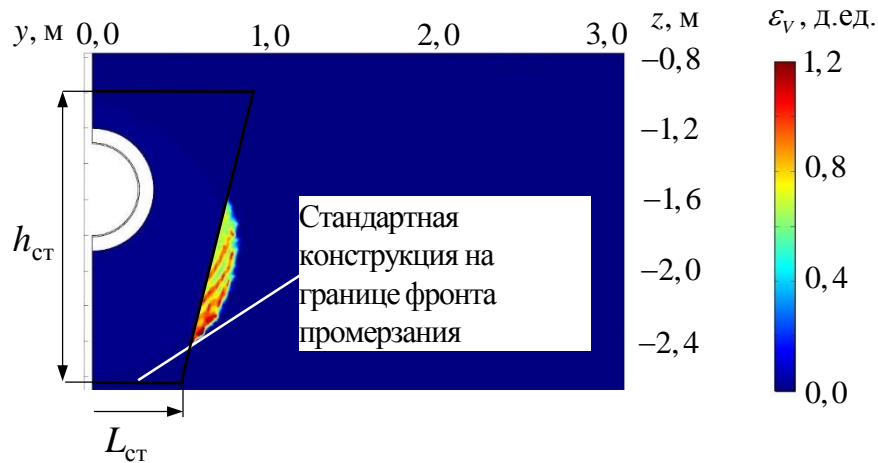


Рисунок 4.12 - Стандартная противопучинистая грунтовая конструкция для трубопровода 530x7 мм

На рисунке 4.13 приведена зависимость, показывающая возможный диапазон применения комбинированной инженерной защиты (противопучинистая грунтовая конструкция совместно с кольцевой теплоизоляцией) для того же трубопровода и соответствующий процент экономии объема замены грунта по сравнению со стандартной заменой до фронта промерзания для более широкого диапазона свойств грунтов (таблица 4.5) и температуры перекачиваемого продукта (от  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Из графика на рисунке 4.13 видно, что оптимизированная противопучинистая грунтовая конструкция позволяет снизить объем замены грунта на величину до 50%.

Аналогичный результат можно получить для трубопроводов другого диаметра. На рисунке 4.14 приведена область применения комбинированной инженерной защиты для трубопровода 1420x20 мм при тангенсе угла откосов траншеи 1:0,5. Оптимизированная конструкция позволяет снизить объем замены грунта на величину до 23%.

Таблица 4.5 - Исследованный диапазон свойств грунтов

Условное обозначение	$E_{гр} \cdot 10^{-6}$ , Па	$E_{под} \cdot 10^{-6}$ , Па	$E_{под}/E_{гр}$
Диапазон изменения	4 - 20	10 - 40	0,5 - 10

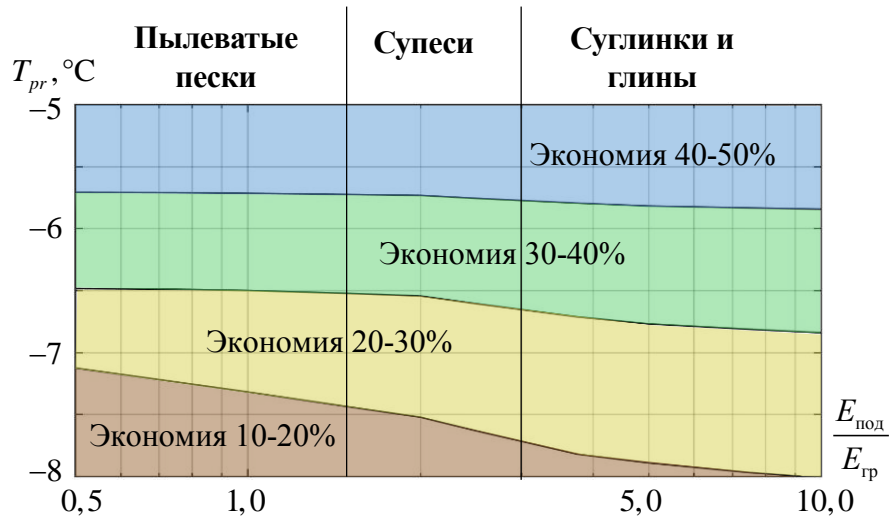


Рисунок 4.13 - Область применения комбинированной инженерной защиты и соответствующий процент экономии объема замены грунта для трубопровода 530x7 мм

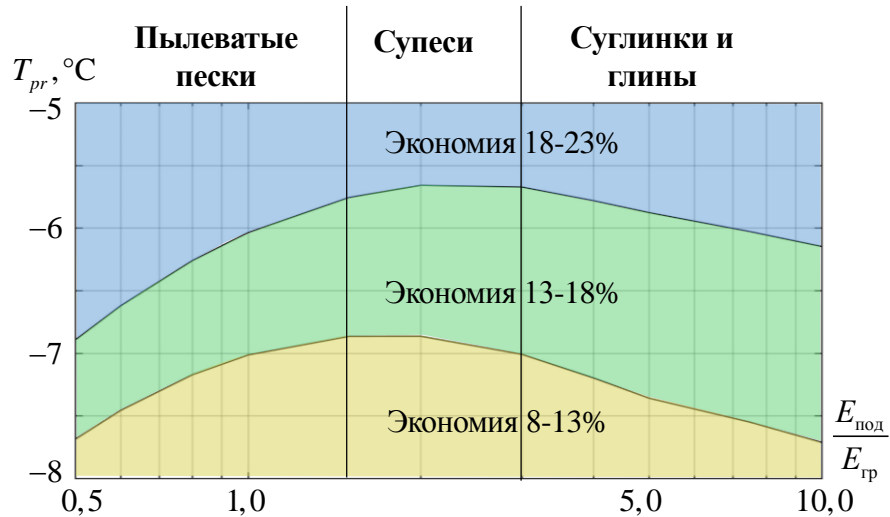


Рисунок 4.14 - Область применения комбинированной инженерной защиты и соответствующий процент экономии объема замены грунта для трубопровода 1420x20 мм

Таким образом, в данном параграфе разработан алгоритм решения задачи оптимизации геометрических размеров противупучинистой грунтовой конструкции, состоящей из средне- или крупнозернистого строительного песка. Расчетным способом доказана возможность обеспечения нормативного напряженно-деформированного состояния трубопровода диаметром от 530 до 1420 мм с температурой продукта от  $-5\text{ }^\circ\text{C}$  до  $-8\text{ }^\circ\text{C}$  в условиях пылевато-глинистых водонасыщенных чрезмернопучинистых грунтов при помощи комбинированной инженерной защиты: оптимизированной противупучинистой грунтовой

конструкции, расположенной выше границы фронта промерзания, в комбинации с кольцевой теплоизоляцией. При этом оптимизированная конструкция позволяет снизить объём замены грунта на величину до 50% по сравнению со стандартным способом замены грунта до границы фронта промерзания.

#### **4.4 Методика расчетного обоснования конструктивных решений по обеспечению стабильности проектного положения магистрального трубопровода в условиях пучинистых грунтов**

Выбор конкретного способа инженерной защиты должен опираться на технико-экономическое обоснование для каждого участка пучинистого грунта отдельно. В методике на рисунке 4.15 реализуется следующая последовательность действий. После идентификации участка пучинистого грунта на продольном профиле выполняется расчет НДС трубопровода по алгоритму на рисунке 3.3. При значении эквивалентного напряжения  $\sigma_{\text{экв}}$  в трубопроводе ниже допустимого значения инженерная защита не требуется. В противном случае следует применить инженерную защиту.

Для инженерной защиты требуется определить протяженность по следующему правилу: инженерная защита должна полностью перекрывать каждый участок трубопровода от геологической скважины, вскрывшей пучинистый грунт, до скважины, его не вскрывшей, на всём протяжении. Требование связано с повышенной опасностью локального морозного пучения и невозможностью определить границу между пучинистым и непучинистым грунтом с точностью от 1,5 до 21 м при выдерживании расстояния между геологическими скважинами более 50 м.

Наиболее простым, дешевым и надежным способом инженерной защиты, хорошо зарекомендовавшим себя на практике, является кольцевая теплоизоляция поверхности трубопровода с применением газонаполненных пластмасс (ППУ или ЭППС) в металлической или полимерной оболочке. Сначала выполняется расчет НДС трубопровода по алгоритму на рисунке 3.3 при максимальной толщине теплоизоляции. В случае, если нормативный уровень НДС трубопровода



обеспечивается, следует повторно уточнить толщину теплоизоляции путем её уменьшения до минимального значения с проверкой условия прочности.

В случае, если доступная к установке на трубопровод теплоизоляция не обеспечивает допустимое НДС, необходимо применить комбинированную инженерную защиту: оптимизированную противопучинистую грунтовую конструкцию из крупно- или среднезернистого строительного песка совместно с кольцевой теплоизоляцией.

Сначала производится поиск вариантов подвоза строительного песка. Для каждого варианта строительного песка решается задача оптимизации геометрических размеров противопучинистой грунтовой конструкции по алгоритму на рисунке 4.9.



Рисунок 4.15 - Методика расчётного обоснования конструктивных решений магистрального трубопровода с отрицательной температурой продукта на потенциально-опасных участках морозного пучения

На последнем этапе для каждой рассмотренной конструкции комбинированной инженерной защиты выполняется расчет стоимости сооружения

и эксплуатации и выбирается наиболее экономичный вариант.

Разработанная методика внедрена в компании ООО «Газпром трансгаз Сургут» (приложение А).

На основе методики разработана программа для ЭВМ «Pipeline Mechanics v.1.0» (приложение Б). Программа может быть использована проектными организациями для обоснования конструктивных решений по подземной прокладке магистрального трубопровода с отрицательной температурой продукта в зоне пылевато-глинистых пучинистых грунтов.

#### **Выводы по главе 4**

1. Теплоизоляция трубопровода является первичным способом защиты от морозного пучения, т.к. имеет низкую себестоимость и зарекомендовала себя достаточной надежностью. Однако область применения теплоизоляции ограничена отрицательной температурой продукта не менее  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  при диаметре трубопровода от 530 до 1420 мм.

2. Доказана возможность обеспечения проектного положения трубопровода диаметром от 530 до 1420 мм с температурой продукта от  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$  в условиях пылевато-глинистых водонасыщенных чрезмернопучинистых грунтов при помощи комбинированной инженерной защиты: оптимизированной противопучинистой грунтовой конструкции в комбинации с кольцевой теплоизоляцией.

3. Оптимизированная противопучинистая грунтовая конструкция позволяет снизить объём замены грунта на величину до 50% по сравнению с заменой грунта до границы фронта промерзания.

4. Разработана методика расчетного обоснования конструктивных решений по обеспечению стабильности проектного положения магистрального трубопровода в условиях пучинистых грунтов. Методика позволяет расчётным путём обосновать границы участка трубопровода, подлежащего инженерной защите от морозного пучения, и параметры конструкции, обеспечивающей его проектное положение на весь срок эксплуатации.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. По результатам численного моделирования получена зависимость максимальных напряжений в трубопроводе диаметром 530 - 1420 мм от длины участка пучения, которая характеризуется повышенной опасностью критических зон длиной от 1,5 до 21,0 м по сравнению с более длинными (от 50 м). Поэтому инженерная защита подземного трубопровода от морозного пучения должна на всём протяжении перекрывать участок от скважины, вскрывшей пучинистый грунт, до скважины его не вскрывшей. Это позволит исключить возможные эксплуатационные риски появления аварийно-опасных критических зон морозного пучения протяжённостью от 1,5 до 21,0 м и повысить надёжность транспортной системы в целом.

2. Применение кольцевой теплоизоляции из пенополиуретана позволяет обеспечить стабильность проектного положения подземного магистрального трубопровода диаметром от 530 до 1420 мм с температурой продукта более  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  в условиях чрезмернопучинистых грунтов. При температуре продукта ниже  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  необходимо применение комбинированных конструктивных решений по обеспечению стабильности проектного положения: противопучинистой грунтовой конструкции совместно с кольцевой теплоизоляцией.

3. Комбинированная инженерная защита трубопровода, состоящая из кольцевой теплоизоляции и оптимизированной противопучинистой грунтовой конструкции из крупно- или среднезернистого строительного песка, обеспечивает проектное положение подземного магистрального трубопровода диаметром от 530 до 1420 мм при температуре продукта от  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$  в условиях чрезмернопучинистых грунтов. Оптимизированная конструкция может располагаться выше границы фронта промерзания и сокращает объём замены грунта на величину до 50% по сравнению со стандартной конструкцией.

4. Разработана методика расчётного обоснования конструктивных решений по обеспечению стабильности проектного положения магистрального трубопровода с температурой продукта от  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$  на участках морозного

пучения, включающая в себя разработанные автором алгоритмы расчёта НДС трубопровода и оптимизации геометрических размеров противоположной грунтовой конструкции.

**СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ**

КСП	Капиллярно-сорбционный потенциал
МГ	Магистральный газопровод
МК	Магистральный конденсатопровод
ММГ	Многолетнемерзлый грунт
НДС	Напряженно-деформированное состояние
НГКМ	Нефтегазоконденсатное месторождение
НТД	Нормативно-техническая документация
ПВП	Планово-высотное положение
ППУ	Пенополиуретан
УГВ	Уровень грунтовых вод
ЭПС	Экструзионный пенополистирол

**СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ**

**годовые кольца льда:** зоны повышенной льдистости грунта вокруг холодного подземного трубопровода, связанные с замедлением движения фронта промерзания в теплое время года

**критическая длина участка пучения:** длина участка пучения, при которой достигаются максимальные изгибные напряжения в трубопроводе

**противопучинистая грунтовая конструкция:** совокупность обсыпки, подсыпки и подушки, выполняемой из средне- или крупнозернистого строительного песка

**комбинированная инженерная защита:** инженерная защита, состоящая из кольцевой теплоизоляции поверхности трубопровода и противопучинистой грунтовой конструкции

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Айнбиндер, А. Б. Расчет магистральных и промысловых трубопроводов на прочность и устойчивость: справочное пособие / А. Б. Айнбиндер. - Москва : Недра, 1991. - 287 с. - Текст : непосредственный.
2. Аналитическая задача определения удлинения газопровода в области аркообразования / С. Я. Кушнир [и др.] - Текст : непосредственный // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. - 2011. - № 4. - С. 74-80.
3. Бородавкин, П. П. Механика грунтов в трубопроводном строительстве / П. П. Бородавкин. - Москва : Недра, 1986. - 224 с. - Текст : непосредственный.
4. Брушков, А. В. Засоленные многолетнемерзлые породы арктического побережья, их происхождение и свойства / А. В. Брушков. - Москва : МГУ, 1998. - 327 с. - Текст : непосредственный.
5. Быков, Н. И. Вечная мерзлота и строительство на ней / Н. И. Быков, П. Н. Каптерев. - Москва : Трансжелдориздат, 1940. - 369 с. - Текст : непосредственный.
6. Вагнер, В. В. Развитие арочных выбросов подземных магистральных газопроводов при переменной обводненности грунтов. Монография / В. В. Вагнер, С. Я. Кушнир, С. А. Пульников. - Санкт-Петербург, 2010. - 225 с. - Текст : непосредственный.
7. Войслав, С. Г. Краткое описание исследований причины пучения полотна Николаевской железной дороги / С. Г. Войслав. - Санкт-Петербург : Бюро исследования почвы, 1896. - Текст : непосредственный.
8. Вялов, С. С. Реологические основы механики грунтов / С. С. Вялов. - Москва : Высшая школа, 1978. - 447 с. - Текст : непосредственный.
9. Газораспределительные системы. Актуализированная редакция СНиП 42-01-2002 (с Изменениями № 1, 2) : СП 62.13330.2011\* : Утвержден приказом Министерства регионального развития Российской Федерации (Минрегион России) от 27 декабря 2010 г. N 780 : ввод в действие с 2013-01-01. - Москва : Издательство стандартов, 2013. - Текст : непосредственный.
10. Глобус, А. М. Экспериментальная гидрофизика почв. Методы определения

потенциала и коэффициентов переноса почвенной влаги / А. М. Глобус. - Ленинград : Гидрометеиздат, 1969. - 355 с. - Текст : непосредственный.

11. Годунов, С. К. Разностные схемы. Введение в теорию / С. К. Годунов, В. С. Рябенский. - Изд. 2-е, перераб. и доп. - Москва: Наука, 1977. - 440 с. - Текст : непосредственный.

12. Гольдштейн, М. Н. Деформации земляного полотна и оснований сооружений при промерзании и оттаивании / М. Н. Гольдштейн. - Москва : Трансжелдориздат, 1948. - 211 с. - Текст : непосредственный.

13. Горелик, Я. Б. Методы расчета деформаций инженерных конструкций, вызванных пучением пород промерзающего слоя / Я. Б. Горелик. - Текст : непосредственный // Криосфера земли. - 2010. - № 1. - С. 50-62.

14. Горелик, Я. Б. О режимах льдообразования при промерзании грунтов / Я. Б. Горелик. - Текст : непосредственный // Криосфера земли. - 2007. - № 4. - С. 42-49.

15. Горелик, Я. Б. Физика и моделирование криогенных процессов в литосфере / Я. Б. Горелик, В. С. Колунин; отв. ред. акад. В. П. Мельников. - Новосибирск : СО РАН, Филиал «Гео», 2002. - 317 с. - Текст : непосредственный.

16. Горковенко, А. И. Основы теории расчета пространственного положения подземного трубопровода под влиянием сезонных процессов : 25.00.19 : дис. ... док. техн. наук / А. И. Горковенко ; ТюмГНГУ. - Тюмень, 2006. - 305 с. - Текст : непосредственный.

17. Горобцов, Д. Н. Научно-методические основы исследования теплофизических свойств дисперсных грунтов : 25.00.08 : дис. ... канд. геол.-минерал. наук / Д. Н. Горобцов ; МГРИ. - Москва, 2011. - 198 с. - Текст : непосредственный.

18. ГОСТ 12248-2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости : межгосударственный стандарт : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 19 апреля 2011 г. N 46-ст : взамен ГОСТ 12248-96 и ГОСТ 24143-80: дата введения 2012-01-01 / разработан ОАО «НИЦ



«Строительство». - Москва : Изд-во стандартов, 2010. - Текст : непосредственный.

19. ГОСТ 23250-78 Материалы строительные. Метод определения удельной теплоемкости : государственный стандарт союза ССР : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по делам строительства от 14 июля 1978 г. N 130 : введен впервые : дата введения 1979-01-01 / разработан Государственным комитетом СССР по делам строительства. - Москва : Изд-во стандартов, 1978. - Текст : непосредственный.

20. ГОСТ 25584-2016 Грунты. Методы лабораторного определения коэффициента фильтрации : межгосударственный стандарт : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 2 ноября 2016 г. N 1570-ст : взамен ГОСТ 25584-90: дата введения 2017-05-01 / АО «НИЦ «Строительство». - Москва : Изд-во стандартов, 2016. - Текст : непосредственный.

21. ГОСТ 28622-2012. Грунты. Метод лабораторного определения степени пучинистости : межгосударственный стандарт : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 27 декабря 2012 г. N 2016-ст : взамен ГОСТ 28622-90: дата введения 2013-11-01 / ОАО «НИЦ «Строительство». - Москва : Изд-во стандартов, 2012. - Текст : непосредственный.

22. ГОСТ 30256-94 Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности цилиндрическим зондом : межгосударственный стандарт : введен в действие Постановлением Минстроя России от 6 апреля 1995 г. N 18-31 : введен впервые: дата введения 1996-01-01 / НИПИТеплопроект и НИИСФ. - Москва : Изд-во стандартов, 1995. - Текст : непосредственный.

23. ГОСТ 5180-2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик : межгосударственный стандарт : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 3 ноября 2015 г. N 1694-ст : взамен ГОСТ 5180-84: дата введения 2016-04-01 / ОАО «ПНИИС». - Москва : Изд-во стандартов, 2015. - Текст : непосредственный.

24. ГОСТ Р 55990-2014. Месторождения нефтяные и газонефтяные. Промысловые трубопроводы. Нормы проектирования : национальный стандарт Российской Федерации : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 1 апреля 2014 г. N 278-ст : введен впервые: дата введения 2014-04-01 / ООО «Газпром «ВНИИГАЗ». - Москва : Изд-во стандартов, 2014. - Текст : непосредственный.

25. Григорьев, Б. В. Замерзание влажных грунтов в равновесных и неравновесных условиях : 01.04.14 : дис. ...канд. техн. наук / Б. В. Григорьев ; ТюмГУ. - Тюмень, 2013. - 135 с. - Текст : непосредственный.

26. Грунтоведение / В. Т. Трофимов, В. А. Королев, Е. А. Вознесенский [и др.]; ред. В.Т. Трофимова. - Москва : МГУ, 2004. - 1024 с. - Текст : непосредственный.

27. Даниэлян, Ю. С. Особенности неравновесного перераспределения влаги при промерзании - оттаивании дисперсных пород / Ю. С. Даниэлян, П. А. Яницкий. - Текст : непосредственный // Инженерно-физический журнал. - 1983. - Т. 44, № 1. - С. 91-98.

28. Дерягин, Б. В. Вода в дисперсных системах / Б. В. Дерягин, Н. В. Чураев, Ф. Д. Овчаренко [и др.] - Москва : Химия, 1989. - 288 с. - Текст : непосредственный.

29. Долматов, Б. И. Воздействие морозного пучения грунтов на фундаменты сооружений / Б. И. Долматов. - Ленинград : Госстройиздат, 1957. - 58 с. - Текст : непосредственный.

30. Долматов, Б. И. Условия моделирования процесса пучения водонасыщенного грунта. Вопросы механики грунтов / Б. И. Долматов. - Ленинград : Госстройиздат, 1958. - Текст : непосредственный.

31. Жолобов, И. А. Влияние нелинейности теплофизических свойств мерзлых грунтов на динамику теплосилового взаимодействия с горячим подземным трубопроводом : 01.04.14 : дис. ...канд. техн. наук / И. А. Жолобов ; ТюмГУ. - Тюмень, 2015. - 151 с. - Текст : непосредственный.

32. Жуков, В. Ф. Земляные работы при строительстве фундаментов и оснований в области вечной мерзлоты / В. Ф. Жуков. - Москва : АН СССР, 1946. - 142 с. -

Текст : непосредственный.

33. Золотарь, И. А. Расчет промерзания и величины пучения грунта с учетом миграции влаги / И. А. Золотарь. - Текст : непосредственный // Процессы тепло и массообмена в мерзлых горных породах. - Москва, 1965. - С. 19-25.

34. Иванов, И. А. Эксплуатационная надежность магистральных трубопроводов в районах глубокого сезонного промерзания пучинистых грунтов : 25.00.19 : дис. ... док. техн. наук / И. А. Иванов ; ТюмГНГУ. - Тюмень, 2002. - 267 с. - Текст : непосредственный.

35. Иванов, И. А. Геотехнические проблемы трубопроводного транспорта / И. А. Иванов, С. Я. Кушнир, С. А. Пульников. - Тюмень : ТюмГНГУ, 2011. - 208 с. - Текст : непосредственный.

36. Иванов, И. А. Магистральные трубопроводы в районах глубокого сезонного промерзания пучинистых грунтов / И. А. Иванов, С. Я. Кушнир. - Санкт-Петербург : ООО «Недра», 2010. - 174 с. - Текст : непосредственный.

37. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 22-02-2003 [Текст] : СП 116.13330.2012 : Утвержден приказом Министерства регионального развития Российской Федерации (Минрегион России) от 30 июня 2012 г. N 274 : ввод в действие с 2013-01-01. - Москва : Издательство стандартов, 2012. - Текст : непосредственный.

38. Инженерные изыскания для строительства, составление прогноза изменений температурного режима вечномерзлых грунтов численными методами [Текст] : РСН 67-87 : утв. постановлением Государственного комитета РСФСР по делам строительства от 20 августа 1987 г. № 152 : ввод. в действие с 1988-01-01. - Москва : Госстрой СССР, 1987. - Текст : непосредственный.

39. Инструкция по проектированию, строительству и реконструкции промысловых нефтегазопроводов : СП 34-116-97 : Утвержден приказом Минтопэнерго России от 23.12.1997 г. N 441 : ввод в действие с 1998-04-01. - Москва : Издательство стандартов, 1998. - Текст : непосредственный.

40. Использование метода конечных элементов в решении задач геотехники / С. А. Кудрявцев, В. Н. Парамонов, И. И. Сахаров, А. Г. Шашкин. - Хабаровск : ДВГУПС, 2014. - 162 с. - Текст : непосредственный.

41. Исследование процесса формирования эксплуатационного положения протяженных участков МГ Уренгой - Челябинск в сложных гидрогеологических условиях / М. Ю. Карнаухов, С. А. Лазарев, С. А. Пульников, Ю. С. Сысоев. - Текст : непосредственный // Газовая промышленность. - 2015. - № S (724). - С. 53-58.

42. Калюжный, И. Л. Гидрофизические процессы на водосборе: Экспериментальные исследования и моделирование / И. Л. Калюжный, С. А. Лавров. - Санкт-Петербург : Нестор-История, 2012. - 616 с. - Текст : непосредственный.

43. Киселев, М. Ф. Мероприятия против деформации зданий и сооружений от воздействия сил морозного выпучивания фундаментов / М. Ф. Киселев. - Москва : Стройиздат, 1971. - 102 с. - Текст : непосредственный.

44. Киселев, М. Ф. Предупреждение деформаций грунтов от морозного пучения / М. Ф. Киселев. - Ленинград : Стройиздат, 1975. - 130 с. - Текст : непосредственный.

45. Киселев, М. Ф. Расчет нормальных сил морозного выпучивания фундаментов / М. Ф. Киселев. - Текст : непосредственный // Основания, фундаменты и механика грунтов. - 1961. - № 5. - С. 23-24.

46. Кокорев, В. А. О метеорологических данных для изучения современных и будущих изменений климата на территории России. / В. А. Кокорев, А. Б. Шерстюков. - Текст : непосредственный // АРКТИКА. XXI век. Естественные науки. - 2015. - № 2(3). - С. 5-23.

47. Комаров, И. А. Термодинамика промерзающих и мерзлых дисперсных пород : 04.00.07 : дис. ... док. геол.-минерал. наук: / И. А. Комаров ; МГУ им. М. В. Ломоносова. - Москва, 1999. - 448 с. - Текст : непосредственный.

48. Королёв, В. А. Взаимосвязь потенциала влаги в грунтах с параметрами испарения из них воды / В. А. Королёв, Л. Б. Блудушкина. - Текст :

непосредственный // Инженерная геология. - 2015. - № 3. - С. 22-33.

49. Кутателадзе, С. С. Основы теории теплообмена / С. С. Кутателадзе. - Москва : Атомиздат, 1979. - 416 с. - Текст : непосредственный.

50. Кузьмин, П. П. О расчетном и экспериментальном способах определения испарения с поверхности снежного покрова / П. П. Кузьмин. - Текст : непосредственный // Труды ЗабНИГМИ. - 1974. - № 58. - С. 25-43.

51. Кушнир, С. Я. Пространственная устойчивость подземного магистрального газопровода на обводненных участках трассы / С. Я. Кушнир, С. А. Пульников, Ю. С. Сысоев. - Текст : непосредственный. // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. - 2012. - № 1. - С. 72-76.

52. Лыков, А. В. Теория тепло- и массопереноса / А. В. Лыков, Ю. А. Михайлов. - Ленинград : Госэнергоиздат, 1963. - 536 с. - Текст : непосредственный.

53. Магистральные трубопроводы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.06-85\* (с Изменениями № 1, 2) : СП 36.13330.2012 : Утвержден приказом Федерального агентства по строительству и жилищно-коммунальному хозяйству (Госстрой) от 25 декабря 2012 г. N 108/ГС : ввод в действие с 2013-07-01. - Москва : Издательство стандартов, 2013. - Текст : непосредственный.

54. Матвеев, Л. Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы / Л. Т. Матвеев. - Ленинград : Гидрометеиздат, 1984. - 752 с. - Текст : непосредственный.

55. Михайлов, П. Ю. Динамика тепломассообменных процессов и теплосилового взаимодействия промерзающих грунтов с подземным трубопроводом : 01.04.14 : дис. ... канд. физ.-мат. наук / П. Ю. Михайлов ; ТюмГУ. - Тюмень, 2012. - 175 с. - Текст : непосредственный.

56. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные. Части 1-6. Выпуск 17. Тюменская и Омская области. - Санкт-Петербург : Гидрометеиздат, 1998. - 703с. - Текст : непосредственный.

57. Никольский, Б. П. Справочник химика. Том 5. Сырье и продукты промышленности неорганических веществ, процессы и аппараты, коррозия, гальванотехника, химические источники тока / Б. П. Никольский. - Ленинград :

Химия, 1968. - 976 с. - Текст : непосредственный.

58. Новиков, П. А. Выявление опасных участков магистральных нефтепроводов на основе долгосрочного прогнозирования ореола оттаивания многолетнемерзлых грунтов : 05.26.19 : дис. ...канд. техн. наук / П. А. Новиков ; УГНТУ. - Уфа, 2016. - 180 с. - Текст : непосредственный.

59. Определение реологических свойств глинистых грунтов методом релаксации / В. Н. Кутергин, Р. Г. Кальберген, Ф. С. Карпенко [и др.]. - Текст : непосредственный // Основания, фундаменты и механика грунтов. - 2013. - № 1. - С. 2-5.

60. Орлов, В. О. Криогенное пучение тонкодисперсных грунтов / В. О. Орлов. - Москва : АН СССР, 1962. - 187 с. - Текст : непосредственный.

61. Орлов, В. О. Принципы расчета фундаментов на пучинистых грунтах / В. О. Орлов. - Текст : непосредственный. // Проблемы механики грунтов и инженерного мерзлотоведения. - Москва, 1990. - С. 187-198.

62. Орнатский, Н. В. Проектирование противопучинистых мероприятий. Регулирование водного режима дорожных оснований / Н. В. Орнатский. - Москва : Дориздат, 1948. - Текст : непосредственный.

63. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83\* : СП 22.13330.2016 : Утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 16 декабря 2016 г. N 970/пр : ввод в действие с 2017-06-17. - Москва : Издательство стандартов, 2017. - Текст : непосредственный.

64. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Актуализированная редакция СНиП 2.02.04-88 (с Изменениями № 1, 2, 3) : СП 25.13330.2012 : Утвержден приказом Министерства регионального развития Российской Федерации (Минрегион России) от 29 декабря 2011 г. N 622 : ввод в действие с 2013-01-01. - Москва : Издательство стандартов, 2012. - Текст : непосредственный.

65. Основы геокриологии. Ч. 1. Физико-химические основы геокриологии / Под ред. Э. Д. Ершова. - Москва : МГУ, 1995. - 368 с. - Текст : непосредственный.

66. Основы геокриологии. Ч. 4. Динамическая геокриология / Под ред. Э. Д. Ершова. - Москва : МГУ, 2001. - 688 с. - Текст : непосредственный.

67. Павлов, А. В. Теплообмен почвы с атмосферой в северных и умеренных широтах территории СССР / А. В. Павлов. - Якутск : ЯКН, 1975. - 304 с. - Текст : непосредственный.

68. Почвоведение : учеб для ун-тов. В 2 частях. Ч. 1. Почва и почвообразование / Г. Д. Белицина, В. Д. Васильевская, Л. А. Гришина [и др.] ; ред. В. А. Ковды, Б. Г. Розанова. - Москва : Высш. шк., 1988. - 400 с. - Текст : непосредственный.

69. Пузаков, Н. А. Теоретические основы расчета влагонакопления при промерзании грунта / Н. А. Пузаков. - Москва : Транспорт, 1965. - 168 с. - Текст : непосредственный.

70. Проблемы внедрения систем геотехнического мониторинга на объектах газотранспортной системы ОАО «Газпром» / С. А. Пульников, Ю. С. Сысоев, М. Ю. Карнаухов, С. А. Лазарев. - Текст : непосредственный // Геотехника. - 2014. - № 5/6. - С. 77-83.

71. Проектирование мелкозаглубленных фундаментов малоэтажных сельских зданий на пучинистых грунтах [Текст] : ВСН 29-85. : утв. М-вом сельского строительства СССР 14.02.1985 : ввод. в действие с 14.02.1985. - Москва : Минсельстрой, 1985. - Текст : непосредственный.

72. Пусков, В. И. Расчет нормальных сил морозного пучения грунтов на подошве жесткой полосы с ограниченной податливостью / В. И. Пусков. - Текст : непосредственный // НИИЖТ, 1967. - Вып. 13. - С. 141-150.

73. Пчелинцев, А. М. Строение и физико-механические свойства мерзлых грунтов / А. М. Пчелинцев. - Москва : Наука, 1964. - 258 с. - Текст : непосредственный.

74. Распоряжение Президента РФ от 17.12.2009 N 861-рп "О Климатической доктрине Российской Федерации". - Текст : непосредственный.

75. Расчет на прочность стальных трубопроводов. Актуализированная редакция СНиП 2.04.12-86 (с Изменением № 1) : СП 33.13330.2012 : Утвержден приказом

Министерства регионального развития Российской Федерации (Минрегион России) от 29 декабря 2011 г. N 621 : ввод в действие с 2013-01-01. - Москва : Издательство стандартов, 2012. - Текст : непосредственный.

76. Рекомендации по проектированию и расчету малозаглубленных фундаментов на пучинистых грунтах / НИИОСП. - Москва : Стройиздат, 1985. - 61 с. - Текст : непосредственный.

77. Роман, Л. Т. Механика мерзлых грунтов / Л. Т. Роман. - Москва : МАИК «Наука/Интерпериодика», 2002. - 426 с. - Текст : непосредственный.

78. Роман, Л. Т. Модуль деформации мерзлых грунтов при компрессионных испытаниях / Л. Т. Роман, П. И. Котов, М. Н. Царапов. - Текст : непосредственный // ОФМГ. - 2016. - № 5. - С. 35-40.

79. Роуч П. Вычислительная гидродинамика / П. Роуч. - Москва : Мир, 1980. - 618 с. - Текст : непосредственный.

80. Справочник по строительству на вечномерзлых грунтах / А. Ф. Антонов, Ю. Я. Велли, В. В. Гальперин [и др.] ; ред. Ю. Я. Велли, В. И. Докучаева, Н. Ф. Федорова. - Ленинград : Стройиздат, 1977. - 552 с. - Текст : непосредственный.

81. Сумгин, М. И. Общее мерзлотоведение / М. И. Сумгин. - Москва : АН СССР, 1952. - 339 с. - Текст : непосредственный.

82. Сухарев А. Г. Курс методов оптимизации / А. Г. Сухарев, А. В. Тимохов, В. В. Федоров. - Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2005. - 368с. - Текст : непосредственный.

83. Тютюнов, И. А. Миграция воды в грунтах // Исследование по физике и механике мерзлых грунтов / И. А. Тютюнов. - Москва : АН СССР, - Вып. 4, 1961. - Текст : непосредственный.

84. Тютюнов, И. А. Миграция воды в торфяно-глеевой почве в периоды замерзания и замерзшего состояния в условиях неглубокого залегания вечной мерзлоты / И. А. Тютюнов. - Москва : АН СССР, 1951. - 141 с. - Текст : непосредственный.

85. Устойчивость призм обвалования подземных магистральных нефтегазопроводов / С. Я. Кушнир, С. А. Пульников, А. А. Серебренников, Д. М.



Сенив. - Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. - 2010. - № 4. - С. 65-70.

86. Федосов, А. Е. Физико-механические процессы в грунтах при их замерзании и оттаивании / А. Е. Федосов. - Москва : Трансжелдориздат, 1935. - 587 с. - Текст : непосредственный.

87. Финк, О. И. Устойчивость сооружений в условиях глубокого промерзания почвы / О. И. Финк. - Текст : непосредственный // Вечная мерзлота и железнодорожное строительство : Гострансдат. - Москва. - № 8. - 1931.

88. Харионовский В. В. Надежность и ресурс конструкций газопроводов / В. В. Харионовский. - Москва : Недра, 2000. - 467 с. - Текст : непосредственный.

89. Цытович, Н. А. К теории равновесного состояния в мерзлых грунтах / Н. А. Цытович. - Москва : АН СССР. - № 5-6, 1945. - Текст : непосредственный.

90. Цытович, Н. А. О незамерзающей воде в рыхлых горных породах / Н. А. Цытович. - Текст : непосредственный // Известия АН СССР, серия «Геологическая». - 1947. - № 3. - С. 39-48.

91. Цытович, Н. А. Принципы механики мерзлых грунтов / Н. А. Цытович. - Москва : АН СССР, 1952. - 114с. - Текст : непосредственный.

92. Чеверев, В. Г. Физико-химическая теория формирования массообменных и тепловых свойств криогенных грунтов : 04.00.07 : дис. ... док. геол.-минерал. наук / В. Г. Чеверев ; МГУ им. М. В. Ломоносова. - Москва, 1999. - 369 с. - Текст : непосредственный.

93. Чернышев, С. Н. Погрешность интерполяции при построении границ на инженерно-геологических разрезах для создания расчётных моделей геологической среды / С. Н. Чернышев, А. М. Мартынов. - Текст : непосредственный // Инженерные изыскания. - 2017. - № 11. - С. 32 - 43.

94. Швец, В. Б. Элювиальные грунты как основания сооружений / В. Б. Швец. - Москва : Стройиздат, 1993. - 224 с. - Текст : непосредственный.

95. Штукенберг, В. И. Заметки о пучинах на железных дорогах и меры для уничтожения их / В. И. Штукенберг. - Москва : Инженер, 1885. - 273 с. - Текст :

непосредственный.

96. Энергия, природа и климат / В. В. Клименко, А. В. Клименко, Т. Н. Андрейченко. - Москва : МЭИ, 1997. - 216 с. - Текст : непосредственный.

97. Bouyoucos G. J. Movement of soil moisture from small capillaries to the large capillaries of the soil upon freezing / G. J. Bouyoucos. - Text : electronic // J. Agriculture Research. - 1923. - v. 24, P. 427-431.

98. Brooks R. H. Properties of porous media affecting fluid flow / R. H. Brooks, A. T. Corey. - Text : electronic // Journal of Irrigation Draining Division. - 1966. - № 92. - P. 61-88.

99. Burdine N. T. Relative permeability calculation from pore size distribution data / N. T. Burdine // Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers. - 1953. - № 198. - P. 71-78.

100. Childs E. C. The permeability of porous materials / E. C. Childs, N. Collis-George. - Text : electronic // Proceedings of the Royal Society. - 1950. - № 201. - P. 392-405.

101. Erlicher S. The analysis of the Generalized –  $\alpha$  methods for non-linear dynamic problems / S. Erlicher, L. Bonaventura, O. S. Bursi. - Text : electronic // Computational Mechanics. - 2002. - №28. - P. 83-104.

102. Farrel D. A. Modeling the pore structure of porous media / D. A. Farrel, W. E. Larson. - Text : electronic // Water resources research. - 1983. - № 3. - P. 699-706.

103. Importance of vapor flow in unsaturated freezing soil: a numerical study / S. Zhang [et al.]. - Text : electronic // Cold Regions Science and Technology. - 2016. - № 126. - P. 1-9.

104. Jansen K.E. A generalized- $\alpha$  method for integrating the filtered Navier-Stokes equations with a stabilized finite element method / K. E. Jansen, C. H. Whiting, G. M. Hulbert. - Text : electronic // Computer methods in applied mechanics and engineering. - 2000. - № 190. - P. 305-319.

105. Kunze R. J. Factors important in the calculation of hydraulic conductivity / R. J. Kunze, G. Uehara, K. Graham. - Text : electronic // Soil Science Society of America. - 1968. - № 32. - P. 760-765.

106. Laliberte G. E. Properties of unsaturated porous media / G. E. Laliberte, R. H. Brooks, A. T. Corey. - Text : electronic // Journal of Irrigation Draining Division. - 1968. - № 94. - P. 57-75.
107. Millington R. J. Permeability of porous solids / R. J. Millington, J. P. Quirk. - Text : electronic // Transactions of the Faraday Society. - 1961. - № 57. - P. 1200-1206.
108. Mualem Y. A new model for predicting hydraulic conductivity of unsaturated porous media / Y. Mualem. - Text : electronic // Water resources research. - 1976. - № 3. - P. 513-522
109. Mualem Y. A Hysteresis model based on an explicit domain-dependence function / Y. Mualem, E. E. Miller. - Text : electronic // Soil science society of America. - 1979. - № 43. - P. 1067-1073.
110. Ruckli R. Gelivite des sols et fondation des routs / R. Ruckli. - Text : electronic // Ed. Soc. Bull. Tech. de la suisse Romande, 1943.
111. Taylor G. S. A model for coupled heat and moisture transfer during soil freezing / G. S. Taylor, J. N. Luthin. - Text : electronic // CGJ. - 1978. - № 15 (4). - P. 548-555.
112. Wyllie M. R. J. The generalized Kozeney-Carman equation / M. R. J. Wyllie, G. H. F. Gardner. - Text : electronic // World oil. - 1958. - № 146. - P. 210-228.

## Приложение А (справочное)

Акт внедрения методики расчётного обоснования конструктивных решений по обеспечению стабильности проектного положения магистрального трубопровода на участках морозного пучения с применением комплексной инженерной защиты



ПАО «ГАЗПРОМ»

ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ «ГАЗПРОМ ТРАНСГАЗ СУРГУТ»

(ООО «Газпром трансгаз Сургут»)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Сургут

№ \_\_\_\_\_

УТВЕРЖДАЮ

Главный инженер – первый  
заместитель генерального директора

ООО «Газпром трансгаз Сургут»  
М.Ю. Карнаухов

«15» января 2020 года



**АКТ**

внедрения «Методики расчётного обоснования конструктивных решений по обеспечению стабильности проектного положения магистрального трубопровода на участках морозного пучения с применением комплексной инженерной защиты»

Авторы:

Марков Евгений Викторович

Пульников Сергей Александрович

Комиссия в составе:

Председатель:

Главный инженер – первый заместитель генерального  
директора

М.Ю. Карнаухов

Члены комиссии:

Начальник отдела эксплуатации магистральных  
газопроводов и ГРС

С.А. Лазарев

Начальник технического отдела

С.А. Редикульцев

составила настоящий акт о том, что «Методика расчётного обоснования конструктивных решений по обеспечению стабильности проектного положения магистрального трубопровода на участках морозного пучения с применением комплексной инженерной защиты» прошла апробацию при проведении ремонтных работ технологических трубопроводов обвязки компрессорных цехов ГКС «Заполярная» Новоуренгойского ЛПУМГ в 2018 – 2019 гг.

Разработана численная модель теплосилового взаимодействия участков газопровода, подверженных воздействию морозного пучения грунтов основания. Для данных участков выполнен расчет комбинированной инженерной защиты с применением кольцевой теплоизоляции и противопучинистой грунтовой подушки. Предложенные технические решения учтены при выполнении плановых работ.

Подписи:

Начальник отдела эксплуатации магистральных  
газопроводов и ГРС

С.А. Лазарев

Начальник технического отдела

С.А. Редикульцев

**Приложение Б**  
**(справочное)**

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ  
«Pipeline Mechanics v.1.0»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**СВИДЕТЕЛЬСТВО**

о государственной регистрации программы для ЭВМ

**№ 2018665130**

**Pipeline Mechanics v.1.0**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский индустриальный университет» (ТИУ) (RU)*

Авторы: *Пульников Сергей Александрович (RU),  
Марков Евгений Викторович (RU)*

Заявка № **2018663017**

Дата поступления **19 ноября 2018 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **03 декабря 2018 г.**

*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

 **Г.П. Иванев**

