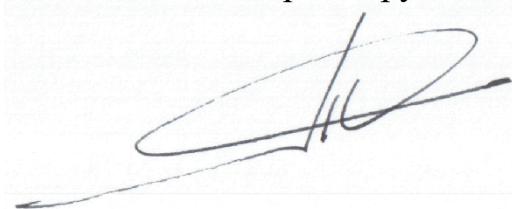


МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Уфимский государственный нефтяной технический университет»

На правах рукописи



СУЛТАНМАГОМЕДОВ ТИМУР СУЛТАНМАГОМЕДОВИЧ

**ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ МЕРЗЛОГО ГРУНТА НА ПРОДОЛЬНЫЕ
ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПОДЗЕМНОГО ТРУБОПРОВОДА**

Специальность: 2.8.5. – Строительство и эксплуатация
нефтегазопроводов, баз и хранилищ (технические науки)

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор физ-мат наук, профессор
Бахтизин Рамиль Назифович

Уфа 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТРУБОПРОВОДОВ В УСЛОВИЯХ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ	10
1.1 Обзор свойств многолетнемерзлых грунтов, их классификация	12
1.2 Геотехнический мониторинг магистральных трубопроводов на территории распространения многолетнемерзлых грунтов	18
1.3 Обзор моделей взаимодействия между подземным трубопроводом и мерзлым грунтом	23
1.4 Аналитические модели взаимодействия трубопровода с мерзлым грунтом, используемые в компьютерном моделировании	27
ВЫВОДЫ ПО ПЕРВОЙ ГЛАВЕ	36
ГЛАВА 2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ТРУБОПРОВОДА ПРИ РАСТЕПЛЕНИИ ВМЕЩАЮЩЕГО ГРУНТА	37
2.1 Планирование экспериментальных исследований	43
2.2 Результаты экспериментальных исследований.....	53
2.3 Моделирование стендового эксперимента в программном комплексе ANSYS Workbench	72
ВЫВОДЫ ПО ВТОРОЙ ГЛАВЕ	78
ГЛАВА 3 ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ НДС ТРУБОПРОВОДА ПРИ ПОВЫШЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ МЕРЗЛОГО ГРУНТА.....	79
3.1 Изменения продольных перемещений трубопровода при изменении температуры окружающего грунта	85
3.2 Результаты расчета НДС трубопровода при просадке численным методом...	93
ВЫВОДЫ ПО ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ:.....	102
ГЛАВА 4 НДС ТРУБОПРОВОДА В ПРОЦЕССЕ ПРОСАДКИ ТРУБОПРОВОДА	103
4.1 Постановка задачи.....	104

4.2 Граничные условия	107
4.3 Результаты расчета напряженно-деформированного состояния трубопровода при просадке грунта методом конечных элементов.....	110
ВЫВОДЫ ПО ЧЕТВЕРТОЙ ГЛАВЕ	126
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	128
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	130
Приложение А. Текст программы для опроса термодатчиков.....	145
Приложение Б	147

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. В последнее время все большее значение приобретают проблемы строительства сооружений в сложных природно-климатических и инженерно-геологических условиях. Многолетнемерзлые грунты (ММГ) составляют более 50 % территории месторождений Западно-Сибирского нефтегазового комплекса. Значительная часть таких грунтов теряют несущую способность при оттаивании. Для строительства трубопроводов в условиях ММГ приходится решать сложные инженерные задачи.

В процессе эксплуатации трубопровод может менять свои температурные режимы, что может привести к образованию ореолов растепления и изменению НДС трубопровода. Эти процессы способствуют потере проектного положения трубопровода. Наличие таких явлений послужило причиной для разработки новых конструкторских решений для поддержания трубопровода в проектном положении, систем мониторинга проектного положения и напряженно-деформированного состояния (НДС) трубопровода, а также выбора наиболее эффективных методов прокладки с целью надежной работы трубопроводов, проложенных в условиях ММГ. Для эффективного использования систем мониторинга и применения конструктивных решений необходимо иметь цифровую модель, описывающей с достаточной точностью поведение конструкции на оттаивающих грунтах.

На данный момент проблемы моделирования взаимодействия трубопровода с грунтом решаются такими программными комплексами, основанными на методе конечных элементов, как CPippe, Frost 3D, ANSYS и многие другие. Однако зависимости, которые используются в данных ПО, не отображают картину взаимодействия трубопровода с мерзлым грунтом в полной мере при изменении температуры и влажности грунта.

В работе проводится моделирование механического взаимодействия трубопровода с многолетнемерзлым грунтом с учетом изменения механических свойств

грунта от действия температуры, поскольку разнообразие и распространение грунтов очень сильно варьируется, практически невозможно найти два одинаковых грунта со схожими свойствами, а имеющиеся базы данных грунтов ранжируют значения механических величин в очень широком диапазоне. Этим фактом обосновывается необходимость проведения полунатурных испытаний непосредственно на объекте строительства (СП22.13330.2016, п. 5.1.12-5.1.14). Вводится взаимосвязь для механической и тепловой моделей трубопровод-грунт, также учитывается влажность грунтов. Технология позволит пересчитывать модели трубопровод-грунт в процессе эксплуатации трубопровода при изменении условий и физических свойств модели.

Данное исследование повысит достоверность моделирования, что позволит увеличить надежность трубопроводов, проложенных на многолетнемерзлых грунтах.

Степень разработанности темы исследования

Проблеме напряженно-деформированного состояния трубопроводов в условиях многолетнемерзлых грунтов посвящено большое количество трудов. Наиболее близкими к проведенным исследованиям являются работы П.П. Бородавкина, С.С. Вялова, П.И. Тугунова, Н.А. Цытовича, Н.А. Гаррис, Ю.В. Лисина, Ю.А. Велли, И.А. Гишкелюка, А.К. Дерцкаяна, Н.Н. Карнаухова, П.А. Пульникова, О.В. Трифонова, В.И Черникина, Х.А. Азметова, А.Б. Айнбиндера, С.М. Соколова, Г.Е. Коробкова, Р.М.Зарипова, И.А. Шаммазова, С.И. Голубина и др.

Соответствие паспорту заявленной специальности

Тематика и содержание диссертационной работы соответствуют паспорту научной специальности 2.8.5. – Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ, а именно пункту 2 – «Научные основы системного комплексного (мультидисциплинарного) проектирования конструкций, прочностных, гидромеханических, газодинамических и теплофизических расчетов сухопутных и морских систем трубопроводного транспорта для добычи, сбора, подготовки, транспортировки и хранения углеводородов, распределения, газоснабжения и

нефтепродуктообеспечения, подземных и наземных газонефтехранилищ, терминалов, инженерной защиты и защиты от коррозии, организационнотехнологических процессов их сооружения, эксплуатации, диагностики, обеспечения системной надежности, механической и экологической безопасности».

Целью диссертационной работы является оценка влияния температуры трубопровода на несущую способность вмещающего мерзлого грунта и продольные перемещения подземного трубопровода.

Основные задачи исследования:

1. Анализ известных моделей взаимодействия трубопроводов с ММГ с целью выявления факторов, влияющих на НДС трубопровода и разработка экспериментального метода определения зависимости коэффициента постели (коэффициент жесткости грунта) от температуры и влажности грунта при смерзании трубопровода с многолетнемерзлым грунтом.

2. Исследование продольных перемещений подземного трубопровода по поверхности контакта с замороженным грунтом при изменении механических свойств, вызванных изменением температуры и влажности.

3. Усовершенствование расчетной методики определения прогиба и напряженно-деформированного состояния участков трубопроводов с учетом изменения коэффициентов постели и механических характеристик грунта при растеплении участка мерзлого грунта.

4. Разработка конечно-элементной модели напряженно-деформированного состояния участка трубопровода, на границе участка с различными значениями модуля деформации дисперсных грунтов, для расчета оптимальных параметров конструкций трубопровода.

Научная новизна:

1. Получена зависимость коэффициента постели от температуры и влажности грунта при взаимодействии трубопровода конечной длины с многолетнемерзлым грунтом (супесь). Максимальные значения коэффициента постели на сдвиг достигаются при влажности 10%, и температуре грунта $-10..-5$ °С. Максимальные

прочностные свойства при сжатии грунт показывает при влажности 5%, и при температурах -10..-6 °С.

2. Выявлена зависимость продольных перемещений свободного конца полубесконечного трубопровода с грунтом при изменении механических свойств, вызванных изменением температуры. При изменении температуры грунта от минус 10 °С до минус 1 °С перемещения увеличиваются в 5 раз, длина зоны с пластическими деформациями грунта по поверхности контакта увеличивается в 6 раз, предельные касательные напряжения по контакту труба-грунт уменьшаются в 4,5 раза.

3. Получен критерий, позволяющий уточнить НДС трубопровода до 10%, при учете зависимости жесткости грунта от температуры и влажности.

Теоретическая значимость

Разработан алгоритм расчета НДС трубопровода при его просадках в условиях изменения механических свойств вмещающего грунта при растеплении. Разработан алгоритм определения продольных деформаций при изменении механических свойств грунта в условиях повышения температуры грунта.

Разработана конечно-элементная модель для определения НДС трубопровода при растеплении грунта. Модель позволяет оценивать НДС трубопровода при изменении механических характеристик слабдеформируемого и среднедеформируемых грунтов в зависимости от температуры.

Практическая ценность работы

Разработаны рекомендации по моделированию напряженно-деформированного состояния участков с просадочными пластичномерзлыми грунтами с учетом возможного интервала температур эксплуатации на стадии проектирования. Учет температуры и влажности грунта позволяет уточнить расчет эквивалентных напряжений до 10%, а также учитывать эти напряжения при разработке новых конструктивных решений при проектировании.

Разработан лабораторный стенд НДС подземных трубопроводов при подвижках грунтов (патент на изобретение RU2766839 С1).

Разработан лабораторно-экспериментальный стенд моделирования деформаций подземного трубопровода в замороженных грунтах, который используется при проведении исследований в ФГБОУ ВО УГНТУ и при проведении лабораторных занятий по дисциплине «Сооружение и ремонт газонефтепроводов», а также при подготовке выпускных квалификационных работ бакалаврами направления подготовки 21.03.01 «Нефтегазовое дело».

По материалам исследований разработано методическое пособие «Прочностной анализ в ANSYS Workbench» и одноименные онлайн-курсы, применяемые в учебном процессе в ФГБОУ ВО УГНТУ.

Методология и методы научного исследования

В исследовании применяются методы строительной механики и механики грунтов. При расчете НДС протяженного трубопровода используется метод конечных элементов (МКЭ). Механические свойства представленных грунтов определялись согласно ГОСТ. Цифровая модель механического взаимодействия трубопровода с грунтом спроектирована в программном комплексе ANSYS. Обработка экспериментальных данных произведена с помощью программ «Статистика», Python.

Положения, выносимые на защиту

1. Влияние изменения температуры и влажности грунтов на механические характеристики системы трубопровода конечной длины с многолетнемерзлым грунтом.

2. Зависимость коэффициентов постели и предельных касательных напряжений по контакту труба-грунт от температуры и влажности грунтов. Усовершенствованная расчетная методика определения НДС трубопровода при оттаивании участка грунта.

3. Влияние температуры и влажности грунта на степень прогиба и НДС трубопровода, проложенного в условиях ММГ, вследствие изменения коэффициентов постели грунта.

Степень достоверности и апробация результатов работы

Достоверность результатов исследований подтверждена данными экспериментального и численного моделирования. Результаты экспериментальных исследований были получены на поверенном оборудовании в соответствии с методиками, указанными в нормативной документации, а также основываясь на геометрическом и физическом подобии. Результаты экспериментальных стендовых исследований, были подтверждены данными компьютерного моделирования в лицензированном программном обеспечении. Результаты исследований не противоречат результатам аналогичных и близких к тематике научных работ, опубликованных в научной литературе.

Апробация. Основные положения диссертационной работы докладывались на следующих мероприятиях: Международные учебно-научно-практические конференции «Трубопроводный транспорт» (г. Уфа, 2019, 2020, 2021, 2022 гг.), Международные молодежные научные конференции «Нефть и газ» (г. Москва, 2021, 2022 гг.)

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 30 работ, в том числе 13 статей в ведущих рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК, из них 11 в журналах SCOPUS и Web of Science, 2 патента на изобретение, 1 патент на полезную модель и тезисы 15 докладов на научно-технических конференциях различного уровня.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, содержит 147 страниц машинописного текста, в том числе 15 таблиц, 50 рисунков и 5 приложений, библиографический список из 119 наименований.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТРУБОПРОВОДОВ В УСЛОВИЯХ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

Изучение условий эксплуатации магистральных и промысловых трубопроводов, проложенных в многолетнемерзлых грунтах, показывает, что без принятия особых, отличных от обычных условий, мер и методов возникают недопустимые деформации, затрудняющие эксплуатацию объектов нефтегазового комплекса и ведущую к инцидентам и авариям. В следующие двадцать лет прогнозируется более двухсот аварийных участков только лишь на магистральном трубопроводе ВСТО-1 вследствие оттаивания мерзлых грунтов.

Для обеспечения надежной эксплуатации магистральных трубопроводов необходимо качественно и количественно описать процессы, влияющие на перемещения трубопровода, на изменение НДС трубопровода при взаимодействии трубопроводов с мерзлым грунтом.

Проблемой напряженно-деформированного состояния трубопроводов в условиях многолетнемерзлых грунтов занималось немало ученых. Наиболее близкими к проведенным исследованиям являются работы [12-16, 19, 21, 22, 32, 38, 43-49, 62, 73, 75-77, 79, 85-87, 112-115]. Во многих из представленных работах используются метод конечных элементов и программное обеспечение на его основе для того, чтобы оценить воздействие элементов конструкции на слабонесущее основание. Так же моделируются процессы осадки основания и воздействие подобных процессов на надежность конструкции. На Рисунке 1.1 показывается распространение ММГ в России, в данных регионах становится актуальным моделирование процессов, причем данные процессы необходимо спрогнозировать перед тем, как произойдет авария. Работа направлена на моделирование трубопроводов в условиях ММГ, в Таблице 1.1 представлены системы трубопроводов, эксплуатируемые на многолетнемерзлых грунтах.



Рисунок 1.1 – Распространение мерзлых грунтов в России

Таблица 1.1 – Анализ подземных магистральных трубопроводов на ММП

№	Проект	Даты сооружения трубопровода	Длина, км	Диаметр, м	Глубина залегания, м	Примечание
1	Trans-Alaska Pipeline System,	1974-1977	1287	1,22	0,4-4,0	$t = 60^{\circ}\text{C}$ $Q = 2785-7570$ $\text{м}^3/\text{сут}$
2	Norman Wells Oil Pipeline	1980-1985	869	0,3048	-	$Q = 5000 \text{ м}^3/\text{сут}$
3	Golmud-Lhasa oil pipeline	1972-1977	1120	0,159	1,2-1,4	$Q = 2,5 \times 10^5 \text{ т/год}$, $P = 6,27-10,0 \text{ МПа}$ $t_{н} = -5-9^{\circ}\text{C}$ $t_{кр} = -41-24^{\circ}\text{C}$ $\delta = 14,3 \text{ мм}$
4	Нефтепровод Россия - Китай	2008-2010	953	0,914	1,5	$t = -6-10^{\circ}\text{C}$ $Q = 3,0 \times 10^7 \text{ т/год}$
5	ВСТО-1 (ESPO)	2006-2009	2694	1,020-1,220	1,2-4,0	$\delta = 12-22 \text{ мм}$ $Q = 58 \times 10^6 \text{ т/год}$ $P = 800 \text{ кг/м}^3$
5	ВСТО-2 (ESPO)	2009-2012	2046	1,067	1,2-4,0	$Q = 30 \times 10^6 \text{ т/год}$
6	Куюмба-Тайшет	2016-2020	705	0,530	-	$Q = 15 \times 10^6 \text{ т/год}$

1.1 Обзор свойств многолетнемерзлых грунтов, их классификация

Многолетнемерзлые грунты – это грунты, которые постоянно находятся в замерзшем состоянии на протяжении нескольких лет. Они имеют ряд особенностей и свойств, которые влияют на их классификацию.

Основные свойства многолетнемерзлых грунтов:

1. Механическая прочность: Многолетнемерзлые грунты обладают высокой механической прочностью из-за наличия льда в их структуре. Это делает грунты стабильными и устойчивыми к деформациям.

2. Низкая проницаемость: Замерзшая вода в грунтах создает плотную структуру, которая снижает проницаемость грунта. Это может приводить к образованию почвенного ледника и создавать препятствие для водопроницаемости.

3. Термальная инертность: Многолетнемерзлые грунты обладают низкой теплопроводностью и теплоемкостью, что делает их термически инертными и способными сохранять стабильную температуру в течение длительного времени без техногенного вмешательства.

4. Обратимость деформаций: Грунты способны восстанавливать свою структуру после оттаивания. Это позволяет им восстанавливать свои механические свойства и сохранять стабильность.

Классификация многолетнемерзлых грунтов осуществляется на основе различных факторов, таких как их состав, плотность, толщина мерзлого грунта и температурные режимы. В основе классификации лежат генетические и термические критерии.

По пределу прочности мерзлые грунты различают на скальные и полускальные. К скальным относят очень прочные, прочные, средней прочности и малопрочные. К полускальным относят пониженной прочности, низкой прочности и очень низкой прочности.

По температуре разделяют немерзлый (талый), охлажденный, мерзлый, морозный и сыпучемерзлый грунты.

По модулю деформации дисперсные грунты разделяют на Очень сильно деформируемые ($E < 5$ МПа), сильнодеформируемые ($5 < E < 10$ МПа), среднедеформируемые ($10 < E < 50$ МПа), слабодеформируемые ($E > 50$ МПа).

По относительной деформации морозного пучения грунты подразделяют на непучинистый, слабопучинистый, среднепучинистый и сильнопучинистый.

По льдистости дисперсные мерзлые грунты делят от слабольдистого до сильнольдистого и ледогрунта.

В зависимости от характера распространения многолетнемерзлых пород по площади выделяются области сплошного, прерывистого и островного развития (Рисунок 1.1). Чем севернее рассматриваемый регион, тем больше зона распространения мерзлых пород и тем ниже средняя годовая температура грунта и тем глубже находится скальный или непросадочный немерзлый грунт.

В работе рассматриваются участки редкоостровного и островного распространения. Наиболее большие по численности города в области редкоостровного распространения ММГ это Ханты-Мансийск, Усть-Ильинск, Иркутск, Чита. В зоне островного распространения находятся Мирный, Якутск, Норильск. Все остальные крупные города, которые находятся севернее и восточнее находятся в зоне массивно-островного распространения ММГ.

По природе структурных связей между частицами грунты разделены на три класса:

- скальные – с жёсткими кристаллизационными и цементационными связями;
- дисперсные – с физическими, физико-химическими и механическими связями. Для дисперсных грунтов выделяются подклассы связанных и несвязанных грунтов;
- мёрзлые – с дополнительными криогенными связями [62].

В зависимости от просадочности грунты классифицируются на четыре категории:

I категория – непросадочные грунты, дающие при оттаивании незначительную равномерную осадку;

II категория – малопросадочные грунты, дающие равномерную осадку до 10% глубины оттаявшего слоя;

III категория – льдонасыщенные грунты, дающие неравномерную осадку до 40% толщины оттаявшего слоя;

IV категория – грунты, содержащие крупные включения подземного льда, дающие при оттаивании провалы, термокарсты [38, 62, 66, 67].

В работе предполагается, что подземный трубопровод вводится в эксплуатацию, находясь в проектном положении. Однако в течение времени эксплуатации, на трубопровод действуют различные нагрузки, связанные, в том числе с процессами, происходящими в грунтах. Эти процессы могут быть связаны как с природными факторами, так и с факторами, которые возникают в результате эксплуатации трубопровода. В результате этих процессов трубопровод имеет продольные, горизонтальные и вертикальные перемещения. Также в отдельных случаях трубопровод может «скручиваться». Перемещение трубопровода может происходить как из-за действия веса трубопровода, продукта, изоляции, температурного перепада, внутреннего давления и других нагрузок, связанных с эксплуатацией трубопровода, так и из-за внешнего воздействия грунта, например, оползневой процесса, образования таликов, термокарстовых зон, вибрационного воздействия, тектонических движений плит и т. д. [30, 94].

К природным факторам можно отнести климатические изменения, термокарстовые и карстовые процессы, изменение количества солнечной радиации, изменение слоя снегового покрова, миграция влаги и др. К техногенным факторам относятся пуск трубопровода в эксплуатацию, смена режима перекачки, разрушение теплоизоляции трубопровода, строительные и ремонтные работы и др. [30].

При эксплуатации подземных нефтепроводов, проложенных на ММГ, опасность представляет формирование вокруг них ореолов растепления грунта. При оттаивании крупных включений подземного льда возможно возникновение термокарстовых провалов и просадок грунта.

Зависимость механических свойств от влажности и температуры.

На Рисунке 1.2 представлены зависимости временного сопротивления сжатию, полученные Н.А. Цытовичем для мерзлых грунтов при изменении температуры и влажности грунта [73]. На Рисунке 1.3 показана зависимость модуля сдвига образца мерзлого грунта от температуры, полученная П. Л. Швейковым [12]. На Рисунках 1.4, 1.6 (Н.А. Цытович) и Рисунке 1.5 (А.Е. Дюков) изображены зависимости модуля деформации от температуры, влажности и внешнего давления [19, 73].

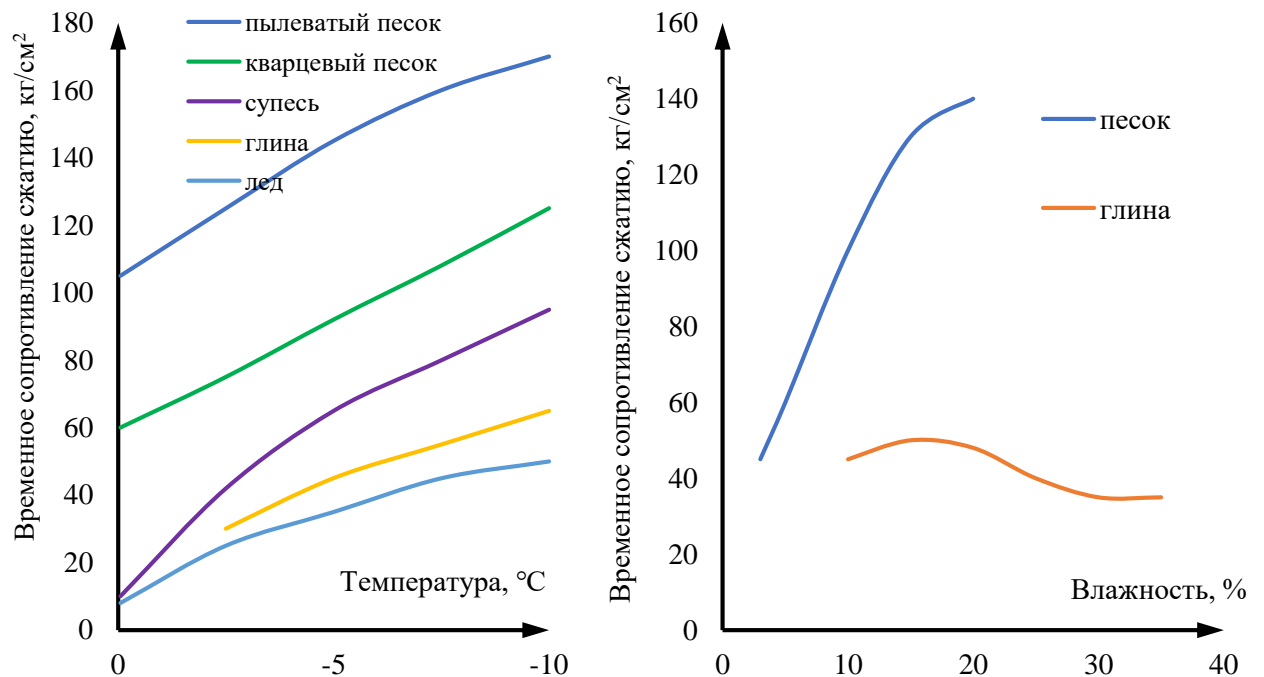


Рисунок 1.2 – Зависимость временного сопротивления сжатию мерзлых грунтов от температуры (а) и влажности (б) [73]

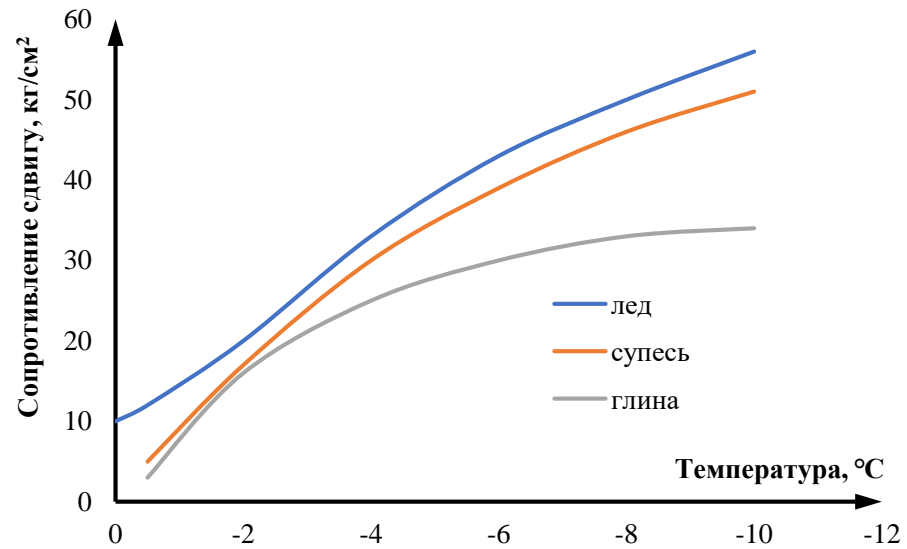


Рисунок 1.3 – Зависимость сопротивления сдвигу мерзлого грунта и льда от температуры [12]

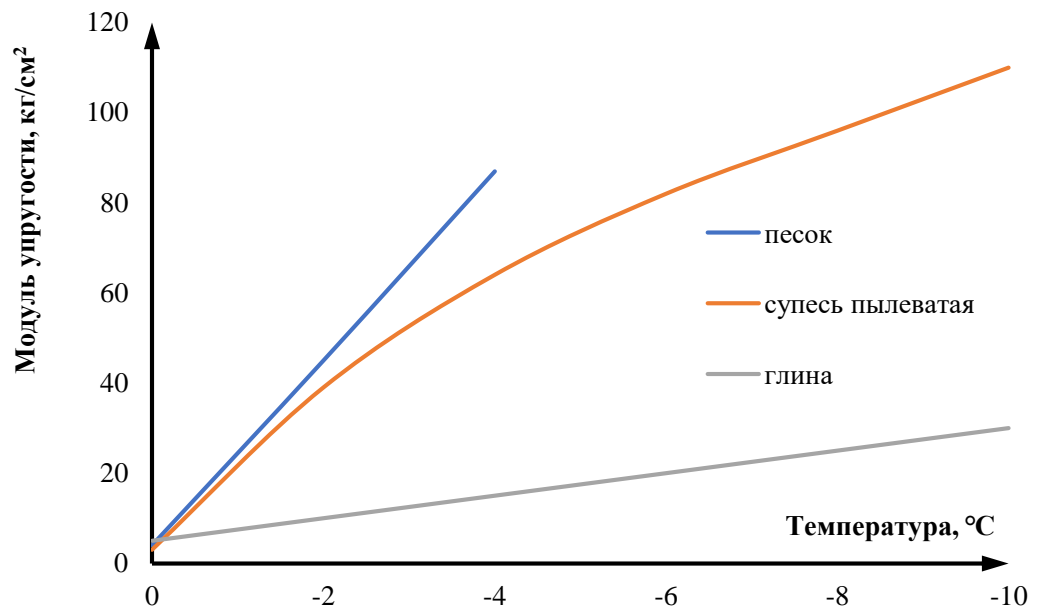


Рисунок 1.4 – Зависимость модуля деформации мерзлых грунтов от величины отрицательной температуры при давлении 2 кг/см² [73]

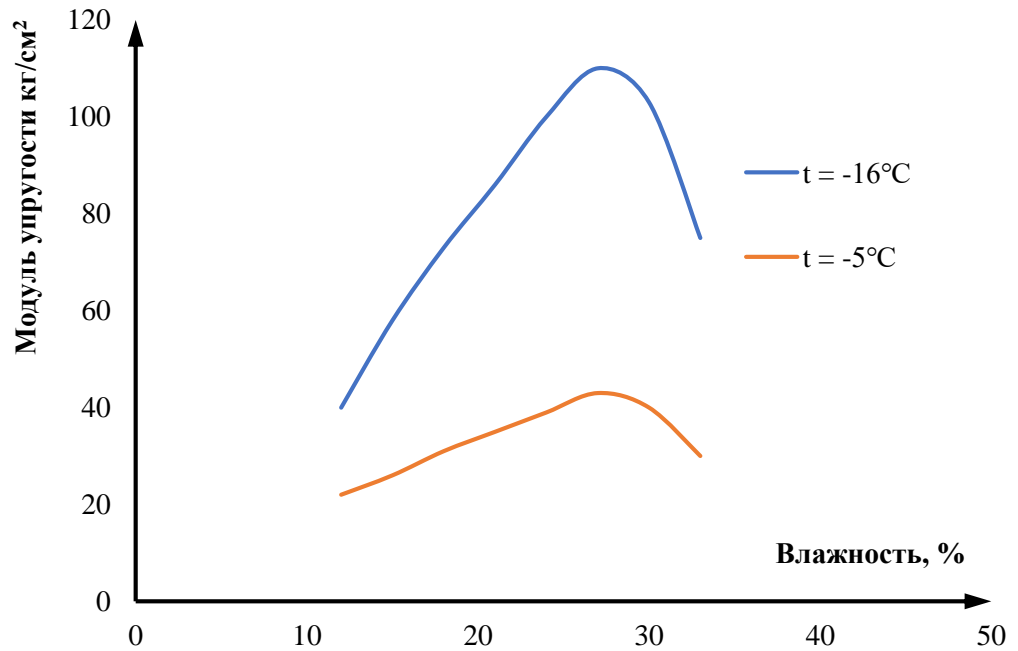


Рисунок 1.5 – Зависимость модуля деформации E (10^{-3} кг/см²) мерзлого суглинка от влажности ω , % и температуры t , °C при давлении 1 кг/см² (по А. Е. Дюкову) [19]

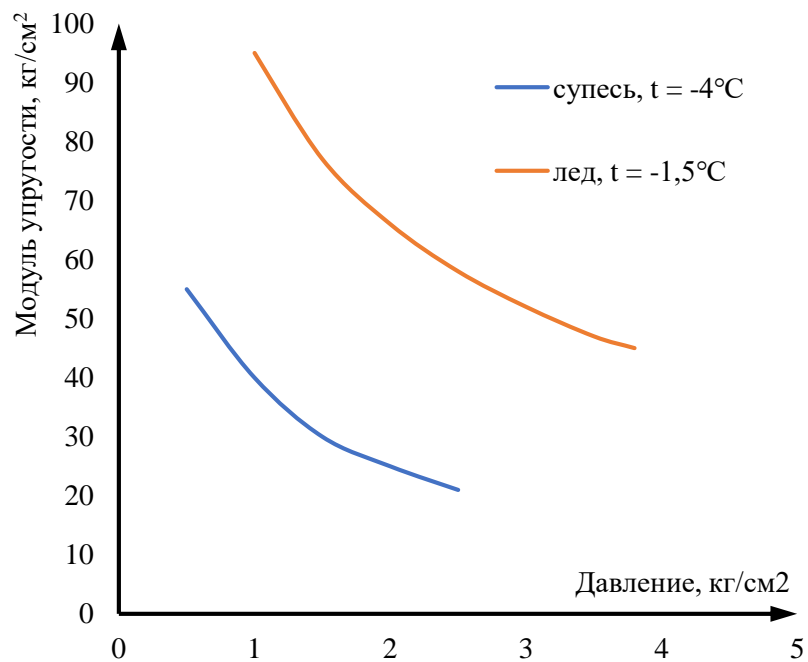


Рисунок 1.6 – Зависимость модуля деформации мерзлой супеси и льда от величины внешнего давления (по Н. А. Цытовичу) [73]

1.2 Геотехнический мониторинг магистральных трубопроводов на территории распространения многолетнемерзлых грунтов

Все больше начинают развиваться технологии проектирования трубопроводов в условиях многолетнемерзлых грунтов. Опасность строительства трубопровода в этих условиях заключается в критическом перемещении трубопроводов вследствие воздействия оползней, оттаивания многолетнемерзлых грунтов (ММГ), карстовых образований и др. Продольные и поперечные перемещения трубопровода могут влиять на надежность установленного оборудования, арматуры, в самом трубопроводе могут возникнуть критические напряжения.

На сегодняшний день контролировать напряженно-деформированное состояние трубопровода (НДС) можно с помощью различных систем:

- мониторинг НДС интеллектуальными вставками;
- мониторинг НДС волоконно-оптическими сенсорами;
- измерение НДС в шурфах;
- пропуск диагностических снарядов и другие [42, 107].

При проведении геотехнического мониторинга необходимо иметь документ, который содержал бы в себе методику прогнозирования изменения планово-высотного положения и напряженного состояния трубопровода. Так же методика должна содержать указания по определению величины ореолов растепления с помощью датчиков и с помощью числового моделирования [50, 51, 54]. Так же необходимо учитывать возможную деградацию тепловой изоляции и увеличение средних и максимальных температур в регионе строительства [52, 60].

При мониторинге необходимо определить изменение температур в грунте, начальное положение трубопровода и скорость изменения проектного положения, физические, механические и теплопроводные свойства грунта [52]. Так же необходимо знать геометрические и эксплуатационные характеристики трубопровода.

При эксплуатации трубопроводов в условиях ММГ возникает необходимость постоянного мониторинга перемещений трубопровода, поскольку контро-

лируемые процессы типа подвижек грунтов или оттаивания грунтов могут произойти неожиданно и очень стремительно, это вынуждает контролировать трубопровод на опасных участках прокладки с возможностью немедленно принять необходимые меры.

Система мониторинга НДС трубопровода в условиях ММГ должна обладать следующими характеристиками:

- мониторинг в режиме реального времени – для немедленного принятия мер по устранению инцидента;
- конкурентная стоимость системы – установка системы должна быть более привлекательной для заказчика;
- надежность системы и правильность результатов – случайные подвижки грунта не должны разрушать датчики системы мониторинга и влиять на результаты измерений;
- геометрические размеры, простота и удобство эксплуатации – система должна быть удобна в транспортировке, установке и ремонте. Так же это влияет на стоимость системы.

Полное ранжирование факторов, необходимых для контроля с помощью систем геотехнического мониторинга приведено в Таблице 1.2.

Таблица 1.2 – процессы в многолетнемерзлых грунтах

Тепломассообмен	Водные процессы	Гравитационные процессы	Внешние процессы
1	2	3	4
Термокарстовые процессы	Термоэрозия	Солифлюкация	Ветровая эрозия
Морозное пучение	Заболачивание	Курумообразование	Изменение количества солнечной радиации
Льдообразование	Термоабразия	Оползневые процессы, обвалы	
Криогенное выветривание	Образование включений льда	Лавинные процессы, сели	
Морозобойное растрескивание			

Наличие этих факторов может вызвать такие процессы, как пучение, осадки, всплытие, оползневые подвижки грунтов. При действии этих процессов трубопровод может испытывать различные деформации: он может выпучивать, проседать, всплывать, изгибаться, терять устойчивость под действием продольных сил. Эти процессы могут сопровождаться образованием ореола растепления, а может быть обратная ситуация, когда трубопровод оказывается холоднее температуры грунта и вмерзает в него. Также, вышеперечисленные процессы могут происходить без переноса тепла от трубопровода к грунту и наоборот.

При эксплуатации подземных нефтепроводов, проложенных в условиях ММГ, главную опасность представляет формирование ореолов растепления грунта при повышении температуры трубопровода. Такое явление может произойти при нарушении свойств теплоизоляции или отказах термостабилизаторов. Также необходимо помнить о повышении средней температуры планеты на 1,1 °С. Крупные включения подземного льда при последующем оттаивании могут образовывать просадку грунта, а при циклическом смерзании и оттаивании – термокарстовые трещины или бугры пучения.

Без необходимых инженерных мероприятий это приводит к повреждению трубопровода и разливу нефтепродуктов. Ореол растепления может быть также опасен и для объектов, находящихся рядом с трубопроводом: ЛЭП, вдольтрассовые дороги, запорная арматура и т.д.

На Рисунке 1.7 приведены примеры трубопроводов, потерявших свое проектное положение вследствие оттаивания многолетнемерзлых грунтов при повышении температуры эксплуатации.

В первом случае потеря устойчивости трубопровода происходит с выходом на поверхности из-за перепада температур и ухудшения сцепления грунта, в трубопроводе действуют продольные сжимающие силы. При постоянном растеплении и смерзании происходит перераспределение продольных напряжений, возможны небольшие деформации.

На втором и третьем Рисунке происходит оттаивание грунтов в летний период, поднятие грунтовых вод, что приводит к увеличению архимедовой выталкивающей силы. Также такие процессы возможны при местном отказе термостабилизаторов. На последнем Рисунке представлен трубопровод при повышении температуры эксплуатации с потерей теплоизоляционных свойств.



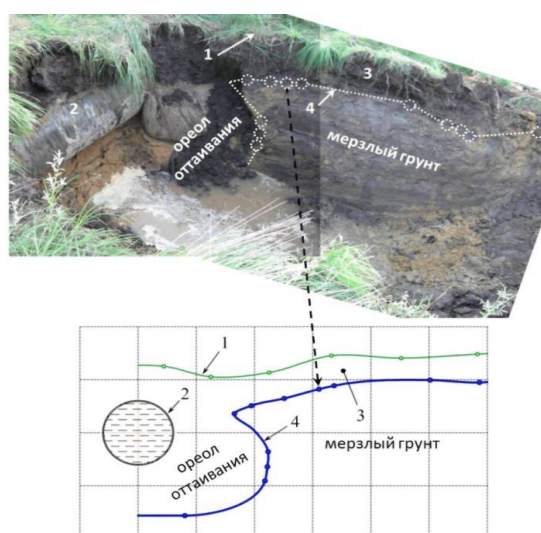
Рисунок 1.7 – Случаи потери проектного положения трубопровода

Во избежание подобных процессов предполагается устанавливать температурные и тензометрические датчики по длине трубопровода там, где это необходимо, по результатам анализа опасных участков (например, с учетом данных, полученных со спутников). Поскольку, как правило, доступ к таким участкам во время оттаивания осложнен, поведение трубопроводов по данным тензометрии моделируется дистанционно и при достижении критических отметок при вероятности аварии, опасный участок трубопровода отключается. Участок отключается для уменьшения веса и температуры трубопровода до тех пор, пока температура грунта не восстановится до нормальных значений.

Технология мониторинга ореола растепления вокруг трубопровода описана в работе [78] и показана на Рисунке 1.8.

С определенным шагом в шурфах в зимний период устанавливаются датчики температуры, которые измеряют температуру в поперечном сечении вдоль трубопровода. Показания датчиков сравниваются с теоретической моделью и делается вывод о скорости оттаивания грунта вокруг трубопровода. В случае геотехнического мониторинга трубопровода в ММГ, в тех сечениях, где установлены температурные датчики на трубопровод на верхние и на нейтральные волокна, будут установлены тензодатчики. Шаг установки температурных датчиков будет зависеть от сложения грунтов и температуры продукта, шаг установки тензодатчиков зависит от геометрии трубопровода и мест установки температурных датчиков.

Для поддержания оттаявшего трубопровода с стабильном устойчивом состоянии используются различные устройства опор [55, 58, 59], а также предлагаются мероприятия для создания дополнительного напряжения такого трубопровода, чтобы в процессе оттаивания эти напряжения компенсировали изгибающие напряжения [56, 57].



1 – дневная поверхность; 2 – трубопровод; 3 – сезонно-талый слой;

4 – граница ореола оттаивания [78]

Рисунок 1.8 – Определение границы ореола оттаивания грунта вокруг трубопровода

1.3 Обзор моделей взаимодействия между подземным трубопроводом и мерзлым грунтом

Цифровая модель системы «трубопровод – мерзлый грунт» и процессов, происходящих в процессе эксплуатации, предназначена для оптимизации геотехнического мониторинга трубопроводов в ММГ. Под цифровой моделью в данной работе подразумевается автоматизированная конечно-элементная модель, которая меняет свои геометрические характеристики, граничные условия и нагрузки в зависимости от данных мониторинга и диагностики. Такая модель позволила бы более точно и быстро обнаруживать наиболее напряженные места имеющихся трубопроводов и проводить более качественные проекты.

Для создания цельной конечно-элементной модели «трубопровод – мерзлый грунт» необходима разработка трех связанных между собой моделей – гидродинамической, тепловой и механической (Рисунок 1.9). В отдельности данные модели являются достаточно изученными для мерзлого грунта. Однако, на стыке двух моделей возникают определенные сложности. Имеются программные комплексы для расчета теплогидродинамической модели, такие как Frost 3D, позволяющие проводить расчет изменения влажности при различных температурах и гравитации, также данное ПО позволяет моделировать смерзание и оттаивание, строить температурные поля. Данный продукт, например, можно использовать для моделирования работы термостабилизаторов. На данный момент нет программных продуктов, позволяющих моделировать напряженно-деформированное состояние грунтов в зависимости от их влажности.

В диссертации делается акцент на тепломеханическую модель, а именно на моделирование ухудшения прочностных свойств грунта при повышении температуры трубопровода и влиянии этих процессов на моделирование напряженно-деформированного состояния трубопровода. Также затрагиваются вопросы обратного смерзания влаги и возникновения процессов пучения.

В Таблице 1.3 представлены аналитические и эмпирические модели, описывающие механизмы нестабильного поведения подземного трубопровода мерзлом грунте.



Рисунок 1.9 – взаимодействие моделей мерзлого грунта между собой

Таблица 1.3 – Краткое изложение методов исследования и соответствующих формул для оценки поведения взаимодействия между заглубленным трубопроводом и морозным пучением / оттаиванием в соответствии с опубликованной зарубежной литературой [93]

№	Автор-год	Модель	Формула	Примечание
1	Лаченбраш (1970)	Подземный подогреваемый трубопровод в мерзлоте	$\nabla^2 T_1 = \frac{1}{\alpha_1} \frac{\partial T_1}{\partial t}, y \geq 0, T > 0^\circ C, (x, y) \notin pipe$ $\nabla^2 T_2 = \frac{1}{\alpha_2} \frac{\partial T_2}{\partial t}, y \geq 0, T < 0^\circ C, (x, y) \notin pipe$	Взаимодействие подземного трубопровода и оттаявшего грунта в вечной мерзлоте Температура нефти: 70-80 °С Диаметр трубопровода: 0,122 м Диаметр ореола оттаивания: 0,61-0,915 м (несколько лет)

Продолжение Таблицы 1.3

№	Автор-год	Модель	Формула	Примечание
	Хуанг (1977)	Подземный теплый трубопровод в мерзлоте	$\nabla^2 T_1 = \frac{C_1}{K_1} \frac{\partial T_1}{\partial t}, y \geq 0, T_1 > T_f, (x, y) \notin pipe$ $\nabla^2 T_2 = \frac{C_2}{K_2} \frac{\partial T_2}{\partial t}, y \geq 0, T_2 < T_f, (x, y) \notin pipe$	Квазистатическая модель, используемая для прогнозирования ореола оттаивания вокруг заглубленного трубопровода в вечной мерзлоте
3	Никсон и др. (1983)	Подземный трубопровод на границе мерзлого и оттаявшего грунта	<p>Скорость подъема: $h = h_0 P_0 / P$</p> <p>Характеристики грунта: $\varepsilon = B\sigma, \nu = 0,5$</p>	Взаимодействие морозного пучения на подземный трубопровод при переходе от мерзлого к незамерзшему грунту. Грунт: упругий или нелинейный вязкий континуум. Трубопровод: пассивный элемент конструкции.
4	Конрад и Моргенштейн (1984)	Подземный холодный трубопровод в мерзлоте	<p>Тепловой поток: $\frac{1}{\alpha} \frac{dT}{dt} = \frac{d^2 T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr}$</p> <p>Морозное пучение: $\Delta h = 1,09\nu\Delta t + 0,09\varepsilon n\Delta X$</p>	Охлажденный трубопровод погружен в насыщенный влажной грунтом, а затем вокруг трубопровода возникло ледяное включение.
5	Никсон. (1992)	Подземный трубопровод в мерзлоте	<p>Тепловой поток:</p> $T_p = T_g + (T_0 - T_g) \cdot \exp\left(\frac{-H_c x}{QC_w}\right)$ $\sigma_{изг} = \rho d / 2$	Подземный трубопровод пересекает водные преграды в холодных условиях вечной мерзлоты, на суше; затем вокруг трубопровода возникает ореол оттаивания
6	Шах и Разакпур (1993)	Подземный трубопровод в иле и песке	<p>Содержание льда $W(\phi_{iw}) + I(\phi_{iw}) + G = 1$</p> <p>Транспортные уравнения</p> $\frac{\partial}{\partial t} = (\rho_w W + \rho_i I) + \nabla \cdot (\rho_w v_w) + \nabla \cdot (\rho_w v_i) = 0$	Модель морозного пучения жестким льдом, используется для оценки поведения подземного охлажденного газопровода.

Продолжение Таблицы 1.3

№	Автор-год	Модель	Формула	Примечание
7	Сельвадор и Шинд (1993)	Подземный трубопровод в мерзлом и оттаявшем грунте	Деформация: $d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^{(v)} + d\varepsilon_{ij}^{(e)} + d\varepsilon_{ij}^{(c)}$ Замороженный ореол: $\alpha = \alpha[\ln(\sigma_v), X(t)]$	Модель учитывает взаимодействие в переходной зоне между замерзшей и морозоустойчивой областью, которая вызывает замерзание ореола вокруг трубопровода.
8	Фориеро и Ладаньи (1994)	Подземный трубопровод в мерзлом и оттаявшем грунте	Напряжения: $\frac{\partial \sigma_{\Pi}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\varphi}}{\partial \varphi} + \frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\varphi\varphi}}{t} + F_r = 0$ $\frac{\partial \tau_{r\varphi}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\varphi\varphi}}{\partial \varphi} + \frac{2\tau_{r\varphi}}{r} + F_\varphi = 0$	Модель рассматривает постоянную скорость смещения как реакцию сопротивления нагрузке сопротивления при возрастании нагрузки на подземном трубопроводе, и затем наблюдаются структуры трещин в мерзлом грунте вокруг трубы.
9	Никсон и Макиннес (1996)	Подземный трубопровод в мерзлоте	Распределение температуры по длине трубопровода $T = T_g + (T_0 - T_g) \exp\left[\frac{-H_c x}{(C_0 F)}\right]$	Модель температуры подземной трубы, предсказывает замерзание и оттаивание вокруг трубопровода.
10	Разакпур и Ванг (1996)	Подземный трубопровод в иле и песке	Морозное пучение: $\Delta h = 0,09\eta\Delta z + 1,09U(t)\Delta t$ Потенциальная энергия: $\Pi = U - W_n - W_f$ Напряжения по контакту труба-грунт $P(x) = \alpha_1 \bar{P}_0 a_1^{(x/L_1)-1}$	Взаимодействие подземного трубопровода с замерзшим грунтом, моделируется с использованием зависящего от времени термомеханического процесса.
11	Сельвадурай и Конук (1999)	Подземный трубопровод в мерзлоте	Уравнение теплопроводности: $C \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T + L \rho_{(i)} \frac{\partial \theta_{(i)}}{\partial t}$ Скорость деформации: $d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^{(el)} + d\varepsilon_{ij}^{(vp)} + d\varepsilon_{ij}^{(h)} \delta_{ij}$ Модель балки: $[u] = [K][F]$	Полуаналитическая модель используется для изучения взаимодействия подземных трубопроводов и мерзлых грунтов.

Продолжение Таблицы 1.3

№	Автор-год	Модель	Формула	Примечание
12	Палмер и Вильямс (2003)	Подземный трубопровод в мерзлоте	Равномерная кривизна изгиба: $k > \frac{1}{1-2\nu} \frac{\nu}{p} \left[\frac{w}{\pi D^2 \gamma / 4} + \frac{4}{\pi} \frac{H}{D} \left(1 + \frac{fH}{D}\right) \right]$	Морозное пучение вызвало потерю устойчивости в подземном трубопроводе, наличие влаги в почве не учитывается
13	Хаулэдер (2006)	Подземный трубопровод в мерзлом и оттаявшем грунте	Определяющие перемещения уравнения: $EI \frac{d^4 w_A}{dx^4} + k'_s w_A = 0$ $EI \frac{d^4 w_B}{dx^4} + k'_s w_B - \alpha k'_s (w_B - w_e) = 0$ $EI \frac{d^4 w_C}{dx^4} = -F_p$	Нелинейное напряженно-деформированное поведение трубопровода и постпиковое снижение сопротивления в мерзлом грунте используются для прогнозирования взаимодействия грунт-труба.
14	Вен и др. (2010)	Подземный трубопровод в мерзлом грунте	Общее напряжение: $\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p + \varepsilon^{th} + \varepsilon^{ry} + \varepsilon^f$ $[\varepsilon] = [B][u]$	Простая термоупругопластическая модель для анализа напряжений и деформаций подземного трубопровода.

1.4 Аналитические модели взаимодействия трубопровода с мерзлым грунтом, используемые в компьютерном моделировании

К основным физико-механическим характеристикам грунта относятся пористость, влажность, плотность, модуль деформации, угол внутреннего трения и сцепление.

Процесс замерзания зависит не только от энергетических связей воды с другими компонентами грунта, но и от внешних условий: давления, величины отрицательной температуры, скорости ее понижения. Первые исследования изменения температуры грунта при промерзании были выполнены П.И. Андриановым [63, 65], затем Н.А. Цытовичем, А.П. Боженовой [73]. В настоящее время имеется

большое количество научных работ, посвященных исследованиям изменения температуры грунтов при промерзании и оттаивании в лабораторных и полевых условиях [11, 65, 122].

1.4.1 Тепловая модель теплообмена с трубопроводом по длине

При сбалансированном теплообмене механическая энергия, сообщаемая насосами перекачиваемой нефти, превращается в гидравлическую энергию потока. Гидравлическая мощность $Q\rho gH_{\text{бал}} = N_{\text{бал}}$ затрачивается на преодоление трения в нефтепроводе длиной L и в виде тепла поступает в окружающую среду. В результате с единицы длины трубопровода грунтом воспринимается тепло в размере $q_{\text{грунт}} = k\pi d(t_{\text{бал}} - t_e)$.

Из условия теплообмена запишем уравнение [85-87]:

$$Q\rho gH_{\text{бал}} = Q\rho gi_{\text{бал}}L = k\pi d(t_{\text{бал}} - t_e)L, \quad (1.1)$$

где Q – производительность нефтепровода;

ρ – плотность перекачиваемой нефти;

L – длина трубопровода;

H – балансный напор в нефтепроводе;

i – гидравлический уклон в нефтепроводе;

k – коэффициент теплопередачи от перекачиваемой нефти в окружающую среду, определяемой по следующей зависимости [85-87]:

$$\frac{1}{kd} = \frac{1}{\alpha_1 d} + \sum \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{1}{\alpha_2 d}, \quad (1.2)$$

где d – внутренний диаметр трубопровода;

D – наружный диаметр трубопровода;

d_i, d_{i+1} – внутренний и наружный диаметр трубы и слоев изоляционного покрытия;

λ_i – коэффициенты теплопроводности металла и слоев изоляционного покрытия;

α_1, α_2 – внутренний и внешний коэффициенты теплоотдачи.

Расчет тепло-потерь теплоизолированного нефтепровода в атмосферу является достаточно изученным, однако, при моделировании тепло-потерь в мерзлый грунт возникают сложности одновременного моделирования теплогидродинамической модели, особенно, если модель должна учитывать перемещения трубопровода. Характер распределения температур от оси трубопровода до мерзлого грунта представлен на Рисунке 1.10, а также в работах [34, 85-87] дается подробное описание теплопереноса в наземных и подземных трубопроводах.

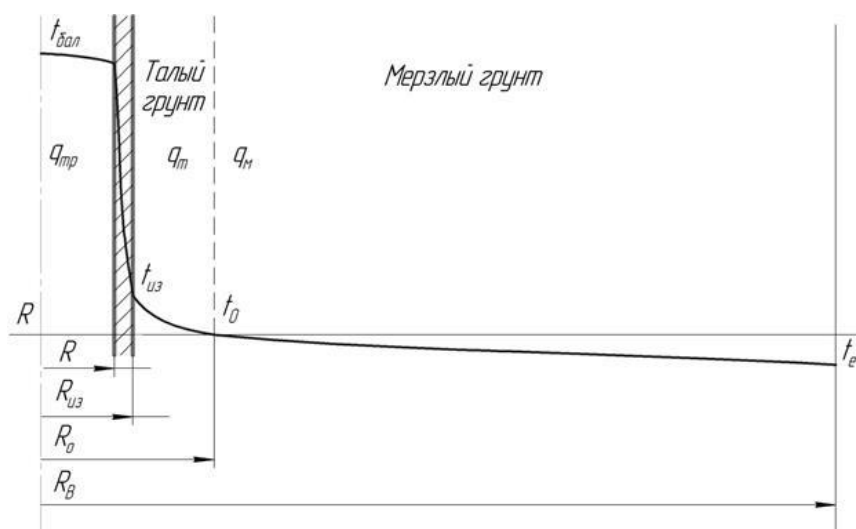


Рисунок 1.10 – Схема распределения температур в зоне теплового влияния нефтепровода [85]

1.4.2 Механическая модель

Для описания характера взаимодействия трубопровода с грунтом при перемещении используются следующие модели [9, 12-16, 53]:

- модель упругого грунта В.А. Флорина;
- модель упругого грунта П.П. Бородавкина;
- модель жестко-пластичного грунта Мора-Кулона;
- модель П.П. Бородавкина и О.Б. Шадрина;
- модель непрерывной связи.

Для определения продольных перемещений трубопровода используется коэффициент обобщенного сопротивления грунта k_u . Этот коэффициент характеризует напряжения по контакту труба-грунт. Эта модель справедлива при рассмотрении относительно небольших перемещений [12-16].

$$\tau_x = k_u u, \quad (1.3)$$

где τ_x – касательное напряжение по контакту труба – грунт при продольном перемещении;

k_u – обобщенный коэффициент сопротивления грунта при продольном перемещении;

u – линейное перемещение трубы.

Модель Мора-Кулона

Отдельно от физико-механических характеристик рассматриваются сжимаемость грунтов под воздействием внешних нагрузок и сопротивление грунтов сдвигу. В механике грунтов унификация всех типов грунтов представляется невыполнимой задачей, поэтому для учета особенностей каждого конкретного вида грунта разработаны различные экспериментальные методы [12].

С точки зрения перемещения подземного трубопровода необходимо рассматривать свойства грунта сопротивляться перемещениям. В зависимости от характера приложения, нагрузки различают:

- мгновенно приложенную и постоянно действующую;

- монотонно возрастающее продольное усилие P от нуля до предельного значения P_{np} ;

- монотонно изменяющееся во времени продольное усилие.

Модель Мора-Кулона (Рисунок 1.11) представляет собой зависимость касательных напряжений от величины нормальных напряжений [12-16]:

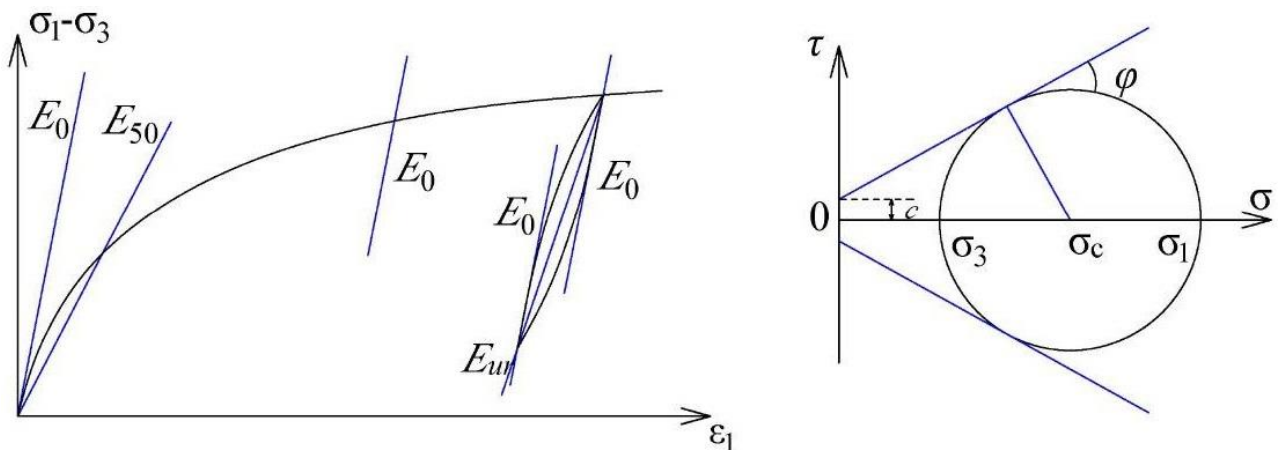
$$\tau = \sigma \cdot \operatorname{tg}(\varphi) + c, \quad (1.4)$$

где τ – касательные напряжения, Па;

σ – нормальные напряжения, Па;

φ – угол внутреннего трения, град;

c – сцепление грунта, Па [90, 102].



- 1) зависимость между нормальными напряжениями и осевыми деформациями при малых относительных деформациях 2) зависимость между нормальными и касательными напряжениями

Рисунок 1.11 – Модель Мора-Кулона

Помимо угла внутреннего трения φ , для описания модели Мора-Кулона требуется значение угла дилатансии ψ , который характеризуется изменением объема, наблюдаемым в зернистых материалах, когда они подвергаются сдвиговым

деформациям [90]. В моделях грунта, предлагаемых в ПО ANSYS, «Hardening Soil» и Мора-Кулона угол дилатансии принимается постоянным, и для песка в среднем по плотности и плотном состоянии определялся из условия $\psi = \varphi - 30$, град [90, 102].

Деформации грунтов оснований зданий и сооружений определяются с использованием упругих параметров: модуля деформации E ; модуля сдвига G , модуля объемной деформации K и коэффициента Пуассона μ . В большинстве случаев основание является многослойным и модули деформации могут изменяться значительно от слоя к слою, возрастая, как правило, с глубиной. Основными упругими параметрами являются модуль деформации и коэффициент Пуассона. Используя решения теории упругости, остальные модули определяются с использованием выражений, которые приведены в табл. 1.4. В Таблице 1.5 представлены экспериментальные методы получения вышеупомянутых параметров. В Таблице 1.6 представлены средние значения модуля деформации в зависимости от типа грунта.

Таблица 1.4. Взаимосвязь между модулями деформаций грунтов [107]

Обозначение	Модуль сдвига, G	Модуль деформации, E	Модуль объемной деформации, K	Коэффициент Пуассона, μ
G, E	G	E	$\frac{GE}{9G - 3E}$	$\frac{E - 2G}{2G}$
G, K	G	$\frac{9GK}{3K + G}$	K	$\frac{3K - 2G}{2(3K + G)}$
G, μ	G	$2G(1 + \mu)$	$\frac{2G(1 + \mu)}{3(1 - 2\mu)}$	μ
E, μ	$\frac{E}{2(1 + \mu)}$	E	$\frac{E}{3(1 - 2\mu)}$	μ

Модуль деформации или как его называют в механике сплошной среды – модуль Юнга является коэффициентом пропорциональности зависимости «деформация-напряжение», предложенной Гуком в виде:

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} \sigma_z. \quad (1.5)$$

В данном уравнении каждому равному приращению одноосного напряжения σ_z соответствует пропорциональное возрастание деформации ε_z . В Таблице 1.4.2 приведены лабораторные методы определения модулей деформации.

Таблица 1.5 – краткое описание методов определения модулей деформации грунтов

Тип испытаний	Описание метода
Одноосное сжатие	Определение модуля деформации, E . Увеличение σ_1 при постоянных $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$.
Гидростатическое (всестороннее) сжатие	Определение модуля объемной деформации, K . Увеличение $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ равным образом.
Простой сдвиг	Определение модуля сдвига, G . После гидростатического нагружения $\sigma_0 = \sigma_{акт} = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$ остается постоянным, но два других напряжения изменяются $\Delta\sigma_1 = -\Delta\sigma_3$, $\Delta\sigma_2 = 0$.
Компрессионное сжатие	Определение компрессионного модуля деформации, E_d . Увеличение σ_1 при невозможности бокового расширения $\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0$.
Стандартное трехосное сжатие	Определение касательного модуля деформации, E_t при сжатии. После гидростатического нагружения до σ_0 , σ_1 возрастает, а $\sigma_2 = \sigma_3 = \text{const}$ до разрушения.
Стандартное трехосное расширение	Определение касательного модуля деформации, E_t при расширении. После гидростатического нагружения до σ_0 , $\sigma_2 = \sigma_3$ возрастают, а $\sigma_1 = \sigma_0$.

Таблица 1.6 – значения модулей деформации грунтов

Вид грунта	Модуль деформации, E , МПа
Очень мягкие глины	0,5-5,0
Мягкие глины	5,0-20,0
Полутвердые глины	20,0-50,0
Твердые глины	50,0-100,0
Песчаные глины	25,0-200,0
Рыхлые пески	10,0-20,0
Плотные пески	25,0-100,0
Гравелистые грунты	100,0-200,0

Сопротивление мерзлого грунта сдвигу зависит от нормального давления, плотности, влажности, текстуры:

$$\tau_t = c_t + ptg(\varphi_t), \quad (1.6)$$

где c_t – сцепление грунта;

p – нормальное давление;

φ_t – угол внутреннего трения.

c_t и φ_t зависят от времени воздействия сдвигающей нагрузки и температуры грунта.

Модель Винклера

Как правило, моделирование взаимодействия грунта с трубопроводной системой осуществляется на основании теории, описанной в трудах [20, 36, 39]. В качестве трубопровода рассматривается балка на упругом основании.

Программные комплекс и аналоги рассматривают следующие перемещения трубопровода в грунте: вдоль оси трубопровода, поперечное перемещение (вбок), вверх и вниз (Рисунок 1.12). Сопротивление грунта в разных направлениях рассматриваются независимо друг от друга.



Рисунок 1.12 – Моделирование трубопровода в грунте с помощью пружин с заданной жесткостью, характеризуемой коэффициентами постели на сдвиг k_u и на сжатие k_0

Для определения НДС трубопровода в определенный момент времени необходимо знать жесткость грунта в трех направлениях. Предполагается разбивка трубопровода на конечные элементы. Где каждый узел, это начало или конец маленького участка трубопровода. Трубопровод между двумя узлами является конечным элементом, чем меньше длина такого конечного элемента, тем точнее расчет, и, наоборот. К каждому узлу «прикреплены» пружины различной жесткости, причем жесткость зависит от температуры грунта. Причем, реакции в этих пружинах будут сосредоточенными, а не распределенными, поэтому должен быть установлен максимально-допустимый размер конечного элемента. Обычно, минимальная длина конечного элемента устанавливается равной диаметру трубопровода, максимальная – 5-6 диаметров трубопровода (на протяженных прямолинейных участках).

ВЫВОДЫ ПО ПЕРВОЙ ГЛАВЕ

1. Рассмотрены основные механические и физические свойства многолетнемерзлых грунтов, а также экспериментальные исследования зависимости прочностных характеристик мерзлых грунтов от влажности и температуры грунта.

2. Изучены основные модели взаимодействия многолетнемерзлого грунта с трубопроводом, разработанные зарубежными и отечественными учеными. Рассмотрены теоретические и экспериментальные модели гидродинамического, теплового и механического взаимодействия трубопровода с многолетнемерзлым грунтом.

3. Обоснована необходимость геотехнического мониторинга напряженно-деформированного состояния трубопроводов, проложенных на участках с сезоннооттаивающими просадочными грунтами, а также трубопроводов, эксплуатируемых при циклических перепадах температур в условиях мерзлых грунтов.

4. Рассмотрены механические характеристики грунтов, используемые в компьютерном моделировании с помощью метода конечных элементов. Определены основные методы экспериментального определения механических характеристик грунтов (модуль деформации, угол внутреннего трения, сцепление, модуль сдвига, коэффициент Пуассона и др.), для последующего использования полученных данных в моделировании.

ГЛАВА 2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ТРУБОПРОВОДА ПРИ РАСТЕПЛЕНИИ ВМЕЩАЮЩЕГО ГРУНТА

Основной проблемой трубопроводного транспорта в условиях ММГ является изменение проектного положения трубопровода на протяжении всего периода эксплуатации. Однако трубопроводы не работают при постоянных объемах и температурах перекачиваемого продукта. Там, где предполагается использование основания по II принципу (основания используются в предварительно оттаявшем состоянии) предусматриваются конструктивные решения для поддержания проектного положения трубопровода. Однако, при отказе термостабилизаторов, нарушении теплоизоляции или регулировании температуры трубопровода, может увеличиться ореол оттаивания и ореол растепления. Этот сценарий опасен повышением температуры грунта и потерей несущей способности, и может привести к потере устойчивости или потере проектного положения трубопровода. Распределение температуры грунта вдоль трубопровода показано на Рисунке 2.1. Чтобы предотвратить подобные процессы, необходимо уметь прогнозировать и предупреждать процессы, описанные в предыдущей главе.

Модель, описывающая температуру трубопровода по длине трубопровода представлена в работе [85]. Для моделирования теплопередачи в грунте используется модель эквивалентной теплопроводности. Параметры производительности и температуры грунта определяются следующей системой уравнений [85-87]:

$$\rho \frac{\partial v}{\partial \tau} + \rho v \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g \sin \alpha_z + \frac{2\tau_{mp}}{R}; \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} = -\rho \frac{\partial v}{\partial z}; \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + v \frac{\partial t}{\partial z} = \frac{2\pi R q(t)}{\rho c F} + \frac{v}{c} \cdot \frac{dh}{dz}, \quad \text{где } q(t) = \frac{\lambda_i}{2\pi R} \int_0^\pi \frac{\partial t_i}{\partial r} \Big|_{r=R} dr; \quad (2.3)$$

$$H = H' - k_0 Q^{b_0}; \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial t_i}{\partial \tau} = a_i \left(\frac{\partial^2 t_i}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial t_i}{\partial r} \right), R_i \leq r \leq R_{i+1}, \quad (2.5)$$

где, ρ – плотность перекачиваемого продукта;

p – давление, создаваемое насосными агрегатами;

v – скорость движения продукта;

α_r – угол между трубопроводом и горизонтальной плоскостью;

τ_{mp} – сдвигающие напряжения трения между жидкостью и стенкой трубы;

R – внутренний радиус трубопровода;

$q(t)$ – тепловой поток, проходящий через стенку трубопровода;

F – площадь поперечного сечения трубопровода;

c – удельная теплоемкость перекачиваемого продукта;

h – потери напора на трение по длине;

H, H' – напор центробежного насоса при подаче Q и нулевой подаче;

k_0, b_0 – эмпирические коэффициенты, зависящие от типа насосного агрегата;

λ_i – коэффициент теплопроводности;

t_i, a_i – температура и коэффициент постели слоя системы «трубопровод – грунт» (металл трубопровода, изоляция, талые и мерзлые грунты);

τ – время;

r – радиус, в котором рассчитывается температура;

R_i – расстояние от центра трубопровода до каждого слоя системы «трубопровод – грунт».

Для прогнозирования поведения грунта предполагается по трассе трубопровода с определенным шагом устанавливать датчики температуры и влажности грунта для систематического пересчета математической модели перемещений участков трубопровода. Модель строится методом конечных элементов согласно [23]. На основе заранее проведенных экспериментальных исследований на всех типах грунта, встречающихся по трассе трубопровода

делается пересчет их свойств при изменении влажности и температуры грунта [37]. При технологической необходимости изменения температуры продукта проводится аналитическое исследование о возможности повышения температуры с точки зрения недопущения критического НДС, и далее, данные датчиков считываются на всем периоде эксплуатации с целью пересчета НДС трубопровода в режиме реального времени, (температура определяется по методике, предложенной в [29]). Влияние внешних факторов на температуру грунта подробно изучено в работах [85-87].

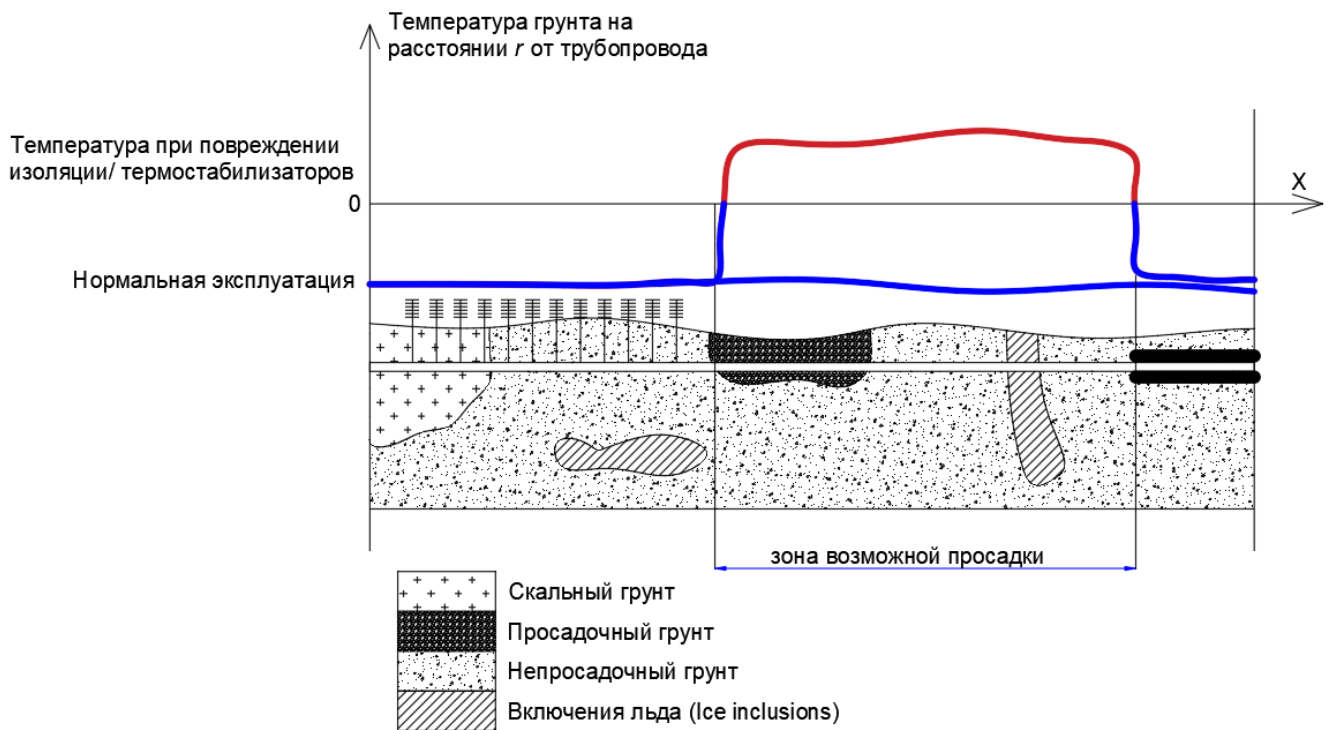


Рисунок 2.1 – распределение температуры трубопровода по длине и ее влияние на механические свойства системы «трубопровод-грунт»

При изменении температуры трубопровода по длине в процессе эксплуатации по поверхности контакта трубопровода с грунтом возникают касательные напряжения. На Рисунке 2.2 показан процесс продольного деформирования трубопровода. При увеличении деформации первый участок грунта (очень сильно

деформируемый грунт) работает сначала в упругой зоне, затем переходит в пластичное состояние. Далее начинает деформироваться второй участок трубопровода в зоне распространения грунта с отличными от первого участка свойствами, который так же сначала работает в упругой зоне, далее достигается его предельной состояние, и начальная длина деформированного трубопровода увеличивается с ростом продольного усилия P .

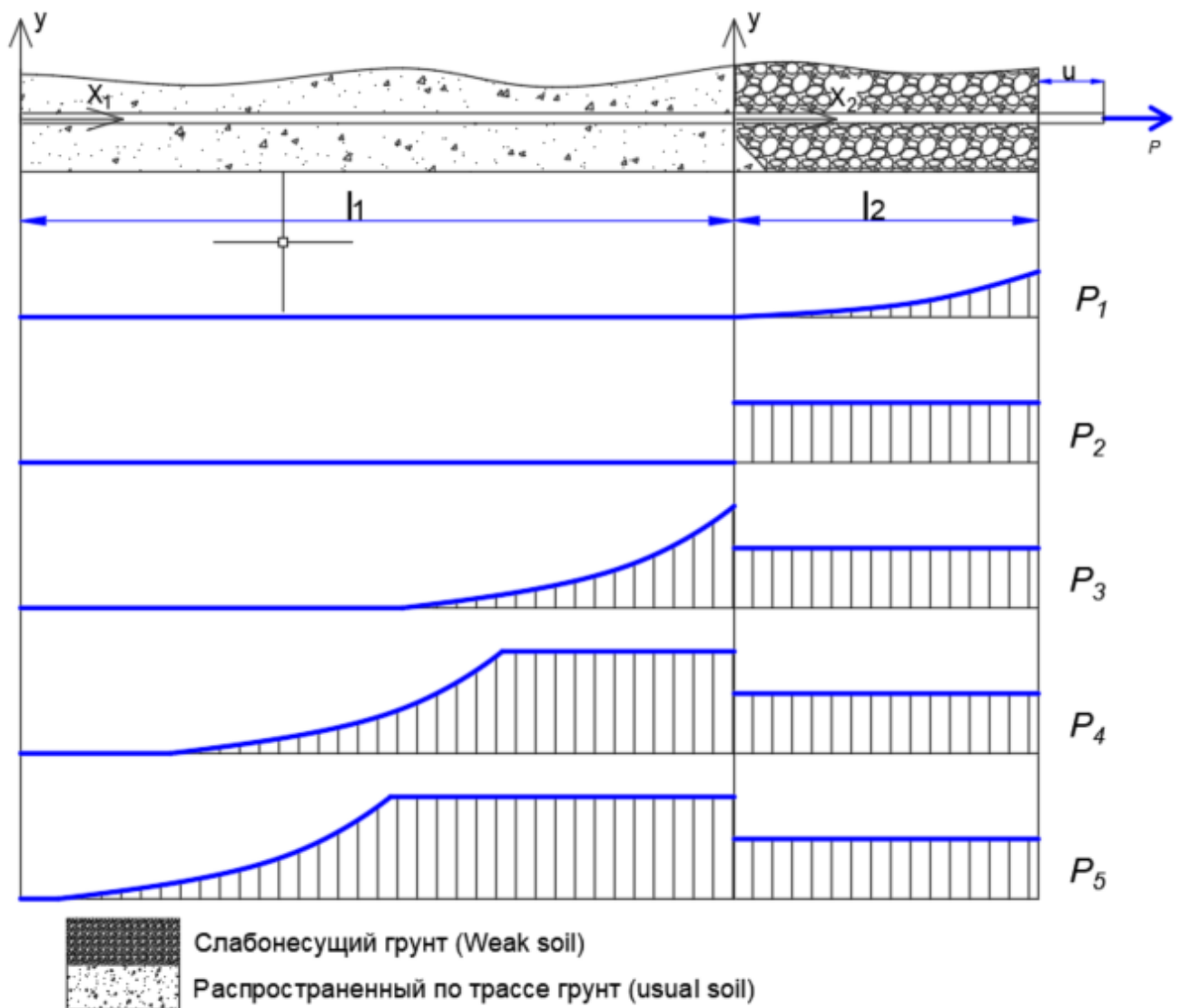


Рисунок 2.2 – Распределения касательных напряжений в процессе перемещения трубопровода в следствие его деформации, $P_1 < P_2 < P_3 < P_4 < P_5$

Уравнение упругих перемещений трубопровода в однородном грунте описывается с помощью следующей зависимости:

$$u = C_1 ch\beta x + C_2 sh\beta x, \quad (2.6)$$

где

$$\beta^2 = \frac{\pi D_n k_u}{EF}, \quad (2.7)$$

C_1, C_2 – постоянные, определяемые из граничных условий ($x = 0, u = 0, x = l_1, du/dx = P/EF$); D_n – наружный диаметр трубопровода, E – модуль упругости трубопровода, F – площадь сечения стенки трубы.

Уравнение перемещений при $\tau > \tau_{кр}$ пропорционально усилиям по модели Флорина: $u = \tau_{кр}/k_u$.

При смешанном распространении грунтов необходимо назначить каждому участку собственную систему координат, как показано на Рисунке 2.2. Далее составляются уравнения, число которых соответствует количеству типов грунтов на рассматриваемом участке:

$$\begin{aligned} u_1 &= C_1 ch\beta_1 x_1 + C_1' sh\beta_1 x_1; \\ u_2 &= C_2 ch\beta_2 x_2 + C_2' sh\beta_2 x_2; \\ &\dots \\ u_n &= C_n ch\beta_n x_n + C_n' sh\beta_n x_n. \end{aligned} \quad (2.8)$$

Для определения постоянных C_n и C_n' записываем необходимое количество граничных условий:

$$\begin{aligned}
x_1 = 0, u_1 = 0, x_1 = l_1, u_1 = u_0; \\
x_2 = 0, u_2 = u_0, x_2 = l_2, u_2 = u_0; \\
x_3 = 0, u_3 = u_0, x_3 = l_3, u_3 = u_0; \\
\dots \\
x_n = 0, u_n = \chi, x_n = l_n, \frac{du_n}{dx_n} = \frac{P}{EF}.
\end{aligned}
\tag{2.9}$$

Полное решение данной системы уравнений для двух участков грунтов приведено в труде [14]. В рамках данной работы смешанное распространение грунтов подразумевает собой неравномерное распределение температуры в процессе эксплуатации. Таким образом необходимо знать зависимость k_u для зоны упругого взаимодействия трубопровода с грунтом и $\tau_{кр}$ для пластичной зоны взаимодействия с грунтом.

2.1 Планирование экспериментальных исследований

Объектом экспериментального исследования является участок трубопровода на границе оттаявшего и мерзлого грунта. Моделируемый участок изображен на Рисунке 2.3 на границе двух грунтов. Предполагается, что трубопровод находится в прямолинейном положении, основанием для трубопровода служит мерзлый грунт, который находится в твердом состоянии. Справа и слева от просадочного грунта находится непросадочный грунт, который деформируется незначительно по сравнению с непросадочным грунтом при повышении температуры грунта. В данной расчетной схеме трубопровод под действием собственного веса начинает перемещаться вниз (проседать) или вверх (при действии морозного пучения), увлекая за собой участки трубопровода слева и справа от рассматриваемого участка. При данном процессе величина просадки и НДС трубопровода будет зависеть от продольного перемещения концов, то есть от податливости ($\tau_{кр}$ и k_u) грунта слева и справа. Температура грунта, который был в твердом мерзлом состоянии, теперь повышается, и грунт начинает проседать, модуль деформации и модуль сдвига просадочного грунта меняют свои значения в худшую сторону из-за повышения температуры грунта.

За основные факторы эксперимента принимаются:

- температура, t , °С. Температура грунта варьируется от минус 10 до плюс 5 °С. При такой температуре грунта на глубине 1-2 метра эксплуатируются магистральные трубопроводы. Основная область исследования рассматривается от минус 5 до 0 °С.

- влажность, w , %. Влажность варьируется от 5 до 15%. Верхняя граница определяется тем, что при данной температуре грунт теряет свои несущие свойства. Нижняя граница объясняется тем, что при влажности грунта ниже 5% температуры не влияет на несущие свойства грунта.

- отношение средней глубины заложения к диаметру – относительная глубина заложения, h_{cp}/d . Глубина заложения выбрана из соображений, что трубо-

провод моделируется диаметром 530 мм, при отношении $h_{cp}/d < 2$ трубопроводы не прокладываются (минимальная глубина залегания – 1,2 м). При относительной глубине $h_{cp}/d > 5$ образуется свод естественного обрушения, при такой глубине магистральные трубопроводы практически не прокладываются.

Значения основного уровня и интервала варьирования контролируемых факторов представлены в Таблице 2.1.

Также имеется дрейфующий фактор – плотность. Данный фактор необходимо стараться оставлять величиной постоянной. Во время проведения эксперимента необходимо добиться неизменяемости данного фактора. Все четыре фактора не зависят друг от друга.

Параметрами оптимизации выбраны коэффициент постели на сдвиг ($k_u = y_1$) и критическое касательное напряжение ($\tau = y_2$).

Таблица 2.1 – Значения факторов и интервалов варьирования

	$x_1 = t$	$x_2 = w$	$X_7 = h_{cp}/d$
Основной уровень	-2,5	7,5	3,4
Интервал варьирования	7,5	7,5	1,4

Поскольку известна подобласть, в которой процесс протекает достаточно хорошо, то выбирается центр подобласти (-5;10;3,4). Под наилучшей точкой понимается значение влажности и температуры при которой значение y_1 и y_2 максимальны.

Выбор интервала варьирования зависит от доли величины коэффициента постели в области определения фактора. Поскольку интервал составляет более 30%, то интервал является широким.

Точность фиксирования факторов является средней, диапазон изменения параметров оптимизации – широкий, характеристика кривизны поверхности отклика – неизвестна.

Экспериментальная модель для определения свойств механических свойств конечного элемента системы «Трубопровод – грунт» представлена на Рисунке 2.4. На данной модели проводилось изучение зависимости перемещений от прикладываемых усилий в различных направлениях при изменении температуры грунта.

Экспериментальная установка представляет собой теплоизолированный металлический лоток отверстиями по торцам, в которые помещается трубопровод, лоток заполняется изучаемым грунтом. Усилия в канате измеряются динамометром, установленным между трубой и грузом (1). Перемещения трубопровода измеряются с помощью индикатора часового типа (2). Усилия к трубе прикладываются с помощью грузов, перекинутых через шкив (3). Трубопровод оборудован инфракрасным регулируемым нагревательным элементом (Рисунок 2.5), установленным внутри трубопровода. Помимо деформаций измеряются радиусы ореолов растепления участка грунта. Для этого используются терморезисторы, установленные сверху, сбоку и снизу трубы (Рисунок 2.6). Сверху лоток закрывается теплоизолированной крышкой, моделируя зимние условия, или остается открытым, моделируя летние условия эксплуатации. На крышку сверху устанавливаются грузы для моделирования глубины заложения: чем больше груз, тем больше глубина заложения. Лоток с грунтом и трубой отделяется от всей конструкции для помещения в морозильник.

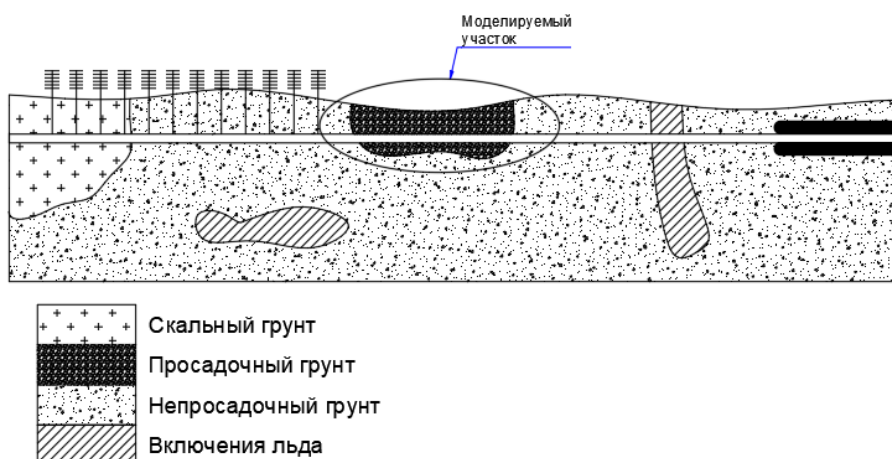


Рисунок 2.3 – Перемещение трубопровода вследствие увеличения температуры грунта

1) Нагрузки контролируются цифровыми динамометрами, установленными между болтовым соединением и трубопроводом, абсолютная погрешность $\Delta = 0,05$ Н. Болтовое соединение жестко заделано в неподвижную стенку и не имеет случайных перемещений.

2) Температура контролируется терморезисторами, относительная погрешность которых составляет $\delta = 1$ %. Измерение происходит с помощью разработанной системы Arduino.

3) Перемещения контролируются индикатором часового типа (ИЧ), абсолютная погрешность $\Delta = 15$ мкм. ИЧ устанавливаются на штативах.

Контролируемые параметры модели:

- X_1 – начальная температура грунта $T_{\text{экспл.}}$, [°C];
- X_2 – относительная влажность грунта $\omega = m_e/m_{\text{ср}}$, [%],
- X_3 – температура эксплуатации (температура теплоносителя) $T_{\text{экспл.}}$, [°C];
- X_4 – продольные усилия F , [Н];
- X_5 – давление на крышку p , [кПа];
- X_6 – время проведения опыта t , [сек].

Косвенные параметры модели:

- X_7 – глубина заложения $h_{\text{ср}} = h_0 + p/\rho g$, [мм];
- X_8 – касательные напряжения $\tau = F/\pi D l$, [кПа];

где h_0 – расстояние от оси трубопровода до плоскости засыпки грунта, ρ – плотность грунта, g – ускорение свободного падения, D – диаметр трубопровода, l – длина контакта трубопровода с грунтом, m_e – масса воды в лотке, $m_{\text{ср}}$ – масса сухого грунта в лотке.

Регистрируемые параметры модели:

- Y_1 – коэффициент постели на сдвиг k_u , [МН/м³];
- Y_2 – предельные касательные напряжения $\tau_{\text{кр}}$, [МН/м³];
- Y_3 – температура грунта в процессе эксперимента $T_{\text{экспл.}}$, [°C];
- Y_4 – осевые перемещения трубопровода u , [мм];
- Y_5 – радиус ореола растепления R , [мм];

- Y_6 – сцепление грунта c , [кПа];
- Y_7 – угол внутреннего трения грунта φ , [град].

На Рисунках 2.6 и 2.7 приведены фотографии экспериментальной установки и схемы подключения датчиков к измерительной системе Arduino.

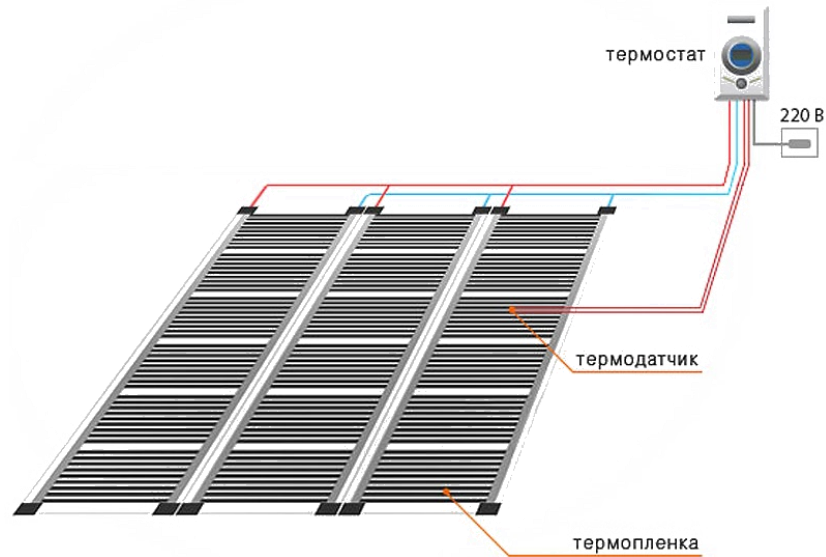


Рисунок 2.5 – Регулируемый инфракрасный нагревательный элемент



Рисунок 2.6 – Датчик системы измерения температуры вокруг грунта и их расположение вокруг трубопровода

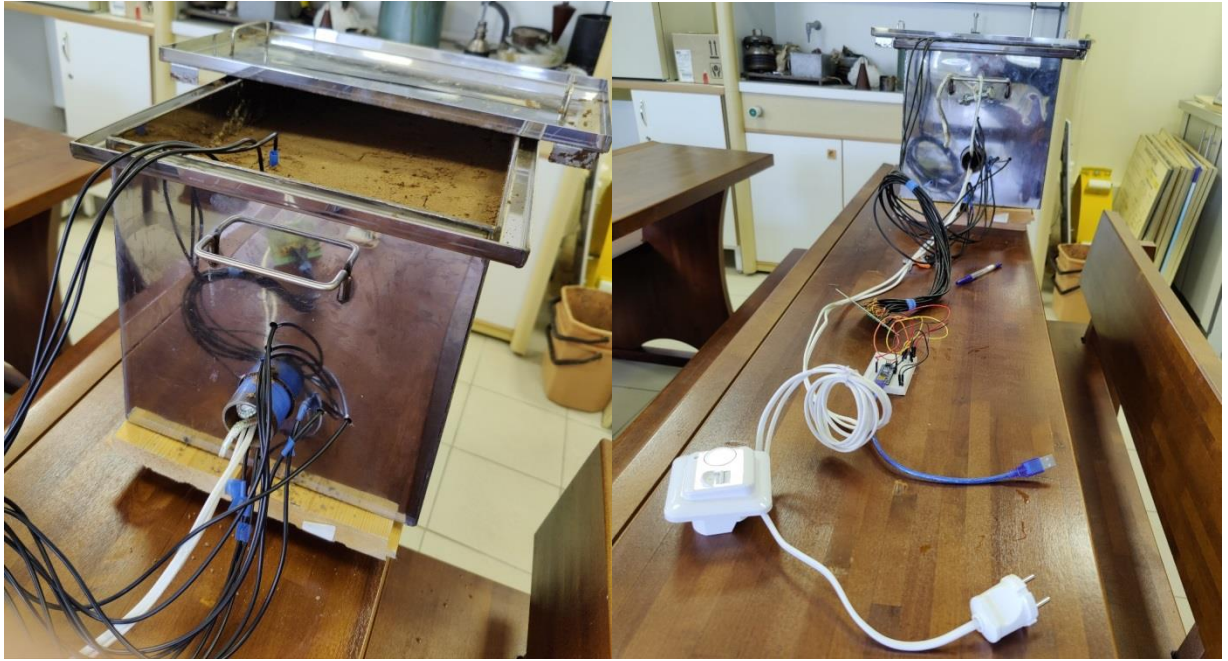


Рисунок 2.7 – Общий вид установки

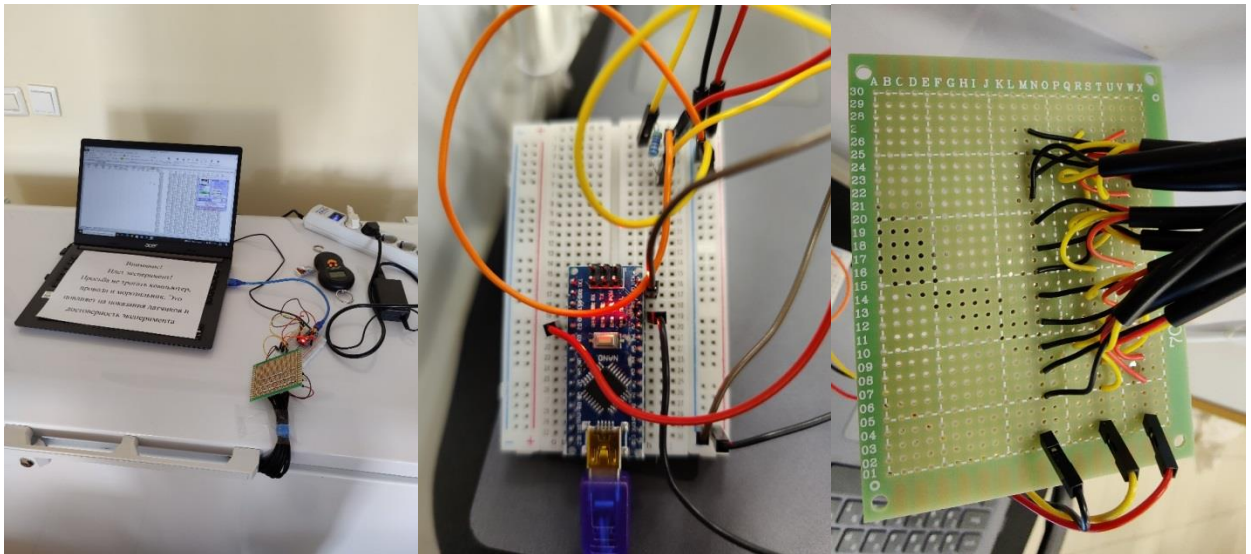


Рисунок 2.8 – Общий вид подключаемых элементов

Для наблюдения за температурным полем грунта разработано устройство на базе системы Arduino с помощью платы Arduino Nano и 12 цифровых датчиков температуры (в металлической гильзе) Ds18b20. Датчики расположены над трубопроводом, сбоку от трубопровода и под трубопроводом в одном сечении на

расстоянии $r = D_{\text{тр}}$, $r = 1,2D_{\text{тр}}$, $r = 1,5D_{\text{тр}}$, $r = 2D_{\text{тр}}$ от оси трубопровода, номера датчиков показаны на Рисунке 2.5. Внутри трубопровода помещается инфракрасный нагревательный элемент мощностью 110 Вт и общей площадью полотна а развертке $0,25 \text{ м}^2$. Мощность нагрева составляет 440 Вт/м^2 . Система наблюдения устанавливается вокруг трубопровода диаметром 50 мм и длиной 650 мм. Вся система представлена на Рисунке 2.6. В работе описаны результаты для грунта влажностью $w = 15\%$, в качестве исследуемого грунта принята супесь плотностью $\rho = 1400 \text{ кг/м}^3$.

Установка помещалась в морозильник для создания следующих условий:

- наружная температура $t_x = -30 \text{ }^\circ\text{C}$, температура нагрева трубы $t_r = 30 \text{ }^\circ\text{C}$;
- наружная температура $t_x = -20 \text{ }^\circ\text{C}$, температура нагрева трубы $t_r = 20 \text{ }^\circ\text{C}$;
- наружная температура $t_x = -10 \text{ }^\circ\text{C}$, температура нагрева трубы $t_r = 10 \text{ }^\circ\text{C}$.

Наиболее приближенный к реальным условиям является последний пункт, однако, при большем интервале температур будет наблюдаться лучшая сходимость модели и эксперимента. Проведение эксперимента при большем интервале необходимо для настройки модели.

Эксперимент проводился в 3 этапа. Первый этап включал в себя подготовку грунта до необходимой влажности, послойное уплотнение грунта в лотке, укладка трубопровода, установка датчиков, герметизация щелей во избежание высыхания грунта. Вторым этапом лоток замораживался до необходимой температуры в течение 2–3 дней. На третьем этапе, не извлекая лоток из морозильника, включался нагревательный элемент внутри трубы, датчики подключались к компьютеру и велось наблюдение в течение 24 часов, до тех пор, пока не установится стационарная температура.

Для исследования продольного перемещения рассматривается трубопровод, изготовленный из однородного изотропного материала, равного диаметра, деформации в котором происходят по закону Гука. Трубопровод уложен в грунт, физические свойства которого определяются плотностью, влажностью и упругими свойствами. Размеры конструкции определяются линейными и угловыми пара-

метрами, также на конструкцию действуют сосредоточенные и распределенные силы, а также моменты и давление. Характер закрепления описывается с помощью упругих характеристик опор: $K_1[PL^{-1}]$ – для упругих опорных стержней (шарнирные опоры и жесткие заделки), $K_2[PL]$ – для упругих заделок, $K_3[PL^{-3}]$ – для упругих оснований. Модуль Юнга, модуль сдвига и коэффициент Пуассона грунта и трубопровода примем постоянным и равным для модели и для рассматриваемого объекта. Примем, что трение между трубой и грунтом отсутствует ввиду малости рассматриваемых деформаций, перемещения происходят за счет сдвига слоев грунта относительно друг друга, сдвиг зависит от упругих свойств грунта [2, 4].

Все приведенные выше величины полностью определяют напряженно-деформированное состояние участка трубопровода. Для рассматриваемого участка трубопровода в грунте требуется определить опорные реакции и внутренние усилия в элементах трубопровода, нормальные и касательные напряжения в любой точке трубопровода и грунта, продольные и поперечные относительные деформации в точках, а также линейные перемещения в данных точках. Задача определения данных неизвестных может считаться решенной, если получены зависимости вида при различных температурах и влажности грунта:

$$R = f_1, \sigma_{mp} = f_2, \sigma_{gp} = f_3, \tau_{mp} = f_4, \tau_{gp} = f_5, u = f_6, \quad (2.10)$$

где f_i – функция, учитывающая внешние нагрузки, условия закрепления и начальные деформации.

Определение данных функций для реального трубопровода представляется невыполнимой задачей из-за многократной статической неопределимости и ряда других причин. Ввиду этого, для определения реальных усилий в трубопроводе будем использовать метод моделирования.

Среди величин, входящих в (1) имеются только две размерные величины: P и l , обладающие независимыми размерностями [Н] и [м]. Таким образом, согласно П-теореме:

$$\frac{R}{EL^2} = \Phi_1, \frac{\sigma_{mp}}{E_{mp}} = \Phi_2, \frac{\sigma_{zp}}{E_{zp}} = \Phi_3, \frac{\tau_{mp}}{E_{mp}} = \Phi_4, \frac{\tau_{zp}}{E_{zp}} = \Phi_5, \frac{u}{l} = \Phi_6. \quad (2.11)$$

Для переноса результатов эксперимента с экспериментальной установки на натурную модель необходимо учитывать температурные поля грунта, необходимо учесть физическое и геометрическое подобие. Для упрощения переноса данных с модели на натуру будем пользоваться программным комплексом ANSYS. Для того, чтобы говорить о достоверности компьютерной модели необходимо, чтобы значимые параметры экспериментальной и компьютерной модели совпадали [10, 21-23]. Ключевыми параметрами для сравнения моделей трубопровода в мерзлом грунте по результатам проведения эксперимента являются:

- радиусы ореола оттаивания (расстояние от оси трубопровода до местоположения точки в грунте с нулевой температурой);
- конечная температура грунта на расстояниях $r = D_{тр}$, $r = 1,2D_{тр}$, $r = 1,5D_{тр}$, $r = 2D_{тр}$;
- график зависимости перемещения трубопровода от приложенной продольной нагрузки.

При этом контролируемые параметрами компьютерной модели будет являться величина упругости грунта, угол внутреннего трения, сцепление и плотность грунта, начальные температуры трубопровода и внешней стенки, теплофизические свойства грунта. От свойств металла трубы распределение ореолов оттаивания и перемещения зависят практически не будут.

2.2 Результаты экспериментальных исследований

2.2.1 Результаты экспериментальных тепловых исследований на стенде

На Рисунке 3 представлены показания датчиков, линии 12–sensor соответствует расположению 12-й точки измерения температур с Рисунка 2.6. Рисунок 2.9а показан для температуры трубопровода 30 °С, температура грунта минус 30 °С. Рисунок 2.9 (б) показан для температуры трубопровода 20 °С, температура грунта минус 20 °С. Рисунок 2.9 (в) показан для температуры трубопровода 10 °С, температура грунта минус 10 °С. На Рисунке 2.9 (г) показано сравнение средних температур этих экспериментов. Как видно из рисунков в первом случае возникновение ореола оттаивания происходит немного быстрее, однако конечные температуры устанавливаются те же, после чего не меняются. Однако, кривизна второго графика немного больше ввиду большей начальной температуры. Для сравнения кривизны линий температур от времени на общем графике (Рисунок 2.9 (г)) представлены показания 6, 9 и 12-го датчиков при разных условиях оттаивания.

График меняется неравномерно ввиду того, что нагревательный элемент нагревает трубу до тех пор, пока значения датчиков 1–3 не покажут заданное значение, после чего нагревательный элемент отключается, до тех пор, пока температура трубы снова не опустится более чем на 0,5 °С от заданного значения.

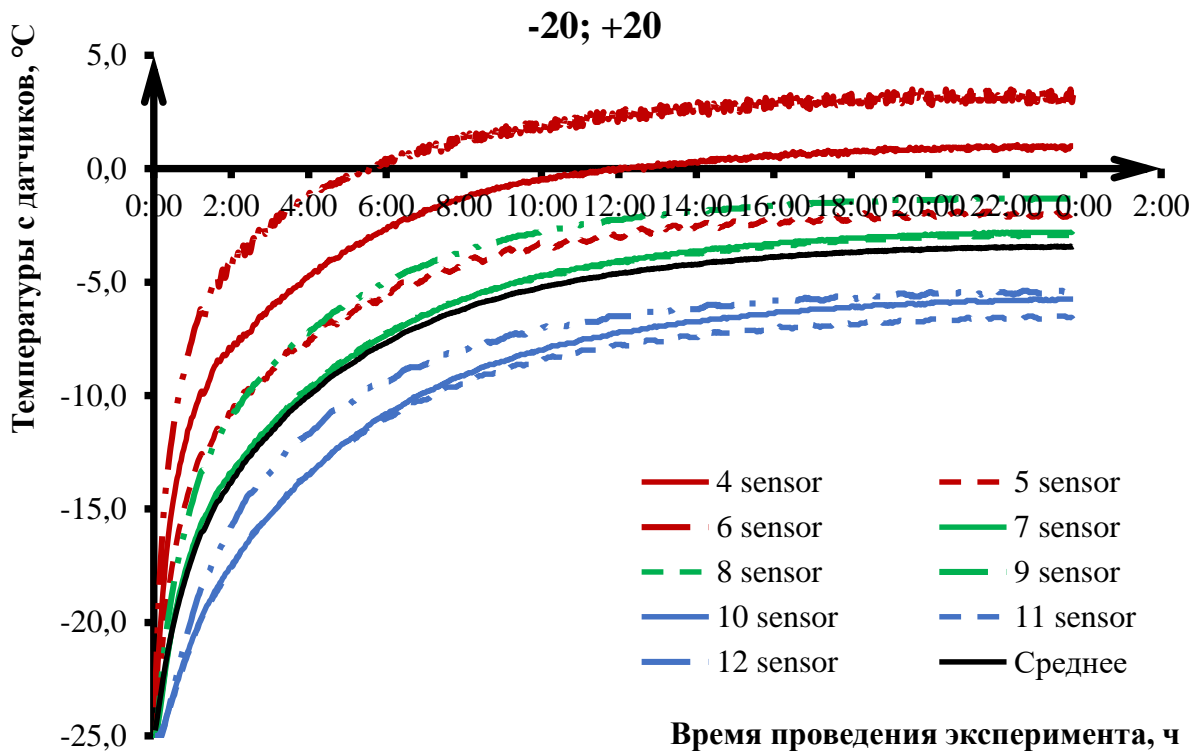
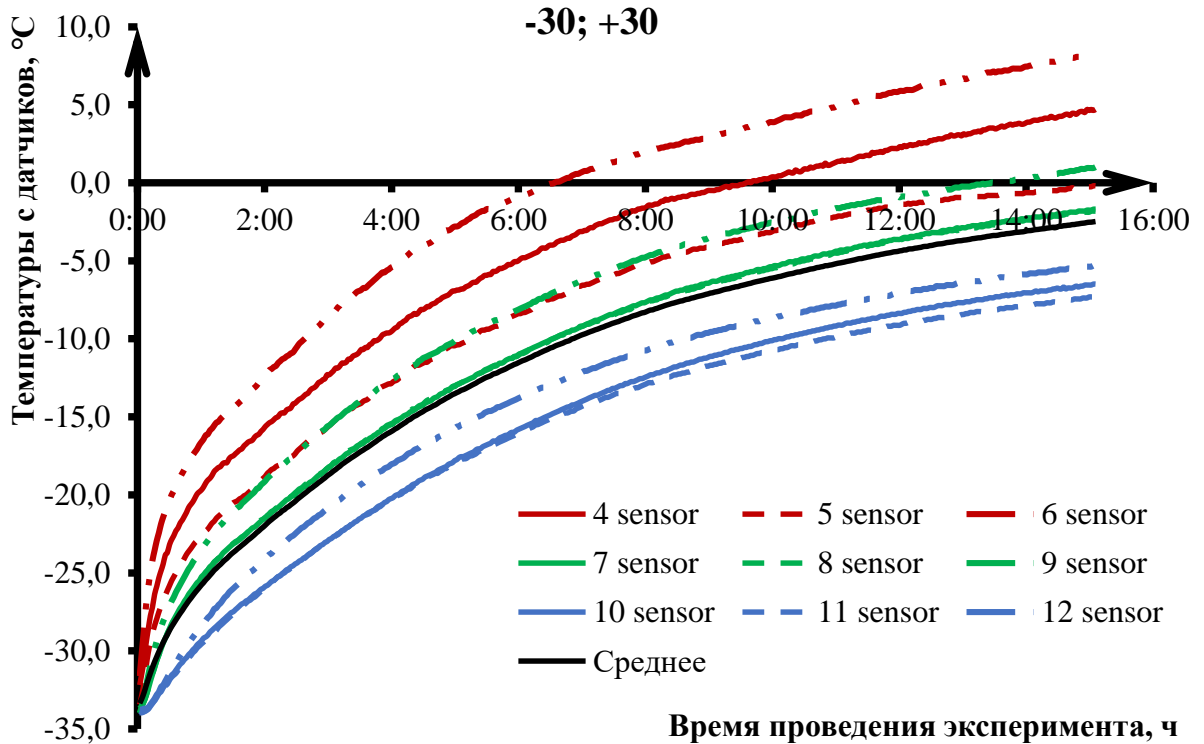


Рисунок 2.9 (а, б) – Зависимость температуры вокруг трубопровода от времени. Штрихпунктирные линии соответствуют датчикам №6, №9 и №12, пунктирные линии соответствуют датчикам №5, №8 и №11, а сплошные линии датчикам №4, №7 и №10

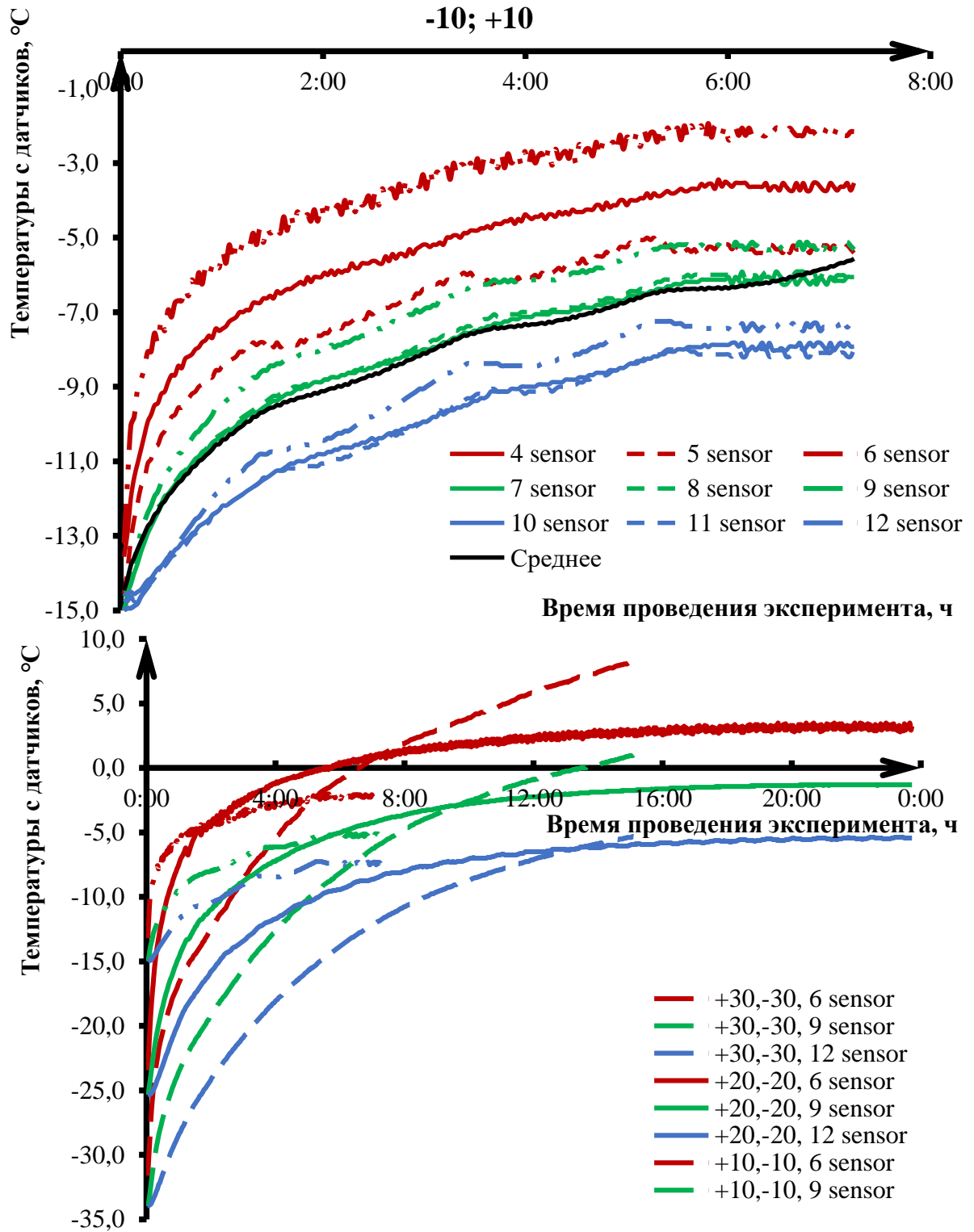


Рисунок 2.9 (в, г) – Зависимость температуры вокруг трубопровода от времени. Штрихпунктирные линии соответствуют датчикам №6, №9 и №12, пунктирные линии соответствуют датчикам №5, №8 и №11, а сплошные линии датчикам №4, №7 и №10

2.2.2 Результаты компьютерного моделирования температурного поля грунта

Согласно СНиП 2.02.04–88 таблицы 3 приложения 1 теплопроводность супеси пылеватой при влажности 15% и плотности 1400 кг/м^3 составляет $1,10 \text{ Вт/(м}\times\text{К)}$ в оттаявшем состоянии и $1,27 \text{ Вт/(м}\times\text{К)}$ в мерзлом состоянии. Однако предварительно проведенные опыты на грунте с той же влажностью показали другие значения: $1,0 \text{ Вт/(м}\times\text{К)}$ в оттаявшем состоянии и $1,15 \text{ Вт/(м}\times\text{К)}$ в мерзлом состоянии. В пересчете с объемной теплоемкости на массовую теплоемкость получились следующие значения: массовая теплоемкость супеси составила $1817 \text{ Дж/(кг}\times\text{К)}$ в оттаявшем состоянии и $1467 \text{ Дж/(кг}\times\text{К)}$ в мерзлом состоянии [25, 101]. Теплофизические характеристики стали взяты по умолчанию из базы данных ANSYS.

При задании теплофизических свойств многолетнемерзлого грунта необходимо было учесть теплоту, теряемую на фазовый переход из одного агрегатного состояния в другое при таянии льда. Удельная теплота плавления льда составляет $\lambda = 330 \text{ кДж/кг}$, где λ это количество теплоты, затрачиваемое на переход единицы массы льда в воду при его фазовом превращении из кристаллического состояния в жидкое при температуре плавления. Если вычислить площадь синей фигуры на Рисунке 2.10, то в результате получится 330 кДж/кг . Похожий принцип учета теплоты фазового перехода представлен в исследовании [119].

Граничными условиями являются тепловой поток внутри трубопровода равный 880 Вт/м^2 (полотно с мощностью нагрева 440 Вт/м^2 скручен в 2 витка) и тепловой поток, приложенный ко всем граням металлического лотка -57 Вт/м^2 (согласно экспериментальных данных). Время действия тепловых потоков на установку составляет 50400 секунд или 14 часов, поскольку, согласно опытам, после 14 часов устанавливается стационарное тепловое поле. Начальная температура системы задавалась равной $-30 \text{ }^\circ\text{C}$. По результатам расчета исследовалось общее поле температур во всей системе, а также распределение температур по длине

по трем направлениям, в соответствии с установленными датчиками. Результаты расчета представлены на Рисунке 2.12.

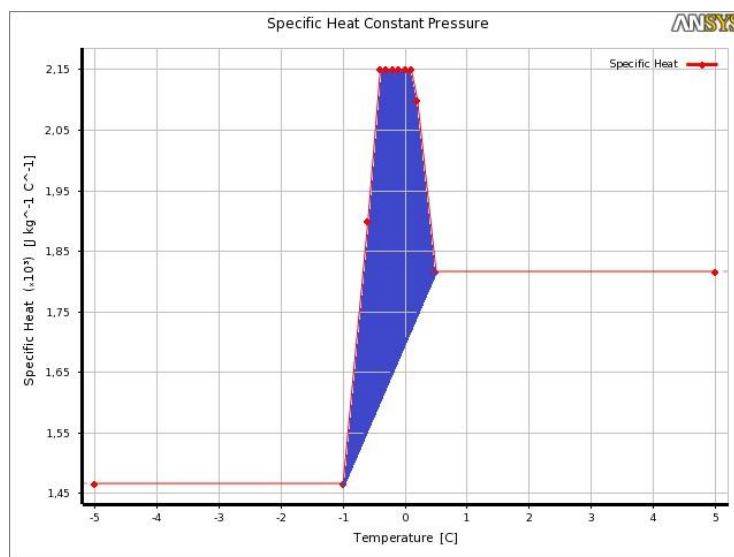
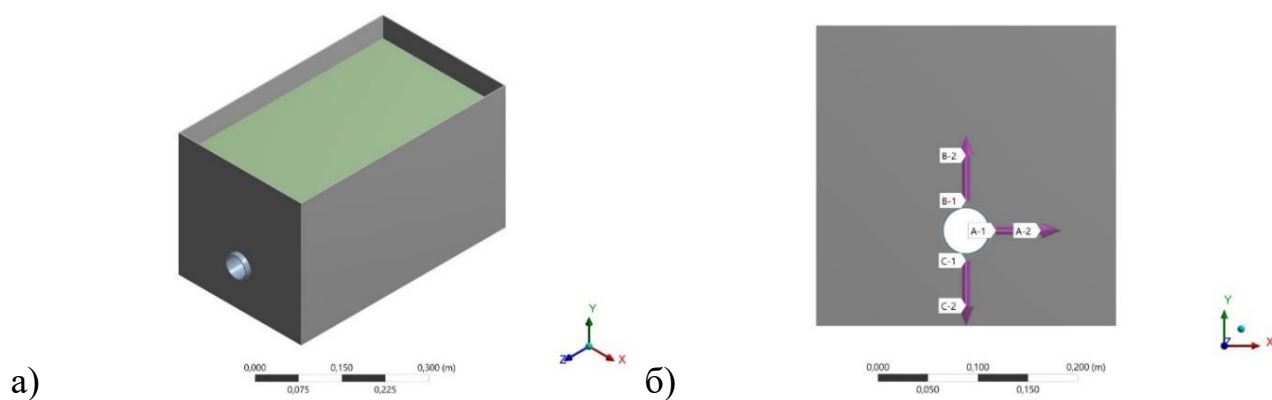


Рисунок 2.10 – Удельная теплоемкость многолетнемерзлого грунта с учетом удельной теплоты плавления льда

На Рисунке 2.11 (а) изображена расчетная модель трубопровода в мерзлом грунте, модель полностью повторяет геометрию экспериментальной установки с Рисунка 2.6. Труба выступает на 20 мм с переднего торца установки и на 50 мм с заднего торца.



а – исходная геометрия модели, б – линии для сравнения расчетных температур с экспериментом

Рисунок 2.11 – Подготовка модели к расчету

На Рисунке 2.11 (б) изображены линии, повторяющие расположение температурных датчиков для сравнения значений эксперимента и расчета. Результаты расчета занесены в Таблицу 2.2, где величина ореола оттаивания – расстояние от оси трубопровода до значения температуры равного 0 °С. При этом, как видно из расчета, величина ореола разная в зависимости от направления, что подтверждается результатами экспериментального исследования. На Рисунке 2.12 показано тепловое поле вокруг трубопровода за разный период времени, от 2 минут с начала расчета до 14 часов. Как видно по графическому изображению температур, разница выступа трубопровода из грунта влияет на результат температурного поля по верхней грани. Поэтому с экспериментальными значениями сравниваются значения, отстоящие на 10 см от торца лотка (именно на такой глубине установлены температурные датчики).

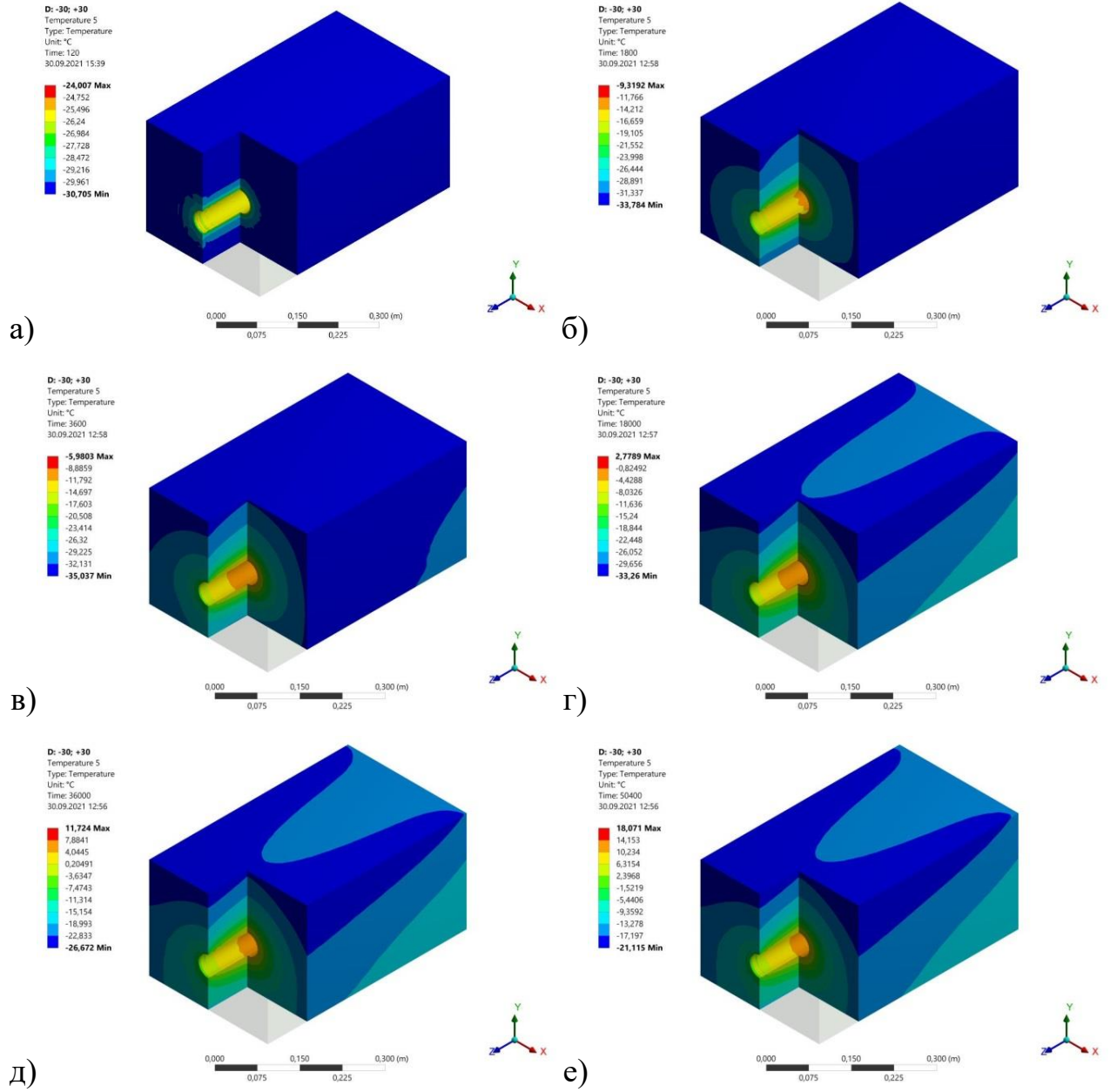
Таблица 2.2 – Величина ореола оттаивания по трем направлениям в течение времени

Время эксперимента, ч	8	9	10	11	12	13	14
Величина ореола оттаивания (вниз), мм	2,08	4,17	7,29	10,39	13,54	17,71	21,88
Величина ореола оттаивания (вбок), мм	1,52	4,17	6,83	9,38	12,50	15,92	19,79
Величина ореола оттаивания (вверх), мм	1,52	3,88	6,25	8,33	11,46	14,44	18,3
Среднее значение ореола оттаивания, мм	1,71	4,07	6,79	9,37	12,50	16,02	19,99

На Рисунке 2.13 изображены графики зависимости температур от времени для различных направлений. По Рисунку видно удовлетворительное согласование результатов по нижнему направлению и неудовлетворительное по верхнему направлению. Это объясняется изменяющимся во времени значением теплового потока, действующего на верхнюю грань лотка в процессе эксперимента, а также погрешностью месторасположения установки датчиков. Однако достаточно

наглядно отображается скорость увеличения температур в начальный период (первые 2–4 часа) и общий угол графика в последние 4–6 часов расчета. Так же разница связана с тем, что начальная температура проведения эксперимента несколько отличается от расчетной температуры. Отклонение графиков можно объяснить еще и тем, что в программном комплексе достаточно сложно смоделировать постепенное оттаивание грунта, то есть не весь лед сразу превращается в воду, а лишь его часть.

Данное исследование проведено с целью дальнейшего изучения тепломеханического взаимодействия трубопровода и грунта. Этот расчет может быть применен, например, при расчете просадки оттаявшего участка, при расчетах эффективности термостабилизаторов. Также данный расчет будет актуален для работ, связанных с устойчивостью трубопроводов при образовании таликов или при воздействии на трубопровод бугров пучения.



а – 120 секунд, б – 1800 секунд, в – 3600 секунд, г – 18000 секунд,
 д – 36000 секунд, е – 50400 секунд.

Рисунок 2.12 – Тепловые поля вокруг трубопровода с течением времени

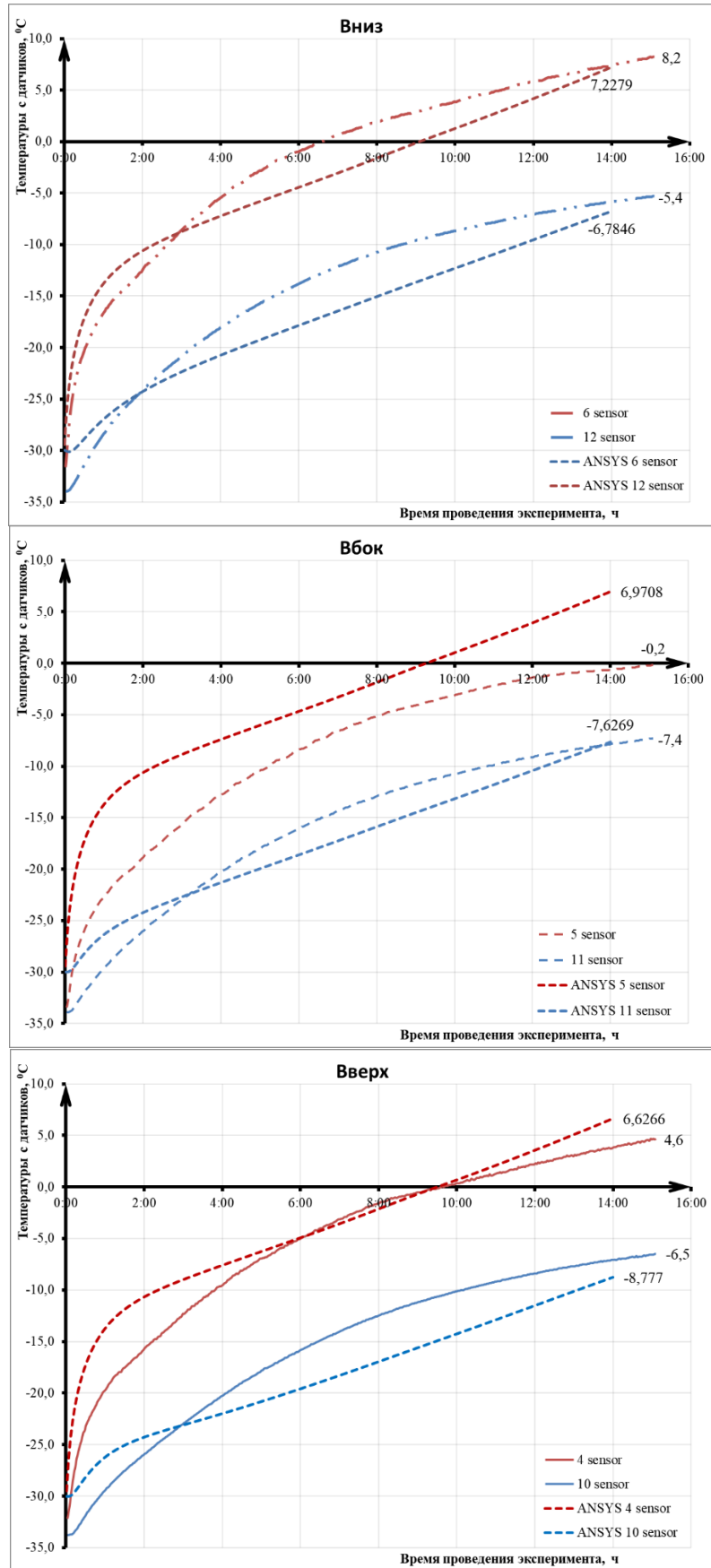


Рисунок 2.13 – Сравнение результатов расчета с экспериментальными данными

2.2.3 Результаты определения коэффициентов постели в зависимости от температуры и влажности экспериментальным методом

Ввиду того, что для механических испытаний в мерзлом грунте имела необходимость постоянного перемещения лотка с грунтом. Возникла необходимость уменьшить вес лотка, поэтому были изменены размеры модели. Между двумя стендами были сохранены такие параметры как диаметр трубопровода, отношение глубины к диаметру и длину трубопровода, находящегося в контакте с грунтом.

Первые опыты проводились в условно сухом суглинке, при комнатной температуре, моделируя различную глубину заложения трубопровода. Для имитации глубины заложения трубопровода в грунте использовалось давление на поверхность грунта. На пластину, лежащую на поверхности грунта, укладывались грузы 4 кг, 8 кг, 12 кг и 16 кг. Таким образом, моделировалась средняя глубина заложения 128 мм, 156 мм, 184 мм и 212 мм соответственно. Без грузов средняя глубина заложения составляет 100 мм. Диаметр трубопровода равен $d = 50$ мм, длина трубопровода, находящегося в грунте $l = 600$ мм.

Для достижения необходимой влажности грунт извлекался из лотка, лоток зачищался и осушался. Далее грунт увлажнялся до заданной весовой влажности. Грунт увлажнялся в отдельном лотке, после чего укладывался в лоток и уплотнялся. Так же, как для сухого грунта, были проведены опыты при комнатной температуре, при разной моделируемой глубине заложения. После определения основных характеристик влажного грунта при комнатной температуре, грунт помещался в морозильник, где замораживался в течение суток до необходимой температуры.

Грунт увлажнялся до значений 5 %, 10 %, и 15 %. Это решение объясняется тем, что уже при 20 % полностью терялась связность грунта, несущая способность грунта в таких условиях не предполагает прокладку подземного трубопровода.

Затем лоток помещался в морозильник и замораживался до необходимой температуры. После заморозки лоток с грунтом устанавливался на опору и к трубе прикладывались усилия, как показано на Рисунке 2.4.

Результаты опыта в сухом грунте показаны на Рисунке 2.14. На графике отображены величины касательных напряжений при возникающих перемещениях в сухом грунте при комнатной температуре. Получено 5 кривых для суглинка и песка в зависимости от того, какая нагрузка прикладывалась на поверхность грунта. Перевод из величины нагрузки на поверхность грунта в среднюю глубину заложения трубопровода h_{cp} , который уложен в суглинке и песке, показан в Таблице 2.3. (A – площадь приложения нагрузки $A = 0,25 \times 0,37 \text{ м}^2$). Например, усилию 8 кгс для суглинка соответствует глубина заложения трубопровода $h_{cp} = 15,6$ см. По графику видно изменение угла наклона в упругой зоне и изменение предельных касательных напряжений в пластичной зоне.

Таблица 2.3 – Моделирование изменения глубины залегания трубопровода

Усилие, прикладываемое сверху на грунт, P , Н	Смоделированная средняя глубина заложения, h_{cp} , см	h_{cp}/d	Давление, оказываемое на трубопровод, $\sigma = \rho g h_{cp}$, Па
Суглинок			
0	10,0	2,0	1511
40	12,8	2,6	1935
80	15,6	3,1	2359
120	18,4	3,7	2783
160	21,2	4,2	3208
Песок			
0	10,0	2,0	1208
40	13,5	2,7	1632
80	17,0	3,4	2056
120	20,5	4,1	2480
160	24,0	4,8	2904

В практике проектирования трубопроводов, давление грунта на трубопровод принимают равномерно распределенным по периметру трубы, что позволяет существенно упростить решение задач о продольных перемещениях трубопрово-

да. Обоснованность такого допущения при средней глубине заложения, не превышающих 2-5 номинальных диаметров трубопровода, довольно хорошо подтверждается натурным экспериментами по продольному перемещению труб в однородном песчаном грунте [17].

На Рисунке 2.14 показаны зависимости коэффициента постели грунта при продольном перемещении в зависимости от отношения средней глубины заложения к диаметру трубопровода h_{cp}/d . Это означает, что для проведения экспериментов для подтверждения линейной зависимости коэффициента постели от глубины заложения достаточно для каждой температуры провести не менее 5 опытов, при различных h_{cp}/d . При проведении натурных экспериментальных исследований максимальным значением h_{cp}/d следует принимать значение отношение высоты свода обрушения к диаметру трубопровода; минимальным значением h_{cp}/d принимается значение минимальной глубины заложения к диаметру. В Таблице 2.4 представлены основные значения, полученные в результате обработки измерений для сухого грунта.

Таблица 2.4 – Зависимости касательных напряжений от продольных перемещений для суглинка и песка

Суглинок					
m , кг	0	4	8	12	16
h_{cp} , см	10,0	12,8	15,6	18,4	21,2
h_{cp}/d	2,0	2,6	3,1	3,7	4,2
k_u , МН/м ³	1,72	4,30	5,74	8,60	12,29
τ_{np} , Па	172	430	516	602	774
Песок					
m , кг	0	4	8	12	16
h_{cp} , см	10,0	13,5	17,0	20,5	24,1
h_{cp}/d	2,0	2,7	3,4	4,1	4,8
k_u , МН/м ³	1,23	3,04	4,53	6,14	8,60
τ_{np} , Па	172	258	430	602	860

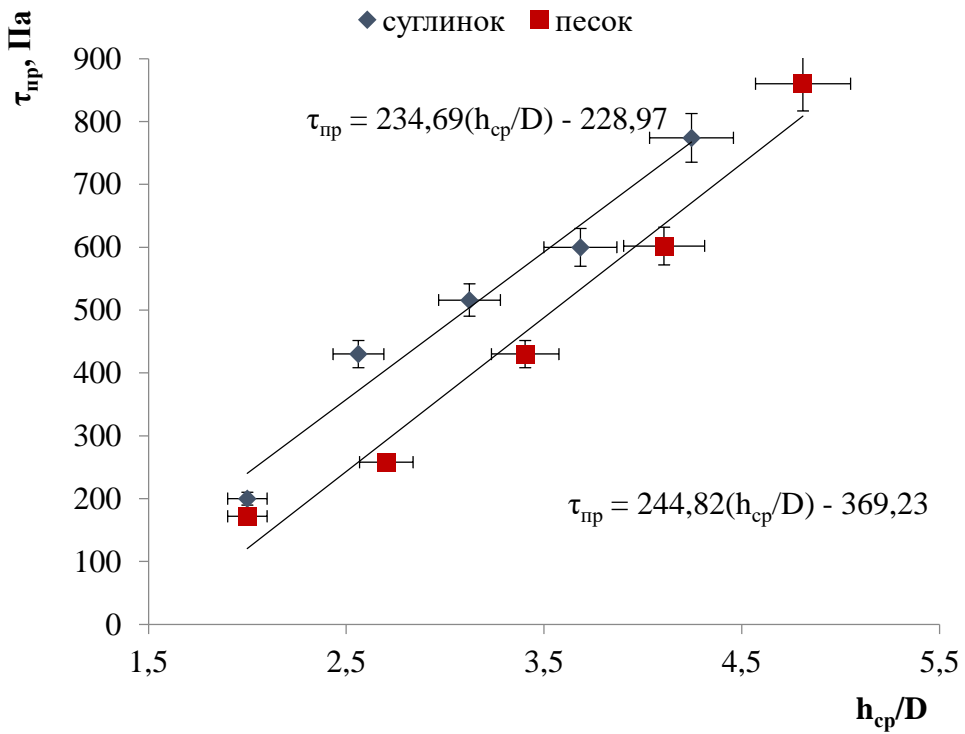
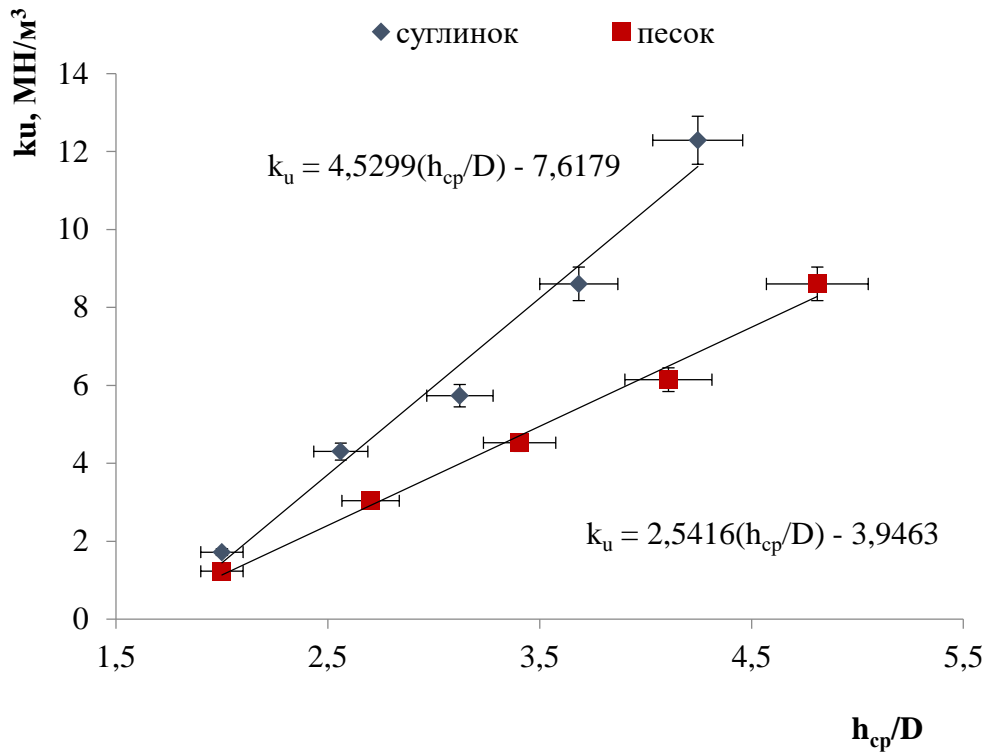


Рисунок 2.14 – Зависимость предельных касательных напряжений и коэффициента постели от глубины заложения трубопровода для суглинка и песка

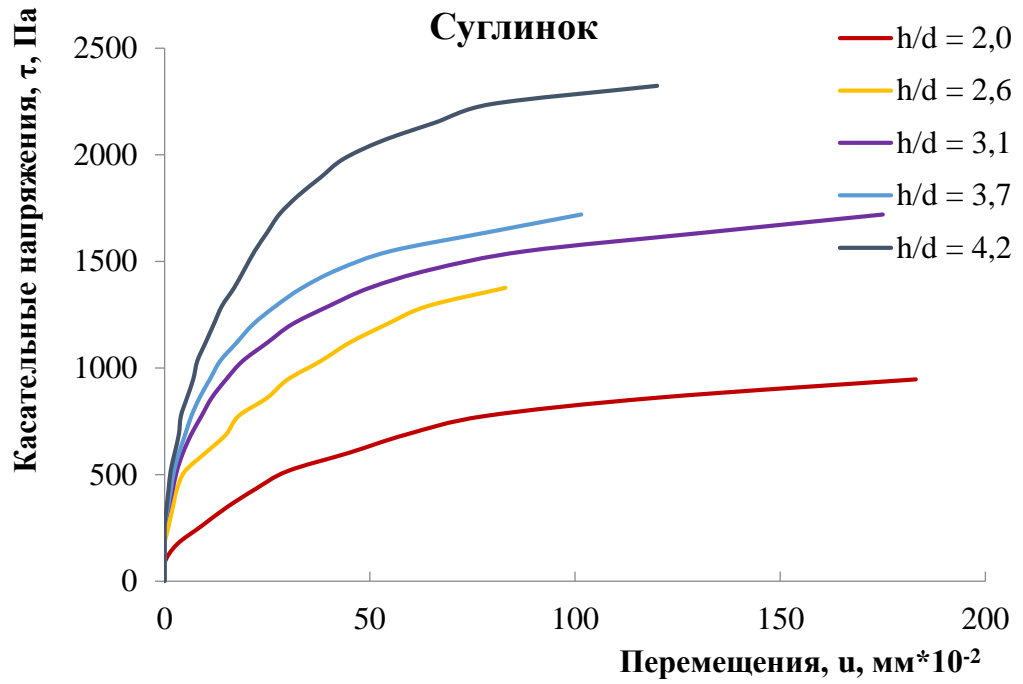


Рисунок 2.15 – Зависимость перемещений от касательных напряжений для суглинка при разной глубине заложения для суглинка

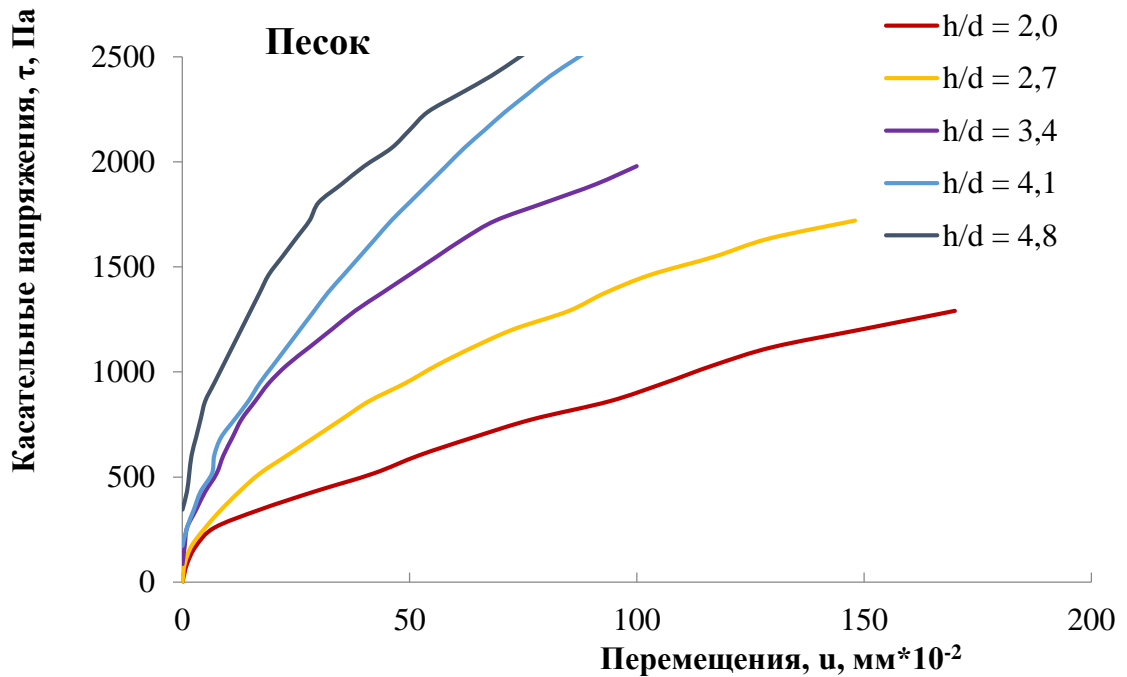


Рисунок 2.16 – Зависимость перемещений от касательных напряжений для суглинка при разной глубине заложения для песка

В Таблице 2.5 представлены значения коэффициентов постели, полученные при обработке экспериментальных значений в упругой зоне взаимодействия трубы с грунтом. На Рисунках 2.17 – 2.19 показаны графики зависимостей, которые демонстрируют характер изменения коэффициента постели при изменении таких характеристик как влажность и температура грунта. На основании полученных результатов можно сделать вывод, что наибольшее сопротивление перемещениям грунт будет оказывать при влажности грунта $w = 10\%$ и температуре грунта $t = -10\text{ }^\circ\text{C}$.

Таблица 2.5 – Значения коэффициентов постели в зависимости от глубины заложения, влажности и температуры грунта.

Коэффициент постели при сдвиге, k_u , МН/м ³													
		$m = 0\text{ кг, } h_{cp}/d = 2,0$				$m = 8\text{ кг, } h_{cp}/d = 3,4$				$m = 16\text{ кг, } h_{cp}/d = 4,8$			
		$w, \%$				$w, \%$				$w, \%$			
		0	5	10	15	0	5	10	15	0	5	10	15
$t, \text{ }^\circ\text{C}$	5	1,2	5,5	1,0	0,1	4,5	6,1	3,5	0,5	8,6	6,3	4,0	1,0
	0	1,2	8,1	15,1	19,7	4,6	8,4	17,7	20,3	8,7	9,1	21,6	21,2
	-5	1,3	17,2	21,7	25,0	5,0	19,1	30,9	26,0	8,6	20,6	32,5	26,9
	-10	1,2	18,7	19,3	23,1	4,4	19,8	28,8	24,9	8,5	21,5	33,5	28,2

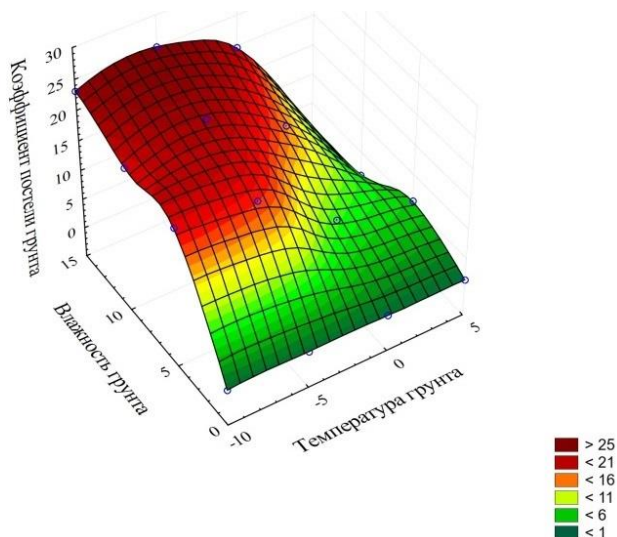


Рисунок 2.17 – График зависимости коэффициента постели от влажности и грунта при глубине заложения $h_{cp}/d = 2,0$

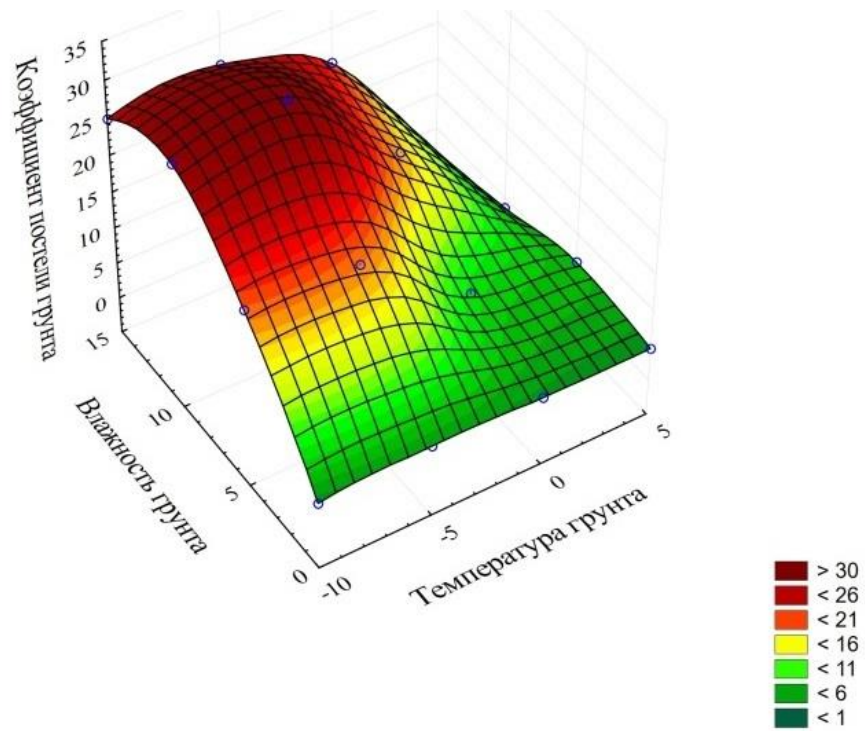


Рисунок 2.18 – График зависимости коэффициента постели от влажности и грунта при глубине заложения $h_{cp}/d = 3,4$

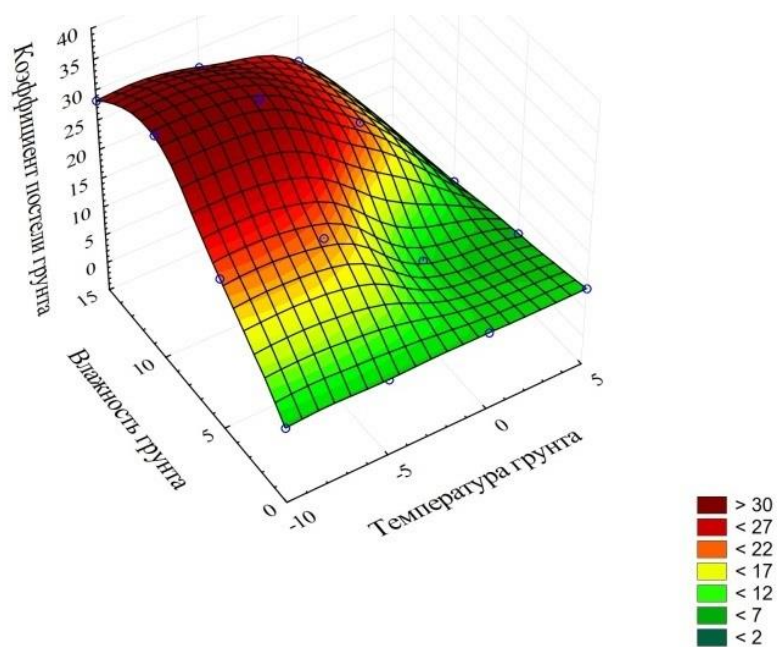


Рисунок 2.19 – График зависимости коэффициента постели от влажности и грунта при глубине заложения $h_{cp}/d = 4,8$

Модуль деформации (формула 2.12) и коэффициент постели на сжатие (формула 2.13) определены согласно ГОСТ 12248.4-2020 «Определение характеристик деформируемости методом компрессионного сжатия». Устройство компрессионного сжатия грунта изображено на Рисунке 2.20 [27, 29].

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_{сж}}, \quad (2.12)$$

$$k_0 = \frac{\Delta\sigma}{\Delta l}, \quad (2.13)$$

где, $\Delta\sigma$ – изменение нормального напряжения в образце;

$\Delta\varepsilon_{сж}$ – изменение относительного сжатия образца;

Δl – изменение абсолютного сжатия образца.

Высота образца составляет $l = 26$ мм, диаметр $d = 87$ мм [27, 64].

Опыты проводились при различной влажности и температуры образцов. Массовая влажность задавалась от 10 до 25%, температура грунта задавалась от минус 15 до минус 1 °С. Значения температур и влажностей грунта при испытании представлены в Таблице 2.6.



Рисунок 2.20 – Устройство компрессионного сжатия

Таблица 2.6 – значения температур и влажностей при испытаниях грунтов на сжатие

Массовая влажность, %	Планируемые температуры, °С			
	-1,0	-5,0	-10,0	-15,0
	Температуры проведения эксперимента, °С			
10	1,5	-2,6	-10,0	-13,7
15	-2,3	-6,6	-11,2	-13,4
20	-1,7	-4,1	-11,2	-19,9
25	-0,6	-5,4	-12,2	-19,8

Поскольку температура в морозильнике не является установившейся величиной, и рассчитать необходимую величину в морозильнике и ее время действия для заморозки до точной температуры представляется невыполнимой задачей, то перед каждым опытом измерялась температура образца внутри и на краю образца. Одновременно в морозильник помещались 2 образца в одинаковых устройствах. Один с нарушенной структурой – датчик помещался внутрь и с ненарушенной, на котором проводились опыты.

Результаты опытов приведены на Рисунках 2.22-2.23. В опытах на сжатие большее значение принимает температура грунта. Лучшие прочностные свойства грунт показывает при малой влажности, и при температурах от минус 10 °С до минус 6 °С. При увеличении влажности от 10% до 25% наблюдается уменьшений модуля деформации $E = 1,8$ до $E = 0,6$ МПа при температурах от минус 10 °С до минус 6 °С.

Модуль упругости от температуры и влажности глины

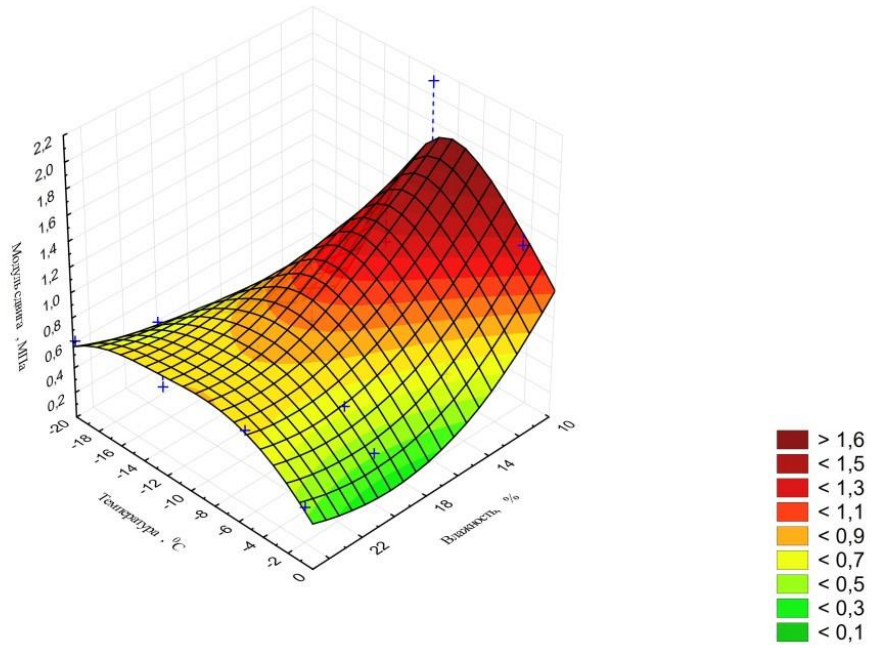


Рисунок 2.22 – Модуль деформации грунта от влажности и температуры

Коэффициент постели на сжатие от температуры и влажности глины

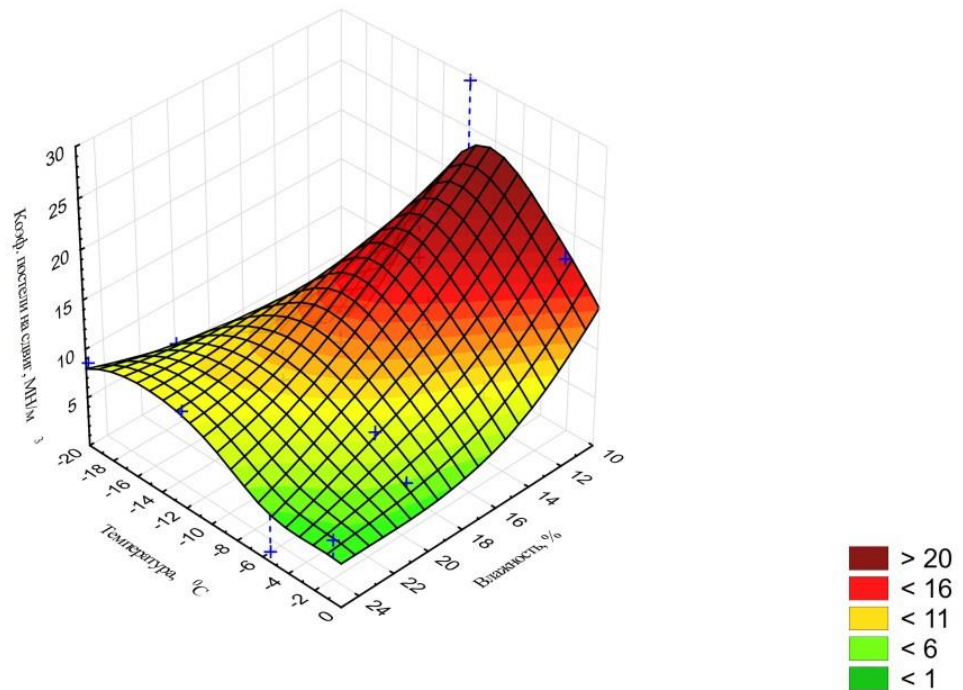


Рисунок 2.23 – Коэффициент постели на сжатие от влажности и температуры

2.3 Моделирование стендового эксперимента в программном комплексе ANSYS Workbench

Моделирование трубопровода в многолетнемерзлом грунте позволяет уменьшить количество физических лабораторных прототипов и количество полевых испытаний. Исследуемые характеристики грунта позволят прогнозировать не только продольные перемещения трубопровода, но и перемещение трубопровода по всем трем осям.

Геометрия модели представлена на Рисунке 2.11. С помощью программного комплекса ANSYS исследуется коэффициент постели (зависимость касательных напряжений от продольных перемещений) от угла внутреннего трения, плотности грунта, сцепления, величины внешнего усилия для изучения интенсивности влияния свойств на коэффициент постели. Расчетная схема с приложенными нагрузками представлена на Рисунке 2.24. На трубопровод приложены касательные напряжения $\tau = 1$ кПа.

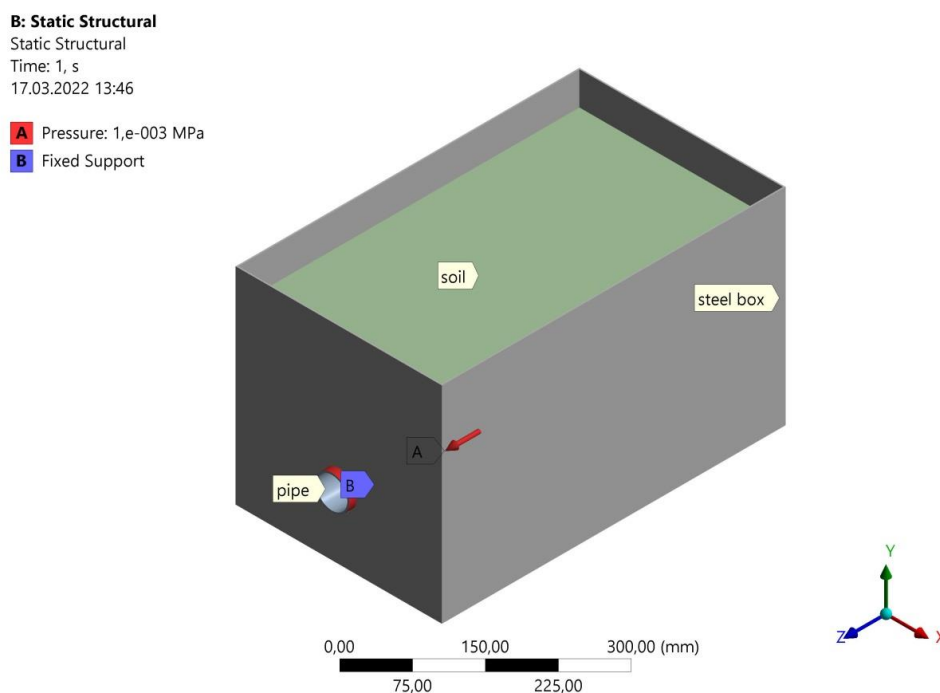


Рисунок 2.24 – Граничные условия

На Рисунке 2.25 показана сетка модели. Установлен автоматический метод настройки «Sweep» для трубопровода, для грунта настроен размер элемента 10 мм. Для лотка метод задания сетки не менялся, установлен автоматический метод. Между всеми телами установлен тип контакта «bonded», который подразумевает отсутствие возможности перемещения и отрыва одного тела от другого. Обоснованность такого выбора при выборе контакта между трубой и грунтом заключается в том, что трение происходит между частицами грунта, а коэффициент трения равен тангенсу угла внутреннего трения $f_{тр} = \text{tg}(\varphi)$.

Угол внутреннего трения грунта для усредненного расчета принимался равным $\varphi = 30$ град., сцепление грунта $c = 5$ кПа, модуль деформации $E = 1,3$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$.

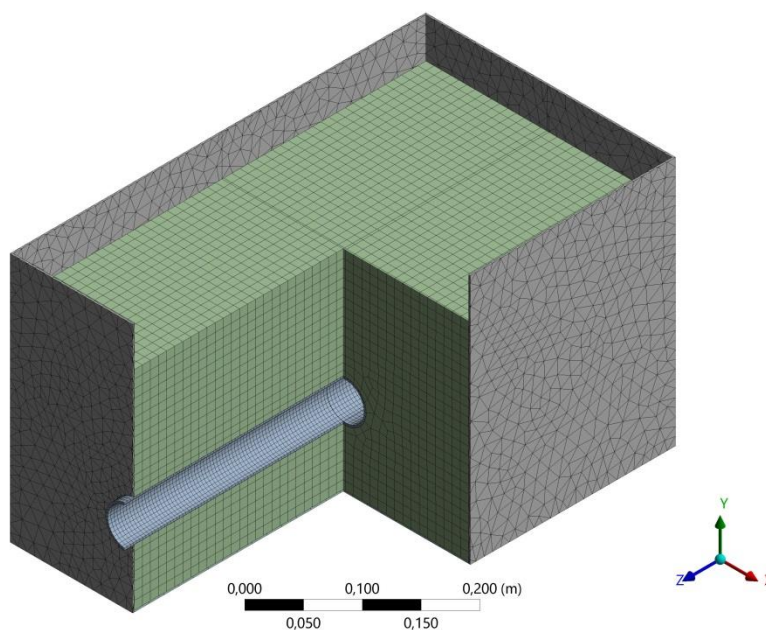


Рисунок 2.25 – Сетка модели

На Рисунке 2.26 показаны эквивалентные напряжения в грунте после деформации трубопровода. Как видно по Рисунку, напряжения по трубе распределены неравномерно, что не учитывалось при проведении экспериментальных исследований, при проведении эксперимента принимались усредненные значения.

На Рисунке 2.27 показаны относительные деформации конструкции экспериментального стенда. Как видно по результатам расчета, все стальные элементы конструкции абсолютно жесткие по отношению к грунту, как и предполагалось при проведении опытов. На Рисунке 2.28 показаны абсолютные деформации грунта.

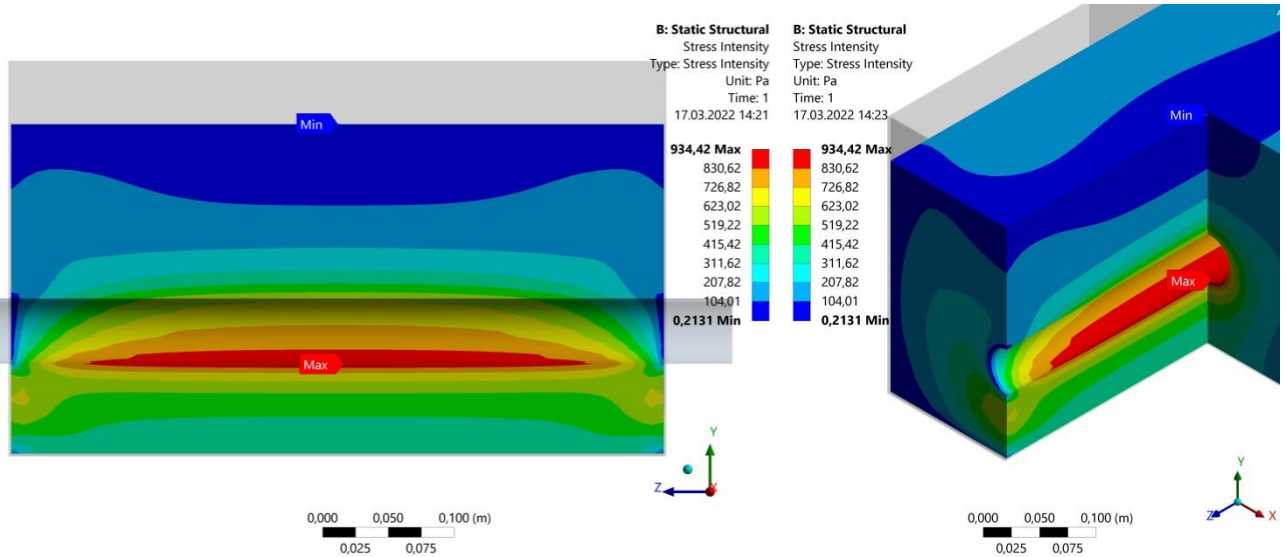


Рисунок 2.26 – Напряженное состояние грунта

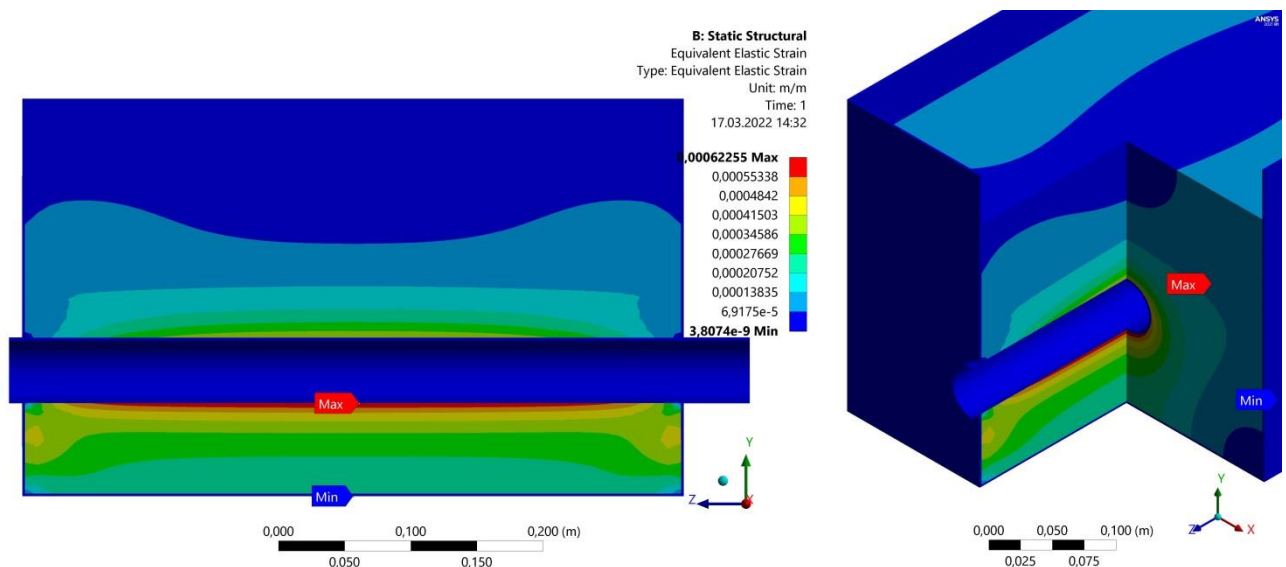


Рисунок 2.27 – Относительные деформации лотка, трубопровода и грунта

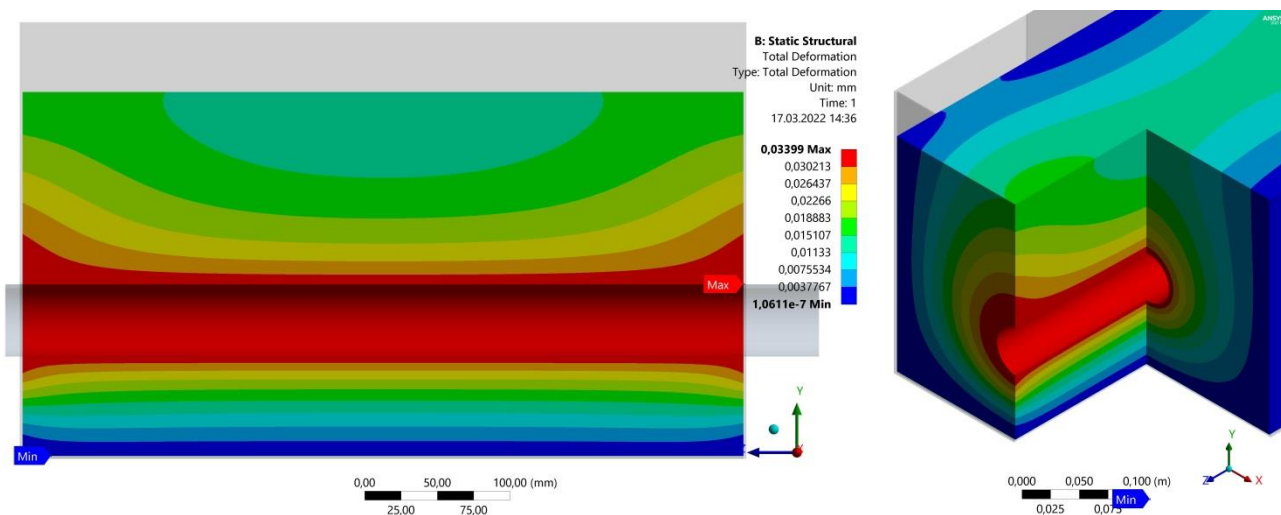


Рисунок 2.28 – Абсолютные деформации грунта

После получения картин распределения напряжений и деформаций необходимо проводить исследование наиболее значимой характеристики, влияющей на коэффициент постели. Для этого задаем характеристики грунта и прикладываем усилия, диапазоны характеристик показаны на Рисунке 2.28:

- касательные напряжения, приложенные к трубопроводу $\tau = 0,5..1,5$ кПа (I колонка, Рисунок 2.28);
- угол внутреннего трения грунта $\varphi = 25..35$ град. (II колонка, Рисунок 2.28);
- модуль деформации $E = 1..5$ МПа (III колонка, Рисунок 2.28);
- сцепление грунта $c = 3..10$ кПа (IV колонка, Рисунок 2.28);

Полученные данные по результатам моделирования представлены в колонке IV, Рисунка 2.28. Точки характеристик брались таким образом, чтобы достичь максимального количества пересечений линий. Каждая линия показывает точки для i -го эксперимента.

На Рисунке 2.29 показано влияние изменение каждого из вышеизложенных параметров на продольные перемещения при приложении продольных усилий. По данной диаграмме можно сказать, что перемещений практически не зависят от угла внутреннего трения и сцепления при нахождении этих параметров в пределах возможных значений для мерзлого грунта. Основным параметром, который

влияет на перемещение трубопровода, является модуль деформации грунта. Этот факт необходимо учитывать при расчете продольных перемещений трубопровода при изменении влажности и температуры грунта. На Рисунке 2.30 показана визуализация расчета всех точек эксперимента, приведена зависимость продольных перемещений u от касательных напряжений τ и модуля деформации грунта E . По данному графику можно определить коэффициент постели грунта на сдвиг k_u при различных значениях модуля деформации E .

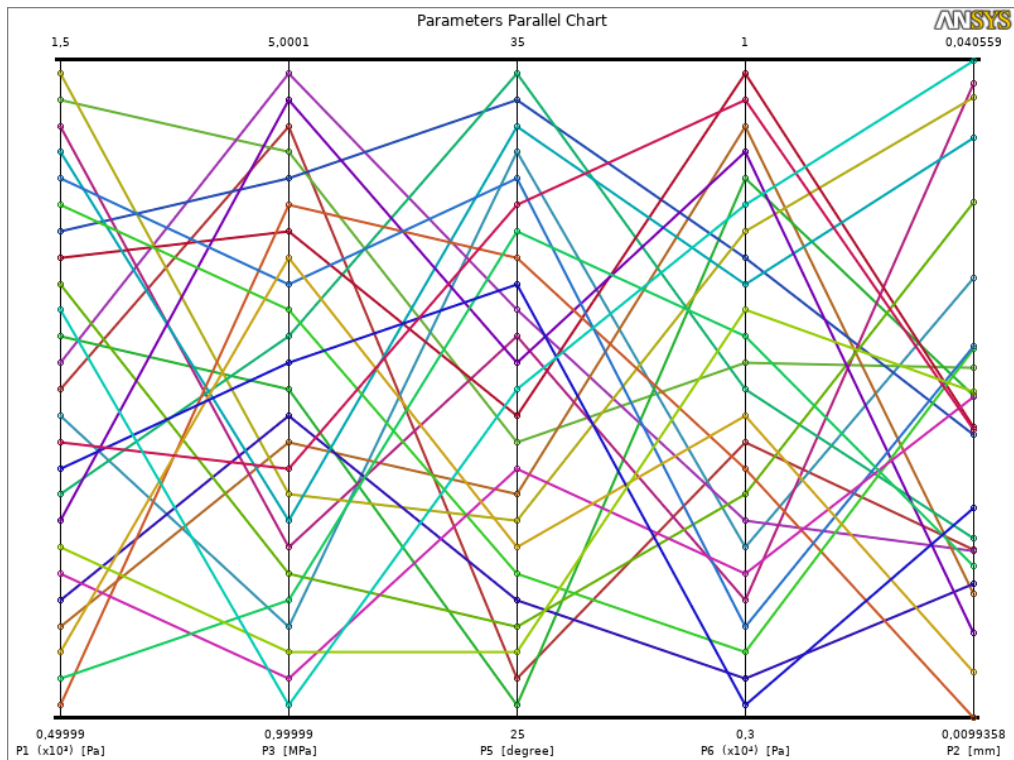


Рисунок 2.28 – Вариативное дерево точек параметризации

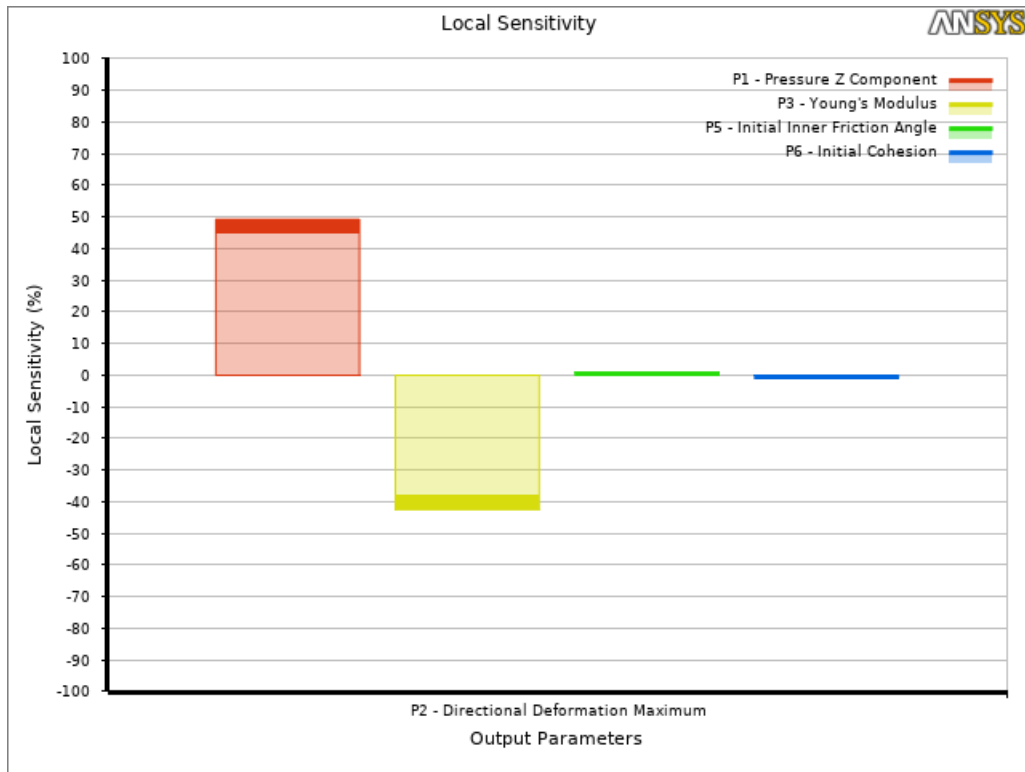


Рисунок 2.29 – Параметр чувствительности исследуемых параметров

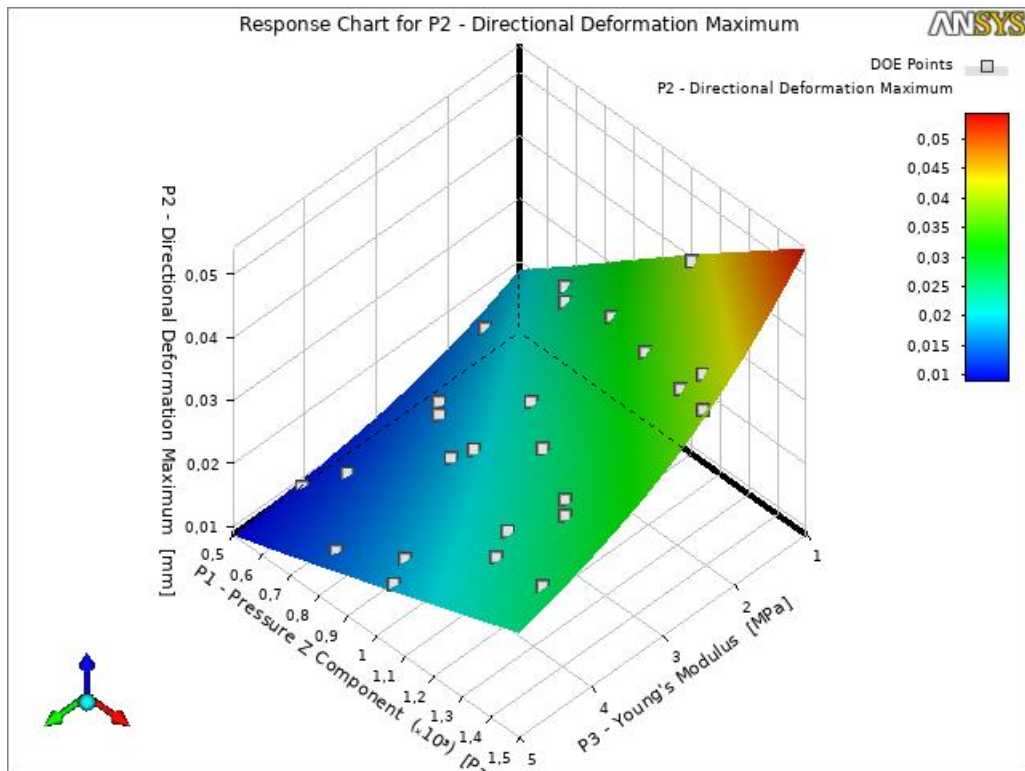


Рисунок 2.29 – Зависимость u от τ и E

ВЫВОДЫ ПО ВТОРОЙ ГЛАВЕ

1. Разработан экспериментальный стенд моделирования тепломеханического перемещения трубопровода при повышении температуры грунта. Разработана система датчиков и написан алгоритм для мониторинга температурных полей вокруг трубопровода при образовании ореола растепления. На стенде используются датчики деформации, усилий и температурные датчики.

2. Произведено сравнение результатов экспериментальных тепловых исследований с расчетами в программном комплексе ANSYS с учетом теплоты фазового перехода из мерзлого состояния грунта в талое состояние. Разработанная компьютерная модель позволяет прогнозировать величину ореола оттаивания при повышении температуры трубопровода и сравнивать результаты расчета с показаниями тепловых датчиков для мониторинга опасных процессов.

3. Исследована зависимость механических характеристик мерзлого грунта при изменении его температуры и влажности. Показана зависимость сопротивления грунта перемещениям от глубины заложения трубопровода. Максимальные значения коэффициента постели на сдвиг достигаются при влажности 10%, и температуре грунта от минус 10 до минус 5 °С. Наибольшие значения модуля деформации и коэффициентов постели при сжатии и сдвиге грунт показывает при влажности 5%, и при температурах от минус 10 до минус 6 °С.

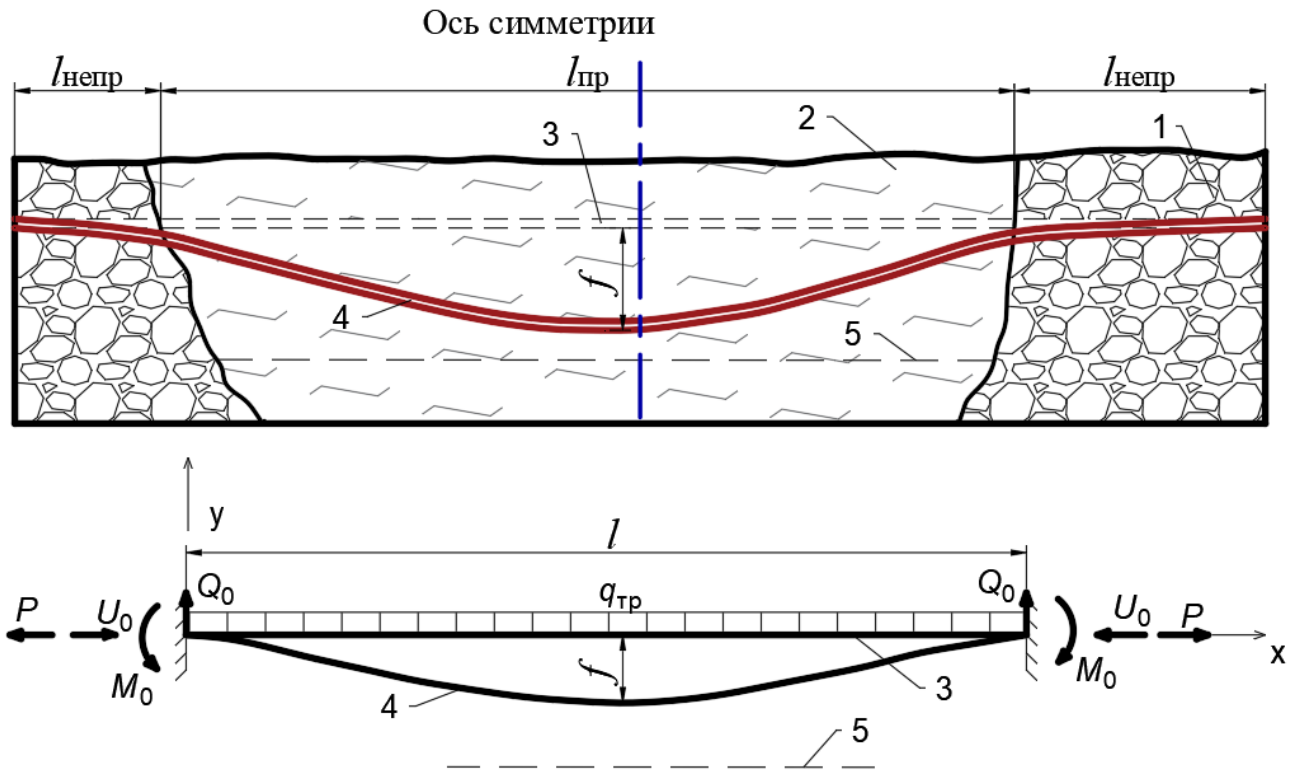
4. На базе тепловой и механической экспериментальных моделей разработана цифровая тепломеханическая модель в программном комплексе ANSYS, цифровая модель позволяет прогнозировать НДС при оттаивании трубопровода. На цифровой модели получена зависимость продольных перемещений u от касательных напряжений τ и модуля деформации грунта E для определения коэффициента постели грунта на сдвиг k_u при различных значениях модуля деформации E . Совпадение цифровой и экспериментальных моделей составило до от 2% до 14% в зависимости от интервала моделируемых температур и нагрузок.

ГЛАВА 3 ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ НДС ТРУБОПРОВОДА ПРИ ПОВЫШЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ МЕРЗЛОГО ГРУНТА

В практике инженерного проектирования принципиально важно точно оценить реакцию подземных трубопроводов на возможные подвижки грунтов, которые серьезно угрожают безопасности трубопровода. В частности, проблема оценки НДС прямолинейного подземного трубопровода, подверженного продольным и поперечным подвижкам грунта, изучалась многими исследователями в течение последних 50 лет с использованием экспериментальных исследований, а также простых аналитических или сложных численных методов. Очевидно, что полномасштабных историй разрушения или экспериментальных исследований, которые можно было бы использовать для оценки или подтверждения применимости разработанных аналитических и численных подходов, немного. В Корнельском университете были проведены полномасштабные испытания для изучения прочности трубопроводов из полиэтилена высокой плотности на разрыв. Исследования НДС трубопровода проводились путем сдвига двух массивов грунтов относительно друг друга в поперечном направлении в зависимости от типа и угла сдвига, а также толщины, диаметра и заглубления трубопровода. В рамках европейского исследовательского проекта GIPIPE была проведена серия испытаний стальных трубопроводов для экспериментального определения взаимодействия грунт-трубопровод при воздействиях грунта, включая движение разломов [61]. Современная формулировка граничных условий не учитывает влияние эксплуатационных нагрузок в трубопроводе, а также зависимость реакции грунта от его температуры, что особенно важно при повышении температуры грунта [71, 72, 74].

Предполагается, что трубопровод находится в прямолинейном положении, основанием для трубопровода служит замороженный грунт, который находится в твердом устойчивом состоянии. Справа и слева от замороженного грунта находится непросадочный грунт, который либо не деформируется при изменении температуры или деформируется незначительно по сравнению с мерзлым просадоч-

ным грунтом при повышении температуры грунта [104, 108, 109], либо температура этого грунта не повышается (Рисунок 3.1). Последний случай может возникнуть, при нарушении тепловой изоляции. В данной расчетной схеме трубопровод под действием собственного веса начинает деформироваться. Грунт, который был в твердом мерзлом состоянии, теперь теряет несущую способность и не является достаточно жестким для поддержания трубопровода в проектном положении.



1 – непросадочный грунт; 2 – просевший грунт; 3 – проектное положение трубопровода; 4 – положение трубопровода в результате осадки оттаявшего грунта; 5 – предельно допустимый уровень прогиба трубопровода;

$l_{0\text{пр}}$ – длина трубопровода на оттаявшем (просадочном) участке грунта,
 $l_{0\text{непр}}$ – длина трубопровода на мерзлом (непросадочном) участке грунта; Q_0 – вертикальная реакции грунта; M_0 – момент, возникающий на границе оттаявшего и мерзлого грунтов; f – прогиб трубопровода; P – растягивающее усилие; U_0 – реакция грунта в продольном направлении

Рисунок 3.1 – Общий вид и расчетная схема трубопровода при просадке

Направления нормальных и касательных напряжений рассматриваемого участка на половине модели показано на Рисунке 3.2. Направление сдвига двух массивов грунта относительно друг друга зависит от угла внутреннего трения непросадочного грунта. Изменение основных механических характеристик при повышении температуры грунта показано в главе 2.

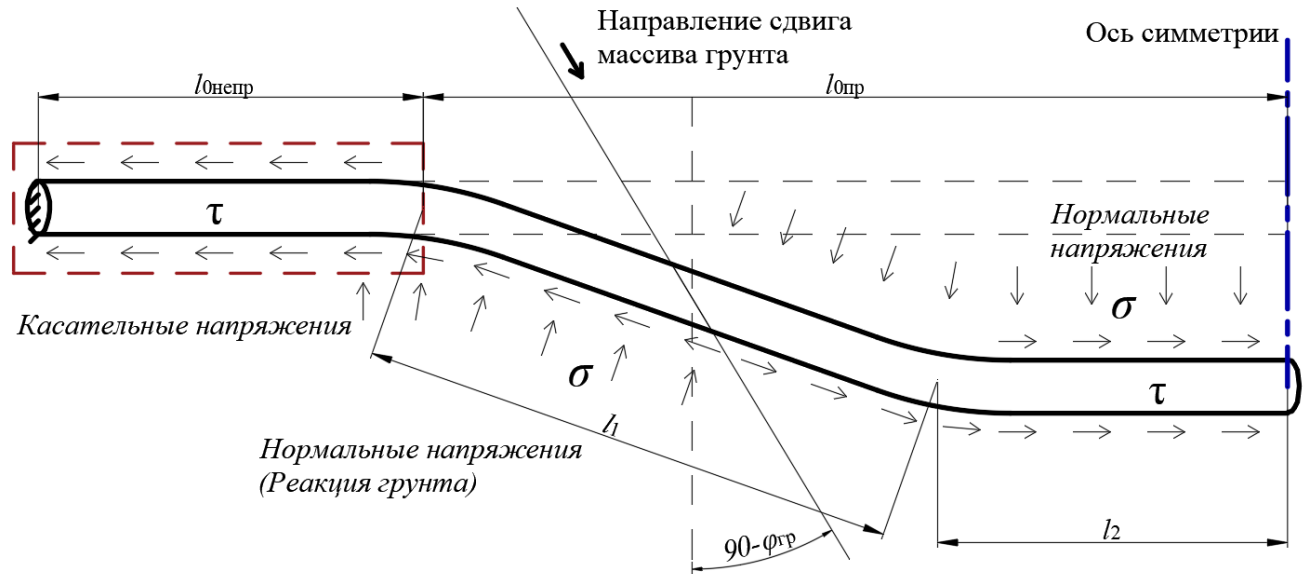


Рисунок 3.2 – Распределение нормальных и касательных напряжений в грунте при повышении температуры грунта

После повышения температуры грунта, искривление участка $l_{0пр}$ может происходить только за счет удлинения участка $l_{0пр}$, а также участков $l_{0непр}$, примыкающих к нему. Граничные условия на концах оттаявшего участка, определяются работой примыкающих участков, рассматриваемых как полубесконечные балки в упругопластичной среде, свойства которых характеризуются коэффициентами постели на сжатии k_0 и коэффициентами постели на сдвиг k_u с обеих сторон участка. Начальная длина участка трубопровода характеризуется начальными длинами просадочного и непросадочного участка $l_0 = l_{0пр} + l_{0непр}$. Конечная длина после остановки движения трубопровода будет вычисляться как сумма начальной

длины трубопровода и растяжения (слабины) трубопровода:

$$l = l_0 + \Delta l_{0\text{пр}} + \Delta l_{0\text{непр}} = l_0 + l_{\text{сл}} [13, 14, 103].$$

Схема к расчету продольных перемещений труб в грунте приведена на Рисунке 3.3, данная схема показывает участок с касательными напряжениями, что является частью Рисунка 3.2. В начале координат на данной схеме трубопровод не имеет перемещений. На Рисунке 3.4 показано равновесие сил в осевом направлении элемента трубы бесконечно малой длины dx , где сопротивление грунта осевому перемещению трубы моделируется линейной пружиной с жесткостью k_u . На Рисунке 3.5 показано схематическое изображение осевого взаимодействия трубопровода с грунтом. Это означает, что грунт может сопротивляться только до тех пор, пока в грунте не возникнет критических напряжений: грунт переходит в пластичное состояние (Рисунок 3.5). Очевидно, что чем больше зона с критическими касательными напряжениями, тем больше будут деформации трубопровода и максимальный прогиб f , и, следовательно, тем больше будут изгибающие напряжения в трубопроводе на границе двух состояний грунтов.

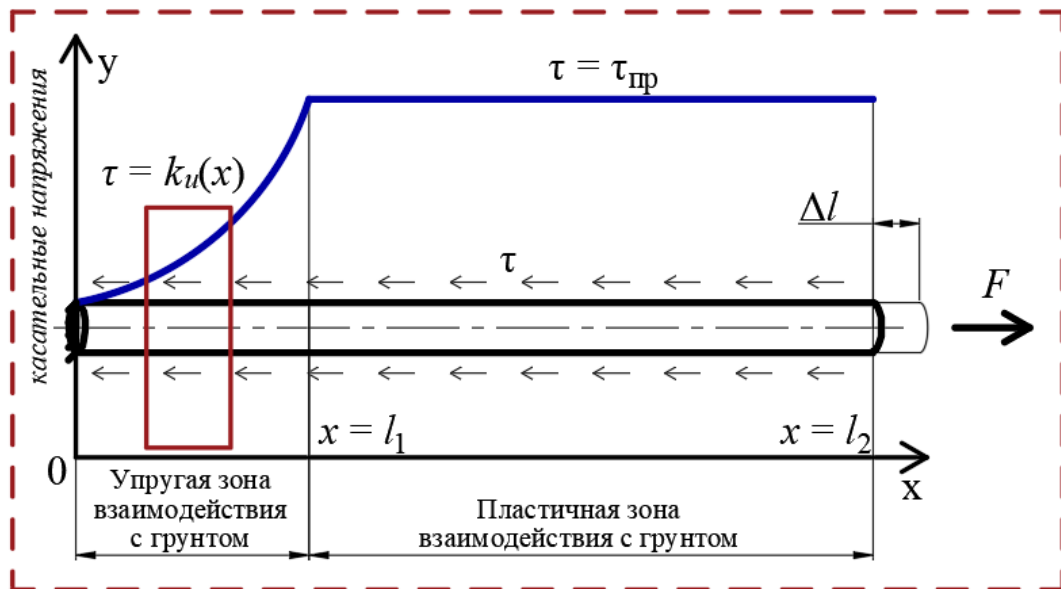


Рисунок 3.3 – Расчетная схема перемещений полубесконечного трубопровода при упругопластичной связи с грунтом

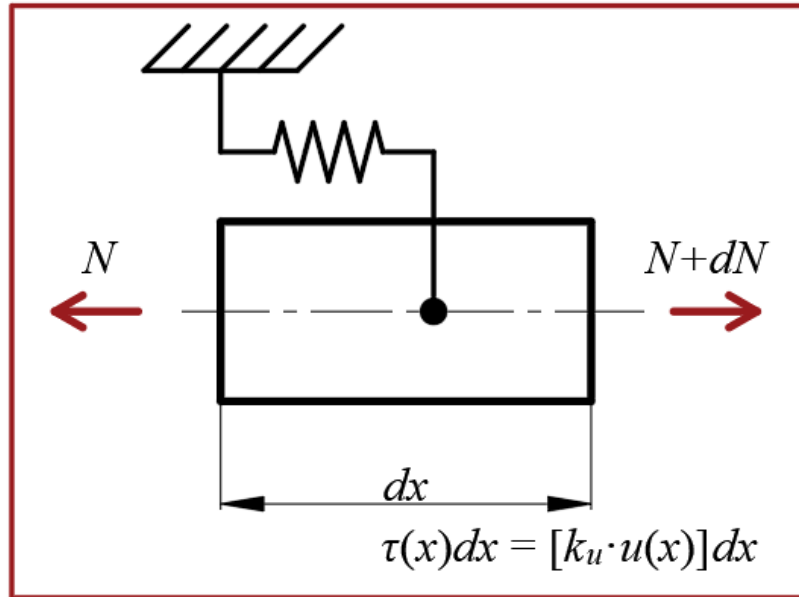


Рисунок 3.4 – К расчету бесконечно-малого участка трубопровода при упругой связи трубопровода с грунтом

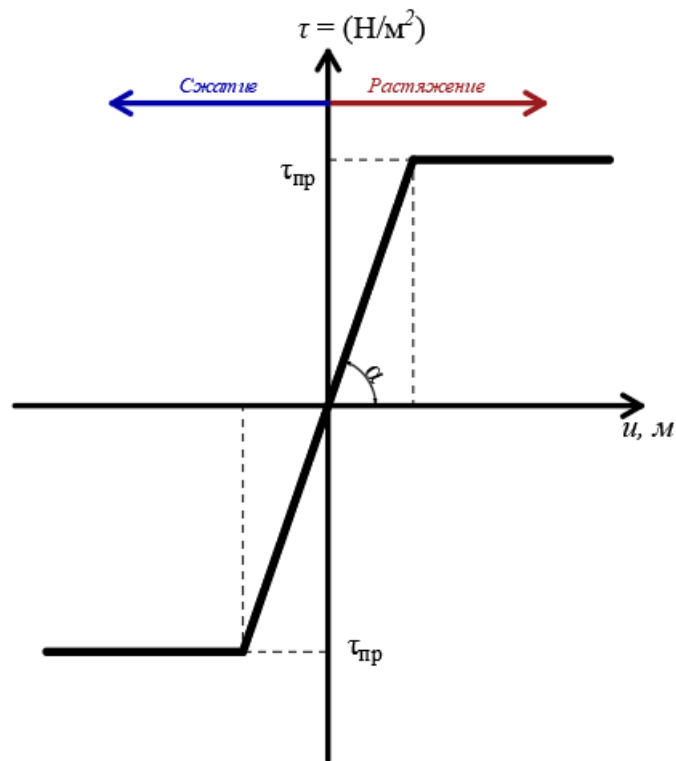


Рисунок 3.5 – Характер взаимодействия подземного трубопровода с грунтом

Для оценки влияния коэффициента постели на продольные перемещения рассмотрим пример подземного участка реального трубопровода, $D = 1020$ мм, трубопровод расположен в северном районе страны. Исходные данные, требующиеся для расчета, приведены ниже:

- $D_n = 1020$ мм – наружный диаметр трубопровода;
- $D_{вн} = 998$ мм – внутренний диаметр трубопровода;
- $\delta_n = 16$ мм – толщина стенки трубопровода;
- $p = 6,4$ МПа – рабочее давление в трубопроводе;
- $\Delta t = 75$ °С;
- $h_0 = 1,3 \dots 2,0$ м - высота слоя засыпки от верхней образующей трубопровода до дневной поверхности;
- вид грунта – глина;
- $\gamma_{непр} = 18$ кН/м³, $\gamma_{пр} = 15,5$ кН/м³ – удельный вес грунта;
- $\varphi_{непр} = 45^\circ$, $\varphi_{пр} = 20^\circ$ – угол внутреннего трения грунта;
- $c_{непр} = 20$ кПа; $c_{пр} = 1$ кПа – сцепление грунта;
- $k_0^{непр} = 15$ МН/м³, $k_0^{пр} = 5$ МН/м³ – коэффициент постели грунта при сжатии (данные взяты из главы 2);
- $k_u^{непр} = 20$ МН/м³, $k_u^{пр} = 8$ МН/м³ – коэффициент постели грунта при сдвиге (данные взяты из главы 2);
- трубы с заводской изоляцией - $\rho_{из} = 1350$ кг/м³;
- $\delta_{из} = 3$ мм;
- $n_{с.в.} = 0,95$.

Расчет основных характеристик трубопровода произведен согласно [68-70].

3.1 Изменения продольных перемещений трубопровода при изменении температуры окружающего грунта

Для определения продольных перемещений подземного полубесконечного трубопровода необходимо знать реакцию грунта на трубопровод, для этого определим вес металла трубы и изоляционного покрытия. В Таблицу 3.1 внесены крайние расчетные значения, которые не зависят от длины трубопровода, для температур грунта $t = -1$ °С – просадочный грунт и для $t = -10$ °С – непросадочный грунт. В расчете рассматривается худший случай, при котором достигается наибольшая разница деформаций. Чем труба легче, тем больше будет разница деформаций при просадке грунта. Поэтому не будем учитывать вес металла продукта, а коэффициент надежности примем равным $n_{св} = 0,95$ [68-69].

$$q_m = q_m^H \cdot n_{св} , \quad (3.1)$$

$$q_{из} = q_{из}^H \cdot n_{св} , \quad (3.2)$$

$$q_{пр} = q_{пр}^H \cdot n_{св} , \quad (3.3)$$

$$q_{тп} = q_m + q_{из} + q_{пр} . \quad (3.4)$$

где q_m – вес металла трубы;

$q_{из}$ – вес изоляции трубопровода;

$q_{пр}$ – вес перекачиваемого продукта.

Среднее удельное давление на единицу поверхности контакта трубы с грунтом с учетом коэффициента надежности по нагрузке (в заводских условиях) $n_{гр} = 0,8$ [12-16]:

$$P_{зп} = \frac{2n_{зп} \cdot \gamma_{зп} \cdot D_{ну} \left(\left(h_0 + \frac{D_{ну}}{8} \right) + \left(h_0 + \frac{D_{ну}}{2} \right) \cdot \operatorname{tg}^2 \left(45 - \frac{\varphi_{зп}}{2} \right) \right) + q_{тп}}{\pi D_{ну}} , \quad (3.5)$$

где $\gamma_{\text{гр}}$ – удельный вес грунта ($\gamma_{\text{гр}} = \rho_{\text{гр}}g$);

h_0 – глубина заложения от дневной поверхности грунта до верхней образующей трубопровода;

$\varphi_{\text{гр}}$ – угол внутреннего трения грунта.

Предельные касательные напряжения по контакту труба-грунт [12-16]:

$$\tau_{\text{нр}} = P_{\text{зр}} \cdot \text{tg} \varphi_{\text{зр}} + c_{\text{зр}}, \quad (3.6)$$

где $c_{\text{гр}}$ – сцепление грунта.

Сопротивление грунта продольным перемещениям отрезка трубопровода единичной длины [12-16]:

$$p_0 = \pi \cdot D_{\text{ни}} \cdot \tau_{\text{нр}}, \quad (3.7)$$

где $\tau_{\text{нр}}$ – предельные касательные напряжения, при которых грунт работает за пределами упругих деформаций.

Определим расчетный коэффициент β :

$$\beta = \sqrt{\frac{\pi \cdot D_{\text{ни}} \cdot k_u}{EF}}, \quad (3.8)$$

где k_u – коэффициент постели грунта при сдвиге.

Предельная величина продольного усилия [12-16]:

$$P_{\text{нр}} = \frac{\tau_{\text{нр}} \beta EF}{k_u}. \quad (3.9)$$

Длина участка упругой связи [12-16]:

$$l_1 = \frac{3,5}{\beta} . \quad (3.10)$$

Длина участка пластичной связи трубопровода с грунтом [12-16]:

$$l_2 = \frac{P - P_{np}}{p_0} ; \quad (3.11)$$

$$P = (0,2\sigma_{кц} + \alpha E\Delta t)F , \quad (3.12)$$

где P – эквивалентное продольное усилие, возникающее при перепаде температур и при действии продольных сил от давления;

P_{np} – усилие, при котором касательные напряжения равны предельным;

$\sigma_{кц}$ – кольцевые напряжения в трубопроводе;

α – коэффициент температурного расширения, для металла $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5} 1/^\circ\text{C}$;

Δt – температурный перепад, для северных регионов строительства в зависимости от места строительства примерно равен $\Delta t \approx 55..80$ °C.

Определим продольные усилия и перемещения в нескольких сечениях участка l_2 . При $x_n = 0$, $u(x_n)$ определим, как при $P = P_{np}$ [12-16]:

$$u(x_n) = \frac{\tau_{np}}{k_u} + \frac{P_{np}x_n}{EF} + \frac{p_0x_n^2}{2EF} ; \quad (3.13)$$

$$P(x_n) = P_{np} + p_0x_n . \quad (3.14)$$

При этом касательные напряжения максимальны и равны $\tau_{\max} = \tau_{np}$. Продольные усилия в том же сечении $P(x_n)$ равны P_{np} ,

Таблица 3.1 – Расчет характеристик грунта и трубопровода

Наименование параметра	Значения при температуре грунта $t = -1$ °С	Значения при температуре грунта $t = -10$ °С
1	2	3
Вес металла трубы, q_m , кН/м	3,96	
Вес изоляции трубопровода, $q_{из}$, кН/м	0,12	
Давление грунта на трубопровод, $P_{гр}$, кПа	25,17	19,29
Угол внутреннего трения грунта, $\varphi_{гр}$, град	20	45
Сцепление грунта, $c_{гр}$, кПа	1	20
Предельные касательные напряжения, $\tau_{пр}$, кПа	10,16	45,17
Коэффициент постели грунта при сжатии, k_0 , МН/м ³	5	15
Коэффициент постели грунта при сдвиге, k_u , МН/м ³	8	20
Расчетный коэффициент β , 1/м	0,0498	0,0787
Предельная величина продольного усилия, $P_{пр}$, МН	0,70	1,68
Длина участка упругой связи, l_1 , м	70,28	44,47
Эквивалентное продольное усилие, P , МН	11,6	11,6
Длина участка пластичной связи, l_2 , м	336,13	67,39

Определим перемещения, касательные напряжения и продольные усилия в нескольких сечениях участка l_1 , P на $P_{пр}$ для мерзлого и для оттаявшего грунтов.

При $x = 0$, $u(x) = 0$, $\tau(x) = 0$:

$$P(x) = P_{np} \frac{ch\beta x}{ch\beta l_1} \quad (3.15)$$

При перемещении x :

$$u(x) = \frac{P_{np} sh\beta x}{\beta EFch\beta l_1} ; \quad (3.16)$$

$$\tau(x) = k_u \cdot u(x) \quad (3.17)$$

Результаты вычислений для остальных сечений занесены в Таблицу 3.2. Результаты вычислений для остальных сечений занесены в Таблицу 3.3.

Полное перемещение свободного конца участка трубопровода [12-16]:

$$u = u_1 + u_2 = \frac{\tau_{np}}{k_u} + \frac{P^2 - P_{np}^2}{2\pi D_{nu} \tau_{np} EF} . \quad (3.18)$$

Таблица 3.2 – Результаты $u(x)$, $\tau(x)$ и $P(x)$ на участке упругой связи трубопровода с грунтом.

Координата рассматриваемого сечения	Расчетные коэффициенты			Перемещение сечения	Касательные напряжения в сечении	Усилие в сечении
1	2			3	4	5
x , м	βx	$\text{sh } \beta x$	$\text{ch } \beta x$	$u(x)$, м	$\tau(x)$, кПа	$P(x)$, МН
0	0,000	0,000	1,000	0,000	0	0,040
10	0,498	0,519	1,127	0,040	0,318	0,045
20	0,996	1,169	1,538	0,090	0,717	0,061
30	1,494	2,115	2,340	0,162	1,297	0,093
40	1,992	3,597	3,734	0,276	2,205	0,148
50	2,490	5,990	6,073	0,459	3,672	0,241
60	2,988	9,900	9,950	0,759	6,069	0,395
70	3,486	16,316	16,347	1,250	10,002	0,649

Таблица 3.3 – Результаты вычислений $u(x)$ и $P(x)$ на участке пластичной связи трубопровода с грунтом.

Координата рассматриваемого сечения	Усилие в сечении	Перемещение сечения
1	2	3
x , м	$P(x)$, МН	$u(x)$, м
0	0,658	1,270
20	1,309	3,161
40	1,960	6,305
60	2,611	10,701
80	3,262	16,351
100	3,913	23,252
120	4,564	31,406

Продолжение Таблицы 3.3

Координата рассматриваемого сечения	Усилие в сечении	Перемещение сечения
1	2	3
x , м	$P(x)$, МН	$u(x)$, м
140	5,215	40,813
160	5,866	51,473
180	6,517	63,385
200	7,169	76,549
220	7,820	90,967
240	8,471	106,636
260	9,122	123,559
280	9,773	141,734
300	10,424	161,162
320	11,075	181,842
336	11,600	199,433

На Рисунках 3.6-3.8 приведены результаты расчетов перемещений, касательных напряжений и внутренних сил в зависимости от длины трубопровода для двух состояний грунта – мерзлого ($t_{гр} = -10$ °С) и оттаявшего ($t_{гр} = -1$ °С), а также для промежуточного значения ($t_{гр} = -5$ °С) для визуализации процесса деформирования трубопровода при повышении температуры грунта. Значения механических характеристик для данных температур определены по экспериментальным значениям, полученным в главе 2.

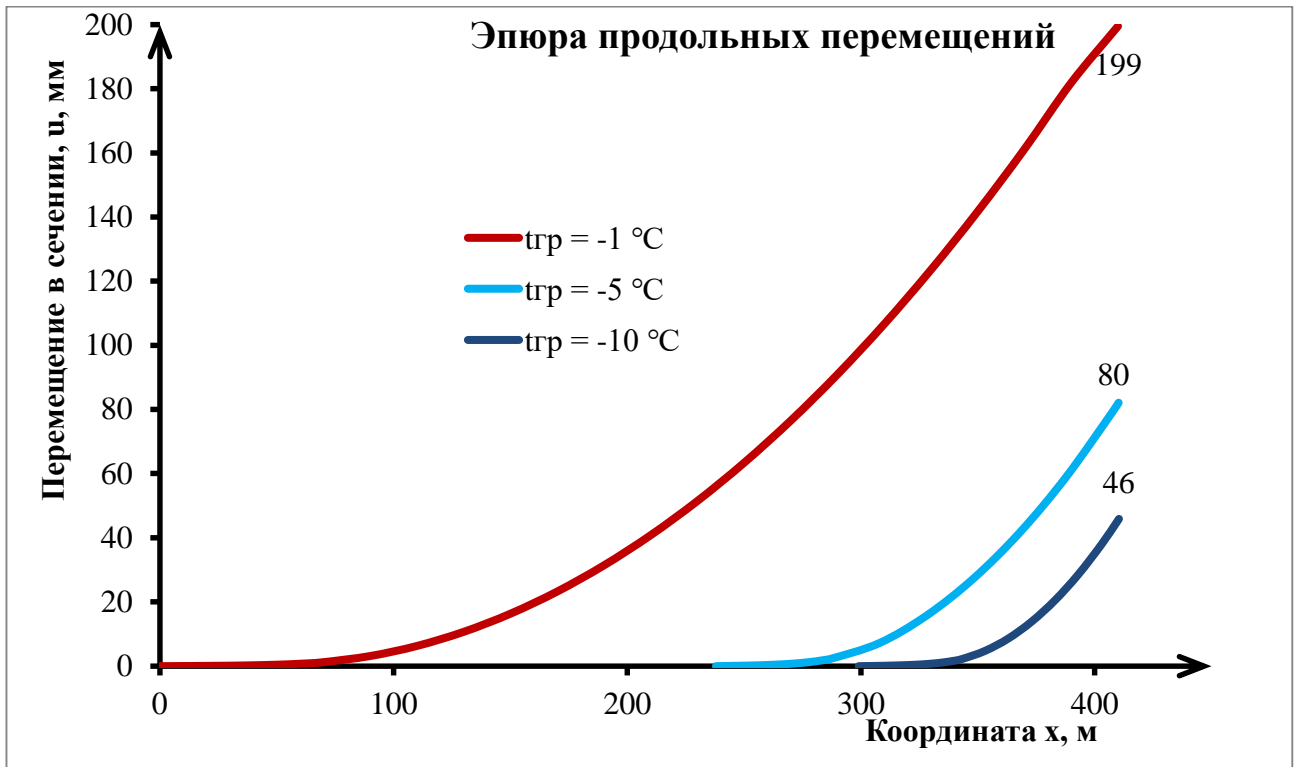


Рисунок 3.6 – Эпюра перемещений

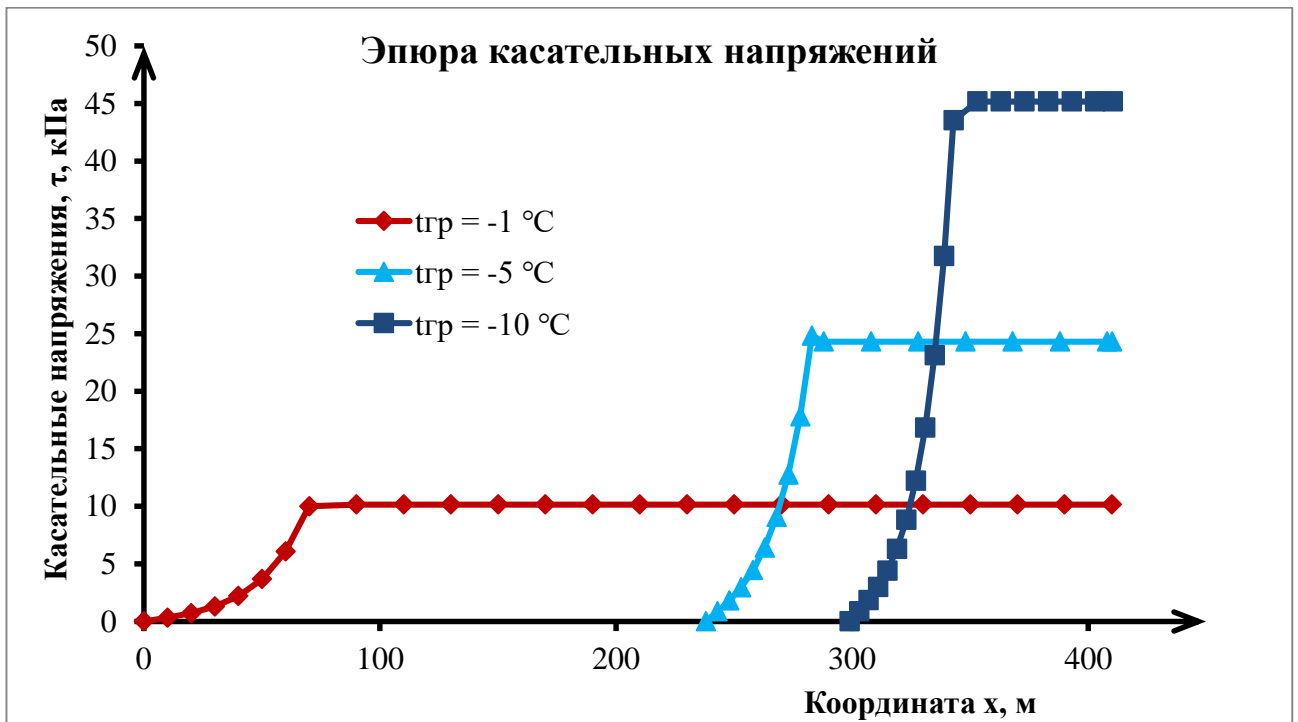


Рисунок 3.7 – Эпюра касательных напряжений

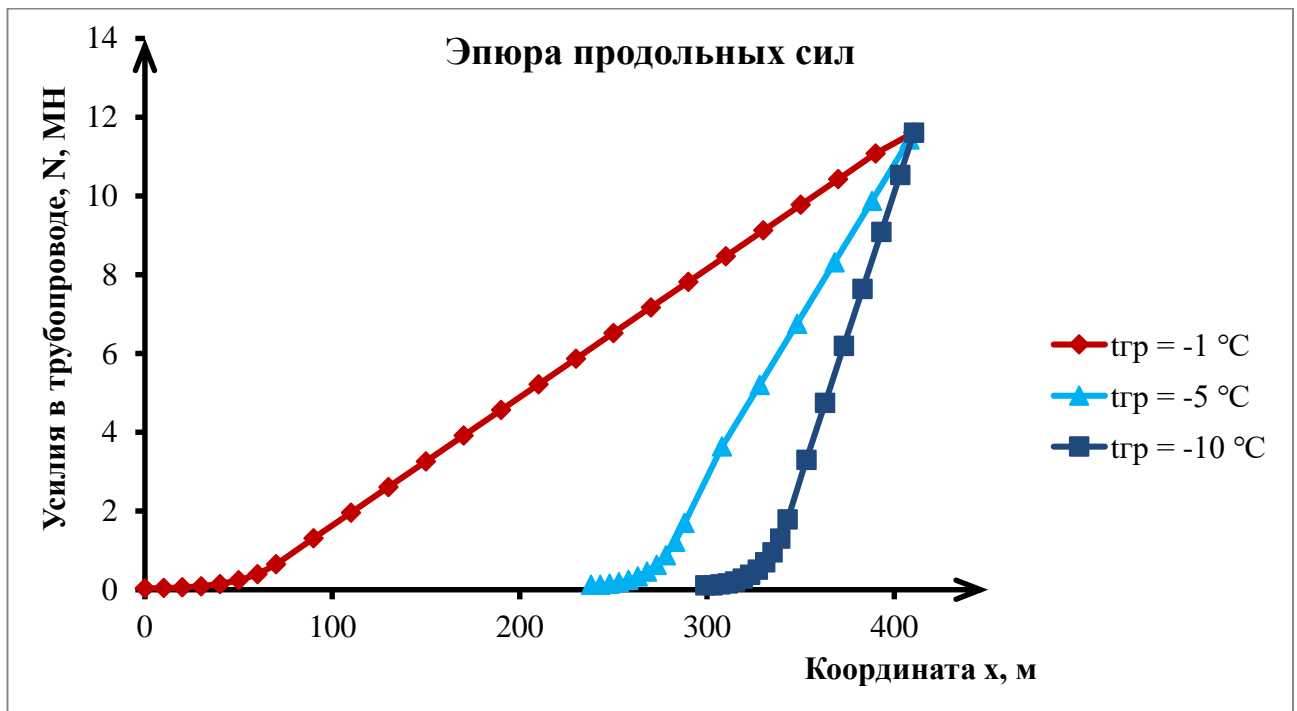


Рисунок 3.8 – Эшюра продольных сил в трубопроводе

Как видно из данных графиков при $k_{u(-10^{\circ}\text{C})} \approx 1,75k_{u(-5^{\circ}\text{C})} \approx 2,5k_{u(-1^{\circ}\text{C})}$:

- перемещения свободного конца трубопровода:

$$u_{-10^{\circ}\text{C}} \approx 1,74u_{-5^{\circ}\text{C}} \approx 4,33u_{-1^{\circ}\text{C}};$$

- участок упругого взаимодействия трубопровода с грунтом:

$$l_{-10^{\circ}\text{C}} \approx l_{-5^{\circ}\text{C}} \approx 1,6 l_{-1^{\circ}\text{C}};$$

- общая длина деформированного трубопровода:

$$l_{-10^{\circ}\text{C}} \approx 1,55l_{-5^{\circ}\text{C}} \approx 3,7l_{-1^{\circ}\text{C}};$$

- предельные касательные напряжения по контакту трубопровод грунт:

$$4,5\tau_{пр(-10^{\circ}\text{C})} \approx 2,4\tau_{пр(-5^{\circ}\text{C})} \approx \tau_{пр(-1^{\circ}\text{C})}.$$

3.2 Результаты расчета НДС трубопровода при просадке численным методом

Рассмотрим методику определения перемещений и напряженного состояния трубопровода, показанного на Рисунке 3.1, при повышении температуры и просадке грунта. В данной расчетной схеме трубопровод начинает прогибаться от действия веса металла трубы, веса изоляции и веса продукта, если трубопровод находится в эксплуатации. Дифференциальное уравнение изгиба при условии, что свойства грунта с обеих сторон от оттаявшего участка одинаковы, записывается в виде [13,14]:

$$EI \frac{d^2 y}{dx^2} = M_0 + P(y - \omega) - x \int_0^x \frac{q(x, v_0) dx}{2} + \int_0^x q(\xi, v_0)(x - \xi) d\xi, \quad (3.19)$$

где, x, y – координаты рассматриваемого сечения оси трубопровода;

w – прогиб трубопровода в сечениях на границе просадочного и непросадочного грунтов;

EI – жесткость трубопровода;

$q(x, v_0), q(\xi, v_0)$ – интенсивность нагрузки в сечениях x, ξ ;

M_0 – момент, возникающий на границе оттаявшего и мерзлого грунтов;

P – растягивающее усилие, возникающее от веса оттаявшего участка, а также от температурного перепада и давления в трубопроводе [12-16, 41].

При условии, что процесс статичен, а скорость осадки трубопровода минимальна, то есть $v_0 = v_{гр} \rightarrow 0$, а нагрузка постоянна $q = const$, дифференциальное уравнение примет вид [13,14]:

$$EI y'' = M_0 + P(y - \omega_0) + \frac{qx^2}{2} - \frac{qlx}{2}. \quad (3.20)$$

Запишем данное уравнение в другом виде, поделив обе части уравнения на EI и примем $P/EI = k^2$, тогда [13,14]:

$$y'' - k^2 y = \frac{k^2}{P} \left(M_0 - P\omega_0 + \frac{qx^2}{2} - \frac{qlx}{2} \right). \quad (3.21)$$

Решим данное неоднородное дифференциальное уравнение, получим:

$$y = C_1 ch(kx) + C_2 sh(kx) - \frac{q}{P} \left(\frac{M_0}{q} - \frac{P\omega_0}{q} + \frac{x^2}{2} - \frac{lx}{2} \right) - \frac{q}{k^2 P}; \quad (3.22)$$

$$y' = C_1 ksh(kx) + C_2 kch(kx) - \frac{q}{P} \left(x - \frac{l}{2} \right); \quad (3.23)$$

$$y'' = C_1 k^2 ch(kx) + C_2 k^2 sh(kx) - \frac{q}{P} = \frac{M(x)}{EI}; \quad (3.24)$$

Константы C_1 и C_2 найдем на основании граничных условий $x = 0, y = w_0$; $x = l, y = w_0$:

$$C_1 = \frac{M_0}{P} + \frac{q}{k^2 P}; \quad (3.25)$$

$$C_2 = - \left(\frac{M_0}{P} + \frac{q}{k^2 P} \right) th \left(\frac{kl}{2} \right). \quad (3.26)$$

Наибольшая осадка трубопровода в сечении $x = l/2$ может быть найдена по следующим зависимостям [13,14]:

$$f = \frac{ql^2}{8P} - \left(\frac{M_0}{P} + \frac{q}{k^2 P} \right) \frac{\left(ch \left(\frac{kl}{2} \right) - 1 \right)}{ch \left(\frac{kl}{2} \right)} + \omega_0; \quad (3.27)$$

$$\omega_0 = \frac{2\alpha}{k_0 D} \left(\frac{ql}{2} + \alpha M_0 \right); \quad (3.28)$$

$$k^2 = \frac{P}{EI}; \quad (3.29)$$

$$\alpha = \sqrt[4]{\frac{k_0 D}{4EI}}. \quad (3.30)$$

Значение изгибающего момента на границе грунтов и в середине пролета:

$$M_0 = \frac{\frac{ql}{2P} - \frac{\alpha^2 ql}{k_0 D} - \frac{q}{kP} \operatorname{th}\left(\frac{kl}{2}\right)}{\frac{4\alpha^3}{k_0 D} + \frac{k}{P} \operatorname{th}\left(\frac{kl}{2}\right)}; \quad (3.31)$$

$$M_c = \left(M_0 + \frac{q}{k^2} \right) \frac{1}{\operatorname{ch}\left(\frac{kl}{2}\right)} - \frac{q}{k^2}. \quad (3.32)$$

Полное удлинение участка l за счет перемещений полубесконечных трубопроводов с обеих сторон участков за счет веса оттаявшего участка, перепада температур и внутреннего давления в трубопроводе [13,14]:

$$u = \frac{Pl}{EF} + u_{01} + u_{02} + u_{ст}. \quad (3.33)$$

где u_{01}, u_{02} – удлинение примыкающих участков;

$u_{ст}$ – продольные перемещения труб за счет растяжения трубопровода от перепада температур и внутреннего давления в трубопроводе.

Величина прогиба u может быть определена из условия [13,14]:

$$u = \frac{\pi^2 f^2}{4l}. \quad (3.34)$$

Приравнивая (3.27) и (3.28) находим для $x = l/2$:

$$f = \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{Pl^2}{EF} + (u_{01} + u_{02} + u_{cl})l}. \quad (3.35)$$

Перемещение конца трубопровода «полубесконечной» длины определяется по формулам [13,14]:

$$u_{01}, (u_{02}) = \frac{P_{01(02)}}{\beta EF}; \quad (3.36)$$

$$\beta = \frac{\pi D k_u}{EF}; \quad (3.37)$$

$$u_{cl} = \alpha_l l \Delta t + \frac{\mu \varphi l D_{6H}}{2 \delta E}. \quad (3.38)$$

Подобное описание прогибов и изгибающих напряжений в трубопроводе позволяет составить физическую модель трубопровода, где основными изменяющимися величинами будут коэффициенты постели грунта на сжатие и на сдвиг, которые в свою очередь зависят от температуры и влажности грунта.

Решение выполняется графическим методом. Задаем с определенным шагом усилие P и находим для различных усилий P значения прогиба u_0 по формулам (3.27) и (3.35) строим зависимость $P = f(f)$. Фактическим значением прогиба будет точка пересечения двух зависимостей на графике. Оттуда же находим величину продольного усилия. Данные о характеристиках сечения трубопровода представлены в Таблице 3.4.

Таблица 3.4 – геометрические характеристики трубопровода

Диаметр	Толщина стенки	Площадь поперечного сечения	Момент сопротивления	Момент инерции
D , мм	δ , мм	F , м ²	W , см ³	I , см ⁴
1020	16	0,050	12500	636000

Решим задачу определения прогиба при различных температурах грунта для разных коэффициентов постели k_u и k_0 . Зададимся протяженностью образованного в результате растепления грунта $l = 40..100$ м, диаметр трубопровода $D_n = 1020$ мм, толщина стенки трубопровода $\delta = 16$ мм.

Здесь предполагается, что трубопровод постепенно повышает свою температуру, длина просевшего участка увеличивается с $l = 40$ м до $l = 100$ м. Реакция оттаявшего просадочного грунта не учитывалась: предполагается, что грунт полностью оттаял и его перемещение происходит вместе с трубопроводом. Граничные участки грунта меняют свои механические свойства при изменении температуры. Трубопровод находится на глубине $h_0 = 1,5$ м (до верхней образующей). На Рисунке 3.8 показано, как будет изменяться положение трубопровода при различной длине оттаявшего участка. На Рисунке 3.9 изображены эпюры изгибающих напряжений в трубопроводе, как видно по эпюрам, при увеличении длины оттаявшего участка $l_{пр}$ от 40 до 80 метров наблюдается увеличение изгибающих напряжений на границах и в центре участка. Однако, при дальнейшем увеличении длины оттаявшего участка происходит постепенное уменьшение изгибающих напряжений, связано это с более плавной формой прогиба и более длинным переходным участком, изгибом трубопровода в зоне непросадочного грунта. В таком случае напряжения перераспределяются более плавно по длине трубопровода, однако прогиб больше допустимого.

Так же сравнивалось напряженно-деформированное состояние при изменении коэффициентов постели грунта от температуры. Рассмотрим трубопровод длиной 100 м. Коэффициенты постели согласно проведенным исследованиям примем:

$$k_{u(-10^{\circ}\text{C})} = 20 \text{ МН/м}^3; k_{u(-5^{\circ}\text{C})} = 14 \text{ МН/м}^3; k_{u(-1^{\circ}\text{C})} = 8 \text{ МН/м}^3;$$

$$k_{0(-10^{\circ}\text{C})} = 15 \text{ МН/м}^3; k_{0(-5^{\circ}\text{C})} = 10 \text{ МН/м}^3; k_{0(-1^{\circ}\text{C})} = 5 \text{ МН/м}^3.$$

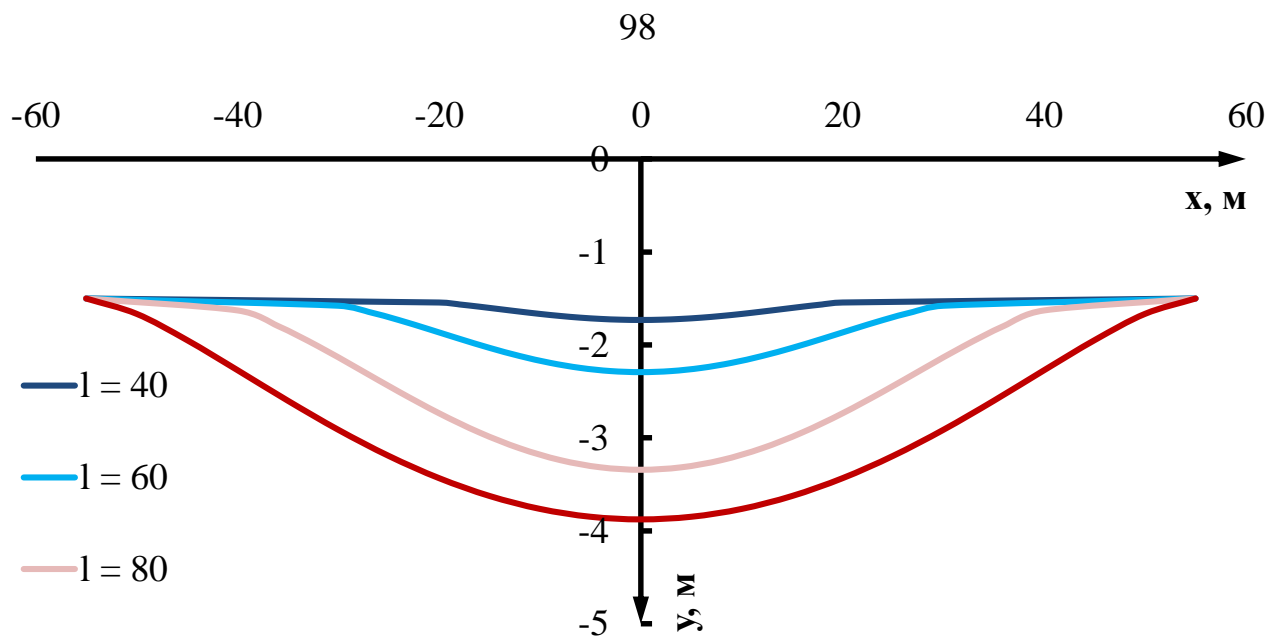


Рисунок 3.8 – Положение трубопровода при длинах просадки $l = 40 \dots 100$ м

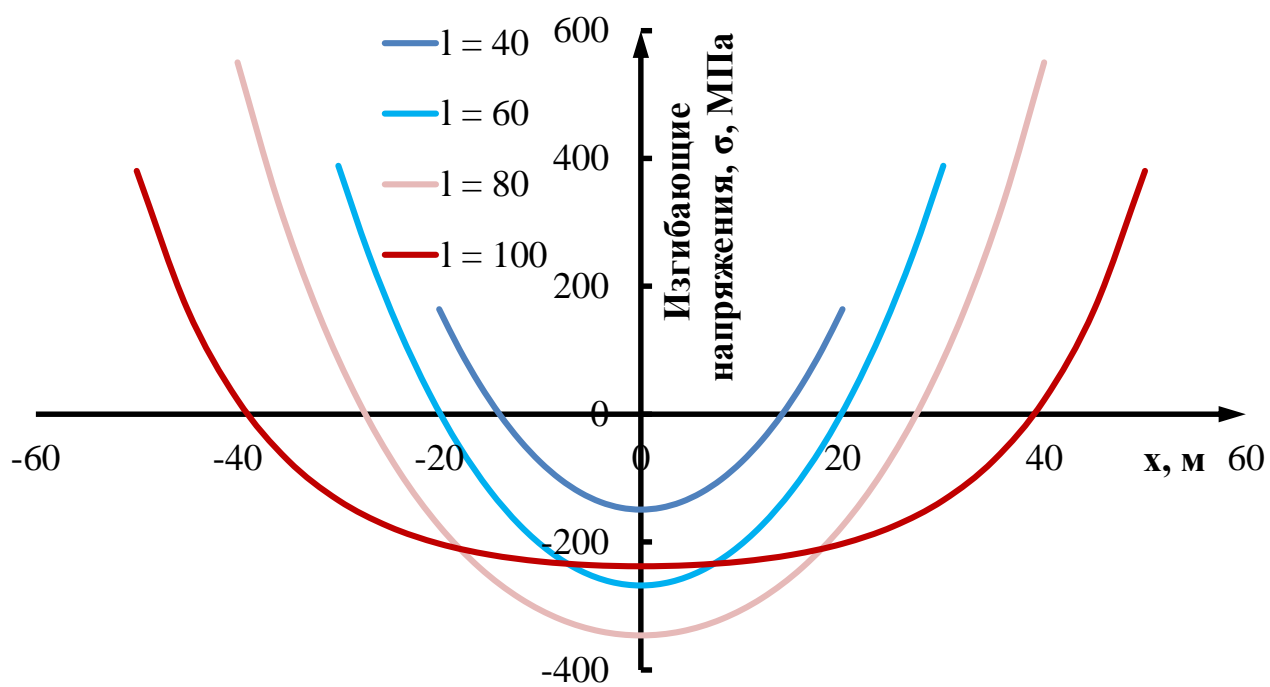


Рисунок 3.9 – Эпюры изгибающих напряжений в трубопроводе при различных длинах просадки

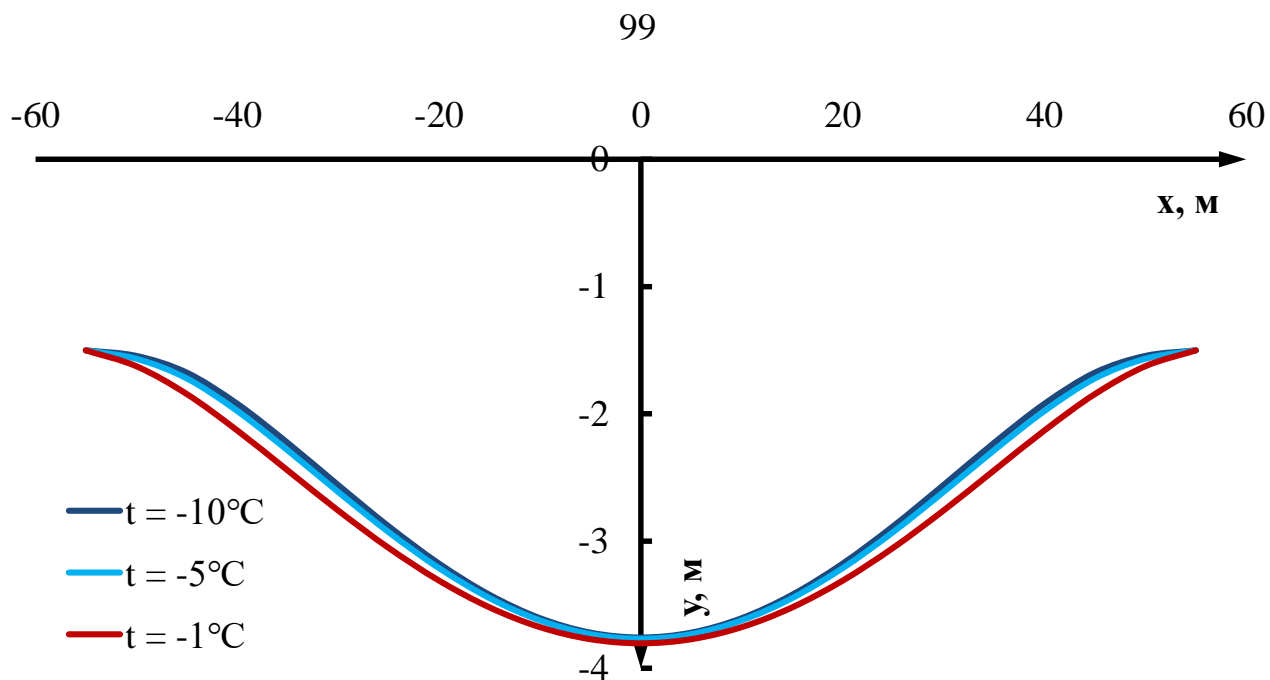


Рисунок 3.10 – Положение трубопровода при длине просадки $l = 100$ м и температурах непросадочного грунта $t = -10\dots-1$ °C

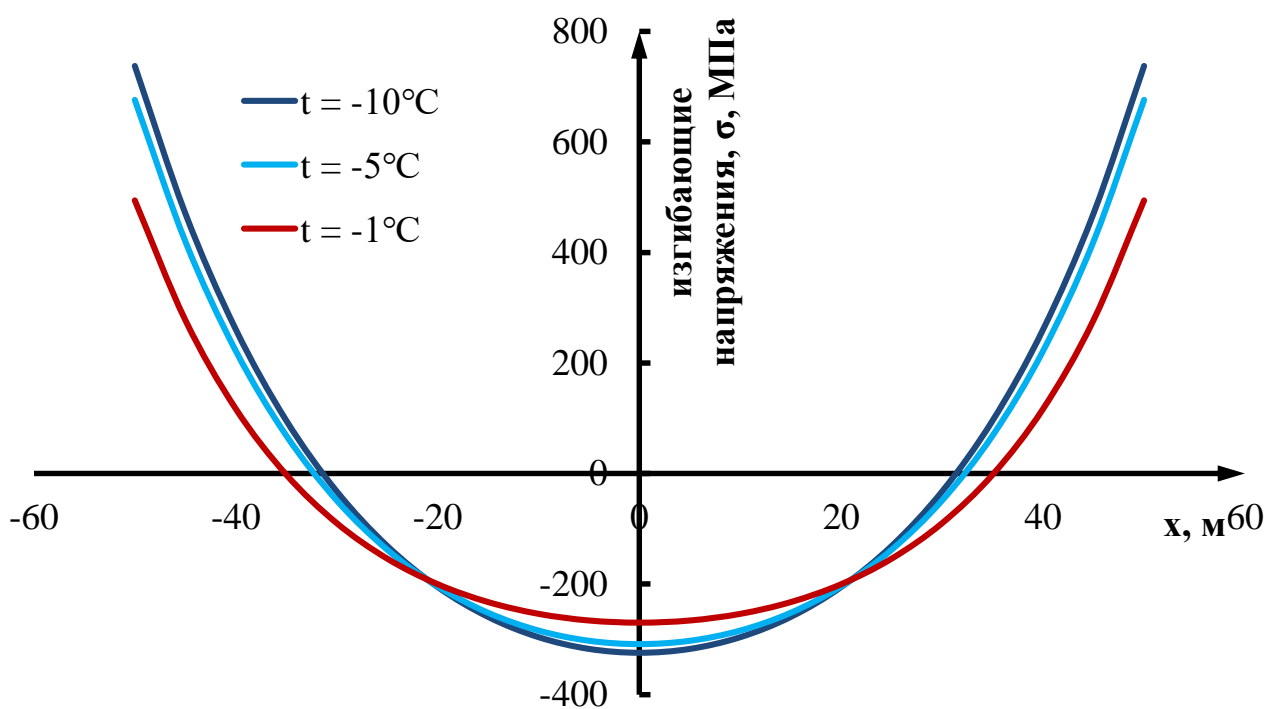


Рисунок 3.11 – Эпюры изгибающих напряжений в трубопроводе при длине просадки $l = 100$ м и температурах непросадочного грунта $t = -10\dots-1$ °C

Были проанализированы случаи прогибов и усилий при изменении коэффициента постели при сжатии в интервале $k_0 = 0,5 \dots 20 \text{ МН/м}^3$, при предположении, что $k_u = 0,75k_0$. Изменение продольных напряжений при просадке трубопровода показано на Рисунке 3.12. Ось абсцисс направлена в сторону повышения температур, что ведет к уменьшению коэффициента постели. Как видно по графику, наиболее резкое изменение растягивающего усилия и максимального прогиба будет в пределах $k_u = 0 \dots 6 \text{ МН/м}^3$.

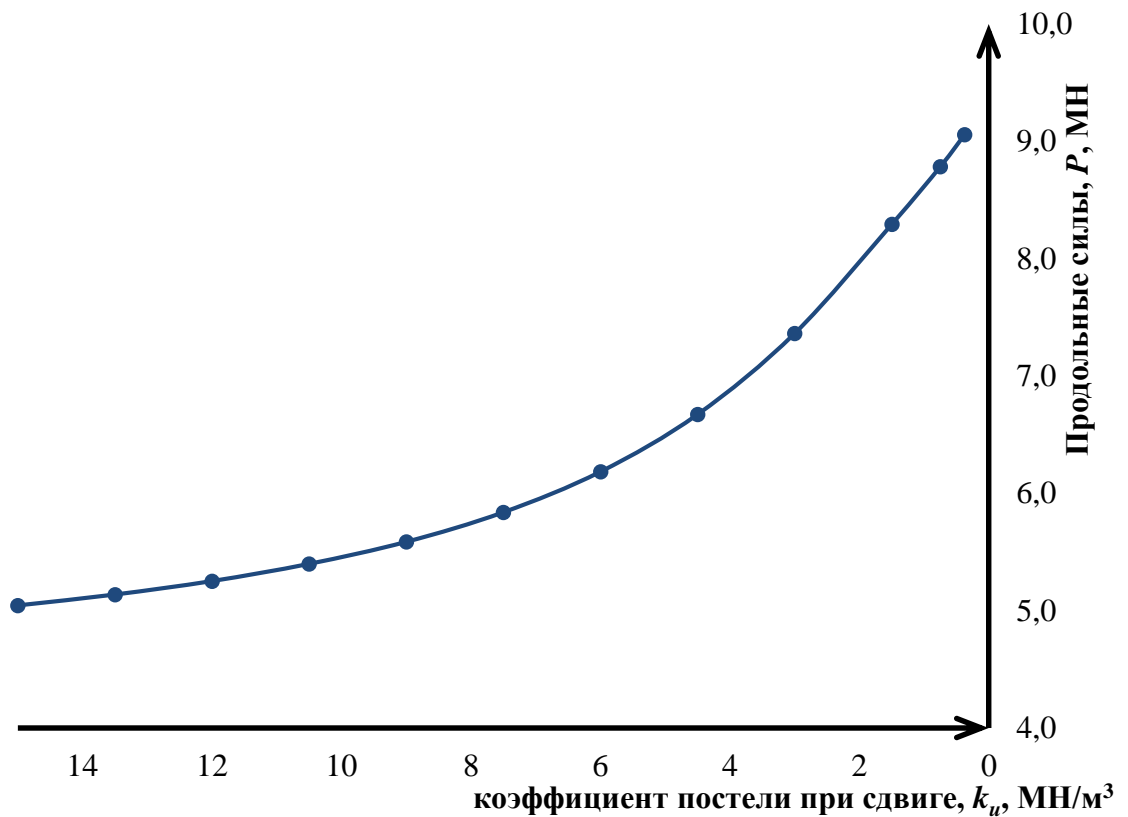


Рисунок 3.12 – График изменения продольных усилий при просадке пластичномерзлого грунта ($k_0 = 0,5 \dots 20 \text{ МН/м}^3$, $k_u = 0,75k_0$)

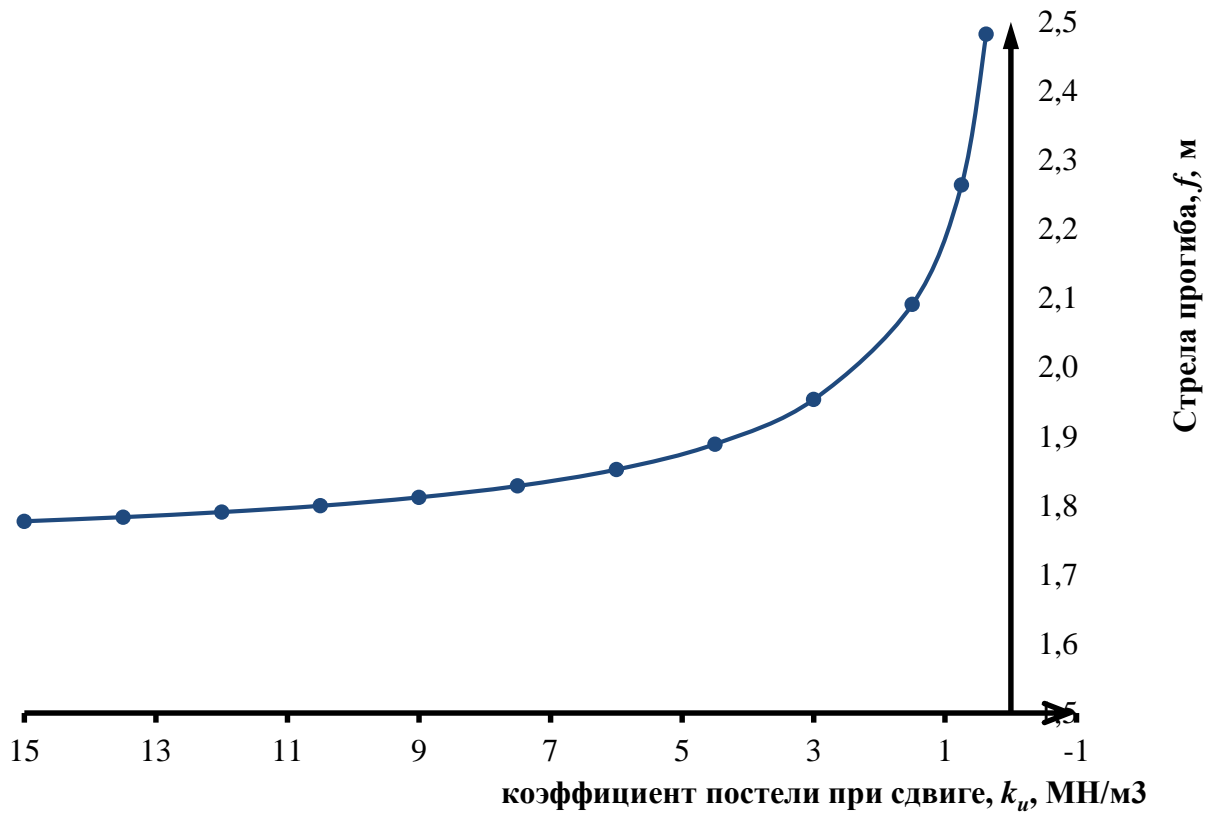


Рисунок 3.13 – График изменения максимального прогиба трубопровода при просадке пластичномерзлого грунта ($k_0 = 0,5 \dots 20$ МН/м³, $k_u = 0,75k_0$)

ВЫВОДЫ ПО ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ:

1. Рассмотрена методика определения продольных перемещений свободного конца полубесконечного трубопровода с учетом изменения свойств грунта при изменении температуры. Значения механических свойств грунта приняты согласно экспериментальных исследований. При изменении температуры с минус 10 до минус 1 °С деформации трубопровода увеличатся почти в 5 раз, длина зоны с пластическими деформациями по поверхности контакта трубопровода с грунтом увеличивается в 6 раз, предельные касательные напряжения по поверхности контакта уменьшаются в 4,5 раза.

2. Разработана методика определения прогиба трубопровода при повышении температуры участка грунта. При решении дифференциального уравнения (при определении перемещения трубопровода) как балки на упругом основании, при изменении температуры меняются коэффициенты постели на сдвиг и на сжатие. Снижение коэффициента постели на сжатие с 14 МН/м³ до 2 МН/м³ вызывает рост продольных усилий в трубопроводе с 5 МН до 9 МН для сечения трубопровода 1020х16 с длиной участка просадки 100 м.

3. Наиболее значительное изменение максимального прогиба трубопровода будет в пределах изменения коэффициента постели на сдвиг $k_u = 0 \dots 6$ МН/м³, при этих значениях k_u прогиб меняется с 1,8 до 2,5 м.

ГЛАВА 4 НДС ТРУБОПРОВОДА В ПРОЦЕССЕ ПРОСАДКИ ТРУБОПРОВОДА

Трубопроводы в регионах распространения многолетнемерзлых грунтов подвергаются сложному тепломеханическому воздействию, что вызывает такие явления как оттаивание, оползни, смещения грунта при действии морозного пучения, проседание грунта [5-8, 17, 20, 24, 81, 105, 116]. Последний вид воздействия следует считать наиболее опасным для подземных трубопроводов. Для него характерны большие относительные смещения смежных блоков грунта [33]. В работе рассматривается потеря несущей способности грунта при повышении его температуры. Ввиду этого наблюдается просадка участка трубопровода вместе с массивом грунта [83, 99, 100]. Механизм разрушения трубопровода зависит от ряда факторов, включая кинематику разлома, грунтовые условия, геометрию трубопровода и траншеи, угол сдвига двух массивов относительно трубопровода, механические свойства материала трубопровода и начальное напряженное состояние в стенке трубы из-за внутреннего давления и перепадов температур [84, 94, 112]. Для обеспечения прочности и надежности трубопровода в месте чередования двух типов грунтов необходимо провести анализ напряженно-деформированного состояния с учетом эволюции деформаций и перехода трубопровода в предельное состояние. Скорость и величина деформации зависит в первую очередь от начальных температур мерзлого грунта и сооружения [121]. Рассматриваемая задача является нелинейной, поскольку и трубопровод, и грунт работают за пределами зоны упругости [84, 97]. Стенка трубы подвергается большим пластическим деформациям и геометрическим искажениям; поведение грунта в зоне пересечения разломов также геометрически и физически нелинейно; взаимодействие трубопровода с грунтом характеризуется изменяющейся площадью контакта, нормальными напряжениями и напряжениями трения, а также образованием зазоров.

4.1 Постановка задачи

Предполагается, что трубопровод находится в проектном прямолинейном положении, основаниями для трубопровода служат непросадочные грунты и просадочный грунт (Рисунок 4.1). Свойства просадочного грунта сильно зависят от температуры и влажности [80, 98, 110]. Процесс оттаивания грунта вокруг трубопровода происходит с небольшой скоростью: можно сказать, что процесс является статическим. И грунт ввиду различных процессов перемещается также в поперечном направлении, что сказывается на напряженно-деформированном состоянии трубопровода [113]. Наиболее напряженными участками будут зоны в верхних и нижних волокнах трубопровода, по длине данные напряжения будут возникать в местах перегиба трубопровода на границе непросадочного и оттаявшего грунта.

Проведем расчет НДС участков на границе двух участков, в которых грунт находится в различном состоянии. Первый грунт (1 – Рисунок 4.1) находится в мерзлом состоянии, поскольку его температура ниже $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, второй грунт (2 – Рисунок 4.1) находится в оттаявшем состоянии, поскольку его температура поднялась ввиду образования ореола растепления. Как показал расчет, НДС трубопровода не зависит от длины трубопровода при ограниченном перемещении вниз и, если перемещения происходят не из-за собственного веса трубопровода, а из-за вынужденного перемещения массива грунта вследствие осадки [118]. Если перемещения происходят вследствие оттаивания грунта вокруг участка трубопровода из-за повышения температуры эксплуатации, то длина влияет на перемещения. Расчет таких перемещений и напряжений, которые были вызваны распределенной нагрузкой, численным методом решены в [13, 92] и смоделированы в [89]. В данных работах производится НДС трубопровода при оползнях, однако, эти же модели применимы для оттаявшего трубопровода. Влияние на НДС трубопровода при изменении температуры эксплуатации по длине вследствие остывания продукта и нагрева продуктом грунта (перехода теплоты продукта в грунт) подробно описано в работе [96]. Здесь представлен наиболее полный список аналитических зависи-

мостей, используемых для решения большинства задач взаимодействия гидравлической, тепловой и механической моделей.

На Рисунке 4.1 показана расчетная схема просадки грунта вокруг трубопровода, в зонах, отмеченных на рисунках, может возникнуть пластичная работа металла трубопровода. И может возникать пластичный шарнир на границах типов грунтов. Пластичная работа не подразумевает разрушение металла, однако эксплуатировать трубопровод при таких напряжениях запрещено. После просадки грунта, искривление оттаявшего участка трубопровода может происходить только за счет удлинения этого участка, а также участков, примыкающих к нему. Граничные условия на концах оттаявшего участка, определяются работой примыкающих участков, рассматриваемых как полубесконечные балки на упругом основании. Определение продольных напряжений при чередовании грунтов примыкающих участков рассматривается в работах, а также при изменении механических свойств многолетнемерзлых грунтов рассматривается в работах [13, 106, 113].

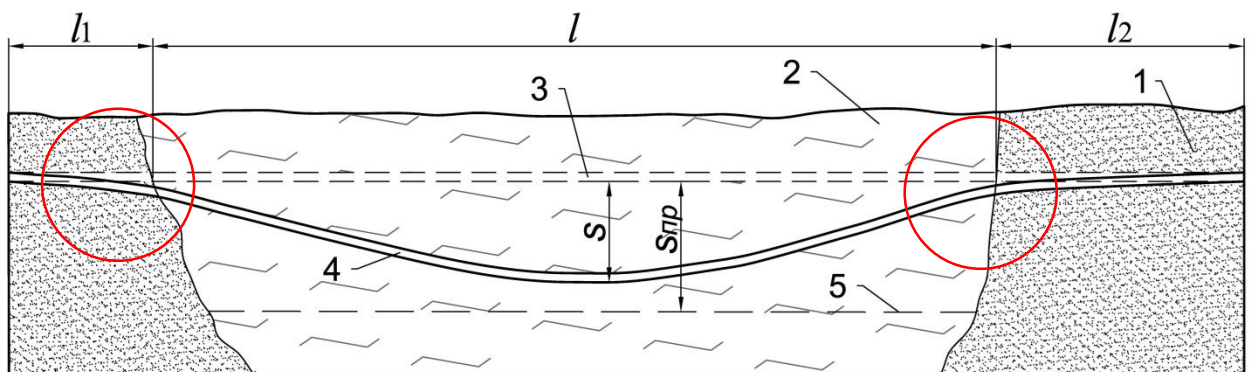


Рисунок 4.1 – Перемещения трубопровода в процессе просадки грунтов

Для расчета НДС трубопровода в программном комплексе ANSYS необходимо задать упруго-пластичную диаграмму растяжения стали (Рисунок 4.2). В качестве рассматриваемой стали выбрана трубная сталь класса прочности К56 с пределом прочности $\sigma_p = 560$ МПа и пределом текучести $\sigma_t = 410$ МПа. Данную

сталь можно задать с помощью модели Bilinear Isotropic Hardening, Yield Strength = 410 МПа, Tangent Modulus = 1450 МПа. Модуль упругости стали $E = 206$ ГПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$.

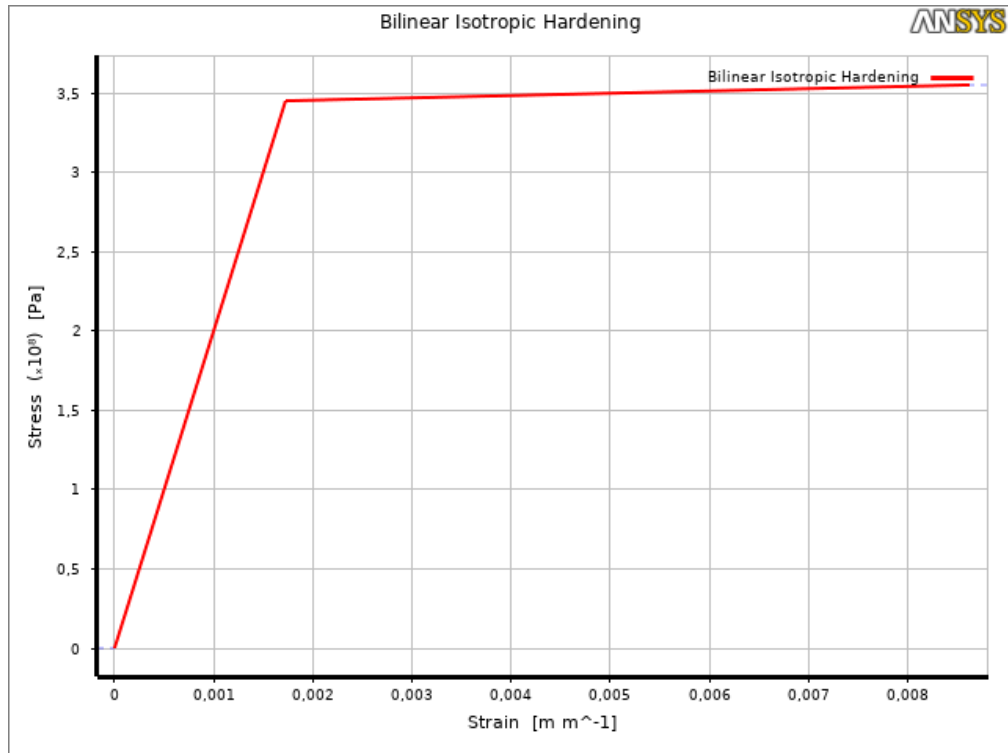


Рисунок 4.2 – Деформационные свойства стали

4.2 Граничные условия

В качестве расчетной схемы выбран трубопровод, диаметром $D = 1020$ мм и толщиной стенки $\delta = 20$ мм. Глубина заложения трубопровода принята равной 1,2 м. Рассчитывается массив грунта длиной 40 м, высотой 5 м и шириной 8 м. Такие размеры были выбраны ввиду правильности задания сетки при решении задач методом конечных элементов. Помимо правильности задания сетки на выбор таких размеров повлияла необходимость исключить воздействия граничных условий, прикладываемых к боковым граням на напряженно-деформированное состояние трубопровода и окружающего его грунта. Подобная модель с схожими граничными условиями рассматриваются в работах [84, 112, 118, 120]. На Рисунке 4.3 показана $\frac{1}{4}$ часть модели, разрез сделан вдоль трубопровода и в поперечном сечении трубопровода по дальней стенке массива грунта. Полная модель без симметрии показана на Рисунке 4.4. Рассматриваются 2 задачи, в первой рассчитывается трубопровод с длиной зоны просадки $l \rightarrow \infty$, во второй задаче зона просадки $l = 40$ м.

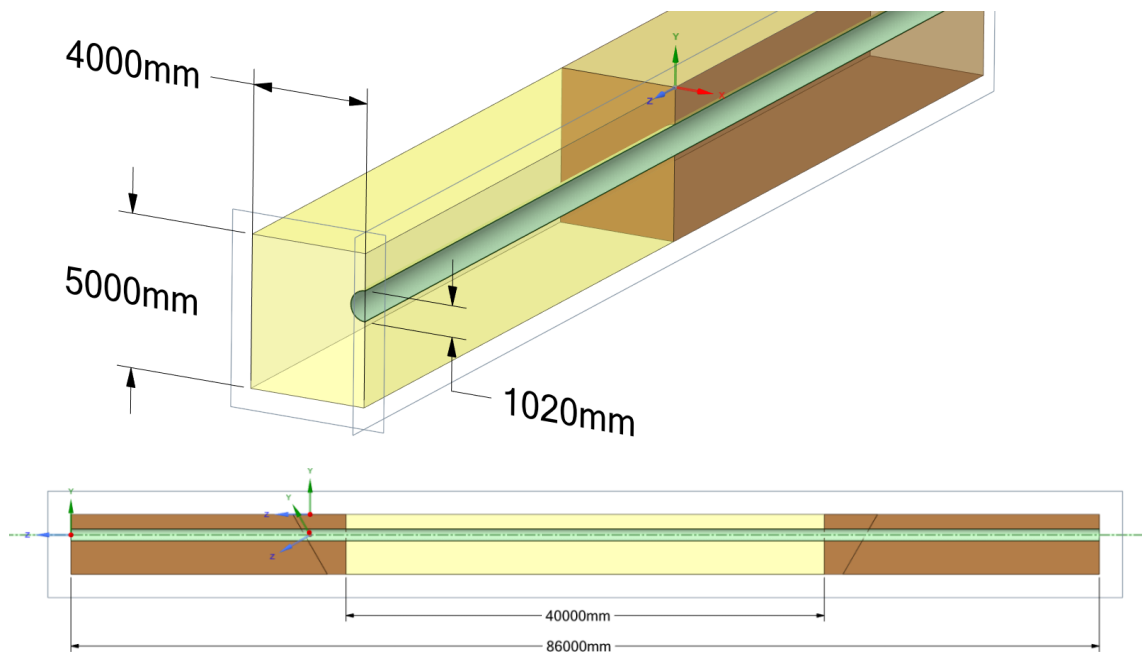


Рисунок 4.3 – Размеры расчетной модели

На Рисунке 4.4 показаны граничные условия и приложенные нагрузки. Расчет трубопровода приводится с внутренним рабочим давлением $p = 0,1$ МПа для визуализации изгибающих напряжений и сравнивается с расчетом трубопровода, находящегося под рабочим давлением $p = 6,4$ МПа. Расчет происходит в 10 шагов, массив просадочного грунта перемещается с шагом в 100 мм по оси Y (нагрузка В, Рисунок 4.4): шаг 1 – $\Delta 1 = 100$ мм, шаг 2 – $\Delta 2 = 200$ мм и т. д., шаг 10 – $\Delta 3 = 1000$ мм. Оценка адекватности численного определения величины просадки мерзлого грунта приведена в работах [10, 40].

В качестве модели грунта будем использовать модель Друкера-Прагера. Наиболее простой моделью грунта для проведения расчетов с помощью метода конечных элементов является модуль Мора-Кулона [1]. Эта модель требует четыре расчетных параметра – модуля деформации, коэффициента Пуассона, сцепления и угла внутреннего трения. В работе используется модифицированная модель Мора-Кулона – модель, для которой необходимо дополнительно задать прочность на одноосное сжатие, прочность на одноосное растяжение и прочность при двухосном сжатии [91]. Физические свойства материалов для мерзлых грунтов можно найти в различных справочниках в зависимости от местности распространения, глубины заложения, температур и влажности [88, 111]. Модель Друкера-Прагера изменяет площадку текучести Мора-Кулона. В отличие от модели Мора Кулона поверхность текучести в модели Друкера-Прагера гладкая, Рисунок 4.5 [90, 102].

Угол сдвига увлекаемого непросадочного грунтового массива, определяется его углом внутреннего трения. В представленной модели модуль деформации устойчивого грунта составляет $E_{непр} = 20$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,35$, угол внутреннего трения непросадочного грунта равен $\varphi = 60$ град, сцепление $c = 20$ кПа. Плотность непросадочного грунта принимается $\rho = 1800$ кг/м³. Прочность на одноосное сжатие $R_{сж} = 10$ МПа, прочность на одноосное растяжение $R_{раст} = 1,8$ МПа и прочность при двухосном сжатии $R_2 = 12$ МПа [106].

Модуль деформации просадочного грунта составляет $E_{пр} = 1$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,35$, угол внутреннего трения просадочного грунта равен

$\varphi = 20$ град, сцепление $c = 1$ кПа. Плотность просадочного грунта принимается $\rho = 1550$ кг/м³. Прочность на одноосное сжатие $R_{сж} = 4,5$ МПа, прочность на одноосное растяжение $R_{раст} = 0,8$ МПа и прочность при двухосном сжатии $R_2 = 5,4$ МПа [18].

F: Модель с симметрией

Static Structural

Time: 8, s

29.11.2021 15:40

- A** Шарнирное закрепление уст
- B** Шарнирное закрепление нижней плоскости неуст
- C** Передвижение
- D** Шарнирное закрепление неуст
- E** Жесткое закрепление уст
- F** Жесткое закрепление трубы

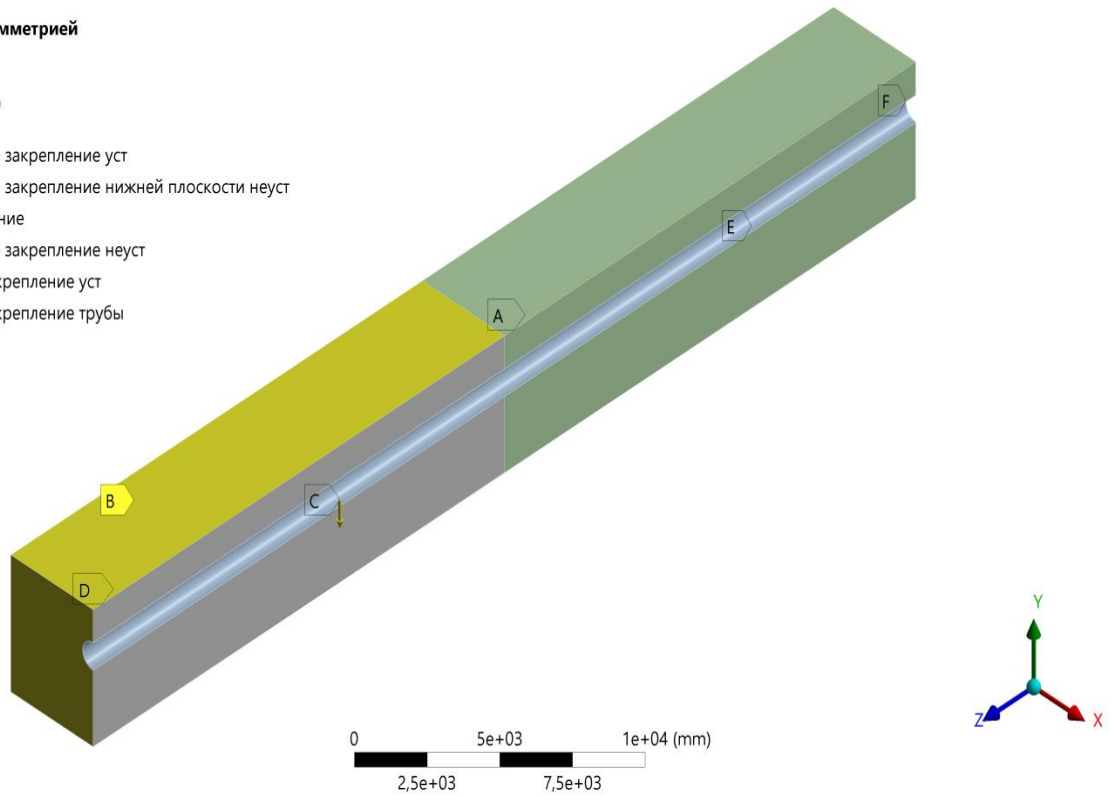


Рисунок 4.4 – Граничные условия и нагрузки

4.3 Результаты расчета напряженно-деформированного состояния трубопровода при просадке грунта методом конечных элементов

Результаты моделирования напряженно-деформированного состояния трубопровода при двух разных условиях: с внутренним давлением и без него. В Таблице 4.1 приведен результат расчета для полубесконечного трубопровода, в Таблице 4.2 приведен результат расчета для трубопровода длиной 40 м. Наибольшие напряжения в трубопроводе возникают на участке, который находится в более жестком грунте, в верхней образующей возникают растягивающие напряжения, в нижней образующей – сжимающие. До определенного момента перемещений массива грунта в трубопроводе возникают упругие изгибающие напряжения, до тех пор, пока значения напряжений не достигнут предела текучести (точка 1, Рисунок 4.5). После этого происходят деформации трубопровода без возрастания величины напряжений (точка 2, Рисунок 4.5).

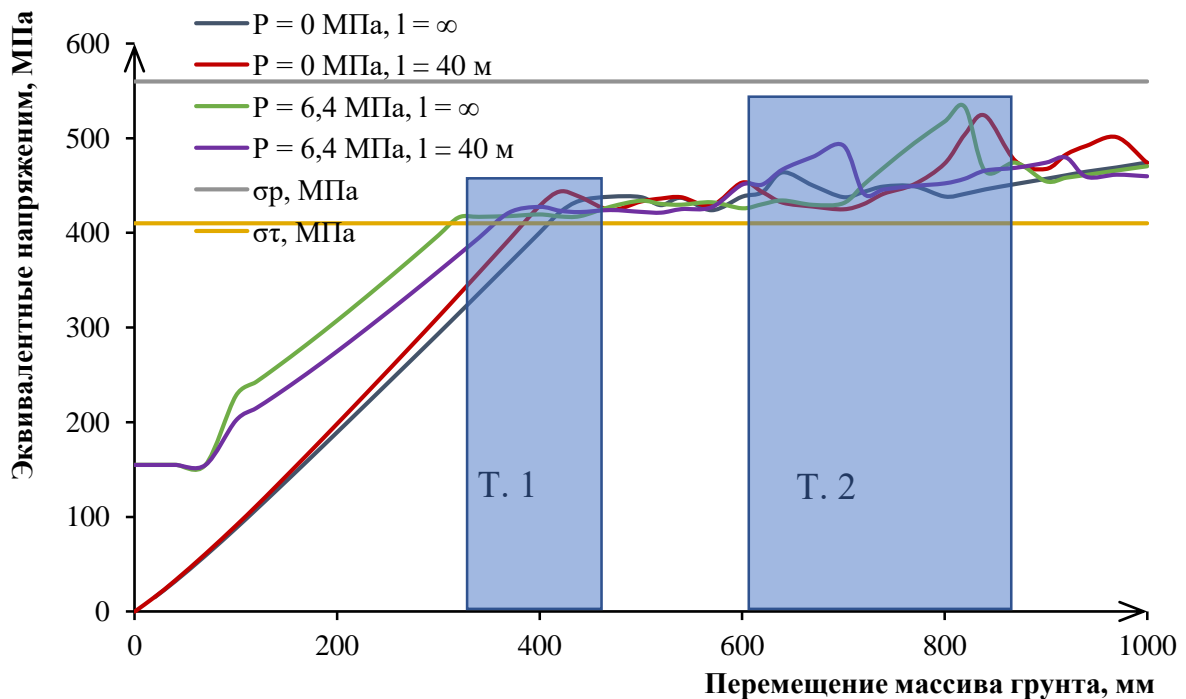


Рисунок 4.5 – Зависимость максимальных эквивалентных напряжений, возникающих в трубопроводе при перемещении массива грунта

На Рисунке 4.6 показаны эквивалентные напряжения, которые складываются из изгибающих напряжений и напряжений от действия внутреннего давления в зависимости от длины модели трубопровода. Напряжения, которые показаны на графике, отображают эквивалентные напряжения, возникающие в верхней образующей трубы. При перемещении просадочного массива грунта вниз, в верхней образующей части трубы в зоне на границе грунтов образуются сжимающие изгибающие напряжения. В части трубы, которая находится в непросадочном грунте, образуются растягивающие изгибающие напряжения, которые при определенном значении смещении массивов достигает критического состояния ($\sigma_t = 410$ МПа). На Рисунке 4.6 (а) трубопровод работает в зоне упругих деформаций до значения перемещений $\Delta = 400$ мм, далее возникают пластические деформации, зона которых увеличивается по длине при увеличении перемещений Δ . При $x \rightarrow -20$ м для несимметричной задачи ($l \rightarrow \infty$) происходит уменьшение напряжений $\sigma_{np} \rightarrow 0$ МПа. Для симметричной задачи, $l = 40$ м, при $x \rightarrow -20$ м, на Рисунке 4.7 (б) наблюдается увеличение эквивалентных напряжений $\sigma_{np} \rightarrow 410$ МПа. Однако напряжения в сечении $x = -20$ м не достигнут предела текучести, поскольку в опасных сечениях $x \approx 2$ м и $x \approx -4$ м предел прочности σ_p будет достигнут раньше.

На Рисунке 4.8 показаны те же результаты, но для трубопровода, работающего под давлением $p = 6,4$ МПа. Помимо напряжений от изгиба здесь присутствуют напряжения от внутреннего давления: $\vec{\sigma}_{эkv} = \vec{\sigma}_{давl} \pm \vec{\sigma}_{изг}$. Поэтому, в верхней образующей в просадочном грунте будут отсутствовать пластические деформации, однако, напряжения, возникающие в нижней образующей, раньше достигнут критического значения. При $x \rightarrow -20$ м для несимметричной задачи ($l \rightarrow \infty$) на Рисунке 4.7 (а) происходит стабилизация напряжений к значению эквивалентных напряжений, которые возникали бы без изгиба. Для симметричной задачи, $l = 40$ м, при $x \rightarrow -20$ м, на Рисунке 4.7 (б) наблюдается изменение эквивалентных напряжений. На Рисунке 4.7 показан худший случай, поскольку верхняя образующая трубопровода нагружена больше и напряжения текучести в верхней обра-

зующей в непросадочном грунте достигаются раньше, чем напряжения текучести в нижней образующей в просадочном грунте.

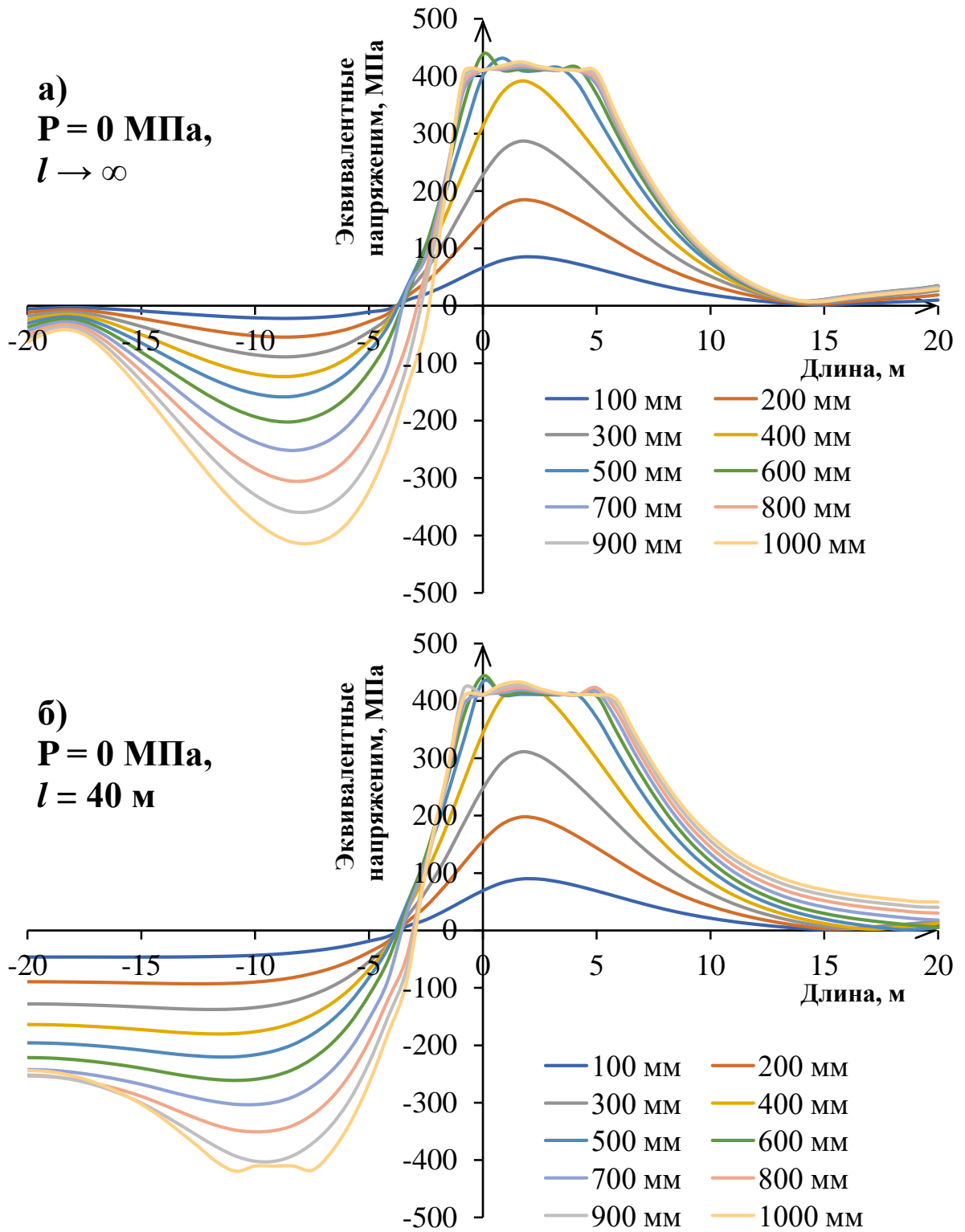


Рисунок 4.6 – Распределение продольных напряжений, возникающих в трубопроводе при перемещении массива грунта по длине, без давления

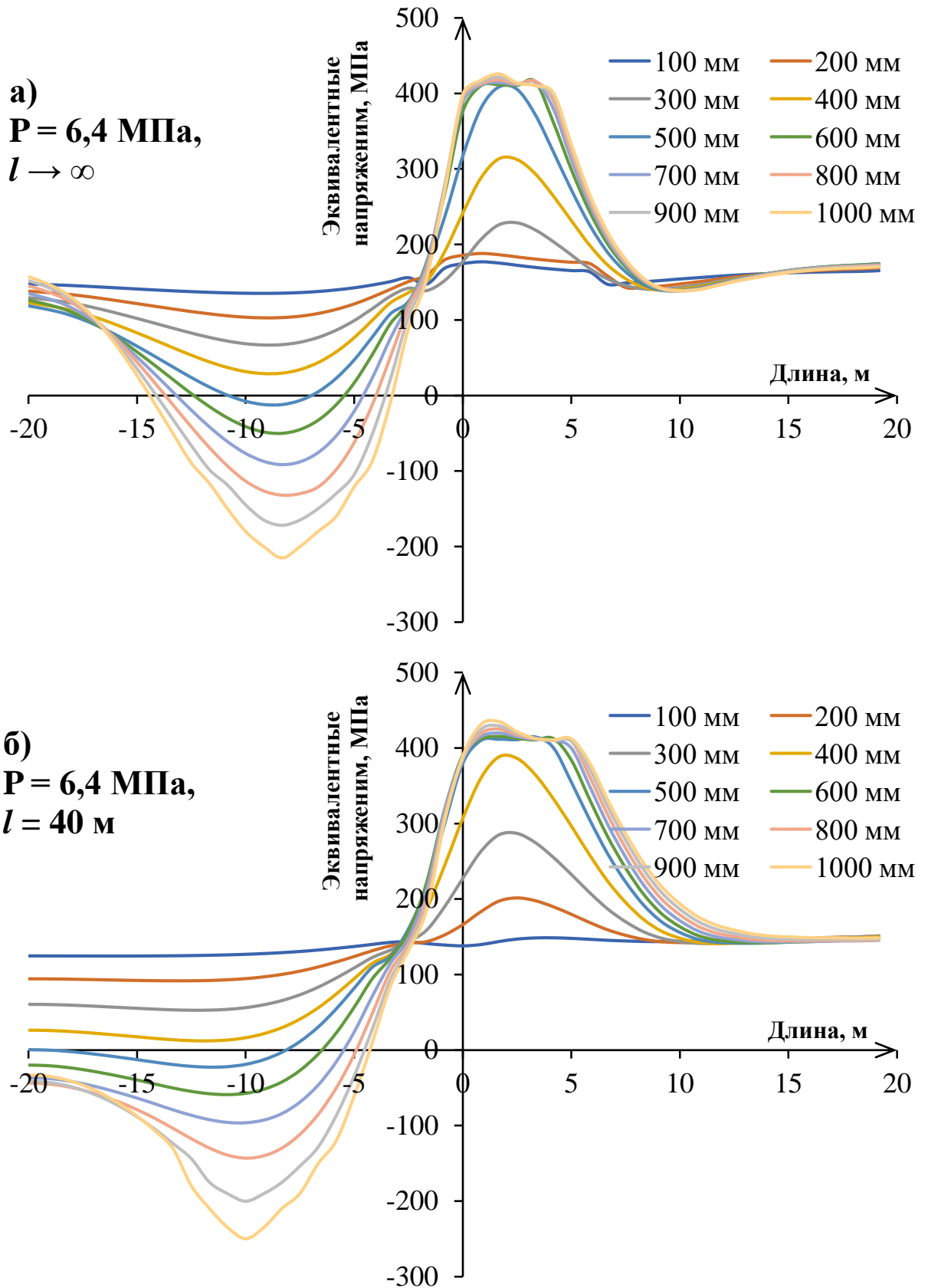


Рисунок 4.7 – Распределение продольных напряжений, возникающих в трубопроводе при перемещении массива грунта по длине, под давлением

На данных рисунках присутствует четыре характерных сечения:

1) $x \approx 2$ м: сечение с наибольшими эквивалентными напряжениями: в этом сечении раньше всего достигается предел текучести стали, данное сечение является самым опасным с точки зрения надежной эксплуатации магистрального трубопровода;

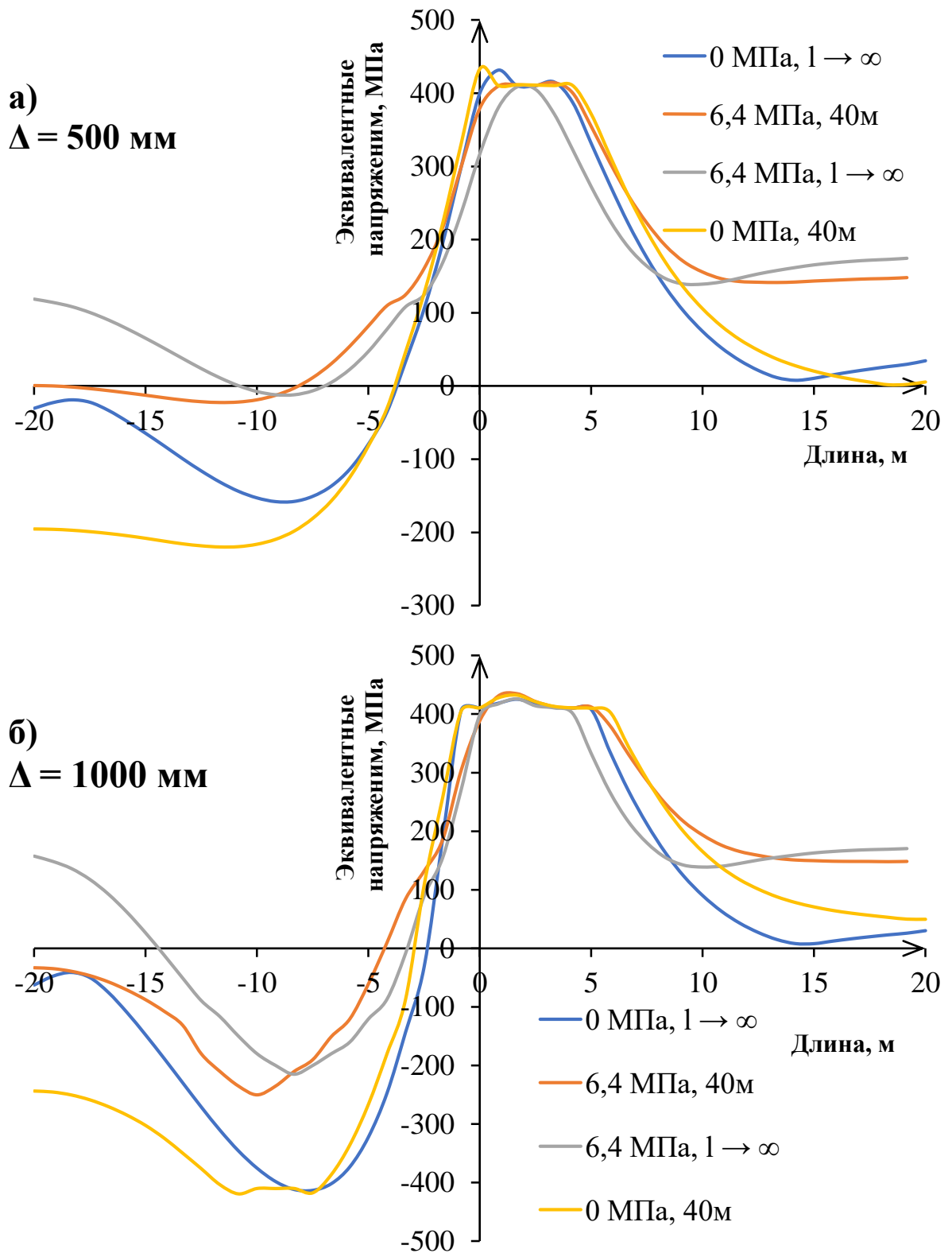
2) $x \approx -3 \dots -2$ м: сечение с минимальными эквивалентными напряжениями: в данном сечении присутствует перегиб, изгибающие напряжения меняют свой знак;

3) $x \approx -12 \dots -5$ м: сечение с наибольшими эквивалентными напряжениями, которое находится в зоне просадочного грунта. В данном сечении наиболее опасными являются нижние волокна, в них достигаются максимальные напряжения;

4) $x \approx -20$ м: сечение с максимальным прогибом. Сечение интересно только при рассмотрении симметричной расчетной схемы. В этом случае напряжения примерно в два раза меньше максимальных напряжений.

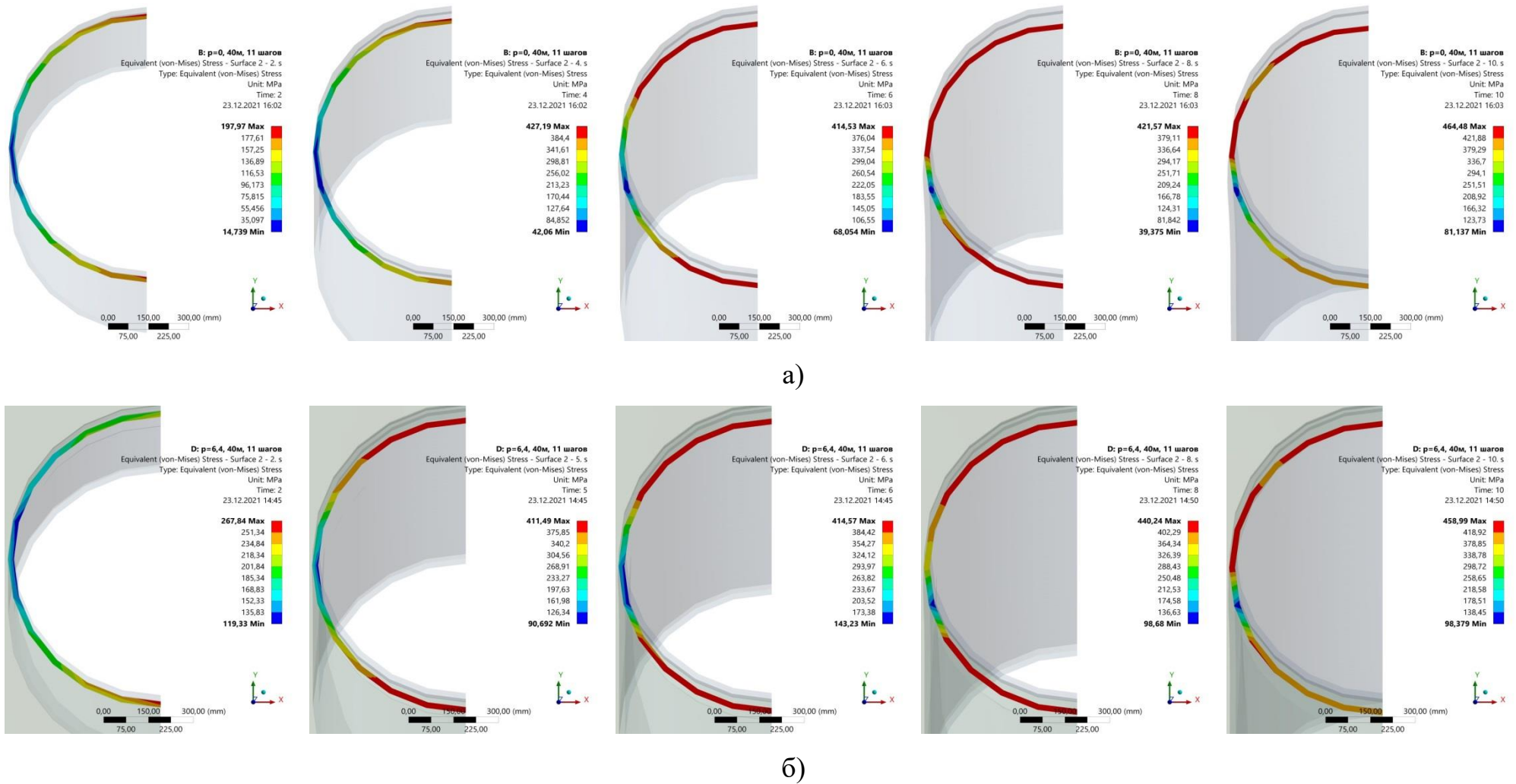
На Рисунке 4.8 показан график зависимости эквивалентных напряжений от длины трубопровода в зависимости от граничных условий. Интерес представляют местоположение опасных сечений. Во всех четырех случаях необходимо принимать во внимание тот факт, что максимальные напряжения необходимо брать как сумму модулей изгибающих и продольных напряжений, на графиках же изображены напряжения только по верхней образующей трубопровода. Для того, чтобы отобразить эквивалентные напряжения в обеих образующих рассмотрим опасное сечение $x = 2$ м.

Напряжения в опасном сечении при $x = 2$ м, для симметричной задачи ($l = 40$ м), труба без внутреннего давления, $p = 0$ МПа показаны на Рисунке 4.9 (а). Напряжения в опасном сечении при $x = 2$ м, для симметричной задачи ($l = 40$ м), труба без внутреннего давления, $p = 6,4$ МПа показаны на Рисунке 4.10 (б).



а) $\Delta = 500$ мм, б) $\Delta = 1000$ мм

Рисунок 4.8 – Распределение продольных напряжений, возникающих в трубопроводе при перемещении массива грунта по длине, для различных граничных условий



а) $l = 40$ м, $p = 0$ МПа; б) $l = 40$ м, $p = 6,4$ МПа

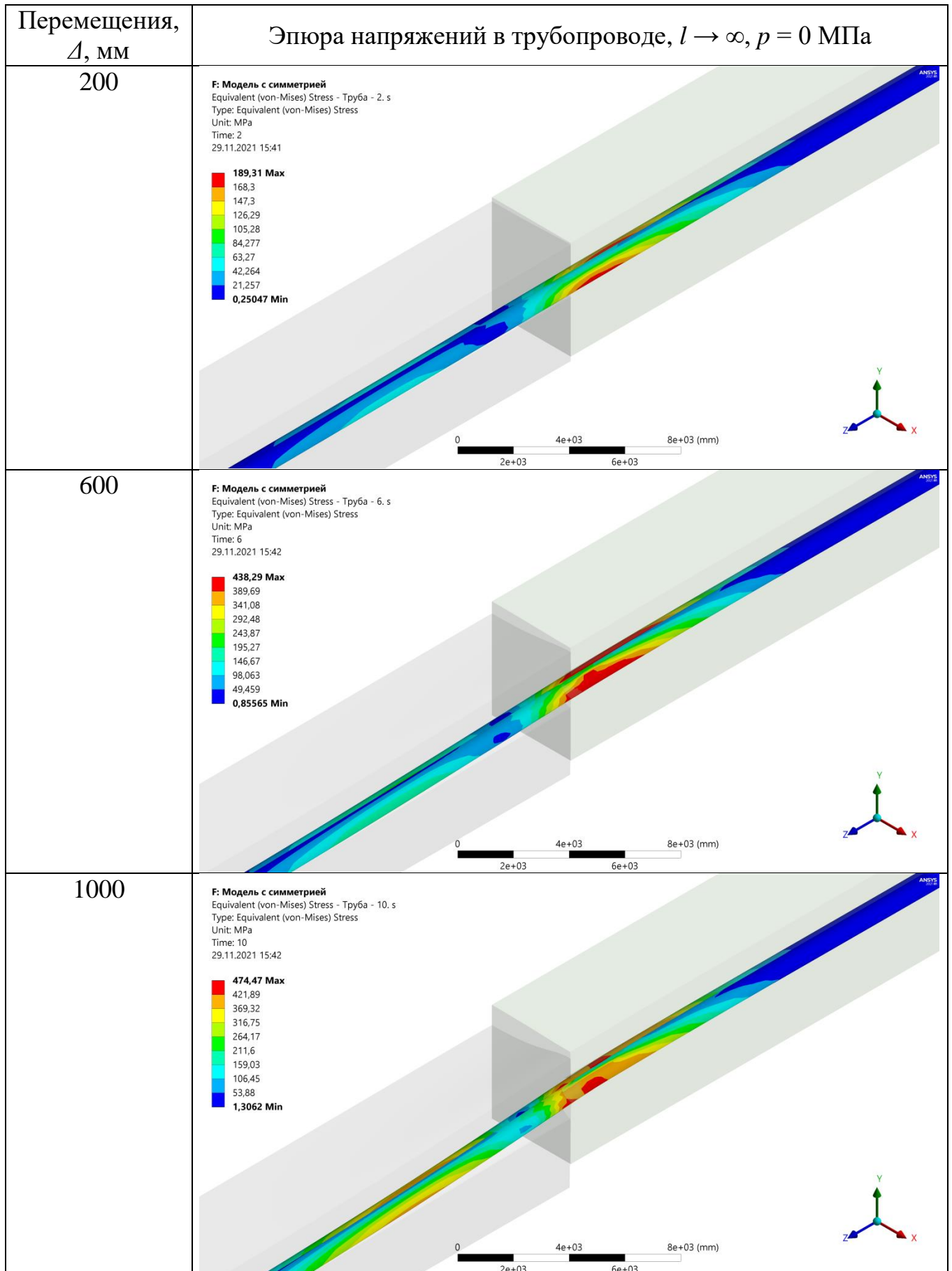
Рисунок 4.9 – Распределение напряжений в самом напряженном сечении при перемещении от 0 до 1000 мм

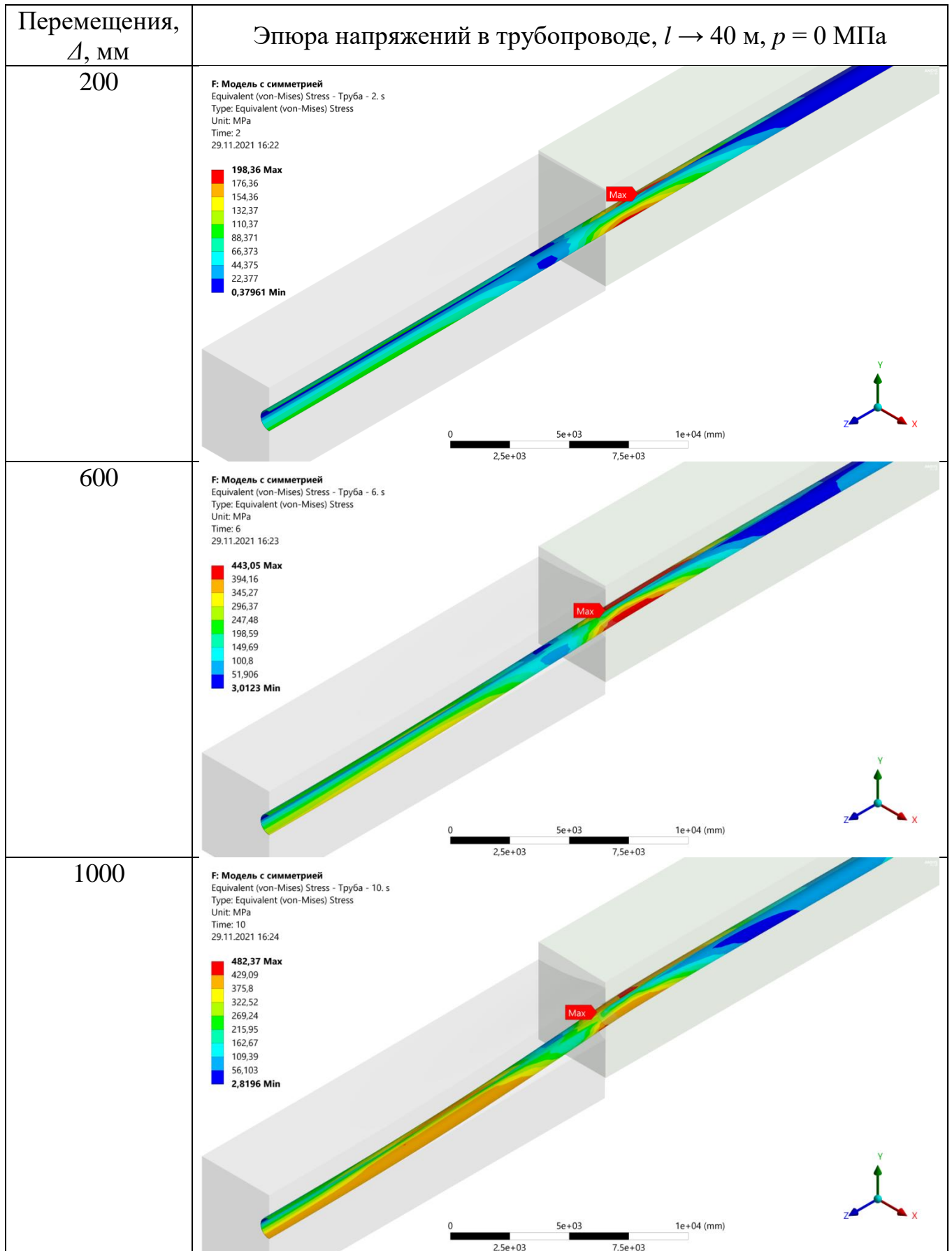
Сравнивая два случая можно сказать, что σ_T достигается раньше у трубопровода, работающего под давлением. Для полубесконечного трубопровода можно с уверенностью сказать, какое сечение будет самым опасным, что видно в Таблицах 4.1 и 4.2; у трубопровода, при симметричной постановке задачи таких сечений два, что можно увидеть в 3D решении.

Решение задач по шагам для $l = \rightarrow \infty$ м приведено в Таблице 4.1, решение для $l = 40$ м приведено в Таблице 4.2. Решение приведено с шагом $\Delta = 400$ мм.

При сооружении трубопроводов на слабых водонасыщенных грунтах происходит сжатие поровой жидкости, приводящей к значительным осадкам грунта. Трубопровод так же оседает, что приводит к возникновению в нем усилий, имеющих неустановившийся характер. Аналогичные явления происходят и в сильно деформируемых грунтах. Таким образом, определение оптимальных механических свойств основного грунта и грунта засыпки представляет практический интерес с точки зрения уменьшения максимальных эквивалентных напряжений, возникающих в трубопроводе. В нашем случае необходимо подобрать свойства просадочного и непросадочного грунта таким образом, чтобы при просадке и больших перемещениях напряжения распределялись равномерно по трубопроводу, а не концентрировались в одной точке. Для этого проведен анализ механических свойств двух примыкающих грунтов. В качестве параметров выбраны модули деформаций непросадочного и просадочного грунтов: $E_{\text{непр}} = 10...50$ МПа, $E_{\text{пр}} = 0,5...10$ МПа. Рассматривается трубопровод под различным давлением: $p_{\text{раб}} = 0...6,4$ МПа.

Таблица 4.1 – Результаты расчета при длине просадки НДС

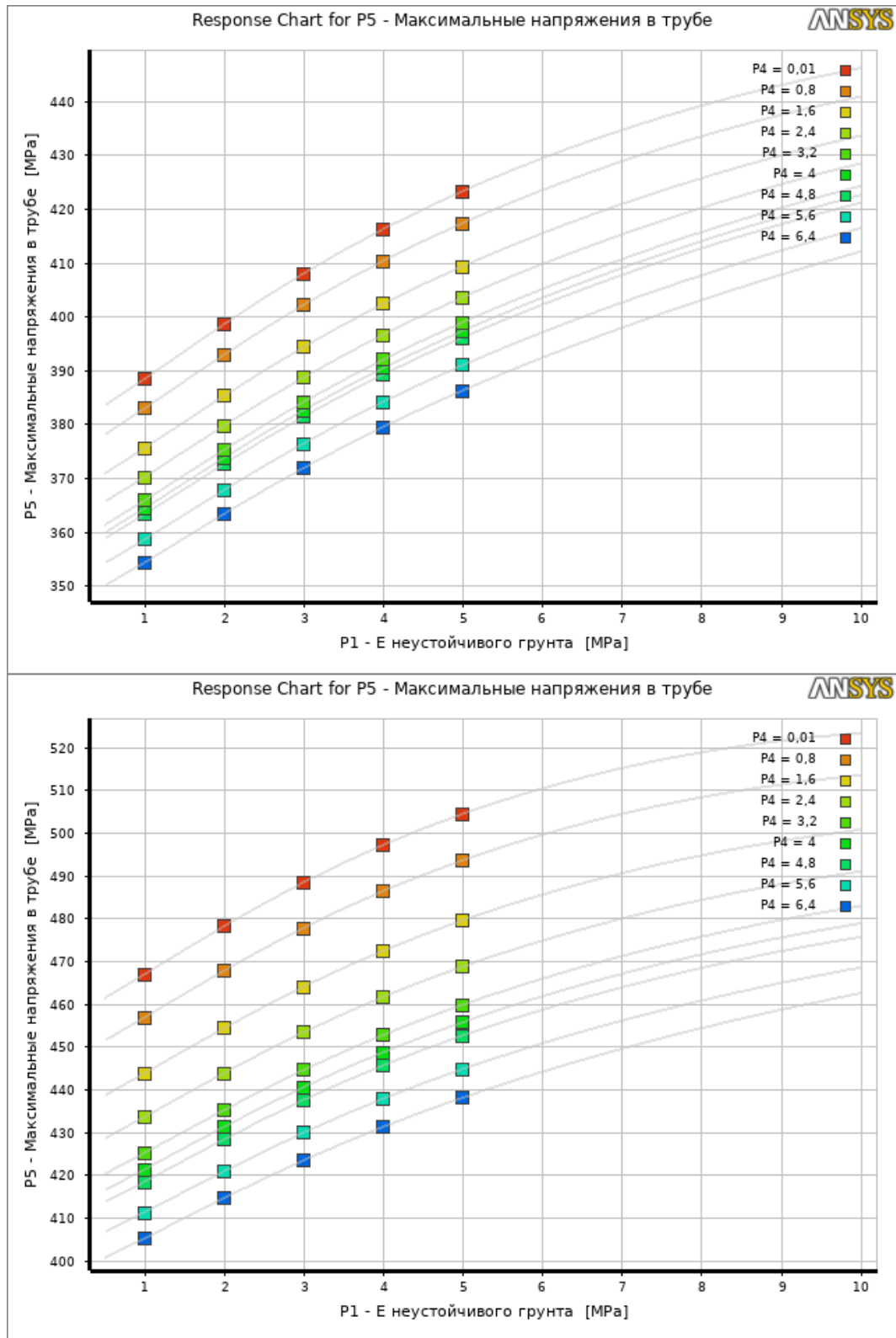




На Рисунке 4.10 показан характер зависимости изменения максимальных напряжений в трубопроводе при различных модулях деформации с шагом $\Delta E_{\text{пр}} = 1$ МПа просадочного грунта и при различном давлении $\Delta p = 0,8$ МПа при перемещении $\Delta = 400$ мм и $\Delta = 500$ мм, модуль деформации непросадочного грунта $E_{\text{непр}} = 30$ МПа. На графике видна параболическая зависимость напряжений при изменении модуля деформации просадочного грунта. По полученным данным ПО ANSYS может прогнозировать максимальные напряжения при изменении модуля деформации от $E_{\text{пр}} = 5$ МПа до $E_{\text{пр}} = 10$ МПа.

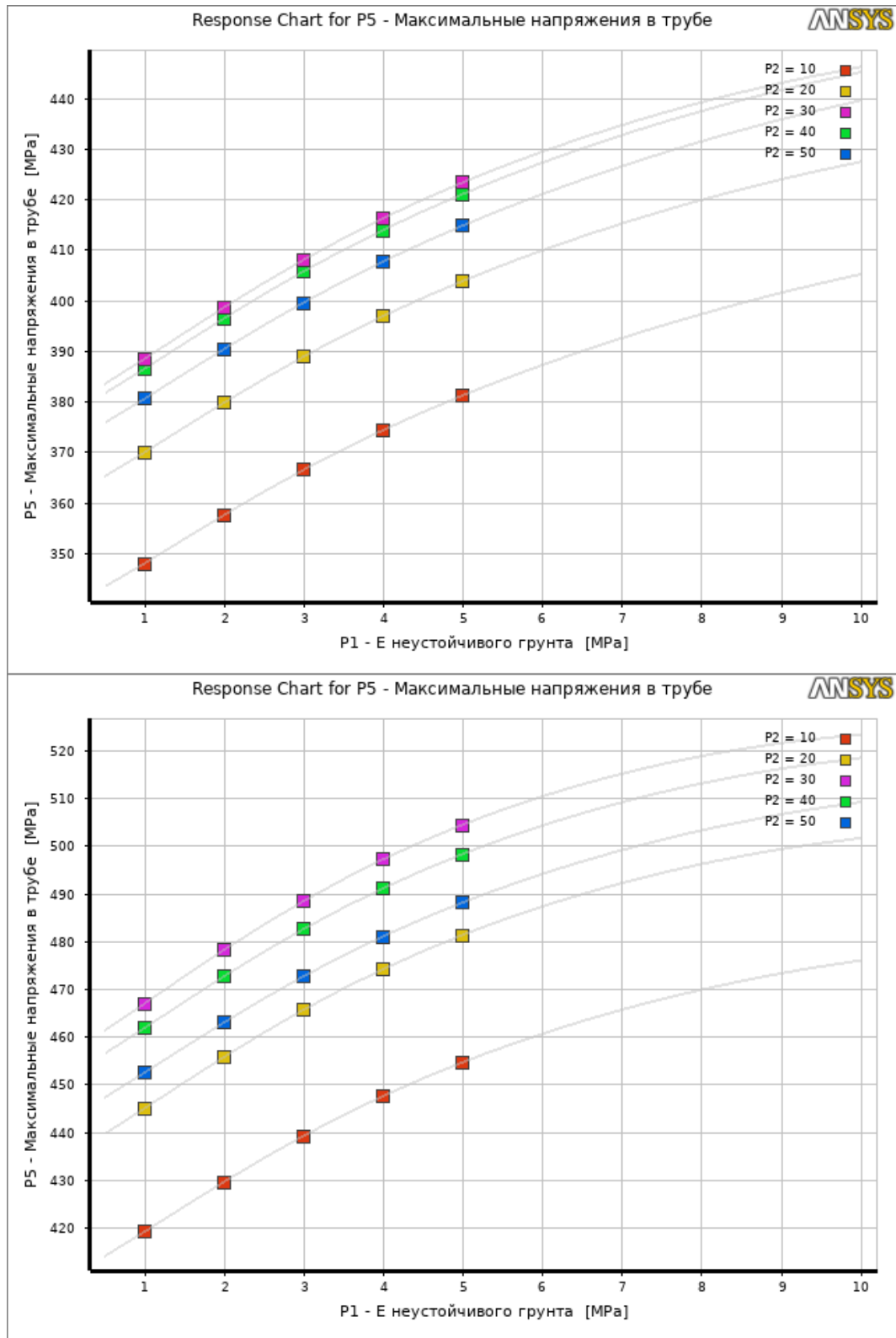
На Рисунке 4.11 изображен характер зависимости максимальных напряжений в трубопроводе при изменении $E_{\text{непр}}$ с шагом $\Delta E_{\text{уст}} = 10$ МПа при перемещении $\Delta = 400$ мм и $\Delta = 500$ мм, модуль деформации непросадочного грунта. Трубопровод работает без внутреннего давления, такое имеет место быть, если трубопровод только что уложен в траншею, но не был запущен в эксплуатацию или при капитальном ремонте трубопровода, так же такое возможно, если в рассматриваемом месте трубопровода имеется самотечный участок или если трубопровод находится в конце эксплуатационного участка. При изменении модуля деформаций $E_{\text{непр}}$ от 10 до 30 МПа происходит увеличение максимальных напряжений, далее происходит снижение максимальных напряжений ввиду достижения в металле пластических деформаций. На Рисунке 4.12 показана та же зависимость, но в трубопроводе имеется давление равное $p = 6,4$ МПа.

На Рисунке 4.13 показана зависимость для перемещения $\Delta = 400$ мм, при увеличении модуля деформации $E_{\text{непр}}$ наблюдается максимум напряжений для трубопровода, работающего без внутреннего давления при $E_{\text{непр}} = 30$ МПа. Для более понятного отображения максимума приведен Рисунок 4.14, на котором показан характер зависимости максимальных напряжений при $E_{\text{пр}} = 1 \dots 5$ МПа.



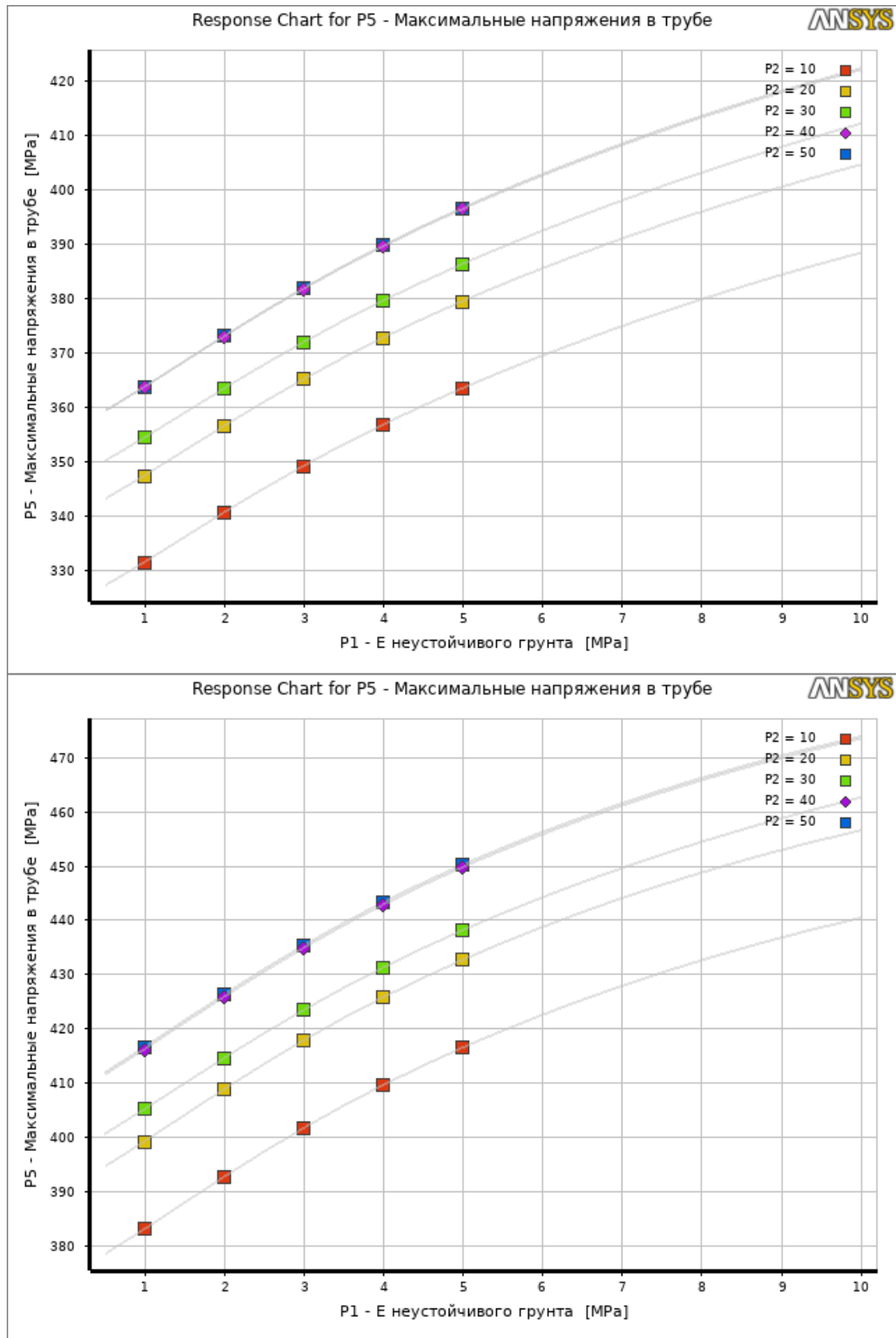
а) $E_{\text{непр}} = 30 \text{ МПа}$, $\Delta = 400 \text{ мм}$; б) $E_{\text{непр}} = 30 \text{ МПа}$, $\Delta = 500 \text{ мм}$

Рисунок 4.10 – Характер зависимости максимальных напряжений в трубопроводе от модуля деформации просадочного грунта при увеличении внутреннего давления



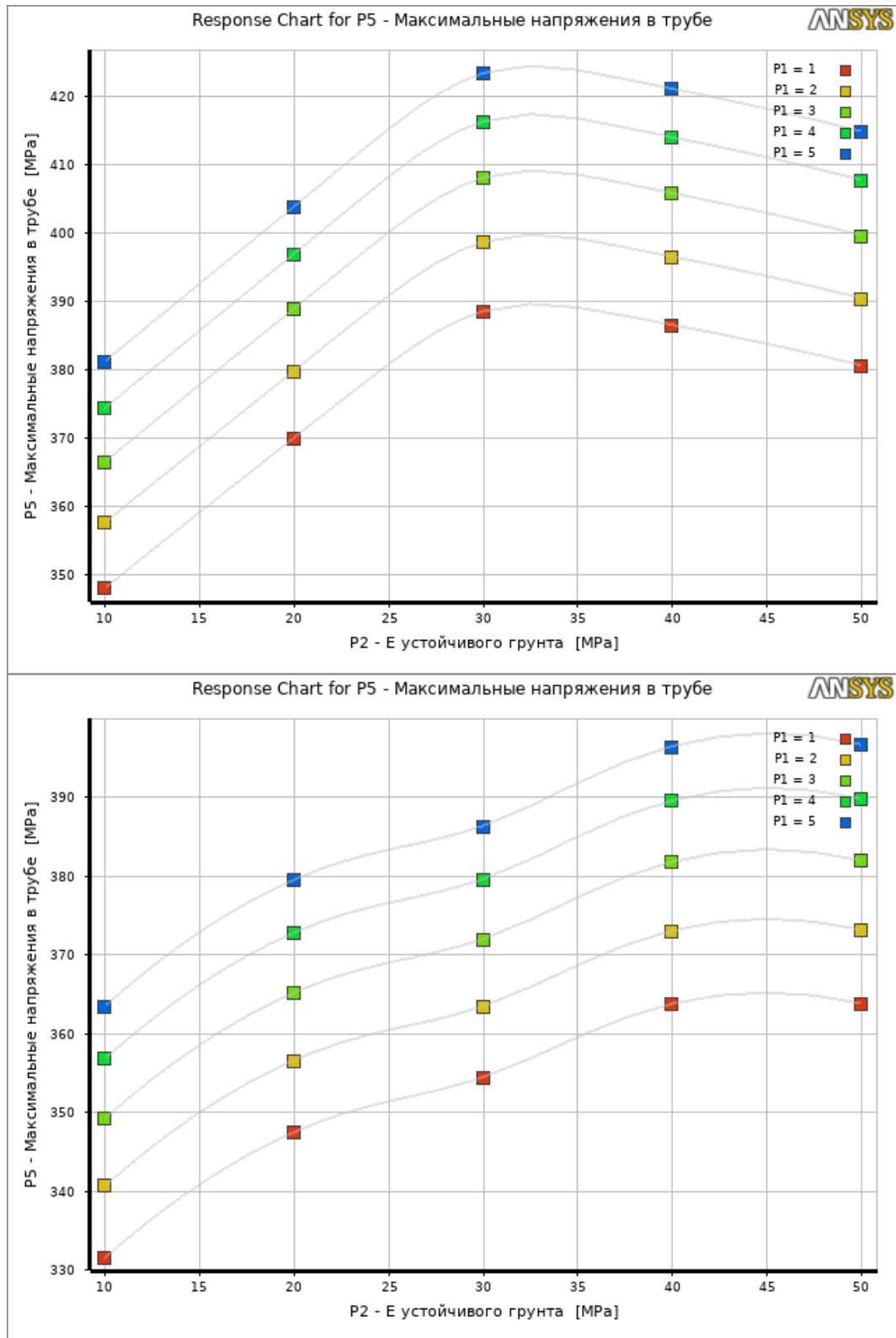
а) $p = 0$ МПа, $\Delta = 400$ мм; б) $p = 0$ МПа, $\Delta = 500$ мм

Рисунок 4.11 – Характер зависимости максимальных напряжений в трубопроводе от модуля деформации просадочного при изменении $E_{\text{непр}}$



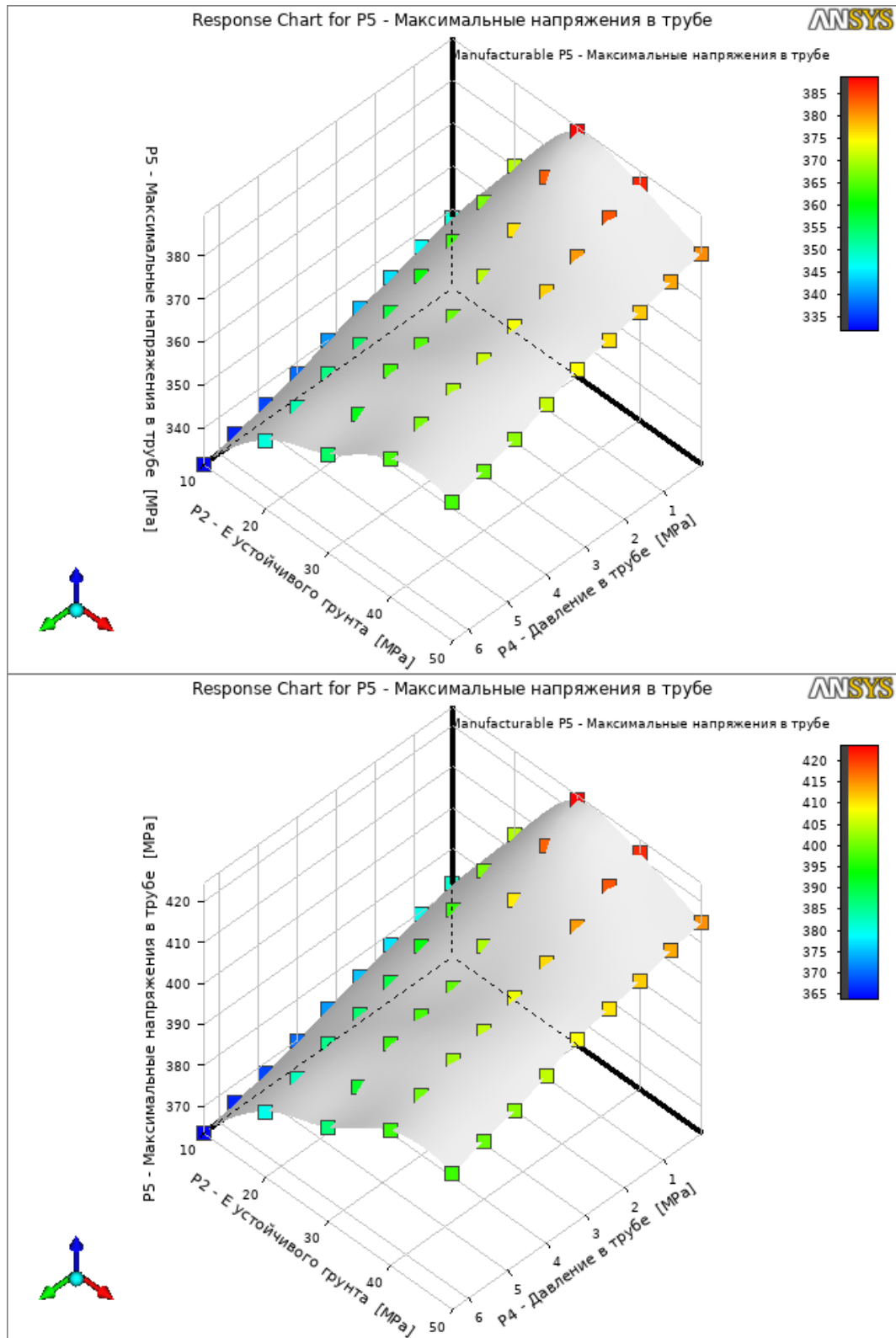
а) $p = 6,4$ МПа, $D = 400$ мм; б) $p = 6,4$ МПа, $D = 500$ мм

Рисунок 4.12 – Характер зависимости максимальных напряжений в трубопроводе от модуля деформации просадочного при изменении $E_{непр}$



а) $p = 0$ МПа, $\Delta = 400$ мм; б) $p = 6,4$ МПа, $\Delta = 400$ мм

Рисунок 4.13 – Характер зависимости максимальных напряжений в трубопроводе от модуля деформации просадочного при изменении $E_{пр}$



а) $E_{пр} = 1$ МПа, $D = 400$ мм; б) $E_{пр} = 5$ МПа, $D = 400$ мм

Рисунок 4.14 – Характер зависимости максимальных напряжений в трубопроводе в зависимости от модуля деформации просадочного грунта и внутреннего давления p

ВЫВОДЫ ПО ЧЕТВЕРТОЙ ГЛАВЕ

1. Разработана цифровая модель участка трубопровода $D \times \delta$ для моделирования напряженно-деформированного состояния при перемещении массива грунта на величину $\Delta = 0,1D \dots 1D$, длине участка непросадочного грунта $l_{\text{непр}} = 20D$, длине участка просадочного грунта $l_{\text{пр}} = 20D$. Исследовано напряженно-деформированное состояние трубопровода при изменении упругих свойств грунтов $E_{\text{непр}} = 10 \dots 50$ МПа, $E_{\text{пр}} = 0,5 \dots 10$ МПа.

2. При увеличении перемещений массивов грунта относительно друг друга, в металле стенки трубопровода увеличиваются напряжения до величины предела текучести, после чего увеличивается распространение данных напряжений по длине до тех пор, пока максимальные напряжения не достигнут предела прочности. Максимальные растягивающие напряжения в разработанной модели сначала возникают в сечении $x = 2D$ в верхних волокнах, далее в сечении $x = -8 \dots -10D$. Максимальные сжимающие напряжения только в сечении $x = 2D$ в нижних волокнах.

3. При заданных граничных условиях максимальные эквивалентные напряжения достигаются при большем относительном соотношении модулей деформации просадочного и непросадочного грунтов: $E_{\text{пр}} = 1$ МПа, $E_{\text{непр}} = 10$ МПа, $\sigma_{\text{экв}} = 425$ МПа; $E_{\text{пр}} = 10$ МПа, $E_{\text{непр}} = 10$ МПа, $\sigma_{\text{экв}} = 388$ МПа. При уменьшении давления в трубопроводе в процессе просадки увеличиваются максимальные эквивалентные напряжения. В связи с этим рекомендуется замена грунтов засыпки в зоне непросадочных грунтов на грунты с меньшим модулем деформации, и, наоборот – в зоне просадочных грунтов на грунты с большим модулем деформации.

4. При описанных процессах необходимо провести ремонт участка с заменой грунта и участка трубопровода с пластическими деформациями. Для надежной работы трубопровода после ремонта необходимо учесть сжимающие напряжения с учетом температурного перепада, что сказывается на технологических

параметрах ремонта [82]. Чтобы не проводить полной замены трубопровода, есть возможность применить усиливающие накладки на участки трубопровода с пластическими деформациями в качестве временного решения. Однако такой вид ремонта не всегда допустим согласно требований нормативной документации.

5. Для предотвращения критической осадки в местах с просадочными грунтами предлагается использовать различные конструкции опор. Так же возможно предусмотреть одиночные опоры на границе просадочных и непросадочных грунтов для предотвращения возникновения концентраторов напряжений при растеплении трубопровода. Экспериментальные установки, приведенные в статьях [31, 104] можно использовать для полунатурного моделирования различных типов опор и их взаимодействия с трубопроводом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ технической и научной литературы показал необходимость разработки универсальной тепломеханической модели трубопровода в многолетнемерзлых грунтах. Анализ тепловых, механических и тепломеханических моделей показал, что для моделирования НДС трубопровода в условиях многолетнемерзлых грунтов необходимо оценить влияние температуры и влажности на механические характеристики грунта. Для моделирования НДС грунта выбраны модели Винклера и Мора-Кулона.

2. Учитывая преимущества метода конечных элементов – масштабируемость, и экспериментального метода – достоверность и подконтрольность условий, разработаны экспериментальный стенд и его цифровая модель для моделирования напряженно-деформированного состояния трубопровода от температуры грунта. На стенде получены зависимости, позволяющие оценить продольные перемещения трубопровода и контактные касательные напряжения по поверхности контакта трубопровода, при отношении глубины заложения к диаметру h_{cp}/d от 2,0 до 4,8, температуре от минус 15 °С до 0 °С и влажности от 0 до 15%. Максимальные значения коэффициента постели на сдвиг достигаются при влажности 10% и температуре грунта (супесь) от минус 10 °С до минус 5 °С. Максимальные значения коэффициента постели на сжатие достигаются при влажности 5% и температуре грунта от минус 10 °С до минус 6 °С. Расхождение пиковых значений эксперимента в цифровой и стендовой моделях составило от 5 до 14%.

3. Выявлена зависимость продольных перемещений свободного конца полубесконечного трубопровода при изменении механических свойств грунта, вызванных изменением температуры. При увеличении температуры вмещающего грунта подземного трубопровода диаметром 1020 мм от минус 10 °С до минус 5 °С, продольные деформации свободного конца трубопровода увеличиваются до двух раз (с 46 до 80 мм); при повышении температуры от минус 5 °С до минус 1 °С до 2,5 раз (с 80 до 199 мм). Снижение коэффициента постели на сжа-

тие из-за повышения температуры грунта трубопровода приводит к росту прогиба до 70%. Учет этих обстоятельств позволяет уточнить расчет эквивалентных напряжений до 10%.

4. Разработана нелинейная конечно-элементная модель для определения НДС трубопровода на переходе через границу между мерзлыми грунтами различных категорий просадочности, позволяющая варьировать механические свойства грунтов, продольные деформации трубопровода, внутреннее давление в трубопроводе, вес трубопровода и продукта, глубину заложения, длину просадочного участка, сечение трубопровода. Модель позволяет рассчитать условия безопасной эксплуатации оттаявших участков трубопровода. Например, при расчете просадки участка трубопровода 1020 мм, длиной оттаявшего участка 40 метров, и при уменьшении модуля деформации оттаявшего грунта с 25 МПа до 1 МПа, прогиб меняется с 31 мм до 202 мм, а изгибающие напряжения увеличиваются с 21 до 142 МПа без учета внутреннего давления и перепада температур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агафонов, А. В. Использование конечно-элементного анализа для расчета на прочность подземных трубопроводов с учетом тепловых деформаций грунтов / А. В. Агафонов, В. А. Волков // Современные технологии в промышленности и строительстве. – 2010. – № 4(3). – С. 535-539.
2. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М. – «Наука», 1976. – 278 с.
3. Айнбиндер, А. Б. Расчет магистральных и промысловых трубопроводов на прочность и устойчивость / А. Б. Айнбиндер. – М.: Недра, 1991. – 287 с.
4. Алабужев П.М. Теории подобия и размерностей. Моделирование / П.М. Алабужев, В.Б. Геронимус, Л.М. Минкевич, Б.А. Шеховцов. – М. – Высш. школа, 1968. – 208 с.
5. Аладинский, А. Ю. Ранжирование по срокам вывода в ремонт опорно-ригельной части участков надземных трубопроводов, проложенных в районах многолетнемерзлых грунтов / А. Ю. Аладинский, В. Е. Грязин, М. В. Чубунов // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2014. – № 2(42). – С. 34–37.
6. Александров, А. А. Компьютерная оценка ресурса прочности магистральных нефтепроводов на участках трасс со структурно неустойчивыми грунтами при температурных перепадах / А. А. Александров, В. И. Ларионов, В. А. Котляревский, Я. Р. Идрисова // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2011. – № 4(86). – С. 40–46.
7. Александров, А. А. Моделирование напряженно-деформированного состояния подземного трубопровода на участках сложных геологических условий / А. А. Александров, В. И. Ларионов, С. П. Сущев // Безопасность в техносфере. – 2012. – № 6. – С. 13-19.
8. Андреева, Е. В. Выбор технических решений по прокладке нефтепровода ВСТО на участках с опасными инженерно-геологическими процессами /Е. В. Андре-

- ева, Г. Р. Габелая, А. А. Чичиринов // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2007. – № 4(10). – С. 28–31.
9. Баширзаде С.Р., Прогнозирование поведения трубопроводных конструкций в сложных грунтово-геологических условиях. Часть 2. Модели взаимодействия грунта с трубопроводом / С.Р. Баширзаде, И.Г. Овчинников // Интернет-журнал «Науковедение». – 2017. – № 9(1). – С. 1–18.
10. Бобко, К. П. Оценка адекватности методики определения осадки трубопровода в многолетнемерзлом грунте / К. П. Бобко, А. А. Маленов // Современные наукоемкие технологии. – 2013. – № 8. – С. 275–276.
11. Болдырев Г.Г., Арефьев Д.В., Муйземник А.Ю. Идентификация параметров моделей грунтов.
12. Бородавкин, П. П. Механика грунтов в трубопроводном строительстве: учебник для вузов / П. П. Бородавкин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1986. – 224 с.
13. Бородавкин, П. П. Подземные магистральные трубопроводы. Проектирование в строительстве / П. П. Бородавкин. – М.: Недра, 1982. – 384 с.
14. Бородавкин П.П. Подземные трубопроводы / П.П. Бородавкин. – М. – Недра, 1973. – 304 с.
15. Бородавкин, П. П. Сооружение магистральных трубопроводов / П. П. Бородавкин, В. Л. Березин. – М.: Недра, 1977. – 407 с.
16. Бородавкин П.П. Трубопроводы в сложных условиях / П.П. Бородавкин, В.Д. Таран. – М. – Недра, 1968. – 304 с.
17. Бронников, В.А. Проблемы инженерно-геокриологического обеспечения магистрального нефтепровода ВСТО-1 и пути их решения / В.А. Бронников, Э.Р. Ибрагимов, В.Г. Кондратьев // Инженерные изыскания. – 2014. - №13-14. – С. 43-52.
18. Васильев, В. И. Тепломассоперенос в промерзающих протаивающих грунтах / В. И. Васильев, А. М. Максимов, Е. Е. Петров, Г. Г. Цыпкин. – М.: Наука, 1997. – 224 с.

19. Велли Ю.А. Справочник по строительству на вечномёрзлых грунтах. Под ред. Ю.А. Велли, В.И. Докучаева, Н.Ф. Федорова. Л., Стройиздат, Ленингр. 1977, 552 с.
20. Власов, А. Н. Применение программного комплекса Abaqus к расчету линейных сооружений в районах с суровыми климатическими условиями / А. Н. Власов, Д. Б. Волков-Богородский, М. Г. Мнушкин // Инженерные системы – 2011: тр. Междунар. науч.-практ. конф., Москва, 5–8 апреля 2011 г. / РУДН, ТЕСИС. – Москва, 2011. – С. 43–49.
21. Гишкелюк, И. А. Компьютерное 3D моделирование ореола оттаивания грунтов с повторно-жильными льдами вокруг нефтепровода / И. А. Гишкелюк, Ю. В. Станиловская // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2013. – № 6(40). – С. 14–20.
22. Гишкелюк, И. А. Прогнозирование оттаивания многолетнемерзлых грунтов вокруг подземного трубопровода большой протяженности / И. А. Гишкелюк, Ю. В. Станиловская, Д. В. Евланов // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2015. – № 1(17). – С. 20–25.
23. Горохов, Е. Н. Методика и программа компьютерного моделирования температурного режима, вмещающего нефтепровод грунтового массива для условий криолитозоны / Е. Н. Горохов, В. И. Логинов, М. А. Козлов, А. А. Маленов // Приволжский научный журнал. – 2011. – № 4(20). – С. 167–175.
24. Горохов, Е. Н. Обеспечение экологической безопасности нефтепровода «Восточная Сибирь – Тихий Океан» на участках, проложенных многолетнемерзлых грунтах / Е. Н. Горохов, Е. В. Копосов, С. В. Соболев, В. И. Ларионов [и др.] // Приволжский научный журнал. – 2011. – № 3(19). – С. 158-164.
25. ГОСТ 26263-84. Метод лабораторного определения теплопроводности мерзлых грунтов. Государственный комитет СССР по делам строительства, 1984. – 11 с.
26. ГОСТ 5180-2015 Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. – М.: Стандартинформ, 2015. 1–23 с.

27. ГОСТ 20276.4-2020 Грунты. Метод среза целиков грунта. – М.: Стандартинформ, 2020. 1–16 с.
28. ГОСТ 25100-2020 Грунты Классификация. – М.: Стандартинформ, 2020. 1–41 с.
29. ГОСТ 25358–2012. Грунты. Метод полевого определения температуры [Текст]. – Взамен ГОСТ 25358–82; введ. 01.07.2013. – М.: Стандартинформ, 2013. – 15 с.
30. Гребенец, В. И. Инженерное мерзлотоведение: учеб. пособие / В. И. Гребенец, В. В. Рогов. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 2000. – 96 с.
31. Гулин Д.А. Расчет удерживающей способности вакуумного анкерного устройства / Гулин Д.А., Салихов Б.И., Султанмагомедов Т.С., Султанмагомедов С.М. // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2017. – № 3. – С. 33–37.
32. Дерцакян, А. К. Строительство трубопроводов на болотах и многолетнемерзлых грунтах / А. К. Дерцакян, Н. П. Васильев. – Л.: Недра, 1978. – 167 с.
33. Дрынкина, Т. Н. Уменьшение влияния неблагоприятных геологических условий при проектировании магистральных трубопроводов на участках распространения многолетнемерзлых грунтов / Т. Н. Дрынкина // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2007. – № 4 (10). – С. 36–38.
34. Еремеев, В. Е. К вопросу расчета толщины тепловой изоляции по заданной величине снижения (повышения) температуры вещества, транспортируемого трубопроводами / В. Е. Еремеев // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2011. – № 3(25). – С. 52–54.
35. Житомирский, Б. Л. Развитие методологических основ низкотемпературной термомеханической разработки мерзлых грунтов при строительстве и эксплуатации нефтегазопроводов: дис. д-ра техн. наук: 25.00.19 / Житомирский Борис Леонидович. – М., 2021. – 275 с.
36. Зотов, М. Ю. Опыт применения программных комплексов для расчета напряженно-деформированного состояния нефтепроводов, прокладываемых на веч-

- номерных грунтах / М. Ю. Зотов, И. В. Ушаков, И. Л. Димов, А. О. Олейникова // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2012. – № 2(6). – С. 61–65.
37. Ивакин, А. В. Применение «Программного комплекса для моделирования температурных режимов работы трубопроводного транспорта нефти» при проектировании и эксплуатации нефтепроводов / А. В. Ивакин, В. Б. Ковалевский, В. Е.
38. Карнаухов Н.Н. Механика мерзлых грунтов и принципы строительства нефтегазовых объектов в условиях севера / Н.Н. Карнаухов, С.Я. Кушнир, А.С. Горелов, Г.М. Долгих. – М. – Центрлитнефтегаз, 2008. – 431 с.
39. Кудрявцев, С. А. Промерзание и оттаивание грунтов: практические примеры и конечноэлементные расчеты / С. А. Кудрявцев, И. И. Сахаров, В. Н. Парамонов. – СПб.: Геореконструкция, 2014. – 247 с.
40. Кулешов А.П. Влияние методики определения свойств грунтов в численных расчетах деформаций / А.П. Кулешов, В.В. Пендин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – № 12. – С. 63-74.
41. Ларионов, В. И. Анализ напряженно-деформированного состояния трубопровода на участках с карстами / В. И. Ларионов, А. К. Гумеров, П. А. Новиков // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер.: Машиностроение. – 2012. – №3(38). – С. 60–67.
42. Исламов, Р.Р. Анализ средств и методов мониторинга напряженного состояния подземных магистральных нефтегазопроводов, работающих в сложных инженерно-геологических условиях / Р.Р. Исламов, Р.В. Агинеи, Е.В. Исупова // Проектирование, сооружение и эксплуатация газонефтепроводов и газонефтехранилищ. – 2017. – №6. – С. 31–41.
43. Лисин, Ю. В. Выбор оптимальных технических решений по прокладке нефтепровода для обеспечения надежной эксплуатации трубопроводной системы «Заполярье–НПС Пурпе» на основе прогнозных теплотехнических расчетов /

- Ю. В. Лисин, А. Н. Сапсай, В. В. Павлов, М. Ю. Зотов, В. Д. Кауркин // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2014. – № 1. – С. 3–7.
44. Лисин, Ю. В. Мониторинг магистральных нефтепроводов в сложных геологических условиях / Ю. В. Лисин, А. А. Александров // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2013. – № 2(10). – С. 22–27.
45. Лисин, Ю. В. Оценка планово-высотного положения трубопровода на участках с многолетнемерзлыми грунтами / Ю. В. Лисин, А. А. Александров, В. И. Ларионов, М. А. Козлов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение. – 2012. № 3(88). – С. 68-79.
46. Лисин, Ю. В. Развитие технологий и строительных решений по способам прокладки трубопровода Заполярье – Пурпе на многолетнемерзлых грунтах и их применение на подводных переходах трубопровода Куюмба – Тайшет / Ю. В. Лисин, В. В. Павлов, А. Е. Сощенко, М. Ю. Зотов // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2014. – № 3(15). – С. 68–71.
47. Лисин, Ю. В. Система автоматизированного мониторинга магистральных трубопроводов на участках со сложными геологическими условиями / Ю. В. Лисин, А. А. Александров, С. П. Сущев // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2012. – № 3(89). – С. 73-79.
48. Лисин, Ю. В. Технические решения по способам прокладки нефтепровода Заполярье – НПС «Пурпе» / Ю. В. Лисин, А. Е. Сощенко, В. И. Суриков, В. В. Павлов, М. Ю. Зотов // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2014. – № 1(13). – С. 24–28.
49. Лисин, Ю. В. стабилизации Технические многолетнемерзлых решения грунтов по температурной стабилизации оснований объектов трубопроводной системы «Заполярье – НПС «Пур–Пе» / Ю. В. Лисин, А. Е. Сощенко, В. В. Павлов, А.

- В. Коргин, В. И. Суриков // Промышленное и гражданское строительство. – 2014. – № 1. – С. 65–68.
50. Макарычева, Е. М. Экспериментальные исследования ореола оттаивания для верификации и калибровки прогнозных математических моделей / Е. М. Макарычева, В. И. Ларионов, П. А. Новиков // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер.: Естественные науки. – 2013. – № 1(48). – С. 109–116.
51. Марков, Е. В. Проблемы задания граничных условий при моделировании теплового взаимодействия «горячих» трубопроводов с многолетнемерзлыми грунтами / Е. В. Марков, С. А. Пульников, А. Д. Гербер // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 2 (10). С. 2106–2110.
52. Новиков, П. А. Оценка результатов прогнозирования ореола оттаивания вокруг трубопровода на участках с многолетнемерзлыми грунтами / П. А. Новиков, А. А. Александров, В. И. Ларионов // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер.: Естественные науки. – 2013. – № 1(48). – С. 73–81.
53. Овчинников, И.Г. Прогнозирование поведения трубопроводных конструкций в сложных грунтово-геологических условиях. Часть 1. Обобщенная модель деформирования трубопровода / И. Г. Овчинников, И. И. Овчинников, С. Р. Баширзаде // Интернет-журнал «Науковедение». – 2016. – №4(8). – С. 1–26.
54. Паздерин, Д. С. Система мониторинга температур протяженных объектов в вечноммерзлых грунтах / Д. С. Паздерин, Е. В. Амосова, Д. Ю. Кропачев // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2011. – № 4. – С. 32–35.
55. Пат. 2525992 RU Устройство для подвески подземного трубопровода на просядочных грунтах / Усков А.М. и др., патентообладатели Усков А.М., Максимов Г.Л., Волков Д.С., Фигаров Н.Г., Семин Е.Л., Беркович Ю.И., опубл. 20.08.2014. – Бюл. № 23.
56. Пат. 2316630 RU Способ защиты трубопроводов от аварийных ситуаций, вызванных карстовыми провалами / Аль-Сайяль Е.Б. и др., патентообладатели Аль-Сайяль Е.Б. Ширяева Т.С., опубл. 10.02.2008. – Бюл. № 15.

57. Пат. 2460926 RU Способ сооружения подземного трубопровода при пересечении участка с прогнозируемыми сосредоточенными деформациями вмещающих пород / Ягин В.П. и др., патентообладатели Ягин В.П., опубл. 10.09.2012. – Бюл. № 25.
58. Пат. 2643914 RU Устройство для обеспечения проектного положения подземного трубопровода при прокладке в слабонесущих грунтах / Султанмагомедов Т.С. и др., патентообладатели ФГБОУ ВО «УГНТУ», опубл. 06.09.2017. – Бюл. № 25.
59. Пат. 173696 RU Устройство для обеспечения проектного положения подземного трубопровода при прокладке в условиях многолетнемёрзлых грунтов / Султанмагомедов Т.С. и др., патентообладатели ФГБОУ ВО «УГНТУ», опубл. 06.02.2018. – Бюл. № 4.
60. Полищук Ю.М. Распределение площадей озёр криолитозоны в широком диапазоне их размеров по космическим снимкам среднего и высокого разрешения / Ю.М. Полищук, А.Н. Богданов, В.Ю. Полищук // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – № 3. – С. 16–25.
61. Питлюк Д.А. Расчет строительных конструкций на основе моделирования / Д. А. Питлюк. – Л. – Стройиздат, 1965. –153.
62. Пульников С.А. Взаимодействие трубопроводов с мерзлыми грунтами / С.А. Пульников, Ю.С. Сысоев, Е.В. Марков. – Тюмень: ТИУ, 2016. – 86 с.
63. Рекомендации по прогнозированию динамики теплового и механического воздействия трубопроводов с промерзающими и протаивающими грунтами. – М.: ВНИИСТ, 1987. – 120 с.
64. Роман, Л. Т. Модуль деформации мерзлых грунтов при компрессионных испытаниях / Л. Т. Роман, П. И. Котов, М. Н. Царапов // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2016. – № 5. – С. 35–40.
65. Роман Л. Т. Пособие по определению физико-механических свойств промерзающих, мерзлых и оттаивающих дисперсных грунтов / Л. Т. Роман, М. Н. Царапов

- рапов, П. И. Котов, С. С. Волохов, Р. Г. Мотенко, А. М. Черкасов, А. И. Штейн, А. И. Костоусов. – М.: «КДУ», «Университетская книга», 1977. – 407 с.
66. Соколов, С. М. Теоретические основы новых методов сооружения нефтепромысловых трубопроводов в условиях западной сибирей: дис. д-ра техн. наук: 25.00.19 / Соколов Сергей Михайлович. – Тюмень., 2009. – 368 с.
67. СП 25.13330.2012. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах: СНиП 2.02.04-88 Актуализированная редакция / Минрегион России. – Введ. 01.01.2013. – М., 2012. – 112 с.
68. СП 33.13330.2012. Расчет на прочность стальных трубопроводов: СНиП 2.04.12.86 Актуализированная редакция / Минрегион России. – Введ. 01.01.2013. – М., 2012. – 28 с.
69. СП 36.13330.2012. Магистральные трубопроводы: СНиП 2.05.0685* Актуализированная редакция / Минрегион России. – Введ. 01.01.2013. – М., 2012. – 83 с.
70. СП 47.13330.2012. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения: СНиП 11-02-96 Актуализированная редакция / Госстрой России. – Введ. 01.07.2013. – 115 с.
71. Тарасенко А. А. Обоснование возможности подземной прокладки нефтепроводов в районах распространения многолетнемерзлых грунтов / А. А. Тарасенко, М. Н. Рутинский, П. В. Чепур // Технические науки. – 2015. - №12. – С. 47-52.
72. Хренов, Н. Н. Сооружение северных трубопроводов. Взаимодействие с многолетнемерзлыми грунтами в макетах и на трассе [Эл. ресурс] / Н. Н. Хренов // Нефть. Газ. Промышленность. – 2008. – № 3(39). – Режим доступа: <http://neftegaz.ru/science/view/610>; дата обр. 21.05.2015.
73. Цытович, Н. А. Механика мерзлых грунтов. Общая и прикладная: учеб. пособие / Н. А. Цытович. – Изд. 2-е. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ». –2010. – 448 с.

74. Чужинов, С. Н. Анализ прочности трубопровода на участках просадки грунта / С. Н. Чужинов, П. А. Новиков, Ю. В. Ларионов // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2012. – № 4(90). – С. 92-100. /
75. Шаммазов, А. М. Расчет и обеспечение прочности трубопроводов в сложных инженерно-геологических условиях: в 2 т. / А. М. Шаммазов, Р. М. Зарипов, В. А. Чичелов, Г. Е. Коробков. – М.: Интер, 2005. – Т. 1: Численное моделирование напряженно-деформированного состояния и устойчивости трубопроводов. – 706 с.
76. Шаммазов, А. М. Расчет и обеспечение прочности трубопроводов в сложных инженерно-геологических условиях: в 2 т. / А. М. Шаммазов, Р. М. Зарипов, В. А. Чичелов, Г. Е. Коробков. – М.: Интер, 2005. – Т. 2: Оценка и обеспечение прочности трубопроводов в сложных инженерно-геологических условиях. – 564 с.
77. Шаммазов, А. М. Расчет магистральных газопроводов в карстовой зоне / А. М. Шаммазов, Р. М. Зарипов, В. А. Чичелов, Г. Е. Коробков. – Уфа: Гилем, 1999. – 213 с.
78. Шишкин И.В. Развитие методов оценки устойчивости газопроводов в многолетнемерзлых грунтах: дис. к-та техн. наук. Филиал общества с ограниченной ответственностью научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий – газпром ВНИИГАЗ, Ухта, 2014.
79. Ясин, Э. М. Устойчивость подземных трубопроводов / Э. М. Ясин, В. Н. Черникин. – М.: Недра, 1967. – 120 с.
80. Antipov V. v., Ofrikhter V. G. Transition factor between elastic and deformation moduli for dispersive soils // Magazine of Civil Engineering, 2020, T. 99. № 7.
81. Asheghabadi M. S., Cheng X. Analysis of undrained seismic behavior of shallow tunnels in soft clay using nonlinear kinematic hardening model // Applied Sciences (Switzerland), 2020, T. 10. No 8.
82. Azmetov Kh. A., Shaibakov B. R. Technological parameters determination for main pipelines overhaul under conditions of longitudinal compressive force in the pipe

- wall // Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products, 2019, No 5. P. 95-103.
83. Banushi G., Squeglia N., Thiele K. Innovative analysis of a buried operating pipeline subjected to strike-slip fault movement // Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, T. 107. P. 234–249.
 84. Chen Y., Ma Q., Li D., Yang M., Jiang L. Numerical Simulation on Mechanical Response of Buried Pipeline under Uneven Settlement // Advances in Intelligent Systems Research 6 20176 T. 132. P. 71–74.
 85. Garris N. A., Akchurina E. A., Rusakov A. I. Conjugate Problem Of Controlled Heat Exchange Of Oil Pipeline In Permafrost // Petroleum Engineering, 2018, T. 16. No 1. P. 54-61.
 86. Garris N. A., Kutlyeva Z. R., Baeva G. N. Algorithm For The Process Of Thawing-Freezing Soil Regulating Around The Ground Pipeline In Permafrost // Petroleum Engineering, 2018, T. 16. No 6. P. 46-55.
 87. Garris N. A., Rusakov A. I., Lebedeva A. A. Balanced Heat Exchange Of Oil Pipeline In Permafrost Calculation And Thawing Halo Radius Determination // Petroleum Engineering, 2018, T. 16. No 5. P. 73-80.
 88. Ghoreishian Amiri S. A. Grimstad G., Kadivar M., Nordal S. Constitutive model for rate-independent behavior of saturated frozen soils // Canadian Geotechnical Journal, 2016, T. 53. No 10. P. 1646–1657.
 89. Goodluck Mamuzo Edeki S. Strain-Based Mechanical Failure Analysis of Buried Steel Pipeline Subjected to Landslide Displacement Using Finite Element Method, 2020, 239 p.
 90. Hackston A., Rutter E. The Mohr-Coulomb criterion for intact rock strength and friction - A re-evaluation and consideration of failure under polyaxial stresses // Solid Earth, 2016, T. 7. No 2. P. 493–508.
 91. Han L. H., Elliott J. A., Bentham A. C., Mills A., Amidon G. E., Hancock D. C. A modified Drucker-Prager Cap model for die compaction simulation of pharmaceuti-

- cal powders // *International Journal of Solids and Structures*, 2008, T. 45. No 10. P. 3088–3106.
92. Hawlader B. C., Morgan V., Clark J. I. Modelling of pipeline under differential frost heave considering post-peak reduction of uplift resistance in frozen soil // *Canadian Geotechnical Journal*, 2006, T. 43. No 3. P. 282–293.
93. Li H., Lai Y., Wang L., Yang X., Jiang N., Li L., Wang C., Yang B. Review of the state of the art: interactions between a buried pipeline and frozen soil // *Cold Regions Science and Technology*, 2019, No 157, P. 171-186.
94. Khudayarov B. A., Turaev F. Z. Nonlinear vibrations of fluid transporting pipelines on a viscoelastic foundation // *Magazine of Civil Engineering*, 2019, T. 86. No 2. P. 30–45.
95. Kouretzis G. P., Karamitros D. K., Sloan S. W. Analysis of buried pipelines subjected to ground surface settlement and heave // *Canadian Geotechnical Journal*, 2015, T. 52. No 8. P. 1058–1071.
96. Li H., Lai Y., Wang L., Yang X., Jiang N., Li L., Wang C., Yang B. Review of the state of the art: interactions between a buried pipeline and frozen soil // *Cold Regions Science and Technology*, 2019, T. 157. P. 171–186.
97. Lu H., Lai Y, Yang X., Jiang N., Li L., Wang C., Yang B. Stress Analysis of Operating Gas Pipeline Installed by Horizontal Directional Drilling and Pullback Force Prediction During Installation // *Cold Regions Science and Technology*, 2019, No 157. P. 171-186.
98. Nguyen Phuong Dzung. The dependence of the strength properties of soil on its physical state // *Magazine of Civil Engineering*, 2012, T. 9. P. 23–28.
99. Palmer A. C., Williams P. J. Frost heave and pipeline upheaval buckling // *Canadian Geotechnical Journal*, 2003, T. 40. No 5. P. 1033–1038.
100. Primakov S.S., Vershinin V.E., Zholobov I.A. Thermal power interaction hot buried pipeline with permafrost soils // *Neftyanoe khozyaystvo - Oil Industry*, 2013, P. 128–131.

101. Primakov S.S., Zholobov I.A. Measurement of the thermal conductivity of frozen soils in the range of practically significant temperature // *Neftyanoe khozyaystvo - Oil Economy*, 2014, P. 55-57.
102. Robert D. J. A Modified Mohr-Coulomb Model to Simulate the Behavior of Pipelines in Unsaturated Soils // *Computers and Geotechnics*, 2017, T. 91. P. 146–160.
103. Saiyar M. Pipeline Uplift Resistance in Frozen; Soil-Numerical Study. Conference Paper, Geovancouver, 2016.
104. Sh. Shamilov K., Sultanmagomedov T. S., Sultanmagomedov S. M. Design of the support for underground pipeline fastening in conditions of insular and discontinuous permafrost zones // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*, 2021, T. 332. No 1. P. 31–40.
105. Strokova L. A., Galeeva E. I., Leonova A. V. Zoning of engineering-geocryological conditions of the pipelines on vostochno-messoyakhskoe oil and gas condensate field // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*, 2020, T. 331. No 10. P 14–22.
106. Sultanmagomedov T. S., Bakhtizin R. N., Sultanmagomedov S. M. Experimental study of pipeline movements in permafrost soils // *SOCAR Proceedings*, 2021, No 14. P. 75–83.
107. Sultanmagomedov T.S. Bakhtizin R. N., Sultanmagomedov S. M., Urmanova A.R. Simulation of pipeline axial displacement in frozen soils // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, No 332(4). P. 87–96
108. Sultanmagomedov T.S. Bakhtizin R. N., Sultanmagomedov S. M., Urmanova A.R., Gulin D.A. Experimental study of the axial movement of the pipeline in permafrost conditions with changes in soil temperature and humidity // *Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*, 2020, No 10(3). P. 243-251.
109. Sultanmagomedov T. S., Bakhtizin R. N., Sultanmagomedov S. M., Halikov T. M. Research of Throwing Areols of Underground Pipeline in Permafrost // *SOCAR Proceedings*, 2021, No 2. P. 21–30.

110. Sultanov K.S., Kumakov J.X., Loginov P.V., Rikhsieva B.B. Strength of underground pipelines under seismic effects // Magazine of Civil Engineering, 2020, T. 93. No 1. P. 97–120.
111. Sun T., Gao X., Liao Y., Feng W. Experimental study on adfreezing strength at the interface between silt and concrete // Cold Regions Science and Technology, 2021, T. 190.
112. Trifonov O. V. Numerical Stress-Strain Analysis of Buried Steel Pipelines Crossing Active Strike-Slip Faults with an Emphasis on Fault Modeling Aspects // Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 2015, T. 6. No 1.
113. Trifonov O. V. The effect of variation of soil conditions along the pipeline in the fault-crossing zone // Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, T. 104. P. 437–448.
114. Trifonov O. V., Cherniy V. P. A semi-analytical approach to a nonlinear stress-strain analysis of buried steel pipelines crossing active faults // Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2010, T. 30. No 11. P. 1298–1308.
115. Trifonov O. V., Cherniy V. P. Application of Composite Wraps for Strengthening of Buried Steel Pipelines Crossing Active Faults // Journal of Pressure Vessel Technology, Transactions of the ASME, 2016, T. 138. No 6.
116. Tsinidis G., Di Sarno L., Sextos A., Further p. A critical review on the vulnerability assessment of natural gas pipelines subjected to seismic wave propagation. Part 2: Pipe analysis aspects // Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, T. 92.
117. Wen Z., Sheng Y., Jin H., Li S., Li G., Niu Y. Thermal elasto-plastic computation model for a buried oil pipeline in frozen ground // Cold Regions Science and Technology, 2010, T. 64. No 3. P. 248–255.
118. Xu L., Chen Y., Liu Q., Gardoni P. Mechanical Behavior of Submarine Pipelines under Active Strike-Slip Fault Movement // Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 2018, T. 9. No 3.

119. Xu J., Abdalla B., Eltaher A., Permafrost thawing–pipeline interaction advanced finite element model // International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 2009
120. Zhang J., Chen Y., Zhang H. Local buckling evolution mechanism of a buried steel pipe under fault movements // Energy Sci Eng, 2020, T. 8. P. 412–425.
121. Zhao Q.Q., Zhang H.T., Fediuk R.S., Wang J.W. Antiskid prediction model for cement pavements in seasonal frost regions // Magazine of Civil Engineering, 2020, T. 98. No 6.
122. Zhelnin M.S., Prokhorov A.E., Kostina A.A., Plekhov O.A. Experimental and theoretical study of mechanical deformation of freezing saturated soil // PNRPU Mechanics Bulletin, 2019, No 4. P. 19–28.
123. Fang L., Yu B., Li J. Numerical analysis of frozen soil around the mohe–daqing crude oil pipeline with thermosyphons // Heat transfer Engineering, 2017, No 39 (7-8). P. 630-641.

Приложение А. Текст программы для опроса термодатчиков

```

#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
#define ONE_WIRE_BUS 2 // линия данных подключена к цифровому выводу 2
Arduino
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS); // настройка объекта oneWire для связи с лю-
бым устройством OneWire
DallasTemperature sensors(&oneWire); // передать ссылку на oneWire библиотеке
DallasTemperature
int deviceCount = 0;
float tempC;
long lastUpdateTime = 0; // Переменная для хранения времени последнего считы-
вания с датчика
const long TEMP_UPDATE_TIME = 120000; // Определяем периодичность прове-
рок датчика, 120000 мс = 120 с = 2 мин.

void setup()
{ sensors.begin(); // запустить контроллер
  Serial.begin(9600);
  Serial.print("Locating devices...");
  Serial.print("Found ");
  deviceCount = sensors.getDeviceCount();
  Serial.print(deviceCount, DEC);
  Serial.println(" devices.");
  Serial.println("");
  Serial.println("LABEL,1 sensor,2 sensor,3 sensor,4 sensor,5 sensor,6 sensor,7 sensor,8
sensor,9 sensor,10 sensor,11 sensor,12 sensor,Time"); }
void loop(void)
{ long time;
  sensors.requestTemperatures(); // послать команду всем датчикам для преобразо-
вания температуры
  if (millis() - lastUpdateTime > TEMP_UPDATE_TIME)
  { lastUpdateTime = millis();
    Serial.print("DATA");
    Serial.print(",");
    for (int i = 0; i < deviceCount; i++) // отобразить температуру с каждого датчика
    { tempC = sensors.getTempCByIndex(i);
      Serial.print(tempC);
      Serial.print(","); }
    Serial.print("TIME"); }
  Serial.println();
}deviceCount = 0;

```

```

float tempC;
long lastUpdateTime = 0; // Переменная для хранения времени последнего считыва-
ния с датчика
const int TEMP_UPDATE_TIME = 1000; // Определяем периодичность проверок
датчика
const int PIN_CHIP_SELECT = 4;
void setup()
{ sensors.begin(); // запустить контроллер
  Serial.begin(9600);
  Serial.print("Locating devices...");
  Serial.print("Found ");
  deviceCount = sensors.getDeviceCount();
  Serial.print(deviceCount, DEC);
  Serial.println(" devices.");
  Serial.println("");
  Serial.println("LABEL,1 sensor,2 sensor,3 sensor,4 sensor,5 sensor,6 sensor,7 sensor,8
sensor,9 sensor,10 sensor,11 sensor,12 sensor,Time"); }
void loop(void)
{ long time;
  sensors.requestTemperatures(); // послать команду всем датчикам для преобра-
зования температуры
  if (millis() - lastUpdateTime > TEMP_UPDATE_TIME)
  { lastUpdateTime = millis();
    Serial.print("DATA");
    Serial.print(",");
    for (int i = 0; i < deviceCount; i++) // отобразить температуру с каждого дат-
чика
    { tempC = sensors.getTempCByIndex(i);
      Serial.print(tempC);
      Serial.print(","); }
    Serial.print("TIME"); }
  Serial.println();}

```

Приложение Б (рекомендуемое)

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11)**2 766 839**⁽¹³⁾ **C1**

(51) МПК
G01M 5/00 (2006.01)
G01N 3/12 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
G01M 5/00 (2021.08); G01N 3/12 (2021.08)

(21)(22) Заявка: 2021107209, 19.03.2021
(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
19.03.2021

Дата регистрации:
16.03.2022

Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: 19.03.2021

(45) Опубликовано: 16.03.2022 Бюл. № 8

Адрес для переписки:
450046, г.Уфа, ул. Мира 8, кв. 77,
Султанмагомедов Тимур Султанмагомедович

(73) Патентообладатель(и):
Султанмагомедов Тимур
Султанмагомедович (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: RU 2691271 C1, 11.06.2019. RU
2222800 C1, 27.01.2004. RU 2642881 C1,
29.01.2018. JP 3191844 A, 21.08.1991.

(54) Стенд моделирования напряженно-деформированного состояния трубопроводов

(57) Реферат:

Изобретение относится к области исследования напряженно-деформированного состояния трубопроводов и может быть использовано для моделирования трубопроводов, подверженных геодинамическим процессам. Стенд состоит из изолированного герметичного трубопровода с резьбой на концах трубопровода, тензодатчиков, установленных в интересующих сечениях трубопровода под изоляцией, разборного герметичного протяженного лотка на ножках с отверстиями по торцам лотка, перфорированным днищем и испытуемым грунтом внутри лотка, таск, установленных на

резьбе трубопровода на внутренней и наружной стороне лотка с обеих сторон трубопровода вплотную к стенке, роликовых опор, которые перемещаются по направляющей балке, установленной сверху на лотке с помощью хомутов, прикрепленных к трубопроводу, и талрепов, установленных между роликовой опорой и хомутом, заслонок, установленных в направляющих под днищем. Технический результат - возможность определения напряжений и перемещений в модели натурального трубопровода, подверженного геодинамическим нагрузкам. 5 ил.

RU 2 766 839 C 1

RU 2 766 839 C 1