

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тюмень - 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тюменский индустриальный университет» на кафедре «Транспорт углеводородных ресурсов»

Научный руководитель **Пульников Сергей Александрович**
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет»,
доцент кафедры «Строительного производства»

Официальные оппоненты: **Китаев Сергей Владимирович**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный
нефтяной технический университет»,
профессор кафедры «Транспорт и хранение
нефти и газа»

Сенцов Сергей Иванович
доктор технических наук, доцент,
ФГАОУ ВО «Российский государственный
университет нефти и газа (национальный
исследовательский университет) имени
И.М. Губкина», профессор кафедры
«Сооружение и ремонт газонефтепроводов
и хранилищ»

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ухтинский государственный технический университет», г. Ухта

Защита диссертации состоится «22» октября 2020 года в 15:00 ч. на заседании диссертационного совета Д 212.273.11 при ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет» по адресу: 625000, Тюменская область, г. Тюмень, ул. Володарского, д. 38, ауд. 219.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотечно-информационном комплексе ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет» и на сайте www.tyuiu.ru.

Автореферат диссертации разослан «7» сентября 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Пономарева Татьяна Георгиевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 (Штурмовое, 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. Muallem, 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 конденсаторов 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 конденсаторов с пучинистым грунтом с учётом комплексных решений по защите от морозного пучения.

2. Установить зависимость изгибного 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 конденсаторов 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 конденсаторов 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 °С до -8 °С.

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы ее цель и задачи, приведены основные положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая значимость.

В первой главе выполнен анализ причин и последствий воздействия морозного пучения на проектное положение подземных магистральных трубопроводов, приведена классификация способов защиты от морозного пучения и сделан прогноз интенсивности этих процессов в криолитозоне Западной Сибири.

На рассматриваемой территории эксплуатируются 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 протяжённостью более 4400 км. По статистике аварийности по МГ и МК за 15 лет видно, что именно в этой зоне аварийность в разы выше, чем в среднем по всем магистралям России: 0,39 аварий в год на 1000 км (2 аварии в год на всех 4400 км). Половина этих аварий - по причине воздействия морозного пучения грунтов основания.

Динамика опасных геологических процессов вдоль трассы трубопроводов обусловлена положительным трендом среднегодовой температуры воздуха за период 1976 - 2014 гг. Высокий уровень грунтовых вод, равнинный бессточный рельеф с пылевато-глинистым составом грунтов при климатических изменениях резко усиливают паводковые, эрозионные, термокарстовые процессы и, в частности, морозное пучение. Прогнозируется дальнейшее повышение среднегодовой температуры воздуха 2035 - 2064 гг., что не учтено в проектах строительства эксплуатируемых сегодня сооружений, есть пробелы и в существующих проектных методиках (таблица 1).

Таблица 1 - Пробелы в методиках проектирования инженерной защиты трубопроводов от морозного пучения

Задачи, решаемые при проектировании инженерной защиты	Нормативно-техническая документация	Научная литература
Массоперенос в грунте и определение параметров пучения	-	+
Нагрузки на теплоизолированный трубопровод от пучинистого грунта	-	+
Определение границ инженерной защиты на потенциально опасных участках	-	-
Оптимизация конструкции комбинированной инженерной защиты	-	-

Существующие способы защиты подземных трубопроводов от воздействия морозного пучения имеют ряд ограничений, и для случаев проектирования МГ и МК с температурой продукта ниже $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ необходимо реализовывать комбинированные конструктивные решения. В работе предложено применение комбинации способов противопучинистой грунтовой подушки под трубопроводом и его кольцевой теплоизоляции.

Известные математические модели теплосилового взаимодействия холодного подземного трубопровода с пучинистым грунтом А. И. Горковенко и П. Ю. Михайлова не позволяют решить такую задачу в совместной постановке (рисунок 1а: D_n - наружный диаметр трубопровода, м; h_0 - глубина заложения оси трубопровода, м; \vec{n}_s - нормаль к поверхности трубы; H_{\max} - максимальное вертикальное перемещение при свободном пу-

чении, м; p_{fh}^{max} - максимальное давление пучения, Па; $E_{гр}$ - модуль деформации грунта, Па; $\nu_{гр}$ - коэффициент поперечной деформации грунта; A - размер расчетной области, м; α - угол откоса траншеи, рад; β - угол между \vec{n}_s и осью y , рад; L_p, L_t - поверхности трубопровода и его теплоизоляции). В моделях мёрзлый грунт вокруг холодного трубопровода принимается абсолютно твёрдым телом, а талый - идеально жёсткопластическим. Критическое усилие морозного пучения вычисляется интегрированием пассивного давления по границе между талым и мёрзлым грунтом. При таких допущениях объём грунтовой подушки, заключенный в абсолютно твёрдом теле, не участвует в расчёте - модели не чувствительны к подобным элементам.

Грунтовая подушка, сжимаясь, поглощает деформации морозного пучения, поэтому в работе для расчёта силового взаимодействия трубопровода с пучинистым грунтом предложена математическая модель упругодеформируемого грунта, в которой сжимаемость грунтовой подушки описывается модулем деформации и коэффициентом поперечной деформации.

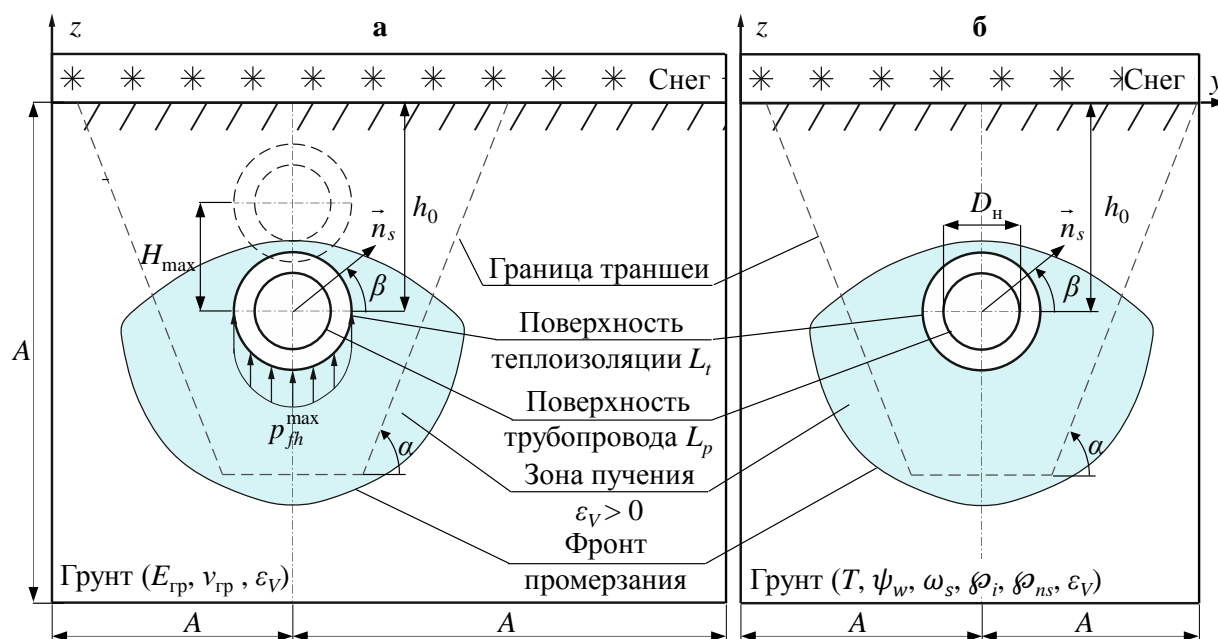


Рисунок 1 - Расчётные схемы трубопровода для определения параметров силового взаимодействия q_{fh}^{max} и H_{max} (а) и для решения задачи тепломассообмена (б)

Предложенная модель позволяет рассчитать не только необходимую толщину кольцевой теплоизоляции, но и комбинированную инженерную защиту, состоящую из теплоизоляции и противопучинистой грунтовой подушки.

Во второй главе описывается математическая модель для решения

задачи тепломассопереноса в пучинистых грунтах и определения объёмных деформаций пучения. Для учёта климатических трендов на долгосрочную перспективу предложено усовершенствовать модель коэффициентом температурного тренда.

Морозное пучение грунта определяется интенсивностью переноса жидкой воды от талых слоёв грунта к промерзающим вокруг поверхности трубопровода с отрицательной температурой продукта. Численное моделирование процесса морозного пучения выполнено с использованием математической модели капиллярно-пористой среды И. Л. Калюжного, Ю. С. Даниэляна и П. А. Яницкого (1) - (6), в которой пучение рассматривается как совокупность процессов неравновесного фазового перехода воды и её переноса в зону отрицательных температур. Влагопроводность грунта рассчитана по формуле Муалема, теплопроводность - по СП 25.13330.2012, капиллярно-сорбционный потенциал (КСП) воды - по И. Л. Калюжному. Объёмные деформации морозного пучения рассчитывались как разница объёмов внутривещных веществ и объёма пор (1). Количество веществ определялось решением уравнений конвективно-диффузионного переноса и фазового перехода воды (2), (4) и соли (3), (5). Замыкает систему уравнение переноса тепловой энергии (6):

$$\varepsilon_V = (\vartheta_w + \vartheta_s) / \rho_{ws} + \vartheta_i / \rho_i + \vartheta_{ns} / \rho_{ns} - e / (e + 1); \quad (1)$$

$$\frac{\partial \vartheta_w}{\partial \psi_w} \frac{\partial \psi_w}{\partial t} = - \frac{\partial \vartheta_i}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\omega_w \frac{\lambda_p}{g} \left(\rho_w \vec{\nabla} \psi_w - \rho_{ws} (1 - hav(\varepsilon_V)) \vec{g} \right) \right) - \nabla \cdot \left(D_{ws} (\vartheta_w + \vartheta_s) \vec{\nabla} \omega_s \right); \quad (2)$$

$$\left(\frac{\vartheta_s + \vartheta_w}{\omega_w} \right) \frac{\partial \omega_s}{\partial t} = - \frac{\omega_s}{\omega_w} \left(\frac{\partial \vartheta_w}{\partial \psi_w} \right) \frac{\partial \psi_w}{\partial t} - \frac{\partial \vartheta_{ns}}{\partial t} + \quad (3)$$

$$+ \nabla \cdot \left(\omega_s \lambda_p g^{-1} \left(\rho_w \vec{\nabla} \psi_w - \rho_{ws} (1 - hav(\varepsilon_V)) \vec{g} \right) + D_{ws} (\vartheta_w + \vartheta_s) \vec{\nabla} \omega_s \right);$$

$$\frac{\partial \vartheta_i}{\partial t} = (\psi_w + \mu_w - L_w T / T_0) H_i; \quad (4)$$

$$\frac{\partial \vartheta_{ns}}{\partial t} = (\vartheta_w + \vartheta_s) (\omega_s - \omega_s^{max}) H_s; \quad (5)$$

$$\left(\vartheta_w c_w + \vartheta_i c_i + \vartheta_s c_s + \vartheta_{ns} c_{ns} + \vartheta_{sk} c_{sk} \right) \frac{\partial T}{\partial t} = (L_w + (c_w - c_i) T) \frac{\partial \vartheta_i}{\partial t} + \quad (6)$$

$$+ \nabla \cdot \left(\lambda_T \vec{\nabla} T \right) - \left(\vec{j}_w (c_w - c_s) + \vec{j}_{ws} (\omega_w c_w + \omega_s c_s) \right) \cdot \vec{\nabla} T + L_s \frac{\partial \vartheta_{ns}}{\partial t},$$

где $\vartheta_w, \vartheta_s, \vartheta_i, \vartheta_{ns}, \vartheta_{sk}$ - масса воды, растворённой соли, льда, нерастворён-

ной соли и твёрдых частиц в единице объёма грунта, кг/м³; $c_w, c_i, c_s, c_{ns}, c_{sk}$ - изобарные теплоёмкости воды, льда, растворённой соли, нерастворённой соли и скелета грунта, Дж/(кг·°C); $\rho_w, \rho_{ws}, \rho_i, \rho_{ns}$ - плотности воды, водно-солевого раствора, льда и нерастворённой соли, кг/м³; D_{ws} - коэффициент диффузии, м²/с; L_w - теплота замерзания воды, Дж/кг; ψ_w, μ_w - КСП и химический потенциал воды, Дж/кг; λ_p - коэффициент теплопроводности, м/с; H_i - параметр скорости фазовых переходов воды, кг²/(Дж·с·м³); ω_s^{max} - максимальная равновесная концентрация порового раствора, д.ед.; H_s - параметр скорости кристаллизации и растворения соли, с⁻¹; e - коэффициент пористости, д.ед; t - время, с; λ_T - коэффициент теплопроводности грунта, Вт/(м·°C); j_{ws} - конвективный поток водно-солевого раствора, кг/(с·м²); j_w, j_s - диффузионные потоки воды и соли, кг/(с·м²); ω_w, ω_s - концентрация воды и соли в поровом растворе, д.ед.; T - температура грунта, °C.

Геотехническая система «трубопровод - грунтовое основание - атмосфера» находится в непрерывном взаимодействии и динамике, что учтено граничными условиями на поверхности грунта и трубопровода (таблица 2: J_w - поток воды из атмосферы, кг/(с·м²); q_T - поток тепла из атмосферы, Вт/м²; \vec{n} - внешняя нормаль к наружным границам моделируемого грунта; K_{mp} - коэффициент теплопередачи через стенку трубопровода, Вт/(м²·°C); T_{pr} - температура перекачиваемого продукта, °C).

Таблица 2 - Граничные условия для задачи тепломассопереноса (рисунок 1б)

$z = 0$	$z = -A, y = 0, y = 2A$	L_p	L_t
$(-\lambda_T \vec{\nabla} T) \cdot (-\vec{n}) = q_T$	$(-\lambda_T \vec{\nabla} T) \cdot (-\vec{n}) = 0$	$(-\lambda_T \vec{\nabla} T) \cdot (\vec{n}_s) =$	$(\vec{j}_w + \omega_w \vec{j}_{ws}) \cdot (\vec{n}_s) = 0$
$(\vec{j}_w + \omega_w \vec{j}_{ws}) \cdot (-\vec{n}) = J_w$	$(\vec{j}_w + \omega_w \vec{j}_{ws}) \cdot (-\vec{n}) = 0$	$= K_{tp} (T_{pr} - T)$	$(\vec{j}_s + \omega_s \vec{j}_{ws}) \cdot (\vec{n}_s) = 0$
$(\vec{j}_s + \omega_s \vec{j}_{ws}) \cdot (-\vec{n}) = 0$	$(\vec{j}_s + \omega_s \vec{j}_{ws}) \cdot (-\vec{n}) = 0$		

На поверхности грунта поток тепла q_T учитывает взаимодействие с атмосферой. Динамика будущих климатических изменений учтена предложенным в работе коэффициентом температурного тренда (0,03 °C/год на 45-летний период):

$$q_T = \alpha_k \left((T_B + k_B t) - T_{пов} \right) + \sigma_0 \varepsilon \left(b_{air} (T_B + k_B t + T_0)^4 - (T_{пов} + T_0)^4 \right) + G_{sun} - G_{ucn}, \quad (7)$$

где k_B - коэффициент температурного тренда, °C/с; α_k - коэффициент конвективного теплообмена, Вт/(м²·°C); $T_B, T_{пов}$ - температуры воздуха и поверхности грунта, °C; $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(К⁴·м²) - постоянная Стефана-Больцмана; ε - степень черноты поверхности в ИК-спектре, д.ед.; b_{air} - ко-

ээффициент противоизлучения атмосферы, д.ед.; $T_0 = 273,15$ К - коэффициент перевода из °С в К; G_{sun} , $G_{исп}$ - потоки тепла от солнечной радиации и испарения, Вт/м².

Расчёт с помощью математической модели должен проводиться поэтапно: без трубопровода до достижения естественного режима грунта и с трубопроводом. Начальные условия соответствуют водонасыщенному грунту:

$$T(t_1, z) = T_{гр}; \wp_w(t_1, z) = \wp_w^{\max}; \omega_s(t_1, z) = 0; \wp_i(t_1, z) = 0; \wp_{ns}(t_1, z) = 0, \quad (8)$$

где $T_{гр}$ - среднегодовая температура грунта, °С; \wp_w^{\max} - масса воды в единице объёма водонасыщенного грунта, кг/м³; $t_1 = 0$ с - начальное время.

Для параболических дифференциальных уравнений (2), (3), (6) решена задача Робена на прямоугольной сетке безусловно устойчивым неявным методом конечных разностей. Для дифференциальных уравнений (4), (5) решена задача Коши обобщённым альфа-методом.

Усовершенствованная математическая модель капиллярно-пористой среды была использована для решения поставленной в работе задачи оценки силового взаимодействия подземного МГ или МК с пучинистым грунтом с учётом комплексных решений по его защите.

В третьей главе описываются предложенные автором расчётная схема и математическая модель для определения нагрузок на трубопровод, учитывающие влияние применяемой инженерной защиты. Представлены результаты сравнения фактического и расчётного высотного положения аварийного участка трубопровода, образовавшегося по причине воздействия морозного пучения. Установлено правило, регламентирующее выбор протяжённости участка трубопровода, подлежащего инженерной защите.

Для описания силового взаимодействия трубопровода с пучинистым грунтом предложена математическая модель упруго-деформируемого грунта (9) - (11), в которой сжимаемость грунтовой подушки описывается модулем деформации и коэффициентом поперечной деформации. Левая часть уравнений является классической теорией упругости. В правой части предлагается добавка, моделирующая расширение пучинистого грунта при замерзании с учетом тепломассопереноса:

$$\left[\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial y} \left(2G_{гр} \frac{\partial u_y}{\partial y} + \lambda_{гр} \left(\frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(G_{гр} \left(\frac{\partial u_z}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial z} \right) \right) = \frac{\partial}{\partial y} \left(\left(\frac{2}{3} G_{гр} + \lambda_{гр} \right) \varepsilon_V \right); \quad (9) \\ & \frac{\partial}{\partial z} \left(2G_{гр} \frac{\partial u_z}{\partial z} + \lambda_{гр} \left(\frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(G_{гр} \left(\frac{\partial u_z}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial z} \right) \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left(\left(\frac{2}{3} G_{гр} + \lambda_{гр} \right) \varepsilon_V \right); \quad (10) \\ & \lambda_{гр} = \nu_{гр} E_{гр} / \left((1 + \nu_{гр})(1 - 2\nu_{гр}) \right); G_{гр} = E_{гр} / \left(2(1 + \nu_{гр}) \right), \quad (11) \end{aligned} \right.$$

где u_y, u_z - компоненты вектора перемещений пучинистого грунта, м; $G_{гр}, \lambda_{гр}$ - параметры Ламе пучинистого грунта, Па.

Дифференциальные уравнения (9) - (10) решены методом конечных разностей. В граничных условиях (таблица 3) для расчётной схемы на рисунке 1б приведено два варианта защемления поверхности трубопровода L_p : труба зафиксирована - рассчитывается q_{fh}^{max} ; труба не зафиксирована - H_{max} . Расчет параметров силового взаимодействия H_{max} и q_{fh}^{max} выполнен по формулам:

$$H_{max} = u_z (A \pm D_H/2; -h_0); \quad (12)$$

$$q_{fh}^{max} = \frac{D_H}{2} \int_0^{2\pi} \left(\tau_{zy}|_{L_p} \cos(\beta) + \sigma_{zz}|_{L_p} \sin(\beta) \right) d\beta, \quad (13)$$

где σ_{zz}, τ_{zy} - компоненты тензора напряжений, Па; q_{fh}^{max} - максимальное погонное усилие при стеснённом пучении, Н/м.

Итогом решения задачи силового взаимодействия является формула, связывающая усилия, действующие на трубопровод q_{fh} (Н/м), с его перемещениями w (м) на участке пучинистого грунта:

$$q_{fh} = q_{fh}^{max} (1 - w/H_{max}). \quad (14)$$

Таблица 3 - Граничные условия для определения параметров силового взаимодействия трубопровода с пучинистым грунтом по предлагаемой модели

$z = 0$	$z = -A$	$y = 0, y = 2A$	L_p	
			H_{max}	q_{fh}^{max}
$\sigma_{zz} = 0, \tau_{zy} = 0$	$u_z = 0, u_y = 0$	$u_y = 0, \tau_{zy} = 0$	$\sigma_n = 0, \tau_n = 0$	$u_z = 0, u_y = 0$

Расчёт напряжений в стенке трубопровода является заключительным этапом оценки работоспособности применяемой инженерной защиты. Расчётная схема и граничные условия приведены на рисунке 2. Для расчёта использована классическая теория продольно-поперечного изгиба балки на упругом основании:

$$E_{ст} I_y \frac{d^4 w_i}{dx^4} - \left(N_0 + E_{ст} \frac{\pi}{4} [D_H^2 - D_{вн}^2] \left(\sqrt{1 + \left(\frac{dw_i}{dx} \right)^2} - 1 \right) \right) \left(\frac{d^2 w_i}{dx^2} + \frac{1}{R_{нач}} \right) = q_i(w_i), \quad (15)$$

где I_y - осевой момент инерции сечения, м⁴; $E_{ст}$ - модуль упругости стали, Па; $q_i(w_i)$ - внешняя распределённая нагрузка на i -м участке, Н/м; N_0 - начальное растягивающее продольное усилие, Н; w_i - перемещения трубопровода на i -м участке, м; $R_{нач}$ - начальный радиус изгиба, м; $D_{вн}$ - внутренний диаметр трубы, м.

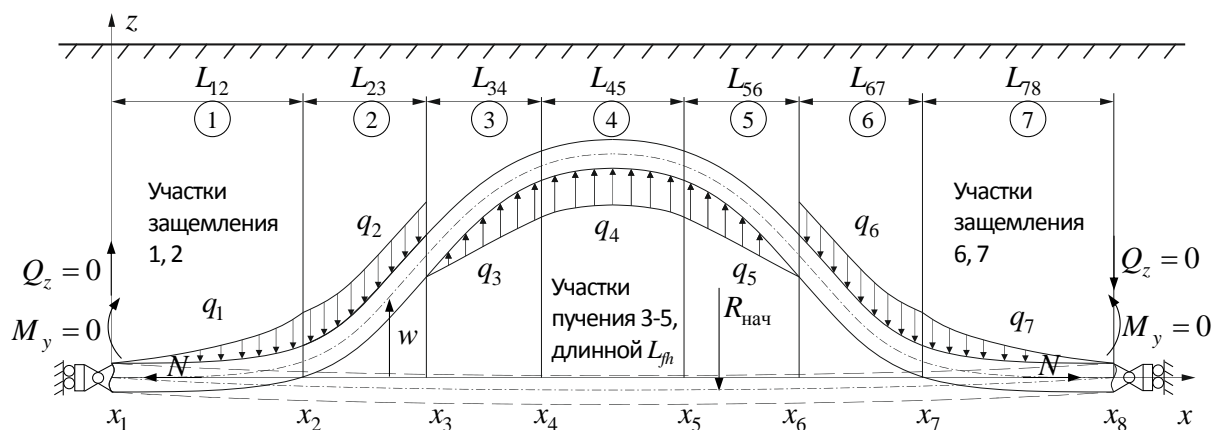


Рисунок 2 - Расчётная схема и граничные условия для определения НДС трубопровода при пересечении участка пучинистого грунта

На участках пучения 3 - 5 на трубопровод действует вертикальная сила (14), вызывающая перемещения трубопровода вверх и реакцию со стороны непучинистых грунтов на участках заземления. Выделены следующие характерные участки: 1, 7 и 2, 6 - упругий и пластический отпор на участках заземления (рассчитан по модели А. Б. Айнбиндера); 3, 5 и 4 - участки переменной и постоянной интенсивности пучения; Q_z , M_y - перерезывающее усилие (Н) и изгибающий момент (Н·м) в поперечном сечении. Уравнение (15) решено методом конечных разностей.

Предложенная в диссертационной работе математическая модель прошла апробацию при исследовании аварии на линейной части МК диаметром 530x7,1 мм. Под трубопроводом обнаружены скопления шлирового льда толщиной до 1 м, сформированные охлаждающим действием перекачиваемого продукта. Проведены инженерные изыскания и измерения высотного положения трубопровода с погрешностью не более $\pm 1,4$ мм (1,2% от максимальных вертикальных перемещений МК). Расчет НДС МК, выполненный по предложенной математической модели, показал уровень достоверности, аналогичный моделям А. И. Горковенко и П. Ю. Михайлова (рисунок 3): среднеквадратичное отклонение расчётных вертикальных перемещений от фактических составило 3,6%; местоположение точки разгерметизации определено с погрешностью 3% от протяжённости участка пучения L_{36} .

Расчётное значение максимального усилия при стеснённом пучении q_{fh}^{\max} по предложенной модели (432 кН/м) составило 95% от значения по модели А. И. Горковенко (457 кН/м). Следовательно, предложенная математическая модель достоверно описывает силовое взаимодействие трубопровода с пучинистым грунтом вплоть до нагрузки от морозного пучения, равной несущей способности основания.

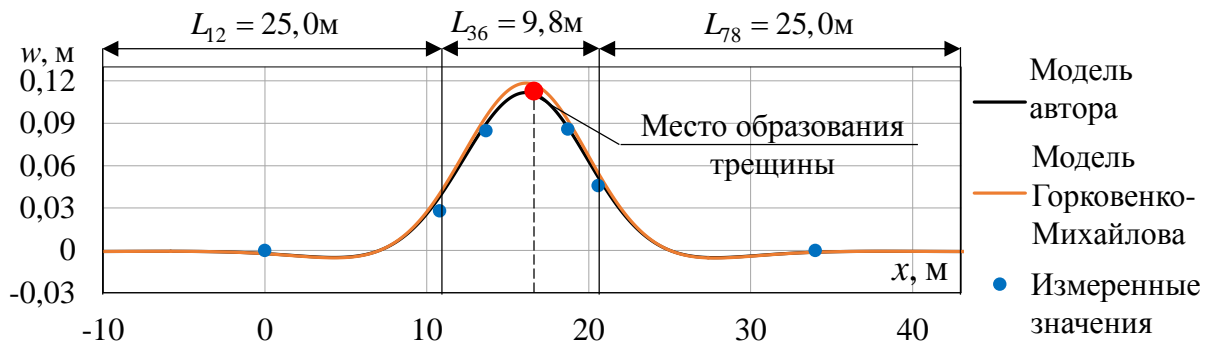


Рисунок 3 - Результаты расчёта высотного положения МК на аварийном участке

По данным А. М. Мартынова погрешность интерполяции высотной отметки границы между пучинистым и непучинистым грунтом по латерали лежит в диапазоне от 23 до 45 м при характерных углах выклинивания пластов менее 6° . Эта погрешность закладывается в расположение границ защищаемого участка. В диссертационной работе проведено многофакторное численное исследование влияния этой погрешности на НДС трубопровода. Расчётная схема приведена на рисунке 2. Получена зависимость, аппроксимирующая результаты расчёта максимального изгибного напряжения в опасном сечении $\sigma_{изг}^{max}$ (Па) с погрешностью не более 5,7%, в диапазоне факторов: $D_n \in [530; 1420]$ мм; внутреннее давление $P_{вн} \in [1,2; 10]$ МПа; температурный перепад после сварки замыкающего шва $\Delta T \in [-30; 30]$ $^\circ\text{C}$; модули деформации грунтов основания на участке пучения и засыпки на участке заземления $(E_{гр}, E_{зас}) \in [4; 40]$ МПа; толщина теплоизоляции $\delta_{из} \in [0; 100]$ мм; $H_{max} \leq 50$ см:

$$\begin{cases} \sigma_{изг}^{max} = \sigma_{изг}^{cr} L_{fh} L_{cr}^{-1} \exp\left(C^{-1} - C^{-1} (L_{fh} L_{cr}^{-1})^C\right), L_{fh} < L_{cr}; \\ \sigma_{изг}^{max} = (\sigma_{изг}^{cr} - \sigma_{изг}^{inf}) L_{fh} L_{cr}^{-1} \exp\left(B^{-1} - B^{-1} (L_{fh} L_{cr}^{-1})^B\right) + \sigma_{изг}^{inf}, L_{fh} \geq L_{cr}, \end{cases} \quad (16)$$

где L_{cr} - критическая протяжённость участка морозного пучения, м; $\sigma_{изг}^{cr}$ - экстремальное значение максимального изгибного напряжения, Па; $\sigma_{изг}^{inf}$ - максимальное изгибное напряжение при $L_{fh} = 200$ м, Па; C, B - коэффициенты аппроксимации.

На рисунке 4 зависимость (16) представлена в графическом виде для случая: $P_{вн} = 6,5$ МПа, $\delta_{из} = 0$ мм, $\Delta T = 30$ $^\circ\text{C}$, $E_{гр} = 10$ МПа, $E_{зас} = 10$ МПа, $H_{max} = 10$ см. Для каждого приведённого диаметра зависимость характеризуется экстремумом напряжений при критической протяжённости участка морозного пучения ($L_{fh} = L_{cr}$). При длине участка пучения $L_{fh} > L_{\Pi} \approx 2,35L_{cr}$ высотный профиль трубопровода имеет характерное плато, а изгибные

напряжения уменьшаются в 1,5 - 2,0 раза по сравнению с напряжениями при критической длине участка пучения L_{cr} (рисунок 5).

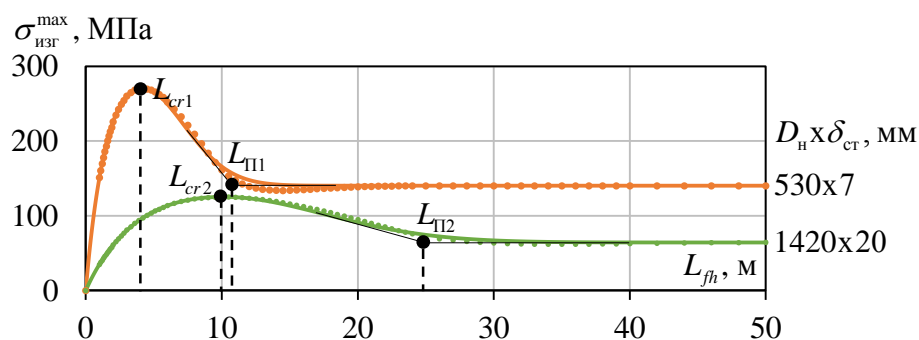


Рисунок 4 - Зависимость максимальных изгибных напряжений $\sigma_{изг}^{max}$ от длины участка пучения $L_{пв}$

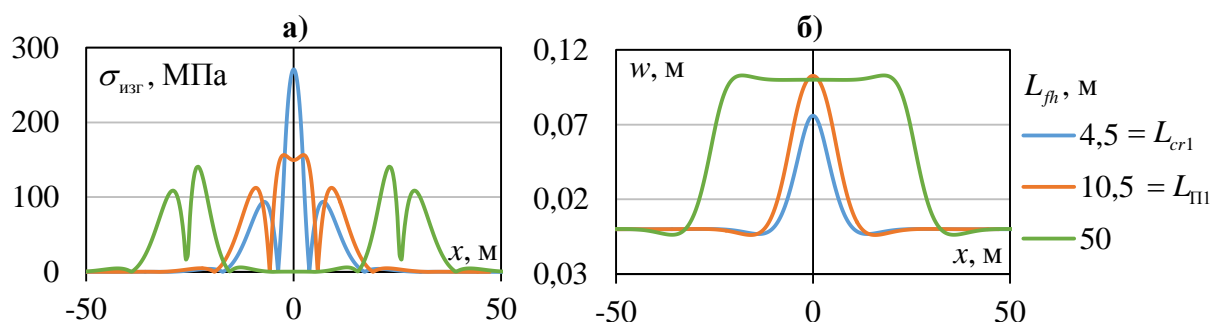


Рисунок 5 - Зависимость изгибных напряжений (а) и перемещений (б) от координаты x для трубопровода 530x7 мм

В пределах исследованных характеристик трубопроводов критическая длина участка пучения лежит в диапазоне: $L_{cr} \in [1,5; 21]$ м. Таким образом, расположение границ защищаемого участка трубопровода, выбранное без учёта погрешности интерполяции границ между геологическими элементами, приводит к увеличению изгибных напряжений в 1,5 - 2 раза. Поэтому для исключения эксплуатационных рисков появления коротких аварийно-опасных критических зон морозного пучения протяженностью от 1,5 до 21,0 м предложено правило, регламентирующее обоснование границ участка трубопровода, подлежащего инженерной защите: инженерная защита от морозного пучения подземного магистрального трубопровода должна на всём протяжении перекрывать участок от геологической скважины, вскрывшей пучинистый грунт, до скважины его не вскрывшей.

В четвертой главе представлены результаты численных исследований и методика расчётного обоснования комбинированных конструктивных решений по обеспечению стабильности проектного положения участка подземного магистрального газо- или конденсатопровода с отрицательной температурой продукта в условиях пучинистых грунтов. Доказано, что без комбинированной инженерной защиты обеспечение проектного поло-

жения трубопровода невозможно при температуре перекачиваемого продукта ниже $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В современном строительстве для теплоизоляции используются изделия из экструзионного пенополистирола или пенополиуретана с теплопроводностью около $0,03\text{ Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$. Такая теплоизоляция обладает структурной прочностью достаточной, чтобы выдержать давление от морозного пучения до $1,0\text{ МПа}$. Противопучинистая грунтовая конструкция состоит из обсыпки, подсыпки и грунтовой подушки и выполняется из крупно- или среднезернистого строительного песка (рисунок 6: S_r - степень водонасыщения грунта, д.ед.; ε_{fn} - степень пучинистости грунта, д.ед.; $E_{\text{под}}$ - модуль деформации грунта подушки, Па).

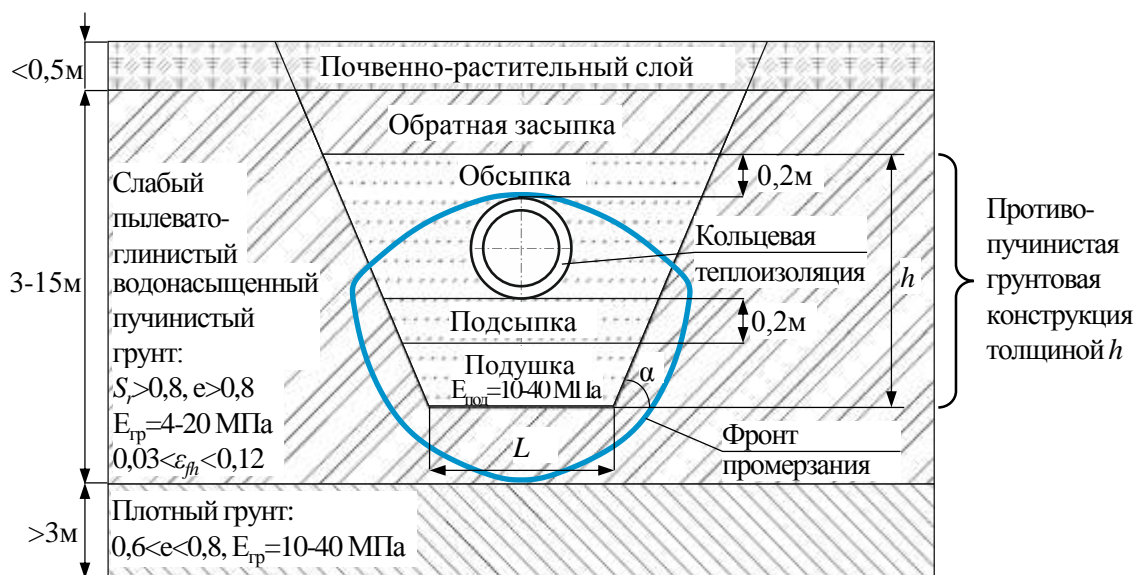


Рисунок 6 - Схема комбинированной инженерной защиты

Стандартным инженерным решением является замена грунта до границы фронта промерзания. В работе выдвинута гипотеза о возможности обеспечения проектного положения трубопровода при меньшей глубине замены грунта. Поэтому поставлена и решена оптимизационная задача (17) с целевой функцией S (площадь сечения грунтовой конструкции, м^2), ограничениями эквивалентного напряжения $\sigma_{\text{эКВ}}^{\text{max}}$ (№1) и минимальных размеров траншеи L (№2) и h (№3):

$$\begin{cases} S \rightarrow \min; \\ \sigma_{\text{эКВ}}^{\text{max}}(S, k) \leq \bar{R} \text{ - ограничение \#1;} \\ L \geq L_{\text{min}} \text{ - ограничение \#2;} \\ h \geq h_{\text{min}} \text{ - ограничение \#3;} \end{cases} \quad (17)$$

$$k = \ln\left(h / (L + h \operatorname{ctg}(\alpha))\right); \quad (18)$$

$$S = Lh + h^2 \operatorname{ctg}(\alpha), \quad (19)$$

где \bar{R} - расчётный предел прочности стали, Па; k - логарифмическое отношение толщины к средней ширине противопучинистой грунтовой конструкции; L, L_{\min} - исследуемая и минимальная ширина траншеи по дну, м; h, h_{\min} - исследуемая и минимальная толщина противопучинистой грунтовой конструкции, м; величины h_{\min} и L_{\min} определяются требованиями нормативной документации.

Для решения оптимизационной задачи использованы расчётные схемы на рисунках 1, 2 и граничные условия в таблицах 2, 3. Грунт противопучинистой конструкции моделировался как упруго-деформируемое водонепроницаемое тело, расширяющееся при замерзании только за счёт изначально содержащейся в нём воды.

В работе приведено доказательство работоспособности предложенной к применению конструкции комбинированной инженерной защиты на примере трубопровода $D_{\text{н}} \times \delta_{\text{ст}} = 530 \times 7$ мм, $T_{\text{пр}} = -6,5$ °С, $E_{\text{под}} = 4$ МПа, $E_{\text{гр}} = 10$ МПа, $\operatorname{tg}(\alpha) = 1:0,25$, $\delta_{\text{из}} = 80$ мм (рисунок 7: $S_{\text{тр}}$ - площадь поперечного сечения трубы и её изоляции, м²). Наименьший объём замены грунта обеспечивает оптимизированная противопучинистая грунтовая конструкция толщиной на 0,4 м меньше, чем стандартная конструкция. Последнее обосновало снижение объёма замены грунта величиной 0,6 м³ (32%) на 1 метр трассы трубопровода.

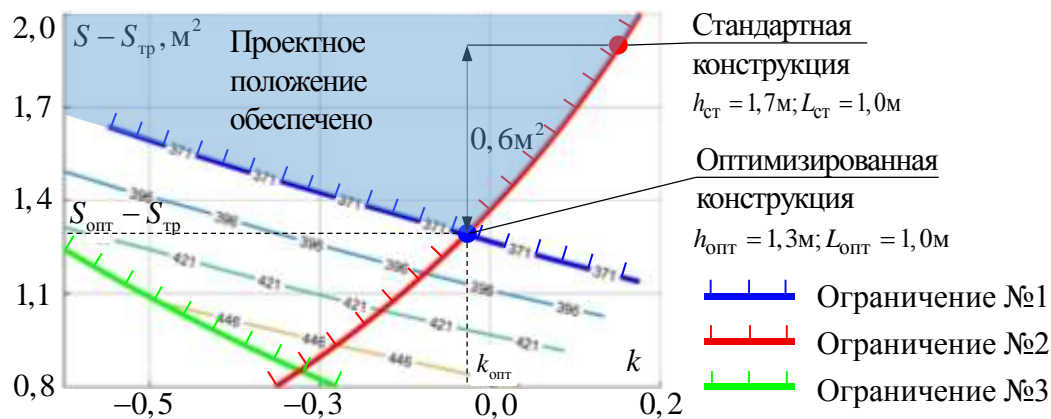


Рисунок 7 - Зависимость эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{ЭКВ}}^{\text{max}}$ (изолинии, МПа) в трубопроводе 530x7 мм от параметров грунтовой конструкции S и k

Для практических целей в работе получена зависимость (рисунок 8), показывающая область применения комбинированной инженерной защиты и соответствующий процент экономии объёма замены грунта по сравнению со стандартной заменой до фронта промерзания. При решении оптимизационной задачи возможно снижение объёма замены грунта на величину до 50%.

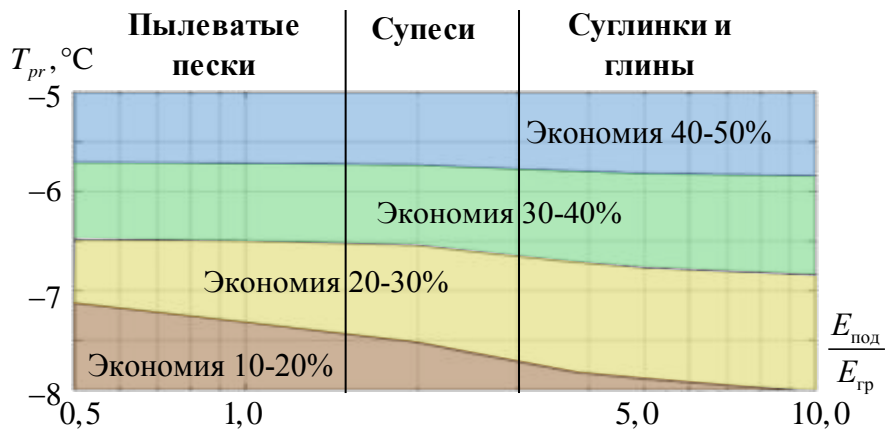


Рисунок 8 - Область применения комбинированной инженерной защиты для трубопровода 530x7 мм и процент экономии объёма замены грунта по сравнению со стандартной заменой до фронта промерзания

Полученные результаты исследования позволили разработать методику расчётного обоснования комбинированных конструктивных решений по обеспечению стабильности проектного положения участка подземного магистрального газо- или конденсатопровода в зоне пучинистых грунтов (рисунок 9).

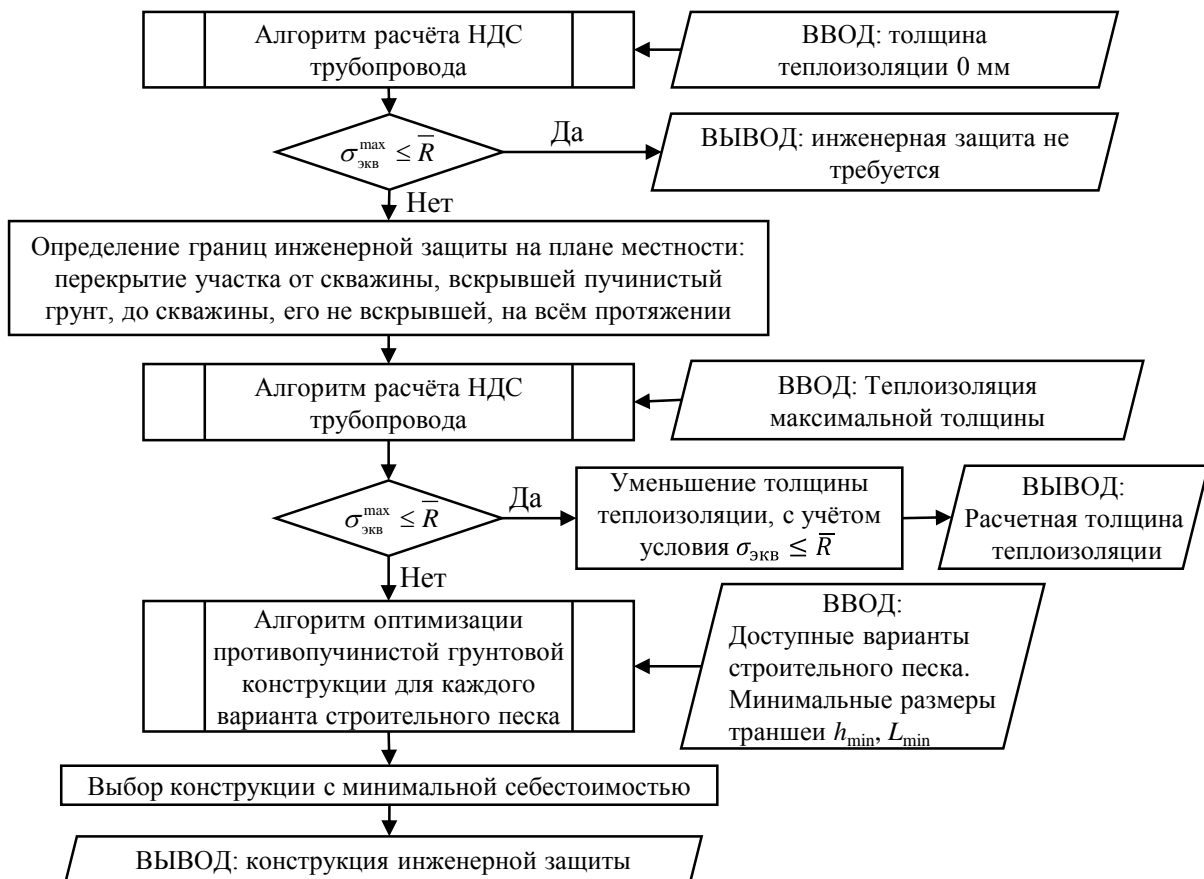


Рисунок 9 - Разработанная методика расчётного обоснования конструктивных решений магистрального трубопровода с отрицательной температурой продукта на потенциально-опасных участках морозного пучения

Предлагаемая методика позволяет расчётным путём обосновать границы участка трубопровода, подлежащего инженерной защите от морозного пучения, и параметры конструкции, обеспечивающие его проектное положение на весь срок эксплуатации с учетом долгосрочных климатических трендов.

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 ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из перечня ВАК

при Министерстве науки и высшего образования РФ:

1. Марков, Е. В. Теоретическое исследование методов инженерной защиты подземных трубопроводов от морозного пучения на участках прерывистого распространения многолетнемёрзлых грунтов / Е. В. Марков, С. А. Пульников. - Текст : непосредственный // Газовая промышленность. - 2018. - № 5. - С. 68 - 75.

2. Марков, Е. В. Методика обеспечения инженерной защиты от морозного пучения подземных магистральных трубопроводов с помощью грунтовой подушки / Е. В. Марков. - Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. - 2018. - № 3. - С. 91 - 101.

3. Марков, Е. В. Численное исследование методов инженерной защиты подземных трубопроводов от силового воздействия на них пучинистых грунтов / Е. В. Марков, С. А. Пульников. - Текст : непосредственный // Нефтяное хозяйство. - 2019. - № 1. - С. 88 - 93.

Публикации в изданиях рецензируемых в международных базах цитирования Web of Science и Scopus:

4. Markov, E. V. Stability of finite difference method for frost heaving calculation in 2D space / E. V. Markov, S. A. Pulnikov, Y. S. Sysoev. - Text : electronic // International Journal of Applied Engineering Research. - 2017. - 17(12). - pp. 6997-7000.

5. Markov, E. V. Evaluation of the effectiveness of ring thermal insulation for protecting a pipeline from the heaving soil / E. V. Markov, S. A. Pulnikov, Yu. S. Sysoev. - Text : electronic // Journal of Engineering Science and Technology. - 2018. - 13(10). - pp. 3344-3358.

Публикации в других изданиях:

6. Марков, Е. В. Ошибки проектирования магистральных трубопроводов в зонах пучинистых и многолетнемерзлых грунтов / Е. В. Марков, С. А. Пульников. - Текст : непосредственный // Нефть и газ 2016: юбилейная 70-я междунар. молодежная научная конференция. - Москва, 2016. - Том. 1. - Секция 1. - 519 с. - С. 419.

7. Марков, Е. В. Математическое моделирование морозного пучения в основании магистральных трубопроводов / Е. В. Марков, С. А. Пульни-

ков. - Текст : непосредственный // Нефтегазовый терминал / ТИУ; отв. ред. Ю. Д. Земенков. - Тюмень: ТИУ, 2017. - 246 с. - С. 147 - 150.

8. Markov, E. V.; Pulnikov, S. A. Engineering protection of pipelines in areas of heaving soils / E. V. Markov, S. A. Pulnikov. - Text : electronic // Deutsch-Russischer Studentischer Erdgas-Workshop Institut für Bohrtechnik und Fluidbergbau der Technischen Universität Bergakademie Freiberg, pp. 53 - 62.

9. Марков, Е. В. Теоретическое обоснование конструкций инженерной защиты трубопроводов в зонах пучинистых грунтов / Е. В. Марков, С. А. Пульников. - Текст : непосредственный // IV Международная научно-практическая молодёжная конференция по геотехнике. - Тюмень, 2018. - 103 с. - С. 45 - 46.

10. Марков, Е. В. Оптимизация инженерной защиты трубопроводов от морозного пучения грунтов / Е. В. Марков, Ю. С. Сысоев, С. А. Пульников. - Текст : непосредственный // Новые технологии - нефтегазовому региону: материалы Международной научно-практической конференции. - Тюмень: ТИУ, 2018. - Т. 1 - 320с. - С. 21 - 23.

Патенты и свидетельства:

Марков, Е. В. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ №2018665130. Pipeline Mechanics v.1.0 / Е. В. Марков, С. А. Пульников. - Текст : непосредственный // Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 03.12.2018г. Оpubл. 03.12.2018.

Подписано в печать 19.08.2020. Формат 60×90 1/16. Усл. печ. л. 1,5.
Тираж 100 экз. Заказ № 1902.

Библиотечно-издательский комплекс
федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Тюменский индустриальный университет».
625000, Тюмень, ул. Володарского, 38.

Типография библиотечно-издательского комплекса.
625039, Тюмень, ул. Киевская, 52.