

**ФИЛИАЛ ОБЩЕСТВА С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННО-
СТЬЮ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ПРИРОД-
НЫХ ГАЗОВ И ГАЗОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ – ГАЗПРОМ ВНИИГАЗ
В Г. УХТА**

На правах рукописи

ШИШКИН Иван Владимирович

**РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ
ГАЗОПРОВОДОВ В МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ**

Специальность - 25.00.19 – Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
А.С. Кузьбожев

Ухта 2014

СОДЕРЖАНИЕ

С.

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. ОБЗОР И АНАЛИЗ СРЕДСТВ И МЕТОДОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ГАЗОПРОВОДОВ В МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ.....	9
1.1. Анализ физико-механических характеристик мерзлых грунтов	9
1.2. Строение мерзлых грунтов	11
1.2.1. Особенности формирования основных типов криогенных текстур	11
1.2.2. Простые криогенные текстуры	11
1.2.3. Слоистые текстуры	14
1.3. Физико-механические характеристики мерзлых грунтов.....	15
1.3.1. Плотность и объемный вес.....	15
1.3.2. Влажность и льдистость	16
1.4. Мерзлотные явления и процессы.....	19
1.4.1. Морозное пучение.....	20
1.4.2. Сезонное промерзание и сезонное оттаивание грунтов.....	21
1.5. Обзор и анализ методов контроля физико-механических свойств мерзлых грунтов	22
1.5.1. Методы электроразведки постоянным током	22
1.5.2. Электропрофилирование методом кажущегося сопротивления	23
1.5.3. Вертикальное электрическое зондирование.....	24
1.5.4. Радиолокационное зондирование.....	26
1.5.5. Сейсмоакустические методы исследований свойств грунтов	28
1.6. Обзор и анализ методов диагностирования положения газопроводов в многолетнемерзлых грунтах	30
1.6.1. Физическая сущность методов	30
1.6.2. Анализ погрешностей методов в многолетнемерзлых грунтах	31
1.7. Выбор и обоснование метода георадиолокации для контроля свойств мерзлых грунтов	34
2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ И АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ГАЗОПРОВОДОВ	38
2.1. Характеристика участков газопроводов	38
2.2. Геокриологические особенности участков проведения исследований	44
2.3. Результаты исследования температуры грунтов на участках прокладки газопровода	46
2.3.1. Методика обустройства скважин для измерения температуры грунтов	46
2.3.2. Результаты измерения температуры грунта и их анализ	52

2.4. Результаты экспериментального определения физических характеристик мерзлых грунтов	55
2.5. Анализ конструктивных особенностей газопровода Бованенково-Ухта, оценка возможности их диагностирования	60

3. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ГАЗОПРОВОДОВ В МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ..... 68

3.1. Основные характеристики радиолокационного метода	68
3.1.1. Глубинность, разрешающая способность и детальность метода	68
3.1.2. Отражения от объектов	70
3.1.3. Разрешающая способность георадара по расстоянию	74
3.1.4. Разрешающая способность георадара в плане	75
3.1.5. Волновая картина и способы ее отображения	76
3.1.6. Особенности обработки данных георадиолокационных исследований.....	77
3.1.7. Особенности интерпретации данных георадиолокационных исследований	83
3.2. Физические основы метода георадиолокации	85
3.3. Виды георадиолокационных антенн	86
3.3.1. Неэкранированные дипольные антенны.....	88
3.3.2. Щелевые и экранированные дипольные антенны	88
3.3.3. Антенны бегущей волны	91
3.4. Разработка общих требований к георадиолокационному диагностированию газопроводов	91
3.4.1. Планирование и организация диагностирования	91
3.4.2. Выбор размера участка и длины профилей.....	93
3.4.3. Определение расстояния между профилями.....	93
3.5. Методика георадиолокационного диагностирования участков газопроводов в мерзлых грунтах	95
3.5.1. Выбор схемы сканирования	95
3.5.2. Порядок проведения исследований.....	96
3.5.3. Подготовка к проведению исследований	98
3.5.4. Порядок обработки и интерпретация результатов	100
3.6. Адаптация георадиолокационного метода для диагностирования особенностей газопровода в многолетнемерзлых грунтах.....	101
3.6.1. Применяемое оборудование	101
3.6.2. Характеристика участка газопровода Бованенково-Ухта, 25,3 км	103
3.6.3. Определение типа грунтов и выделение границы талый – мерзлый грунт на основе скоростного анализа.....	104
3.6.4. Обоснование оптимальной частоты экранированных антенн.....	107
3.6.5. Исследование информативных признаков выявления конструктивных особенностей газопроводов.....	109

4. РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ ГАЗОПРОВОДОВ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ СВОЙСТВ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ 111

4.1. Анализ нормативных требований к прочности подземных магистральных газопроводов.....	111
--	-----

4.1.1. Нормативные требования.....	111
4.2. Постановка задач расчета, исходные данные	115
4.3. Схемы перемещений газопровода в оттаивающих грунтах	117
4.4. Нагрузки и воздействия на газопровод в мерзлых и оттаивающих нестабильных грунтах	121
4.5. Особенности поведения участков газопровода в нестабильно мерзлых грунтах	125
4.6. Расчетная схема осадки газопровода при оттаивании мерзлых грунтов	128
4.7. Расчетная схема всплытия и выпучивания газопровода при оттаивании мерзлых грунтов	135
4.8. Расчетное обоснование требований к участкам осадки газопроводов при оттаивании мерзлых грунтов	140
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	152
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	154

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Обеспечение надёжности эксплуатации газопроводов за счет поддержания их устойчивости в многолетнемерзлых грунтах является первоочередной актуальной задачей газотранспортных предприятий и обеспечивается комплексом мероприятий, направленных на предупреждение и своевременное устранение нарушений устойчивого положения газопроводов.

Нарушение устойчивого положения северных магистральных газопроводов (МГ), связано с оттаиванием окружающих их многолетнемерзлых грунтов, которое может происходить вследствие теплового взаимодействия газопровода с мерзлым грунтом, формирования ореола оттаивания вокруг МГ или сезонного оттаивания грунтов. При оттаивании многолетнемерзлого грунта возможно значительное снижение его несущей и балластирующей способности, что может приводить к всплыванию или просадке участков газопровода.

Диагностирование положения газопровода в многолетнемерзлых грунтах существующими индукционными методами поиска трассы характеризуется значительной погрешностью, вызванной экранирующим эффектом слоев мерзлого грунта высокого электрического сопротивления. Кроме того, одним из мешающих факторов для трассоискателей является наличие на газопроводе технических устройств – балластирующих грузов различных конструкций, теплоизоляционного покрытия, геомодулей и грунтозадерживающих барьеров и других.

Для контроля несущей и балластирующей способности многолетнемерзлого грунта в траншее подходят методы исследования их физико-механических свойств. Среди них наибольшее распространение получили методы электроразведки, сейсморазведки, гравиразведки и другие, которые достаточно эффективно применяются на глубинах в десятки и сотни метров. Однако, при контроле относительно небольших по размерам грунтовых массивов, в частности грунта засыпки газопровода в траншее, методы имеют недостаточную разрешающую способность.

В наибольшей степени для этих целей подходит георадиолокационный метод, однако до настоящего времени на газопроводах, проложенных в многолетнемерзлых грунтах, метод не применялся. Также отсутствует расчетное обоснование прочности и устойчивости газопроводов при оттаивании мерзлых грунтов, текущие характеристики которых получают при диагностировании. Поэтому развитие методов оценки устойчивости газопроводов в многолетнемерзлых грунтах, является актуальной задачей.

Цель работы: Развитие методов диагностирования и оценки устойчивости газопроводов в многолетнемерзлых грунтах для повышения надёжности при эксплуатации.

Задачи исследования:

- выполнить анализ физико-механических свойств многолетнемерзлых грунтов в зависимости от геокриологических условий прокладки газопроводов;
- исследовать сезонные изменения температуры многолетнемерзлых грунтов обвалования газопроводов на начальном этапе эксплуатации в условиях полуострова Ямал;
- определить критерии выявления георадиолокационным методом глубины сезонного оттаивания грунта, участков газопроводов с многолетнемерзлыми грунтами с малой несущей и балластирующей способностью,
- определить критерии выявления георадиолокационным методом балластирующих грузов различных конструкций, грунтозадерживающих барьеров, геомодулей;
- разработать рациональные схемы георадиолокационного диагностирования участков газопроводов в многолетнемерзлых грунтах;
- выполнить расчетное обоснование прочности и устойчивости газопроводов при изменении свойств мерзлых грунтов на основе данных диагностирования.

Научная новизна:

Экспериментально обоснованы диапазоны скорости радиоволновых отражений георадиолокационного метода для основных типов грунтов засыпки газопровода в траншее, критерии выявления границы сезонного оттаивания многолетнемерзлого грунта в траншее газопровода в интервале 0,050-0,055 м/нс, соответствующего талому грунту, 0,123-0,175 м/нс – мерзлому грунту.

Экспериментально обоснованы рациональные схемы георадиолокационного сканирования: с дискретной установкой антенн по профилю с шагом не более 0,5 м на пересеченной местности; непрерывное сканирование с автоматизированным датчиком перемещения на равнинных участках, при которых выявляется не менее 85 % конструктивных особенностей газопровода.

Найдены среди стандартного ряда частот 90-2000 МГц оптимальные величины частоты экранированных антенн для выявления: глубины заложения газопровода, балластирующих устройств, подземных льдов в диапазоне 250-270 МГц, слоя сезонного промерзания – оттаивания, стенок и дна траншеи газопровода - 100 МГц.

На основе расчетного анализа прочности и устойчивости подземного газопровода с рабочим давлением 11,8 МПа при изменении свойств мерзлых грунтов определена критическая протяженность участков газопровода с толщиной стенки 26,4 и 27,7 мм при ко-

торой невозможна его безопасная эксплуатация вследствие развития процессов всплытия или осадки.

Защищаемые положения:

- экспериментальное обоснование методов прогнозирования сезонного изменения свойств многолетнемерзлых грунтов засыпки газопровода;
- экспериментальное обоснование георадиолокационного метода контроля позволяющего оценивать балластирующую и несущую способность многолетнемерзлых грунтов, выявлять конструктивные особенности газопроводов;
- экспериментальное обоснование рациональных схем георадиолокационного метода диагностирования и оптимального двухчастотного диапазона контроля;
- расчетное обоснование метода оценки прочности и устойчивости газопроводов при изменении свойств мерзлых грунтов.

Практическая ценность работы заключается в разработке Рекомендаций ОАО «Газпром» «Порядок мониторинга геокриологических условий прокладки и обеспечения устойчивости газопроводов в нестабильных грунтах с малой несущей способностью», устанавливающих требования к работам по георадиолокационному диагностированию многолетнемерзлых грунтов и технических конструкций обустройства газопровода, методам расчетного обоснования прочности и устойчивости газопроводов в многолетнемерзлых грунтах.

Разработанные рекомендации внедрены на начальном этапе эксплуатации газопроводов Бованенково-Ухта на 15 участках, из которых выделено 2 участка с существенным сезонным изменением свойств многолетнемерзлых грунтов, требующих проведения периодического мониторинга устойчивого положения газопроводов.

По результатам промышленного внедрения работ рассчитан ожидаемый экономический эффект (индекс эффективности не менее 8,5) в ООО «Газпром трансгаз Ухта», достигаемый за счет снижения риска потенциального разрушения газопроводов вследствие внедрения информативных методик диагностирования устойчивого положения газопроводов, своевременного выявления и устранения скрытых нарушений устойчивости.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

- XII Межд. науч. конф. «Севергеоэкотех» (УГТУ, г. Ухта, 4-5 февр. 2012 г.);

- V Межд. научн.-техн. конф. «Газотранспортные системы: настоящее и будущее» (GTS-2013), (Газпром ВНИИГАЗ, г. Москва, 29-30 окт. 2013 г.);

- V науч.-практ. молод. конф. «Новые технологии в газовой отрасли. Актуальные проблемы развития газотранспортной системы. Экология на производстве» (ИТЦ Газпром трансгаз Ухта, г. Ухта, 26-28 июня 2013 г.);

- Межрегион. семинаре «Рассохинские чтения» (УГТУ, г. Ухта, 8-9 февраля 2013 г., 6-7 февраля 2014 г.);

- Всерос. конф. молод. уч-х, спец-ов и студ-ов «Новые технологии в газовой промышленности» (РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, г. Москва, 8-11 октября 2013 г.);

- совещаниях и научно-технических советах ООО «Газпром трансгаз Ухта», Ученых советах филиала ООО «Газпром ВНИИГАЗ» в г. Ухта за период 2010-2014 г.

Публикации: по теме диссертации опубликовано 16 работ, из них 5 в ведущих рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК Минобрнауки РФ и 1 патент РФ.

Структура и объем работы: диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, содержит 159 страниц текста, 54 рисунка, 15 таблиц и список литературы из 83 наименований.

1. ОБЗОР И АНАЛИЗ СРЕДСТВ И МЕТОДОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ГАЗОПРОВОДОВ В МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ

1.1. Анализ физико-механических характеристик мерзлых грунтов

Мерзлыми называют грунты, имеющие отрицательную температуру и содержащие в своем составе лед, который цементирует минеральные частицы или заполняет пустоты, поры и трещины. К ним могут относиться:

- дисперсные грунты (обломочные, песчаные, глинистые, торфяные);
- трещиноватые или выветрелые магматические, метаморфические и сцементированные осадочные породы.

Грунты, имеющие отрицательную температуру и влажность, меньшую, чем количество незамерзшей воды при данной температуре, но не содержащие льда, называются морозными [2,3].

Мерзлые и морозные грунты, могут значительно различаться по составу, криогенному строению, типу криогенеза, криогенному возрасту, температурному режиму, мощности, льдистости и другим характеристикам.

Дисперсные мерзлые грунты являются наиболее сложным объектом исследований и представляют собой многокомпонентные многофазные капиллярно-пористые или коллоидные грунтовые системы. Влага в них обычно находится в трех агрегатных состояниях: в виде льда, пара и незамерзшей воды. Незамерзшая вода - это часть невымерзшей связанной воды, содержание которой с понижением отрицательной температуры уменьшается. При этом лед и незамерзшая вода находятся в постоянном динамическом равновесии. Так, при повышении отрицательной температуры лед подплавляется и пополняет запасы незамерзшей воды, а при понижении температуры происходит увеличение льдо-содержания в грунте за счет постепенного вымерзания незамерзшей воды. Следовательно, мерзлый грунт является высокодинамичной системой, реагирующей на любое изменение внешних термодинамических условий. Промерзшие дисперсные грунты при этом отличаются от немерзлых, прежде всего своей монолитностью, т. е. сцементированностью минеральных частиц льдом и наличием особых (криогенных) структуры и текстуры. Все это обуславливается фазовым переходом грунтовой воды в лед при промерзании и сопровождается целым рядом сложных физико-химических процессов [4].

Промерзание дисперсных грунтов с миграцией влаги приводит к их дифференциации (сегрегации) на массивно-мерзлую (скелетно-минеральную) часть и визуально фиксируе-

мые прослои миграционно - сегрегационного льда, формирующие специфическую криогенную текстуру (слоистую, сетчатую, порфировидную, линзовидную и др.). Если в мерзлом грунте лед в виде визуальных прослоев и отдельных включений отсутствует, а заполняет лишь ее поровое пространство в виде льда-цемента, то формируется бесшлировая криогенная текстура, называемая массивной [5].

Существенные различия мерзлых и немерзлых грунтов связаны с их химико-минеральным составом и дисперсностью, что обусловлено спецификой протекания в криолитозоне геохимических процессов и выветривания. Например, дисперсные грунты, сцементированные льдом, характеризуются повышенным содержанием углекислоты, отчетливо выраженной восстановительной обстановкой и кислой средой.

На территориях распространения многолетнемерзлых грунтов широко развиты подземные льды, которые встречаются в мерзлых грунтах в виде самостоятельных ледяных образований. Наибольшим распространением при этом пользуются повторно-жильные льды, формирующиеся по морозобойным (температурным) трещинам, ледяные тела в буграх пучения, пластовые залежи льда и др.

По длительности пребывания в мерзлом состоянии выделяют три разновидности грунтов [6]:

1) Кратковременномерзлые, которые существуют часы или сутки, а их мощность составляет несколько сантиметров или десятков сантиметров от поверхности;

2) Сезонномерзлые, существующие в течение нескольких месяцев и имеющие мощность от нескольких десятков сантиметров до нескольких метров;

3) Многолетнемерзлые, которые существуют годы, сотни и тысячи лет и имеют мощность до многих сотен метров.

Периодическое изменение температуры поверхности грунтов в течение года приводит к изменению теплового состояния их приповерхностных слоев. В зависимости от среднегодовой температуры грунтов, происходит их сезонное промерзание (в районах, где многолетнемерзлые грунты отсутствуют) или оттаивание (для грунтов с отрицательной среднегодовой температурой). Глубина сезонного промерзания и сезонного оттаивания обычно изменяется от десятков сантиметров до нескольких метров [5,6].

1.2. Строение мерзлых грунтов

1.2.1. Особенности формирования основных типов криогенных текстур

Формирование криогенных текстур в первую очередь определяется составом грунтов, а также их строением и условиями промерзания-оттаивания. В зависимости от первоначального строения различают текстуры, образовавшиеся в однородных и неоднородных грунтах: в первом случае формируются наложенные криогенные текстуры, а во втором - унаследованные. В зависимости от гранулометрического и химико-минерального состава грунтов, условий их промерзания образуются криогенные текстуры различных типов и видов. Ведущим процессом, определяющим разнообразие криогенных текстур, является миграция влаги. Плотность миграционного потока влаги и время его действия определяют мощность прослоев льда, а интенсивность потока – их частоту и ориентировку [6, 7].

Наложённые криогенные текстуры возникают обычно в относительно однородных (до промерзания) грунтах под влиянием процесса промерзания и не связаны с особенностями первичного (исходного) сложения немерзлых грунтов. Среди наложенного типа криогенных текстур промерзающих грунтов в зависимости от наличия, формы и расположения в них ледяных прослоев обычно выделяют [8]:

- простые криогенные текстуры, образуемые включениями льда одной формы;
- слоистые текстуры (горизонтальная, волнистая, косая и др.), образованные удлиненными линзами, ориентированными в одном направлении и параллельными друг другу;
- сетчатые текстуры (ячеистая, плетенчатая, сетчатая и др.), образуемые пересекающимися удлиненными шлирами льда и создающими в мерзлом массиве решетчатые формы;
- сложные криогенные текстуры, образуемые шлирами льда различной формы и величины (объединяющие в себе несколько видов простых криогенных текстур, наложенных друг на друга).

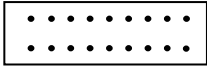

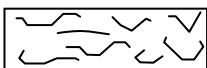

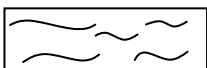
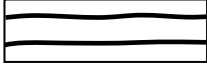





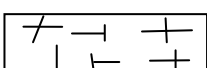
1.2.2. Простые криогенные текстуры

К простым криогенным текстурам относятся (таблица 1.1) [7]:

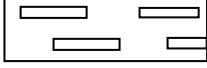
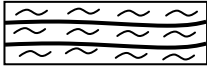



- массивная текстура, которая широко распространена в природе и образуется льдом-цементом. Лед-цемент присутствует в грунте в виде кристаллов, заполняющих полностью или частично поровое пространство. Льдистость глинистых отложений за счет льда цемента не превышает критической влажности;

- базальная текстура, свойственная распученным грубозернистым и обломочным породам, промерзающим в условиях полного водонасыщения, когда частицы и обломки породы погружены в лед и не соприкасаются между собой;

Таблица 1.1 – Основные типы криотекстур

Типы и виды криогенных текстур	Условное обозначение криогенных текстур	Условия, необходимые для образования текстур	
		Состав грунтов	Способ промерзания
Простые текстуры			
Массивная		Гравийно-галечные с песчаным заполнителем, песчаные, глинистые, торф	Эпигенетический, сингенетический
Базальная		Гравийно-галечные с песчаным заполнителем или без него, водоносные	Эпигенетический
Корковая		Гравийно-галечные с тонкодисперсным заполнителем	Эпигенетический, сингенетический
Порфировидная		Глинистые, торф	Эпигенетический, сингенетический (редко)
Слоистые			
Линзовидная		Глинистые, тонкозернистые пески, торф	То же
Полосчатая		Глинистые, разложившийся торф	Эпигенетический
Волнистая		Глинистые, оторфованные пески	Эпигенетический, сингенетический
Плойчатая		Глинистые, пылеватые и заторфованные пески	Сингенетический
Косая		То же	То же
Сетчатые			
Ячеистая		Глинистые	Эпигенетический
Плетенчатая		Глинистые, оторфованные пылеватые пески	Сингенетический, эпигенетический
Неполносетчатая		Глинистые, разложившийся торф	Эпигенетический

Продолжение таблицы 1.1 – Основные типы криотекстур

Типы и виды криогенных текстур	Условное обозначение криогенных текстур	Условия, необходимые для образования текстур	
		Состав грунтов	Способ промерзания
Сложные текстуры			
Атакситовая		Глинистые, торф	Сингенетический, эпигенетический
Поясковая		Глинистые, пылеватые и оторфованные пески	Сингенетический
		Глинистые	
Слоисто-сетчатая		Глинистые	Эпигенетический
Прожилковая		То же	Сингенетический

- корковая текстура, свойственная крупнообломочным породам. Не выдержанные по толщине корки и линзы льда образуются вокруг обломков, валунов, щебенки в связи с проявлением анизотропной теплопроводности между обломочным материалом и вмещающим грунтом в процессе промерзания;

- порфирированная текстура, создаваемая изотермичными кристаллами льда в грунте в виде гнезд, вкраплений неправильной формы. Эта текстура формируется в грунтах разного состава, в том числе в торфе, в условиях небольшого их увлажнения.

Массивная криогенная текстура формируется в случае [6, 7]:

а) несоблюдения физико-механических условий сегрегационного льдовыделения (при промерзании не может быть преодолено сопротивление грунта на разрыв),

б) невыполнения теплофизических условий криотекстурообразования.

Последний случай обычно реализуется либо в результате быстрого промерзания водо- и неводонасыщенных дисперсных грунтов, либо в результате промерзания с любой скоростью слабовлажных тонкодисперсных или грубо- и крупнодисперсных разностей грунтов, когда миграция влаги практически отсутствует, а находящаяся в порах грунтовой вода фиксируется процессом промерзания на месте.

Формирование массивной криогенной текстуры возможно при наличии миграции влаги в промерзающих грунтах, т. е. при соблюдении теплофизических условий сегрегационного льдовыделения. При достаточном развитии процесса миграции влаги из талой в

промерзающую часть грунта такой случай может быть обусловлен только невозможностью преодоления локальной прочности грунта развивающимися в грунте напряжениями.

Массивная криотекстура может образовываться и в том случае, если в промерзающем грунте, возможно, было бы преодоление локального сцепления грунта и образование, например, слоистой криогенной текстуры, но наличие существенной внешней нагрузки на грунт препятствует этому [8].

1.2.3. Слоистые текстуры

Наложенная слоистая криогенная текстура при промерзании дисперсных грунтов образуется при соблюдении теплофизического и физико-механического условий формирования параллельных фронту промерзания сегрегационных прослоев льда. Условие же образования вертикальных ледяных шпиров при этом не выполняется. Этот тип текстуры преимущественно развит в тонкодисперсных грунтах (супеси, суглинки, глины), но иногда встречается и в пылеватых песках. Зарождение и рост слоистой криогенной текстуры происходят обычно в интервале отрицательных температур от минус 0,24 до минус 3°C [4].

Слоистые текстуры, в зависимости от взаимной ориентации ледяных прослоев подразделяются на (таблица 1.1) [5]:

- линзовидную;
- полосчатую;
- плейчатую;
- косую.

По сравнению с другими типами шпировой криогенной текстуры слоистая криотекстура развита в естественных условиях более часто и наиболее отчетливо проявляется при малых скоростях промерзания. Возникающие в этом случае значительные скалывающие напряжения оказываются достаточными для преодоления локальной прочности грунта на сдвиг и зарождения в еще талой иссушающейся части грунта параллельных фронту промерзания зон «концентрации» скалывающих объемно-градиентных напряжений. Зарождению таких зон в значительной степени благоприятствует процесс структурообразования, приводящий к организации у большинства природных грунтов плоских структурных отдельностей - агрегатов плитчатой формы. Это обуславливает образование в талой и промерзающих частях грунта большого числа параллельных фронту промерзания «дефектных» зон, являющихся границами структурных отдельностей.

В процессе продолжающегося промерзания после развития горизонтальных зон «концентрации» напряжений и попадания их в промерзающую зону, они скачкообразно превращаются в льдонасыщенные. Здесь преодолевается структурное сцепление грунта и формируются отдельные тонкие линзы и короткие шлиры льда, различимые только под микроскопом. В последующем, при соответствующей скорости промерзания и наличии миграции влаги, происходит увеличение их размеров в ширину и длину, слияние между собой и образование единого и протяженного, параллельного фронту промерзания прослоя льда, который уже отчетливо прослеживается визуально. Ниже этого шлира еще в период его роста происходит зарождение нового сегрегационного прослоя и т.д. [9].

После того, как сформировался нижерасположенный прослой льда, он становится своеобразным прерывателем потока влаги из талой зоны грунта к вышележащему ледяному прослою, скорость роста которого в итоге замедляется, хотя и не прекращается во все. Прослои еще долгое время продолжают увеличиваться. Возможно также образование шлиров второй генерации в уже мерзлом грунте. Однако это происходит уже не за счет подтока воды из талой зоны, а за счет запасов незамерзшей влаги грунта, пополняющихся в результате подплавления порового льда и льда располагающихся ниже ледяных прослоев.

Очевидно также, что на взаиморасположение ледяных шлиров в грунте, промерзающем по типу слоистой криогенной текстуры, существенное влияние оказывает прежде всего состав, структурно-текстурные и геолого-генетические особенности грунтов. При одинаковых условиях промерзания различные грунты будут характеризоваться не только различием в плотности миграционного потока влаги к фронту льдовыделения в интенсивности льдонакопления, но и существенным различием в величинах и характере развития объемно-градиентных напряжений и деформаций усадки, набухания - распучивания, в мощности зоны иссушения и области роста шлира и др. [10].

1.3. Физико-механические характеристики мерзлых грунтов

1.3.1. Плотность и объемный вес

Объемный вес мерзлого дисперсного грунта представляет собой вес единицы объема в естественном, ненарушенном состоянии и в большой степени зависит от его льдистости, поэтому рекомендуется определять его расчетным методом. Для этого определяют удельный вес грунта, суммарную влажность (ω_c), количество незамерзшей воды (ω_n) при данной температуре, а затем, принимая, что все поры грунта заполнены льдом и незамерзшей водой, рассчитывают объемный вес (γ) мерзлого грунта по формуле [11, 12];

$$\gamma = \frac{0,9 \cdot \Delta \cdot (100 + \omega_c)}{90 + \Delta \cdot (\omega_c - 0,1 \cdot \omega_n)}, \quad (1.1)$$

где 0,9 – удельный вес льда; Δ – удельный вес минеральной части грунта; ω_c – суммарная влажность мерзлого грунта в % к сухой навеске; ω_n – количество незамерзшей воды в % к сухой навеске.

Зная объемный вес мерзлого дисперсного грунта (γ) и его удельный вес, можно определить относительную пористость или коэффициент пористости мерзлого дисперсного грунта [13]:

$$\varepsilon_m = \frac{\Delta - \gamma_m}{\gamma_m}. \quad (1.2)$$

1.3.2. Влажность и льдистость

Суммарная влажность мерзлого грунта ω_c выражается в долях единицы и принимается равной отношению всех видов воды и льда, содержащихся в мерзлом грунте, к массе сухого грунта (а для засоленных грунтов - к массе сухого грунта и содержащихся в нем солей) [12]:

$$\omega_c = \omega_b + \omega_{ц} + \omega_n = \omega_b + \omega_r, \quad (1.3)$$

где ω_b – влажность мерзлого грунта за счет ледяных включений, т. е. линз и прослоек льда; ω_n – то же, за счет порового льда, т. е. льда, находящегося в порах грунта и цементирующего минеральные частицы; ω_n – то же, за счет содержания незамерзшей воды при данной температуре; ω_r – влажность мерзлого грунта между ледяными включениями (принимается равной отношению содержащихся в мерзлом грунте воды за счет льда-цемента $\omega_{ц}$ и незамерзшей воды ω_n к массе сухого грунта). Величину ω_n определяют опытным путем [.

При отсутствии опытных данных влажность ω_r для незасоленных грунтов можно принимать равной $\omega_p + 0,03$ (где ω_p – влажность на границе раскатывания).

Влажность мерзлого грунта за счет незамерзшей воды (содержание незамерзшей воды) определяют опытным путем как отношение массы незамерзшей при данной отрицательной температуре воды к массе сухого грунта. Наличие незамерзшей воды в грунте связано с тем, что минеральные частицы, обладая большой поверхностной энергией, взаимодействуют с водой, изменяя ее структуру, состав и свойства. Такая адсорбированная на поверхности минеральных частиц вода имеет особые свойства и не замерзает при отрицательной температуре. Поровый лед в мерзлом грунте также обладает значительной поверхностной энергией и гидрофильностью и становится причиной образования вблизи поверхности тонкого слоя

промежуточной фазы влаги. Количество незамерзшей воды зависит от температуры, гранулометрического, химического и минерального состава грунта [13].

С уменьшением средних размеров частиц и повышением дисперсности содержание незамерзшей воды увеличивается в связи с ростом удельной активной поверхности грунтов. Поэтому при одной и той же температуре ω_n песков значительно меньше, чем супесей и глин. Наиболее важная характеристика фазового состава воды в мерзлом грунте – его зависимость от температуры. При понижении температуры количество незамерзшей воды уменьшается. Выделяют три характерные области:

1) интенсивных фазовых переходов, в которой изменение весовой влажности (содержание незамерзшей воды) при изменении температуры t на 1°C составляет более 5%. Величина термоградиентного коэффициента $\delta_t = \Delta\omega_n / \Delta t$ здесь составляет $0,5^\circ\text{C}^{-1}$. В этой области, расположенной вблизи 0°C , вымерзает вся свободная и слабосвязанная вода. Границы области соответствуют температуре замерзания грунта и температуре замерзания рыхлосвязанной воды;

2) слабоинтенсивных фазовых переходов, для которой $0,2 > \delta_t > 0,02^\circ\text{C}^{-1}$. Границы области соответствуют температуре замерзания рыхло- и прочносвязанной воды;

3) область, в которой фазовые переходы отсутствуют практически полностью, $\delta_t < 0,02^\circ\text{C}^{-1}$, а температура ниже температуры замерзания прочносвязанной воды.

Содержание незамерзшей воды и льда во многом зависит от засоленности мерзлых грунтов. Влияние засоленности на фазовый состав влаги определяется концентрацией и химическим составом солей. Графики зависимости содержания незамерзшей воды в грунтах от их состава и температуры приведены на рисунке 1.1.

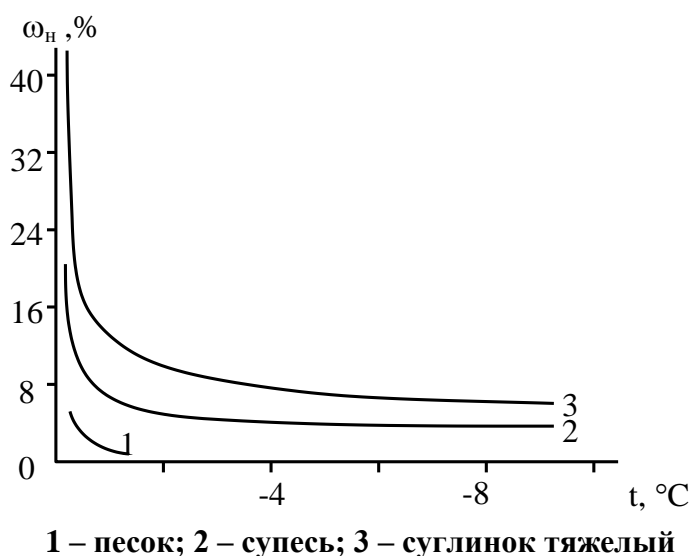


Рисунок 1.1 – Зависимости содержания незамерзшей воды в незасоленных грунтах

Содержание незамерзшей воды в грунтах определяется экспериментально калориметрическим, криоскопическим, контактным, гигроскопическим и другими методами [12].

При отсутствии экспериментальных данных или необходимости получения экспресс - информации о фазовом составе воды на основе имеющейся первичной оценки характеристик мерзлого грунта могут быть использованы расчетные методы. При этом всегда подразумевается, что экспериментальные методы дают точную информацию, а расчетные – лишь ориентировочные оценки. Влажность за счет незамерзшей воды может быть рассчитана по выражению [14, 15]:

$$\omega_H = \kappa_{\omega} \cdot \omega_p \quad (1.4)$$

где κ_{ω} — коэффициент, принимаемый в зависимости от числа пластичности L_p и температуры грунта t .

В таблице 1.2 значения κ_{ω} , аппроксимированы уравнениями [16].

Таблица 1.2 – Значения коэффициента κ_{ω} в зависимости от состава и температуры грунтов

Грунты	Число пластичности	Расчетная формула
Пески и супеси	$L_p \leq 0,02$	$\kappa_{\omega} = 0$
Супеси	$0,02 \leq L_p \leq 0,07$	$\kappa_{\omega} = (2,443 + 1,481 \cdot \lg t)^{-1}$
Суглинки	$0,07 < L_p \leq 0,17$	$\kappa_{\omega} = (1,716 + 0,72 \cdot \lg t)^{-1}$
	$0,13 < L_p \leq 0,17$	$\kappa_{\omega} = (1,55 + 0,7 \cdot \lg t)^{-1}$
Глины	$L_p > 0,17$	При $t = 0 \dots -2 \text{ } ^\circ\text{C}$ $\kappa_{\omega} = \sqrt{0,936 - 0,128 \cdot t^2}$ При $t = -2 \dots -10 \text{ } ^\circ\text{C}$ $\kappa_{\omega} = 0,702 \cdot \lg t ^{-1,07}$

Суммарная льдистость (L_c) мерзлого грунта определяется как соотношение объема всех видов содержащегося в нём льда (ледяных включений и льда-цемента) к объёму мёрзлого грунта. Льдистость мёрзлого грунта за счёт ледяных включений (L_b) - это отношение объёма включений льда (линз, прослоек) к общему объёму мерзлого грунта. Величины L_c и L_b определяют на основе экспериментально установленных значений влажности и плотности мерзлого грунта по следующим выражениям [17]:

$$L_c = L_b + L_{\text{ц}} = \frac{\rho_M \cdot (\omega_c - \omega_H)}{\rho_L \cdot (1 + \omega_c)}, \quad (1.5)$$

$$L_b = \frac{\rho_s \cdot \omega_b}{\rho_L + \rho_s \cdot (\omega_c - 0,1\omega_H)}, \quad (1.6)$$

где $L_{\text{ц}}$ – льдистость льда за счет порового льда-цемента (в долях единицы); ρ_s – плотность частиц грунта, кг/см^3 ; ρ_M – плотность грунта в мёрзлом состоянии, кг/м^3 ; ρ_L – плотность льда, принимаемая равной $0,0009 \text{ кг/см}^3$.

Также различают весовую льдистость (i_b) – отношение веса льда к весу скелета, выраженную в долях единицы, и объемную льдистость ($i_{об}$) – отношение объема льда к объему мерзлого грунта в долях единицы [18-21].

Существует понятие так называемой относительной льдистости - отношение веса льда к суммарной влажности [19]:

$$i = \frac{\omega_c - \omega_H}{\omega_c}, \quad (1.7)$$

В некоторых случаях есть необходимость при оценке влажностного режима мерзлых дисперсных грунтов учитывать такие влагообменные характеристики, как влагоемкость, влагопроводность и диффузивность, или потенциалопроводность. Для мерзлых дисперсных грунтов весьма важно знать влагоемкость после их оттаивания в связи с тем, что их льдистость может быть больше полной влагоемкости и в процессе оттаивания могут произойти осадки от собственного веса. Одновременно с этим необходимо учесть набухание грунта при оттаивании. Если набухание имеет место, то осадка грунта при оттаивании в этом случае будет меньше [20].

1.4. Мерзлотные явления и процессы

Область распространения сезонно - и многолетнемерзлых грунтов характеризуется развитием разнообразных экзогенных геологических процессов, которые подразделяются на следующие группы [22-36]:

- первая группа представлена морозобойным растрескиванием, жильным льдообразованием, криогенным выветриванием, морозным пучением, термокарстом;
- вторая группа объединяет склоновые процессы, обусловленные в первую очередь действием сил гравитации (солифлюкция и курумообразование);
- процессы третьей группы связаны с механическим воздействием на мерзлые грунты экзогенных агентов природной среды (ледников, водных потоков, ветров) и представлены термоэрозией и термоабразией.

Особенности распространения, интенсивность развития и проявления экзогенных процессов в целом определяются ландшафтно-климатическими и мерзлотно-геологическими факторами и условиями. Однако каждый процесс имеет свои механизм и причины развития, поэтому влияние одного природного фактора на развитие разных процессов может быть различным.

1.4.1. Морозное пучение

Морозное пучение дисперсных грунтов – это поднятие поверхности земли, обусловленное увеличением объема замерзшей влаги и льдообразованием (вследствие миграции воды) при промерзании. Это явление широко развито, как в многолетнемёрзлых, так и в сезоннопромерзающих грунтах. Наибольшие деформации пучения наблюдаются при льдонакоплении в тонкодисперсных грунтах, промерзающих в «открытых» системах (т. е. при возможности подтока воды к границе промерзания), где под влиянием градиентов температуры и влаги возникают большие миграционные потоки пленочной воды. Механизм процесса пучения предопределяет его зависимость от климата, условий теплообмена на поверхности, глубины и скорости промерзания грунтов, их состава, строения, теплофизических и влагопроводных свойств, от глубины залегания и режима грунтовых вод [23-32].

В условиях развития отложений, содержащих как мелкозем, так и крупнообломочные грунты, происходит выпучивание крупнообломочного материала и на поверхности образуются каменные поля. Развитие процесса в отложениях, которые подверглись растрескиванию, приводит к сортировке грунтов с образованием каменных полигонов и полос на склонах. В случае мелкополигонального растрескивания тонкодисперсных грунтов могут возникать пятна-медальоны, сложенные пылеватыми глинистыми образованиями, которые формируются за счет выдавливания на поверхность тиксотропного грунта в процессе неравномерного его промерзания сверху и со стороны открытых трещин. Сезонное локальное пучение может проявляться в образовании гидролакколитов, туфуров и бугров-могильников. Первые могут быть результатом однократного промерзания грунтов, а вторые и третьи, обычно различающиеся многочисленными проявлениями на одних и тех же участках, формируются в итоге многократного промерзания.

Многолетнее локальное пучение приводит к образованию бугров пучения, которые обычно подразделяются на сегрегационные (миграционные), инъекционные и инъекционно-сегрегационные. Первые формируются в результате миграции внутригрунтовой влаги к фронту промерзания под влиянием градиента температуры и влаги. Ежегодный прирост их может достигать 250 мм. Инъекционные бугры пучения, являющиеся результатом замерзания внедряющейся под давлением грунтовой воды, а иногда и разжиженного грунта, могут формироваться при промерзании объемов талого грунта (например, подозерных и подрусовых таликов), окруженных мерзлыми грунтами, или в открытых системах, где подток воды обусловлен гидродинамическим напором. Они обычно приурочены к местам разгрузки напорных подземных вод [26].

1.4.2. Сезонное промерзание и сезонное оттаивание грунтов

Известно, что тепловое состояние грунта в слоях, граничащих с Земной поверхностью, и нижних слоев атмосферы в основном определяется радиационно-тепловым балансом поверхности Земли (подстилающей поверхности). В высоких и средних географических широтах радиационно-тепловой баланс формирует такие теплообороты в приповерхностных слоях грунта, при которых совершаются годовые периодические колебания температуры грунтов с переходом через 0°C ; в результате грунты то промерзают, то оттаивают в соответствии с сезонами года. Известно также, что все составляющие радиационно-теплого баланса подстилающей поверхности изменяются по величине и по знаку в зависимости от времени года и широты местности [4, 5].

Такие составляющие радиационно-теплого баланса, как затраты тепла на испарение и турбулентный теплообмен, оказывают существенное влияние на формирование положительных температур поверхности грунтов весной и летом, в период максимального поступления солнечной радиации. На формирование же отрицательных температур основное влияние оказывает эффективное излучение.

Промерзание грунтов связано с сокращением приходящей солнечной радиации и с превышением эффективного излучения над поглощенной радиацией в холодный период года, в результате чего на поверхности грунта устанавливаются отрицательные температуры. При этих температурах в структуре теплооборотов в грунтах основное значение приобретает теплота фазовых переходов воды в лед. Как известно, эти переходы для свободной и чистой воды совершаются при 0°C , поэтому и температура грунтов некоторое время устанавливается близкой к 0°C . В весенне-летний период, наоборот, увеличение приходящей солнечной радиации, превышающей эффективное излучение, вызывает протаивание грунтов.

Процесс сезонного промерзания грунтов и формирование сезонно-мерзлого слоя происходят за счет охлаждения верхних слоев грунта в зимнее время. Следовательно, сезонно-мерзлый слой подстилается талыми грунтами. Среднегодовая температура грунтов, как на подошве промерзающего слоя, так и в подстилающей толще в течение многолетнего периода формируется положительной. Сезонное промерзание грунтов является следствием теплооборотов, совершающихся в холодный полупериод года, т. е. следствием расходной части теплового баланса. По времени промерзание грунтов может быть сезонным (в течение зимы) и кратковременным (в течение части сезона или даже нескольких дней) в зависимости от географических характеристик месторасположения. Территория, где

наблюдается преимущественно сезонное промерзание грунтов, называется областью сезонной мерзлоты.

Сезонное оттаивание формируется в результате оттаивания верхних горизонтов мерзлого грунта. Следовательно, понятие «сезонное оттаивание» предполагает длительное (долгие годы) существование мерзлых грунтов, верхний слой которых оттаивает только в летнее время. Отсюда следует, что сезонноталый слой обязательно подстилается многолетнемерзлыми грунтами. Среднегодовая температура на подошве слоя сезоннооттаивающих грунтов и в подстилающих мерзлых грунтах формируется отрицательной (ниже 0 °С). Сезонное оттаивание мерзлых грунтов является результатом приходной части радиационно-теплого баланса, за счет которой совершаются положительные теплообороты в сезонноталых грунтах в теплый полупериод года. В силу этого сезонное оттаивание может наблюдаться только в области распространения многолетнемерзлых грунтов при условии, что талый слой при промерзании зимой сливается с многолетнемерзлым подстилающим слоем [.

1.5. Обзор и анализ методов контроля физико-механических свойств мерзлых грунтов

Электромагнитные методы исследований основаны на изучении электрических и электромагнитных полей естественного происхождения или создаваемых искусственно.

По результатам исследований определяют геоэлектрическое строение грунтового массива, под которым понимается геометрическое распределение исследуемых грунтов, характеризующихся одинаковыми свойствами в изучаемом объеме [37-53].

По направлению изучения геоэлектрического строения различают:

- профилирование и площадную съемку;
- вертикальное зондирование.

Профилирование и площадная съёмка выполняются с целью изучения строения грунтового массива в горизонтальной плоскости.

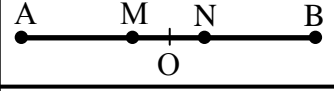

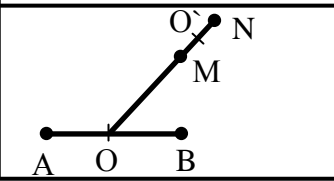
Зондирование, выполняемое по профилям или площади, выполняется для изучения изменения вертикального разреза по горизонтальным координатам.

1.5.1. Методы электроразведки постоянным током

Поля, используемые в методах электроразведки постоянным током, создаются в земле с помощью заземлений – питающих электродов (гальванический контакт), в кото-

рые ток через изолированные провода подается от батарей, аккумуляторов, генераторов постоянного или низкочастотного переменного тока [40-47].

В электроразведке постоянным током чаще всего используются четырехэлектродные установки с двумя питающими и двумя приемными электродами. Под установкой следует понимать взаимное расположение питающих и приемных электродов. Порядок установки электродов установки показан на рисунке 1.2 [43-45].

Симметричная четырёхэлектродная		$AO = OB$ $MO = ON$
Трёхэлектродная установка		$B \rightarrow \infty$
Дипольная радиальная		$AO = OB$ $MO' = O'N$ $OO' = r$

A, B – питающие электроды; M, N – измерительные электроды

Рисунок 1.2 – Примеры размещения электродов при исследовании грунтов методами электроразведки постоянным током

Методы электроразведки постоянным током позволяют [46]:

- изучить площадное распространение и определить границы талых и мерзлых грунтов (преимущественно в области дисперсных пород);
- определить участки с различным положением кровли мерзлых грунтов;
- выявить участки грунтов повышенной льдистости;
- обнаружить и определить границы жильных льдов;
- выявить литологических границ внутри мерзлых дисперсных грунтов.

1.5.2. Электропрофилирование методом кажущегося сопротивления

Массив грунта, представленный некоторой совокупностью промороженных и оттаявших областей, характеризуется различными значениями удельного электрического сопротивления, распределенными в нем определенным образом, соответственно величина кажущегося удельного сопротивления будет зависеть не только от геометрических параметров установки, но и от геоэлектрического строения массива, а также от положения установки относительно неоднородностей этого массива. Кажущееся сопротивление аналитически связано с плотностью тока вблизи приемных электродов и соответственно ха-

рактирует степень искажения токовых линий неоднородностями исследуемого пространства. Физический смысл изменения величины кажущегося удельного сопротивления под влиянием неоднородности состоит в том, что токовые линии втягиваются в проводящие тела и отталкиваются от тел непроводящих. В результате плотность тока на поверхности меняется. Вблизи проводящих тел она уменьшается, и соответственно уменьшается измеряемое значение кажущегося удельного сопротивления [44-46].

Электропрофилирование методом кажущегося сопротивления выполняется путем измерения контролируемого параметра с помощью одной из выбранных установок фиксированных размеров, перемещающейся по линиям наблюдений (профилю) с некоторым определенным шагом.

Разрешающая способность метода определяется размерами установок (взаимным положением питающих и измерительных электродов). При изучении высокоомных непроводящих тел (например, жильных льдов) используется установка с двумя приемными линиями. Длина одной из них должна превосходить, а другой - быть меньше поперечных размеров изучаемого тела. Это позволяет надежно выделять локальные непроводящие объекты (массивы замороженного грунта), а также по характерным признакам определять их поперечные размеры.

Интерпретация при наблюдениях на одном профиле заключается в выделении участков с близкими значениями кажущегося удельного сопротивления, которые при соответствующих соотношениях мощности верхнего слоя и разносов установки могут приближаться к истинным значениям удельного сопротивления грунта. По характерным особенностям графиков кажущегося удельного сопротивления устанавливается положение границ в плане, и в благоприятных условиях на качественном уровне оцениваются их падение и глубина залегания (рисунок 1.3) [44].

1.5.3. Вертикальное электрическое зондирование

Методы вертикального электрического зондирования получили широкое распространение в силу следующих обстоятельств:

- относительно невысокая стоимость работ и оборудования;
- наличие серийной аппаратуры;
- разработанность и постоянное совершенствование приемов интерпретации результатов наблюдений [45].

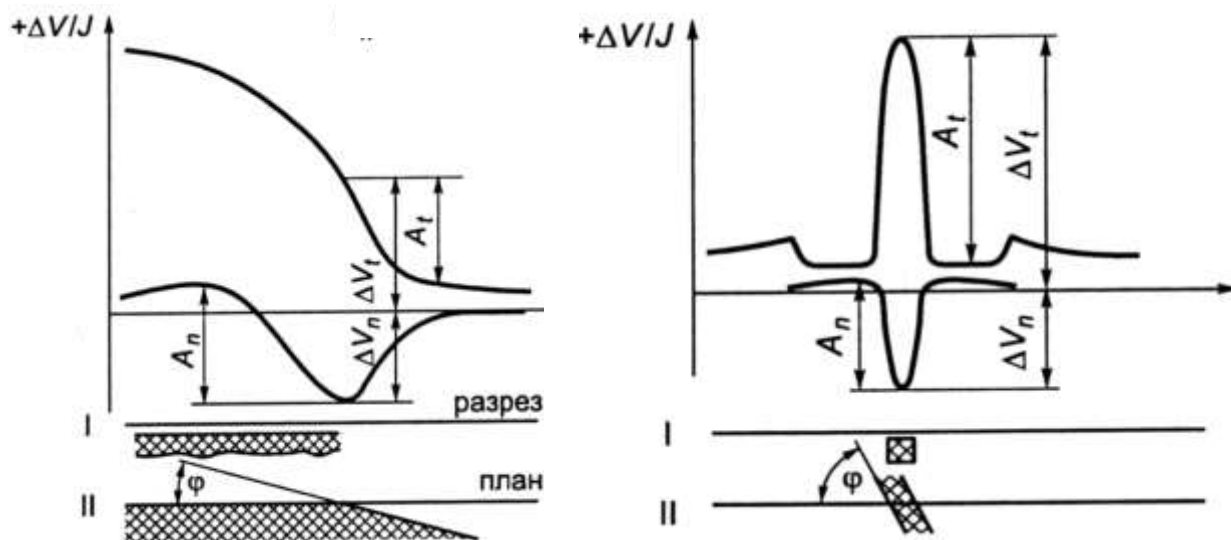


Рисунок 2.3 – Пример интерпретации данных электропрофилерования методом двух составляющих

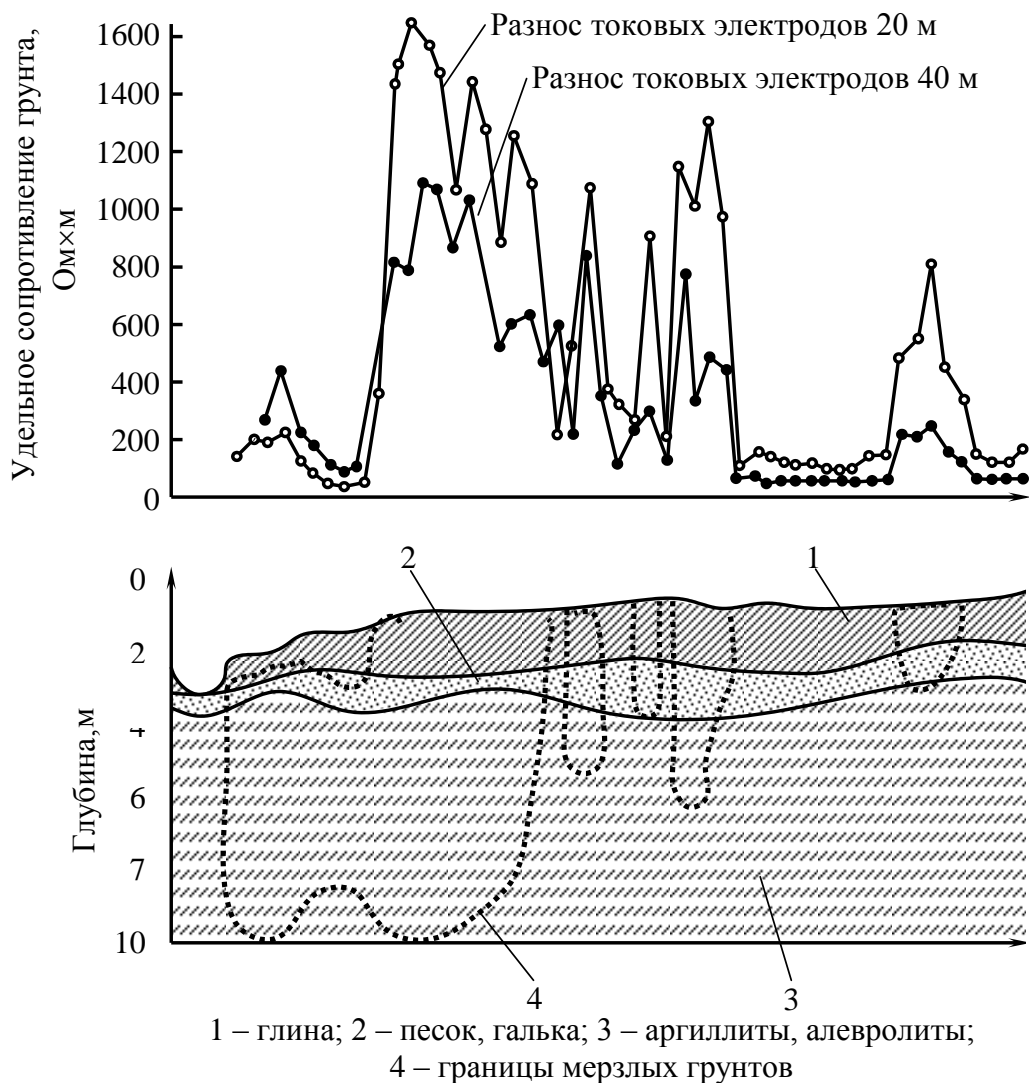


Рисунок 1.4 – Графики электропрофилерования и геоэлектрический разрез
Основными задачами, решаемыми с помощью ВЭЗ, являются:

- определение глубины залегания кровли мерзлых грунтов;
- наблюдение за динамикой сезонного и техногенного промерзания и оттаивания;
- определение мощности многолетнемерзлых пород;
- обнаружение чередования талых и мерзлых пород в вертикальном направлении и оценка их мощности (рисунок 1.4);
- изучение изменений в литологическом составе, влажности (льдистости), засоленности и криогенной текстуре мерзлых пород в вертикальном направлении и их оценка;
- оценка степени коррозионной агрессивности пород по значениям удельного электрического сопротивления.

1.5.4. Радиолокационное зондирование

Другими часто используемыми терминами для обозначения того же метода являются радиолокационное наземное зондирование или георадиолокация [49].

Суть метода состоит в изучении отражения сверхкоротких радиоимпульсов, посылаемых в землю, от границ грунтов, различающихся электрофизическими свойствами. Отражающая способность определяется различием действительной части диэлектрической проницаемости контактирующих сред.

Посылка зондирующего импульса и прием отраженных сигналов осуществляются специальными излучающей и приемной антеннами, параметры которых (конструкция и размеры) определяют их частоту и направленность. Длительность импульсов составляет наносекунды, частота их заполнения – десятки-сотни мегагерц, частота посылок импульсов – десятки килогерц. Отраженный сигнал поступает в приемный блок, где с помощью стробоскопического преобразователя переводится из высокочастотной области в звуковую. Результатом специальной обработки принятого сигнала является радарограмма (эхограмма), фиксирующая изменение амплитуды принятого сигнала во времени. Как и в сейсморазведке, развертка сигнала позволяет измерить временной интервал между посылкой импульса и приходом его отражения. В результате непрерывного перемещения излучателя и приемника вдоль исследуемой трассы (профиля) получается так называемый временной разрез. На нем по горизонтали фиксируется расстояние, а по вертикали (по шкале времени) – амплитуда принятого сигнала, которая может быть отображена либо методом отклонений трассы, либо методом отклонений с зачернением, или методом переменной плотности. Оси синфазности на радарограмме являются изображением рельефа отражающей границы во временном масштабе (рисунок 1.5).

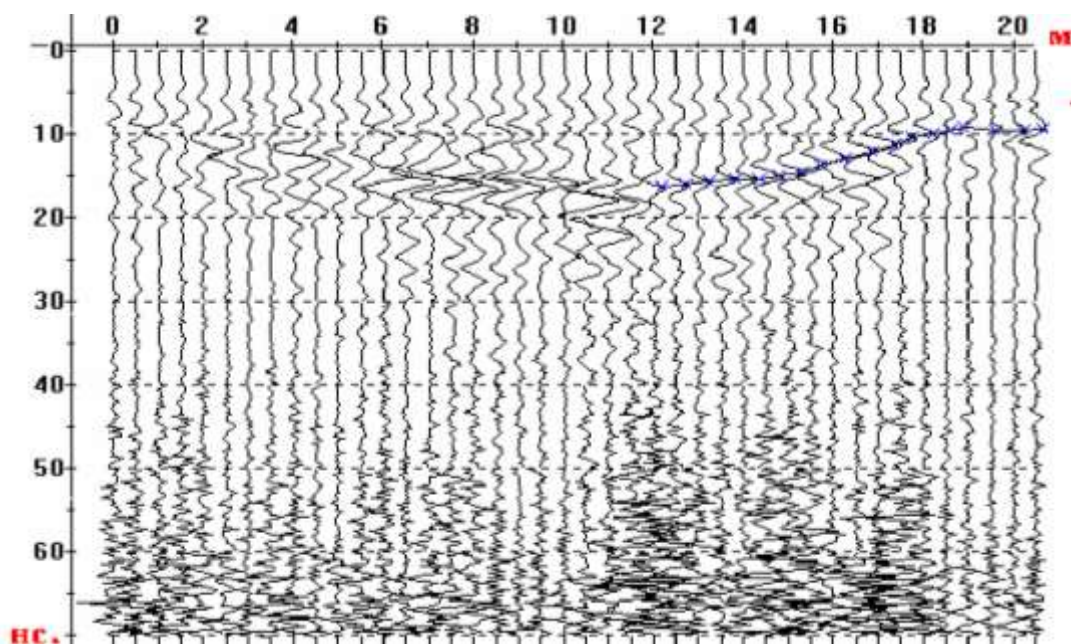


Рисунок 1.5 – Временной разрез с отображением сигнала методом отклонения трасс

При известной скорости распространения импульсов в среде может быть рассчитана глубина положения отражающей границы. Таким образом, временной разрез может быть преобразован в разрез для реальных глубин. Острая направленность излучения и приема, обусловленная высокими частотами, позволяет пользоваться основными положениями геометрической оптики. В то же время из-за высоких частот затухание сигнала в средах, не являющихся идеальными диэлектриками, глубинность метода снижается пропорционально электрическому сопротивлению.

Глубинность в первую очередь зависит от удельного затухания электромагнитных волн в среде, которое связано с ее проводимостью. Чем выше проводимость среды (ниже удельное электрическое сопротивление), тем выше удельное затухание и тем меньше глубинность. Глубина проникновения зондирующего импульса связана, кроме того, с частотой радиоволн. Увеличение частоты ведет к увеличению затухания и соответственно к уменьшению глубинности. Чем ниже частота, тем глубинность больше. При этом следует иметь в виду, что частота будет связана с УЭС верхнего слоя грунта, над которым располагается антенна [50].

Оценка глубинности должна выполняться с учетом потерь, возникающих при прохождении границы воздух-земля и при отражении импульса от промежуточных границ. Все эти оценки должны производиться с учетом динамического диапазона аппаратуры.

По расчетам, в которых использованы экспериментально полученные данные о коэффициентах затухания [48-50], предельные глубины исследования меняются от 30 – 150 м для слабо-поглощающих сред, типа песка и льда, до 2-3 м для сильно-поглощающих глин.

Второй важной характеристикой метода является его разрешающая способность. Она оценивается минимальным расстоянием между двумя границами, отражения от которых различаются между собой. В волновых методах, в том числе и в радиолокации, разрешающая способность связана со скоростью распространения электромагнитных волн в среде и их длиной, точнее, продолжительностью импульса. Известно, что скорость как функция диэлектрической проницаемости является частотозависимым параметром. Таким образом, частота является одной из важнейших аппаратных характеристик георадиолокатора, от которой зависит как глубинность метода, так и разрешающая способность.

Опыт выполненных к настоящему времени работ показывает, что диапазон частот 50-100 МГц является оптимальным при выборе компромисса между приемлемой глубиной и достаточной разрешающей способностью расчленения грунтового массива толщиной до 15 м, сложенного дисперсными породами [43].

1.5.5. Сейсмоакустические методы исследований свойств грунтов

Сейсмоакустическими называют методы исследований массивов грунта, которые основаны на изучении упругих колебаний в среде, вызванных, как правило, искусственными, а в ряде случаев и естественными источниками возбуждения [51, 52].

Основными изучаемыми параметрами являются времена пробега упругих волн от источника возбуждения до приемника, а соответственно и скорости их распространения – кинематические характеристики. Кроме того, изучаются динамические характеристики – частоты и амплитуды колебаний.

По частоте колебаний, выделяют следующие сейсмоакустические методы:

- сейсмические (менее 1 кГц);
- акустические (1 - 17 кГц);
- ультразвуковые (больше 17 кГц).

В зависимости от вида деформаций, переносимых упругой волной в безграничной среде, выделяют два основных класса волн: продольные (P - волны) и поперечные (S - волны). Поперечные волны могут быть поляризованы, как в горизонтальной (SH), так и вертикальной (SV) плоскости.

При распространении продольных волн возникают чередующиеся зоны сжатия и растяжения, т.е. происходит деформация объема. При этом смещения частиц в однородной среде параллельны направлению распространения волны. Поперечные волны связаны со сдвиговыми деформациями, т.е. деформациями формы. Частицы изотропной среды перемещаются при этом перпендикулярно направлению распространения волны.

Особый класс составляют обменные волны, которые образуются при прохождении продольных и поперечных волн через границы. С границами раздела также связано образование поверхностных волн Рэлея (R) и Лява (L). Первая из них, R, связана со свободной поверхностью. Она представляет собой интерференционное колебание, образуемое P - и SV - волнами, и поляризована в вертикальной плоскости. Вторая, L - волна, возникает в верхнем слое, если скорость в нем ниже, чем в подстилающем. Интенсивность R - и L - волн с удалением от поверхности быстро убывает.

Кроме классов выделяют типы волн по характеру их распространения в пространстве с границами раздела сред, отличающихся упругими свойствами. Это прямые, проходящие, отраженные, преломленные, рефрагированные и другие типы волн. Все эти волны являются предметом изучения в сейсморазведке, которую в целом можно рассматривать как многоволновой метод.

По месту выполнения сейсмические наблюдения подразделяются:

- полевые;
- скважинные;
- шурфовые.

В зависимости от места и условий проведения работ и используемых частот могут применяться различные способы возбуждения упругих колебаний и их приема. В сейсморазведке в основном используются импульсные источники колебаний (взрывы, удары).

Альтернативой импульсным источникам являются стационарные, генерирующие гармонические колебания. Специфика создания и приема этих сигналов, обработки и их анализа определяет существование самостоятельной области сейсморазведки – так называемой вибрационной сейсморазведки. Прием колебаний обеспечивается сейсмо- или пьезоприемниками, преобразующими механические колебания исследуемой среды в электрические. Их регистрация осуществляется в цифровой или аналоговой форме на сейсмической станции или акустической аппаратуре.

В общем случае целью сейсморазведочных работ, использующих кинематические характеристики распространения упругих волн, является определение пространственного положения сейсмогеологических границ и величин сейсмических скоростей в их преде-

лах. Завершающим этапом исследований является геологическое истолкование полученных сейсмических разрезов с оценкой физико-механических свойств грунтов.

Методами сейсморазведки решаются следующие инженерно-геологические задачи:

- определение верхних границ мерзлых грунтов;
- выявление и оконтуривание таликов, подземных льдов и массивов сильнольдистых рыхлых грунтов;
- определение объемной льдистости рыхлых грунтов, уровня грунтовых вод;
- выявление зоны разрушенных скальных пород, определение ее мощности.

1.6. Обзор и анализ методов диагностирования положения газопроводов в многолетнемерзлых грунтах

1.6.1. Физическая сущность методов

В основу индукционного метода трассового поиска подземных газо- и нефтепроводов положено наличие магнитного поля, которое создается протекающим по трубопроводу переменным током. Поле вокруг одиночного трубопровода можно представить в виде концентрических линий, равномерно распределяемых по его длине [53, 54].

Посредством обнаружения магнитного поля устанавливают положение оси трубопровода, а также глубину его заложения.

Измерения обычно производят при помощи специальной поисковой катушки, имеющей сердечник для концентрации электрического поля.

Если ось поисковой катушки расположить параллельно поверхности земли непосредственно над трубопроводом (рисунок 1.6), вдоль линий поля, то в катушке наведется электрический сигнал максимальной амплитуды. При смещении катушки в сторону амплитуда снимаемого с катушки сигнала будет плавно уменьшаться.

По максимуму сигнала при указанном положении катушки на практике обнаруживают ориентировочное местонахождение трассы трубопровода. Однако из-за размытости максимума сигнала точно определить местонахождения трубопровода весьма затруднительно.

Если ось поисковой катушки расположить перпендикулярно поверхности земли непосредственно над трубопроводом (перпендикулярно линиям поля, когда ось катушки проходит через ось трубопровода), то электрический сигнал с катушки будет иметь минимальную амплитуду.

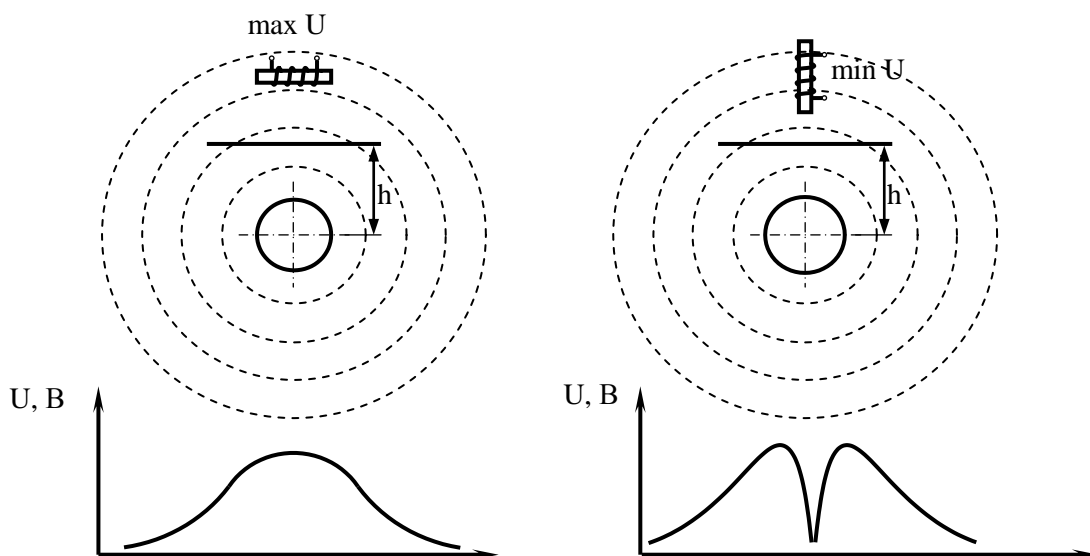


Рисунок 1.6 – Особенности формирования сигнала при перемещении приемной катушки над осью трубопровода

При смещении катушки в сторону амплитуда сигнала сначала резко увеличивается, а затем плавно уменьшается. Перпендикулярное к поверхности земли расположение катушки позволяет получить резко выраженный минимум сигнала, который на практике используется для точного определения местонахождения трубопровода.

Для эффективного обнаружения трасс трубопроводов обычно используют специальные индукционные комплекты приборов, состоящие из генератора звуковых частот и индукционного приемника. Современное поисковое оборудование предполагает наличие средств индикации (жидкокристаллических, электролюминесцентных экранов), позволяющих непосредственно на месте определить как положение оси трубопровода, так и глубину его заложения.

Поиск подземного сооружения может осуществляться как в пассивном, так и в активном режиме, при этом в первом случае индикация объекта выполняется за счет обнаружения электрического поля, формируемого токами, протекающими по объекту (например, защитными токами системы ЭХЗ). Для поиска в активном режиме к трубопроводу необходимо подключить высокочастотный генератор, причем электрические выводы генератора могут подключаться или непосредственно к объекту и заземлителю или к рамке, уложенной над объектом.

1.6.2. Анализ погрешностей методов в многолетнемерзлых грунтах

Большинство моделей трассоискателей, как отечественного, так и импортного производства позволяют выполнять оценку положения подземных протяженных сооружений,

как в горизонтальной, так и в вертикальных плоскостях, соответственно, контролируемые параметры, при обследовании магистрального газопровода, будут являться глубиной заложения и положение оси. На точность показаний прибора, прежде всего, будут оказывать влияние следующие факторы:

- электрические свойства грунтов на участках прокладки МГ;
- рельеф местности на участке контроля;
- конструкционные особенности МГ;
- особенности настройки и калибровки прибора.

Многолетнемерзлые грунты обладают значительным электрическим сопротивлением, что некоторым образом может повлиять на формирование электрического поля вокруг газопровода. Неоднородность электрических свойств по глубине, вследствие сочетания верхнего слоя сезонного промерзания-оттаивания и нижних подстилающих его слоев многолетнемерзлых грунтов может способствовать тому, что область проводимости обратных токов, протекающих по грунту от объекта к заземлителю генератора будет расположена именно в слое сезонного-промерзания оттаивания, так как его электрическое сопротивление значительно ниже сопротивления многолетнемерзлых слоев грунта, что в свою очередь может способствовать возникновению некоторого экранирующего эффекта и как следствие искажению показаний прибора (рисунок 1.7).

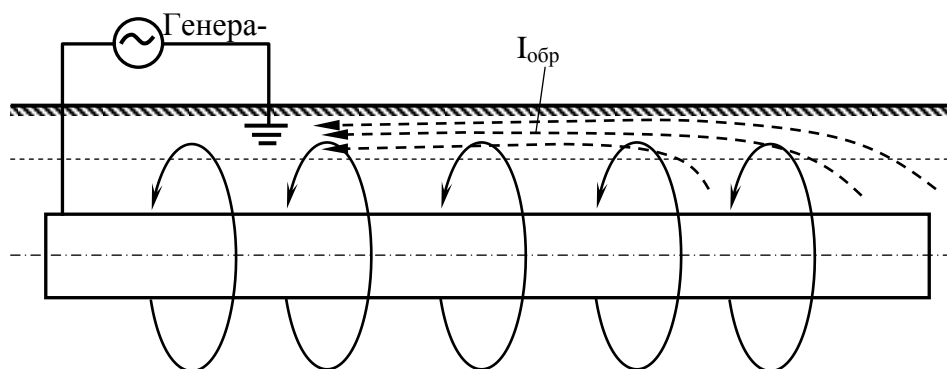


Рисунок 1.7 – Особенности протекания обратных токов в многолетнемерзлом грунте

Известно, что при оценке глубины заложения МГ на склоновых или русловых участках возможно значительное превышение измеренных значений по отношению к фактическим, что, прежде всего, объясняется неправильной ориентацией катушки (или катушек) прибора по отношению к контролируемому объекту при прохождении данных участков. В данном случае возникновение данных погрешностей определяется квалификацией персонала, проводящего обследование.

Наличие рядом с контролируемым объектом (трубопроводом) различных металлических объектов также может вызвать искажение электрического поля и как следствие способствовать искажению показаний прибора. Например балластирующее устройство ПКБУ-МК состоит из пространственной металлической рамы, на которую смонтированы тканевые контейнера для грунта. На МГ такие устройства применяются в группах, каждая из которых включает до четырех устройств, рамы которых соединяются стальными хомутами. Обратные токи, протекающие по грунту засыпки при прохождении через металлические элементы устройств будут формировать собственные электрические поля, которые взаимодействуя с электрическим полем, формируемым вокруг трубопровода будут вызывать его искажение и, как следствие, искажение показаний прибора. В некоторых случаях возможно экранирование подземного объекта вышележащими металлосодержащими объектами, например элементами инженерной защиты прибрежных участков. Свои электрические поля формируются вокруг подземных кабелей телемеханики и электрохимической защиты, воздушных линий электроснабжения, что в некоторых случаях также может способствовать искажению показаний прибора.

Следует отметить, что в настоящее время единая методика калибровки и поверки данного класса приборов отсутствует. Для оборудования зарубежных производителей данные процедуры могут проводиться перед продажей или при сервисном обслуживании по собственным методикам. Отечественные методики предполагают или оценку работоспособности отдельных электронных компонентов оборудования или полигонные испытания, с использованием протяженных кабелей или трубопроводов, расположенных или под или над землей.

Допустимый интервал показаний (погрешность) можно оценить следующим образом при (отсутствии посторонних помех, бесконечно длинного проводника, трассоискатель находится строго перпендикулярно оси коммуникации):

- погрешность счёта АЦП (на глубине 2 м – 0,5%; на глубине 4,5 м – 1,2%; на глубине 9,5 м – 2,5%);

- погрешность за счёт неидентичности приёмных датчиков, а также влияния на них температурных и механических факторов достигает: на глубине 2 м – 5%; на глубине 4,5 м – 9%; на глубине 9,5 м – 12%;

- погрешность за счет невертикальности расположения прибора относительно оси коммуникации: при угле +/- 25,8° – 0,5%.

С учетом вышесказанного погрешность прибора составит: примерно 7% на глубине 2 м, примерно 10% на глубине 4,5 м и примерно 15% на глубине 9,5 м. С учетом особенностей применения приборов в условиях распространения многолетнемерзлых грунтов, а

также применения на МГ инженерных решений погрешность может составить: примерно 10% на глубине 2 м, примерно 15% на глубине 4,5 м и примерно 20% на глубине 9,5 м.

1.7. Выбор и обоснование метода георадиолокации для контроля свойств мёрзлых грунтов

К факторам, являющимся определяющими при выборе оптимального метода контроля состояния грунта, окружающего газопровод, а так же пространственное положение газопровода следует отнести следующие:

- разрешающая способность метода или комплекса методов;
- число контролируемых параметров;
- трудоёмкость реализации;
- стоимость оборудования и его исполнение.

Под разрешающей способностью следует понимать диапазоны определения контролируемых параметров в конкретных условиях. В данном случае, контролю подлежит относительно малая область грунта, глубиной до 6 м и шириной до 10 м, в пределах которой необходимо выделять:

- границы грунтовых массивов отличающихся по литологическим свойствам, а также находящихся в талом или растеплённом состоянии (с точностью до 0,1 м);
- положение подземных объектов малых размеров (например, ледяных глыб размером до нескольких метров);
- положение газопровода (с точностью до 1 см);
- положение пригрузов, кабелей и прочих подземных элементов газопровода (с точностью до 1 см).
- уровень грунтовых вод в пределах контрольной зоны (с точностью до 1 см).

Прежде всего, контролю должны подлежать параметры грунтов, определяющие их физико-механические свойства в различных состояниях (в растеплённом и замороженном). Интерпретация полученных данных позволит определить несущую способность грунта, а также оценить направление величину и направление возможного перемещения.

Трудоёмкость метода определяется количеством конечных операций, которые необходимо выполнить для получения полной и достаточной информации о грунтовых условиях. В данном случае, чем больше контрольных параметров можно получить при интерпретации результатов измерений при условии сохранения необходимой точности, тем предпочтительней метод или комплекс методов.

Применяемое при исследованиях оборудование должно обеспечивать необходимое качество измерений в любых условиях, то есть иметь исполнение, исключающее воздействие факторов окружающей среды (атмосферных осадков, высоких или низких температур) на работоспособность основных элементов. Используемые при работе образцы оборудования должны быть серийными, в комплект поставки обязательно должны входить программные комплексы, обеспечивающие обработку полученных в ходе исследований данных. Габариты оборудования будут иметь первостепенное значение в том случае, если доставка их стандартными средствами затруднена или невозможно (предпочтение отдаётся малогабаритным или модульным конструкциям).

В настоящее время для изучения грунтов криолитозоны наибольшее распространения получили геофизические методы электроразведки, сейсморазведки, гравиразведки и пр., при этом, как правило, наилучшие результаты показывают комбинации данных методов, то есть количество контролируемых параметров будет напрямую зависеть от количества методов в комплексе.

Опыт применения показал, что геофизические исследования мерзлых грунтов методами электроразведки на постоянном токе наиболее эффективны при температурах грунтов от минус 1 до минус 5 °С и сравнительно небольшой мощности мерзлого слоя. При этом выделяют следующие особенности применения данных методов в условиях криолитозоны:

- сильная зависимость удельного электрического сопротивления мерзлых грунтов от их температуры, льдистости и количества в них незамерзшей воды приводит к необходимости сочетания электроразведки с геотермическими исследованиями;

- интерпретация кривых вертикального электрического зондирования стандартными методами может быть ошибочной в сторону преуменьшения мощности мерзлого слоя из-за падения сопротивления промежуточного мерзлого слоя с глубиной, в соответствии с повышением температуры;

- интерпретация данных становится сложной и многозначной из-за необходимости разделяющей идентификации влияния литологии либо мерзлотных эффектов;

- многозначность интерпретации приводит к необходимости учета геотермических данных и физических выводов общего мерзлотоведения;

- так как мерзлый грунт неоднороден по своим температурам, льдистости и условиям залегания, то его разведка во многих случаях по практическим требованиям должна быть очень детальной, что приведет к повышению объема работ;

- проведение измерений на постоянном токе затруднено сложностью обеспечения гальванического контакта электродов с поверхностью мерзлого грунта в холодное время года, а интерпретация данных осложняется экранирующим эффектом высокоомных мерзлых рыхлых отложений;

- при интерпретации результатов вертикального электронного зондирования многолетнемерзлых грунтов основное затруднение вызывает наличие промежуточного слоя, находящегося ниже подошвы сезонного слоя, и имеющего значительный градиент температуры, а соответственно и сопротивления по глубине.

К недостаткам методов электроразведки на постоянном токе следует отнести, прежде всего, необходимость прямого контакта электродов с грунтом, что затруднено в зимний период, при промораживании верхнего слоя грунта.

Методы электроразведки на переменном токе, имеют преимущество перед методами переменного тока в силу того, что в отличие от метода сопротивлений на постоянном токе глубина исследования повышается понижением частоты используемого поля в результате увеличения толщины слоя скин-эффекта, либо увеличением расстояния между излучающим и приемным устройствами. Применение дистанционных приёмников и излучателей не требует непосредственного контакта с грунтом и соответственно несколько расширяет сезонный диапазон применения методов.

К общим недостаткам методов электроразведки, как на постоянном, так и на переменном токе следует отнести недостаточную разрешающую способность, что не позволит в полной мере использовать данные методы для контроля относительно небольших по размерам грунтовых массивов.

Применение сейсморазведки при изучении многолетнемерзлых грунтов оправдано благодаря следующим обстоятельствам:

- зависимость скоростей сейсмических волн от литологического состава рыхлых многолетнемерзлых пород;

- резкое различие скоростей сейсмических волн в многолетнемерзлых и талых рыхлых породах;

- возможность выявления границ участков с различной объемной льдистостью по значениям граничных скоростей;

- возможность определения сейсморазведки для оценки мощности ледяных жил.

В сейсморазведке в целом основательно разработаны методы интерпретации и автоматизации обработки данных, что существенно повышает эффективность ее применения.

К недостаткам сейсморазведки следует отнести необходимость обеспечения надежного акустического контакта датчиков с грунтами, который достигается легче для поверхности глинистых и мерзлых грунтов, то есть при наличии внешнего талого сложенного рыхлыми грунтами, слоя, исследования могут быть затруднены.

Методы гравиразведки, магниторазведки и пр. при изучении криолитозоны могут использоваться как вспомогательные, так как позволяют фиксировать малое число контрольных параметров (например, область применения методов гравиразведки при исследовании мерзлых грунтов ограничена поиском и выявлением массивных подземных льдов).

По отношению к мерзлым грунтам наиболее эффективными для их изучения представляются методы электроразведки переменным током, использующие высокие частоты поля, в частности георадиолокационные методы.

Георадиолокационное зондирование обладает возможностью с наибольшей точностью определить границы между контрастными по электрическим характеристикам грунтами, в результате получения отраженных от них сигналов. Георадиолокация позволяет отделять от мерзлых талые и обводненные грунты, а также криопэги, в силу значительного их отличия по диэлектрической проницаемости и электропроводности. Фактором, ограничивающим глубину георадиолокационного зондирования, является наличие сильноотражающих границ в верхней части исследуемого разреза, экранирующих ниже залегающие слои, что в данном случае не считается недостатком, так как контролю подлежит приповерхностный слой грунта, который в общем случае будет представлять собой сочетание слоя сезонного промерзания-оттаивания и многолетнемёрзлого основания в различных сочетаниях. К достоинствам данного метода также следует отнести:

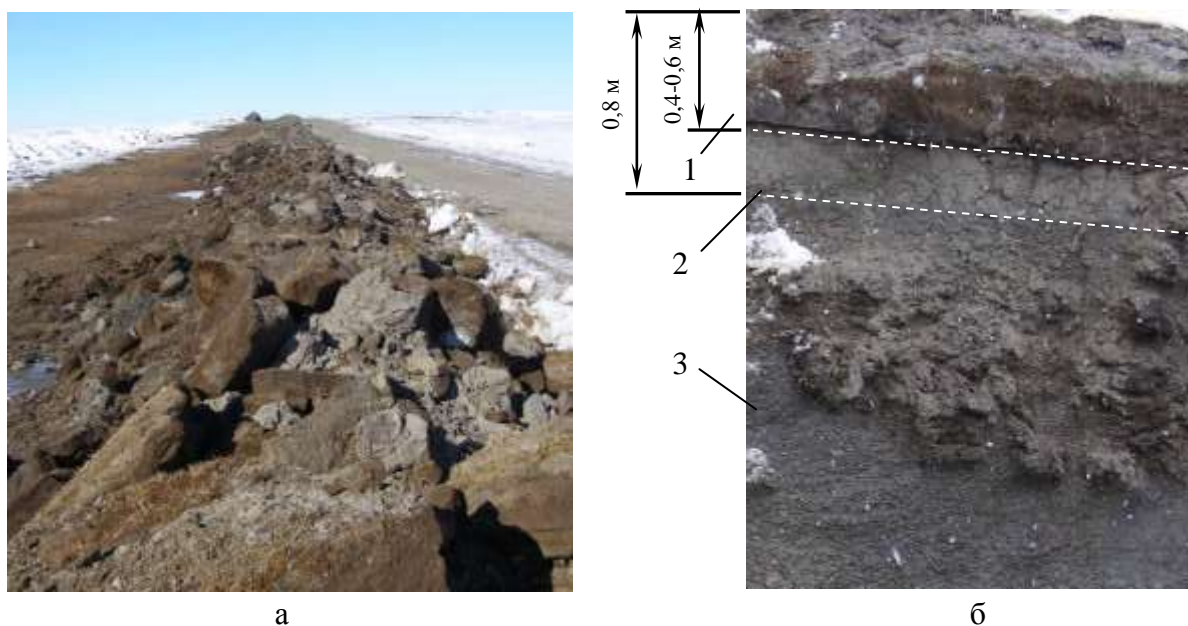
- наличие серийных образцов оборудования;
- наличие программных комплексов для обработки результатов исследований;
- возможность с помощью одного измерительного комплекса решить весь спектр поставленных задач.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ И АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ГАЗОПРОВОДОВ

2.1. Характеристика участков газопроводов

Отработка георадиолокационного метода оценки состояния многолетнемерзлых грунтов выполнялось на участке МГ Бованенково-Ухта 2 нитка 0 – 27 км.

Участок характеризуется чередованием равнинных и пересеченных форм рельефа. Равнинные формы представлены тундрой, местами заболоченной. Грунты участка представлены супесями, суглинками, глинами и песками, поверхностный слой состоит из растительных остатков, толщина его может составлять от нескольких десятков сантиметров на склонах и возвышенностях, до одного метра на заболоченных местах (рисунок 2.1).



1 – растительные остатки; 2 – минеральный грунт слоя сезонного оттаивания-промерзания; 3 – многолетнемерзлый грунт

Рисунок 2.1 – Общий вид трассы МГ (а) и особенности вертикального разреза грунта (б)

Грунты находятся в мерзлом состоянии, толщина слоя сезонного промерзания-оттаивания определяется рельефом, мощностью верхнего слоя растительных остатков и составляет от 0,86 до 1,5 м. Подземные льды участка распространены на глубину от 1,5 м до 8 и более, их протяженности по оси газопровода составляет от 50 до 800 м. В период таяния снега происходит интенсивное обводнение низинных участков.

Засыпка МГ выполнена грунтом, извлеченный при разработке траншеи и представляющим собой отдельные мерзлые глыбы (рисунок 2.2) диаметром до 0,5 м. Для исключения повреждения поверхности МГ, трубопровод укладывается на песчаное основание и далее засыпается песком на высоту до 0,2 м над верхней образующей труб.



а



б



в



г

**Рисунок 2.2 – Инженерные решения, реализованные при сооружении МГ:
а) балластирующее устройство ПКБУ – МК; б, в) обсыпка труб минеральным
грунтом; в) теплоизоляционное покрытие трубы и грунта в основании трубы
на участке наземной прокладки**

Балластировка МГ выполнена полимерно-контейнерными грунтозаполняемыми устройствами ПКБУ – МК. В качестве грунта-заполнителя используется песок. Балластировка предполагает равномерное распределение групп утяжелителей по участкам МГ, количество утяжелителей в группе и количество групп определяется проектом (рисунок 2.2, а).

В местах распространения подземных льдов применены следующие инженерные решения:

- наземная прокладка при большой глубине распространения льда с теплоизоляцией поверхности трубы и поверхности грунта, на который укладываются сваренные в плеть трубы;

- выемка льда с заменой его минеральным грунтом при малой глубине распространения с теплоизоляцией дна траншеи.

Теплоизоляция МГ выполнена сегментами «Пеноплекс», толщина теплоизоляционного слоя составляет 100 мм. Теплоизоляция дна траншеи при подземной прокладке МГ и грунта в основании МГ при наземной выполнена плитами «Пеноплекс» толщиной 50 мм (рисунок 2.2, г).

Для исключения вымывания грунта засыпки на склоновых участках в траншее установлены грунтозадерживающие барьеры, формируемые из заполненных песком мешков из синтетического материала.

На склоновых участках, для предупреждения смещения грунта при оттаивании предполагается установка элементов инженерной защиты – теплоизоляционных плит «Пеноплекс», георешеток и геомодулей, слоя биоматериала. Все указанные технические решения являются стандартными, и применяются на всей трассе МГ.

Назначение опытного участка выполнено в соответствии со следующими требованиями:

- разнообразие грунтовых условий, как по длине участка, так и по глубине профиля;
- распространение форм рельефа, наиболее характерных для всей трассы МГ, как на территории полуострова Ямал, так и на территории Республики Коми;
- разнообразие технических решений и особенностей исполнения МГ, также характерных для всей трассы МГ;
- наличие подъездных путей для стандартных средств доставки оборудования;
- наличие техники и персонала для бурения термоизмерительных скважин.
- возможность расселения специалистов, обслуживания и хранения оборудования (например, наличие городка строителей).

Цели и задачи, решаемые на опытном участке следующие:

- оценка эффективности георадиолокационного метода при определении границ грунтов, отличающихся по состоянию (мерзлое или талое) и свойствам (типу, влажности, льдистости, плотности);

- определение положения МГ в грунте с индикацией балластирующих устройств, теплоизоляционного покрытия, грунтозадерживающих барьеров, элементов инженерной защиты.

Трасса II нитки магистрального газопровода Бованенково-Ухта прокладывается от Бованенковского месторождения в центральной части полуострова Ямал (Ямало-Ненецкий АО) в юго-западном направлении вдоль Урала до города Ухта (республика Коми) прокладываемой по западному побережью центральной части полуострова Ямал и имеющей направление с северо-востока на юго-запад к побережью Байдарацкой губы. Исследования проводились на участке МГ Бованенково - Ухта 0 – 27 км.

Назначены следующие участки проведения исследования:

1. Склоновый участок с поворотом трассы МГ (25,7 – 26,7 км);
2. Заболоченная тундра (25,1 – 25,4);
3. Участок с грунтами, характеризующимися низкой балластирующей способностью (7,7 км);
4. Участок распространения подземных льдов (4,9 км)

Участок №1 (окрестности площадки кранового узла на 26,8 км, рисунок 2.3). Рельеф переменный, переход от возвышенности к заболоченной тундре, перепад высот от 23,1 до 11,3 м. Протяженность – 2000 м, из них 700 м – склон.

Грунты представлены:

- в приповерхностном слое - растительными остатками (до 0,3 м на склоне и до 0,8 м в тундре);
- до глубины 8 м – промороженными супесями и суглинками различной степени льдистости;
- на 25,7 км (ПК 257) на глубине от 3 м и глубже распространена льдистая слабозасоленная глина.

Сезонное промерзание-оттаивание происходит на склоне на глубине до 1 м, в тундре – на глубине до 0,6 м.

На участке реализованы следующие инженерные решения:

- балластировка устройствами ПКБУ – МК в группах, равномерно по всей длине трубы в пределах контрольной области (в качестве грунта-заполнителя используется песок);

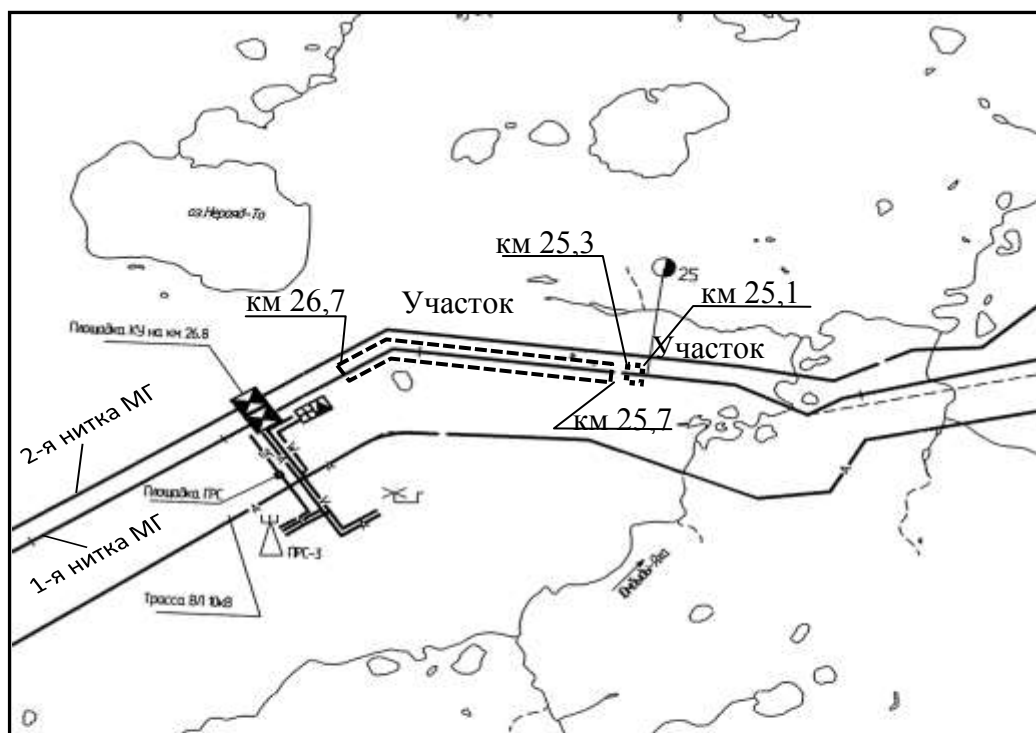


Рисунок 2.3 – Схема расположения точек контроля в пределах опытного участка на 25 – 26 км МГ

- грунтозадерживающие барьеры из КП-Р (заполненных песком) на склоне через 150 м;
- МГ выполнен из труб диаметром 1420 мм с толщиной стенки 27,7 мм, с трехслойным полиэтиленовым защитным покрытием заводского нанесения;
- МГ уложен в траншею на песчаное основание и далее засыпан песком на высоту 0,2 м над верхней образующей.

На начало проведения исследований высота валика грунта засыпки составляла 2 – 2,5 м. Временный вдольтрассовый проезд расположен с левой стороны МГ (по ходу газа), ширина проезда составляет 5 м. С правой стороны МГ снеговой покров от валика и на расстоянии до 10 м отсутствует, растительный слой повреждений не имеет (рисунок 3.6, а).

Участок №2 (25,1 – 25,4 км). Заболоченная тундра. Грунты представлены:

- в верхнем приповерхностном слое - растительными остатками (слаборазложившимися торфами) на глубину до 0,3 м (местами до 0,8 м);
- от 0,3 м и далее - замороженными суглинками, супесями и песками различной степени льдистости и в различных сочетаниях слоев.

Толщина слоя сезонного промерзания-оттаивания – 0,8 м.

Реализованы следующие инженерные решения:

- равномерно установленные группы балластирующих устройств ПКБУ – МК, заполненные песком;
- грунтозадерживающие барьеры из КП-Р с шагом 150 м;
- МГ уложен на песчаное основание и засыпан песком на высоту 0,2 м над верхней образующей.
- МГ выполнен из труб диаметром 1420 мм с толщиной стенки 27,7 мм, с трехслойным полиэтиленовым защитным покрытием заводского нанесения.

Расстояние между первой и второй нитками МГ составляет 106 м.

Участок № 3 (7,7 км). Заболоченная тундра. Грунты представлены значительным (до 1,8 м) по толщине верхним слоем растительных остатков, а также мерзлыми суглинками и песками. Толщина слоя сезонного промерзания-оттаивания составляет 0,4 – 0,6 м. На участке распространены подземные льды.

Реализованы следующие инженерные решения:

- наземная прокладка МГ в местах распространения подземных льдов с термоизоляцией поверхности труб теплоизолирующими сегментами «Пеноплекс», а также термоизоляцией поверхности грунта в основании МГ плитами «Пеноплекс», с закреплением грунтового валика над наземным участком МГ крупноразмерными геомодулями ГП 1500 – 1,5 – 2,1;
- для подземной прокладки - грунтозадерживающие барьеры через каждые 200 м, балластировка устройствами ПКБУ – МК (в группах, равномерно), укладка МГ на песчаную подушку с последующей обсыпкой песком на высоту 0,2 м на верхней образующей;
- МГ выполнен из труб диаметром 1420 мм, с толщиной стенки 27,7 мм, с заводским защитным трехслойным покрытием.

Вдольтрассовый проезд расположен слева от 2-й нитки МГ (по ходу газа). Расстояние между осями первой и второй ниток МГ составляет 103 м. Высота валика грунта засыпки составляет от 1,5 до 2,5 м. В окрестности данной контрольной области участка выполнены предусмотренные проектом термоизмерительные скважины.

Участок №4 (4,9 км). Заболоченная тундра (рисунок 2.4). Грунты представлены:

- верхним слоем растительных остатков толщиной 0,3 м;
- мерзлыми суглинками.
- на глубине от 2 м и глубже распространены подземные льды.

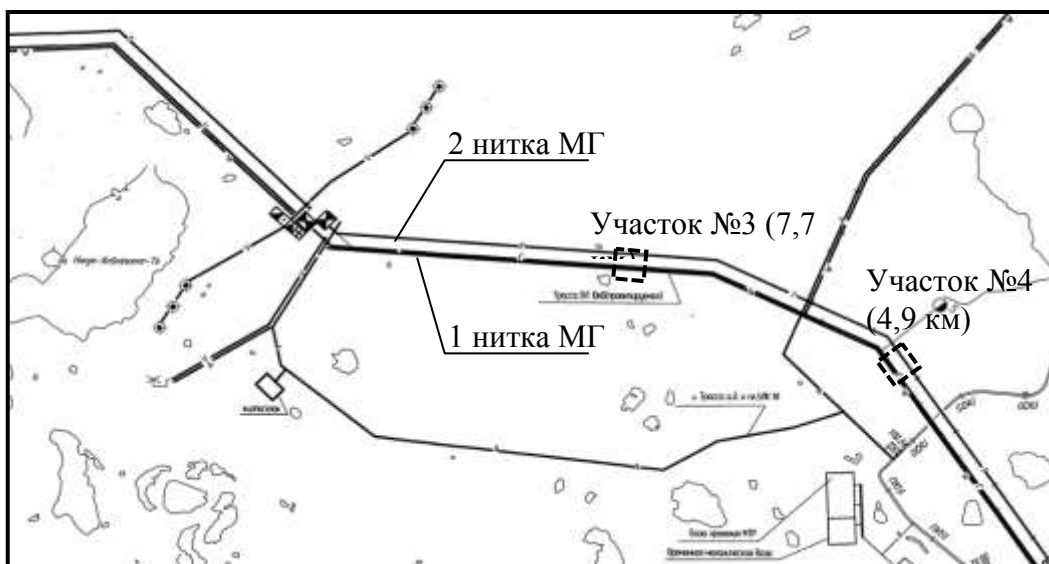


Рисунок 2.4 – Схема расположения точек контроля в пределах опытного участка на 4,5 – 7,7 км МГ

Реализованы следующие инженерные решения:

- в местах распространения подземного льда – выемка льда с заменой его привозным минеральным грунтом, теплоизоляция дна траншеи теплоизоляционными плитами «Пеноплекс».
- балластировка МГ устройствами ПКБУ – МК, заполняемых песком;
- укладка МГ на песчаную подушку с последующей обсыпкой песком на высоту 0,2 м над верхней образующей;
- МГ выполнен из труб диаметром 1420 мм, с толщиной стенки 27,7 мм, с заводским защитным трехслойным полиэтиленовым покрытием.

На участке расположен переход МГ через автодорогу и высоковольтную линию электропередач (4,3 – 4,5 км).

2.2. Геокриологические особенности участков проведения исследований

Участки проведения исследований характеризуются сплошным распространением многолетнемерзлых грунтов. Многолетнемерзлые и охлажденные грунты распространены на всех элементах рельефа. Глубина распространения колеблется в широком диапазоне от 50 до 300 м.

В вертикальном разрезе выделяются три неоднородных по состоянию горизонта грунтов:

- мерзлые грунты, характеризующиеся присутствием ледяных включений во всех литологических разностях, причем максимальное содержание льда фиксируется в интервале глубин 0 - 30 м. Мощность этого горизонта варьируется от 130 м до 200 м;

- охлажденные грунты, естественная отрицательная температура которых (от 0 до минус 2,5 °С) выше температуры их замерзания при местных значениях влажности и концентрации поровых вод в них. Мощность этого горизонта около 100 м;

- талые грунты, естественная температура которых положительная.

Сплошность мерзлых грунтов нарушается с поверхности несквозными таликами (под естественными водоемами), а по разрезу – линзами криопэгов и охлажденными грунтами.

Рассматриваемая территория находится в зоне развития монолитной многолетне-мерзлой толщи, с температурой от минус 3 до минус 9 °С. Сезонное оттаивание грунтов крайне незначительно, определяется растительностью, слоем растительных остатков, особенностями рельефа и составляет в среднем 0,7 м. Максимальные (до 1,0 - 1,2 м) мощности сезонноталого слоя фиксируются на оголенных склонах и поверхностях, сложенных супесчано-песчаными грунтами. На низинных участках мощность сезонноталого слоя обычно достигает 0,45-0,60 м, на пологих склонах мощность сезонноталого слоя минимальна (0,25-0,40 м). На рассматриваемой территории широко распространены засоленные мерзлые и охлажденные грунты, часто содержащие линзы незамерзших, отрицательно температурных рассолов (криопэгов).

Среднегодовые температуры грунтов изменяются от минус 1 до минус 7 °С. Низкие температуры (минус 5 – минус 7 °С) отмечены на возвышенных участках тундры. Повышенные среднегодовые температуры (до минус 1 – минус 3 °С) в пределах заболоченной тундры, у подножия склонов, на участках густых и высоких кустарников обусловлены накоплением большого снега (до 0,7-1,0 м), оказывающего определяющее воздействие.

2.3. Результаты исследования температуры грунтов на участках прокладки газопровода

2.3.1. Методика обустройства скважин для измерения температуры грунтов

Для определения температуры многолетнемерзлых грунтов на участке №1 (25,7 – 26,7 км) были оборудованы термоизмерительные скважины глубиной 4 м. Порядок размещения скважин представлен на рисунках 2.5 и 2.6.

Общее количество скважин – 24, из них:

- 16 пробурено в многолетнемерзлом грунте и грунте засыпки;
- 8 получено при установке обсадных труб в шурфы с последующей засыпкой шурфов грунтом.

Бурение скважин выполнялось шнековой буровой установкой на самоходном шасси. Диаметр шнека составлял 100 мм. Для исключения осыпания стенок каждая скважина обсаживалась пластиковой трубой диаметром 40 мм и толщиной стенки 5 мм с заглушенным нижним торцом. Для герметизации внутренней полости обсадной трубы, верхний надземный торец оборудовался съемной крышкой.

Обустройство скважин выполнялось в следующей последовательности (рисунок 2.7):

- визуальный осмотр участка с назначением мест бурения скважин;
- расчистка снегового покрова в назначенных для бурения точках;
- бурение скважин;
- установка обсадных труб;
- засыпка пространства между стенками скважин и внешней поверхностью обсадных труб грунтом, извлеченным из скважин при бурении;
- термостабилизация скважин (выдержка в течение нескольких недель).

На период проведения работ температура воздуха составляла до минус 2° С днем и до минус 12° С ночью. Снеговой покров на валике грунта засыпки отсутствовал, на вершине склона за пределами вдольтрассового проезда толщина снегового слоя составляла 0,2 – 0,3 м и у подножия склона – до 0,6 м. Время бурения одной скважины составляло от 10 до 15 минут. Каждая пара пробуренных скважин располагается по линии, перпендикулярной оси МГ и исходящей от временного знака ПК, первая скважина в каждой паре расположена в многолетнемерзлом грунте за пределами вдольтрассового проезда, вторая - в грунте засыпки.

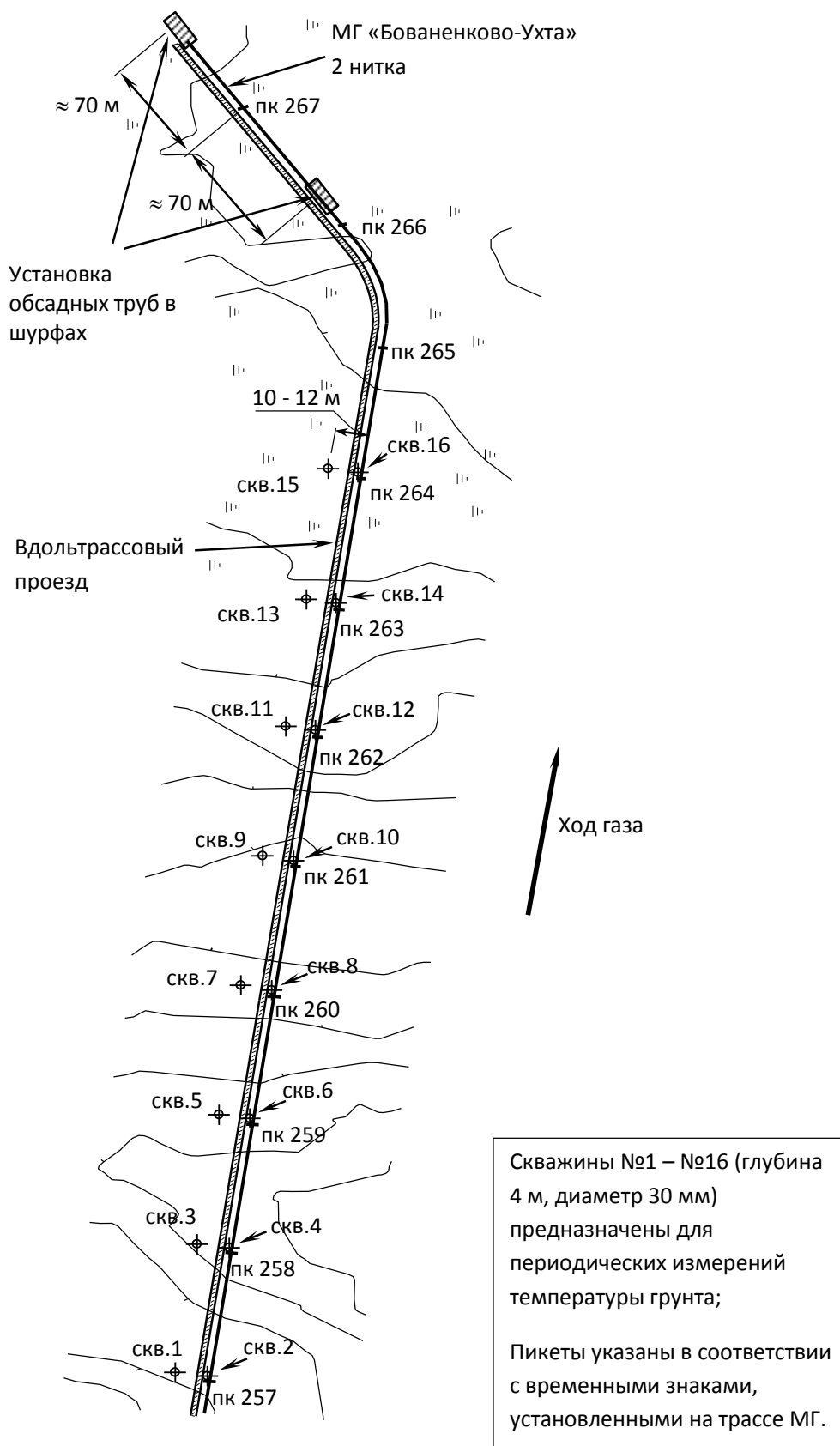
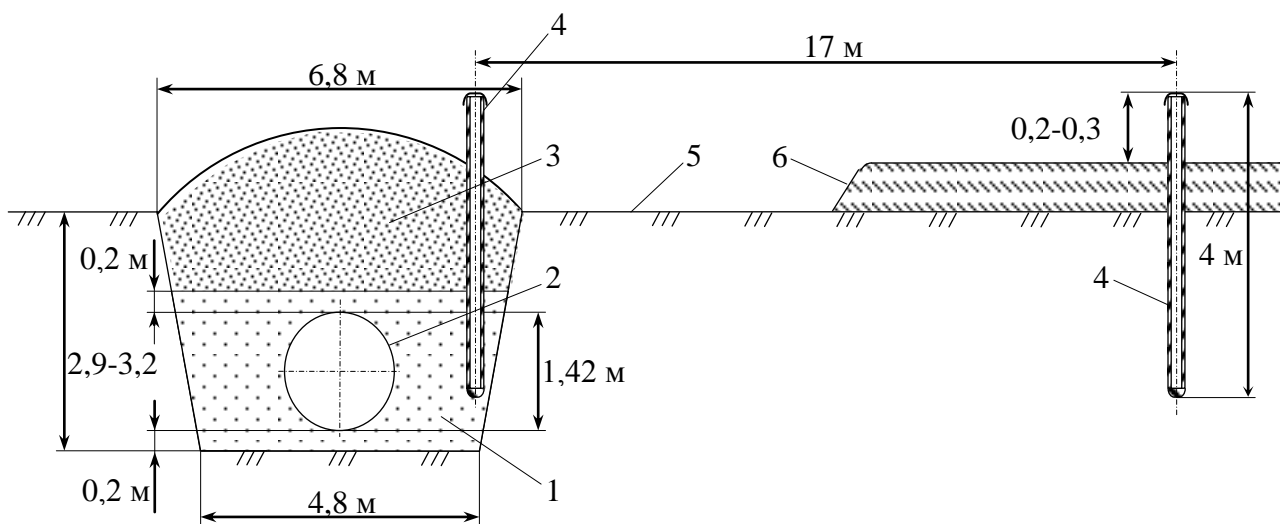


Рисунок 2.5 – Схема размещения термоизмерительных скважин на участке №1 (25,7 – 26,7 км)

Расстояние между скважинами в каждой паре – 15 - 17 м (рисунок 2.6), шаг размещения каждой пары скважин вдоль МГ – 100 м, начиная с ПК 257 (25,7 км) и заканчивая ПК 264 (26,4 км). Длина надземной части каждой скважины, для исключения подтопления талыми водами, составляет не менее 0,3 м. Для исключения разогрева обсадных труб под действием солнечного излучения, их надземные участки покрывались светоотражающим материалом.



- 1 – подушка и обсыпка трубопровода из привозного карьерного грунта;
 2 – трубопровод; 3 – грунт засыпки; 4 – термоизмерительная скважина;
 5 – вдольтрассовый проезд; 6 – слой снега

Рисунок 2.6 – Схема расположения термоизмерительных скважин в одном сечении на участке №1 2-й нитки МГ Бованенково-Ухта

Применение пластиковых обсадных труб обусловлено:

- малым весом;
- низкой теплопроводностью материала;
- коррозионной стойкостью;
- удобством монтажа постоянных и съёмных заглушек;
- низкой трудоёмкостью при механической обработке;
- высокими прочностными показателями материала.



а



б



в



г



д

**Рисунок 2.7 – Бурение скважин на участке №1:
а, б) бурение в грунте засыпки; в) бурение в многолетнемерзлом грунте; г) установка обсадной трубы; д) засыпка затрубного пространства**

Низкая теплопроводность необходима для исключения возможного теплообмена между слоями грунта, имеющими различную температуру. Сопротивление тепловому потоку будет тем выше, чем больше толщина теплопроводящего слоя, соответственно, при проведении измерений между датчиками термометра и грунтом будет слой материала, имеющий толщину, равную толщине стенки обсадной трубы и незначительно влияющий на показания прибора, в тоже время перераспределение температурных в вертикальном направлении по стенке обсадной трубы будет незначительным из-за относительно малой площади поперечного сечения трубы и ее большой протяженности.

Порядок обустройства обсадных труб в шурфах следующий (рисунок 2.8):

- установка обсадных труб у стенки шурфа (по 2 трубы в каждом шурфе, нижний заглушенный торец каждой трубки погружался в талый грунт или обкладывался мерзлым грунтом);
- установка обсадных труб у МГ с закреплением заглушенных торцов (по 2 трубы);
- засыпка шурфа грунтом.



а



б

**Рисунок 2.8 – Размещение обсадных труб в шурфе:
а) у МГ; б) у стенки шурфа**

Одна обсадная труба была прикреплена к указательному столбу и выходила на поверхность грунта над осью МГ. Измерения температуры грунта проводились через 3 недели после обустройства скважин. В период проведения термоизмерений температура воздуха составляла от плюс 2 до плюс 12° С, в связи с чем происходило интенсивное таяние снега с накоплением талых вод в низинах, соответственно в части скважин, выполненных в тундровой части участка №1 термоизмерения не проводились (рисунок 2.9).

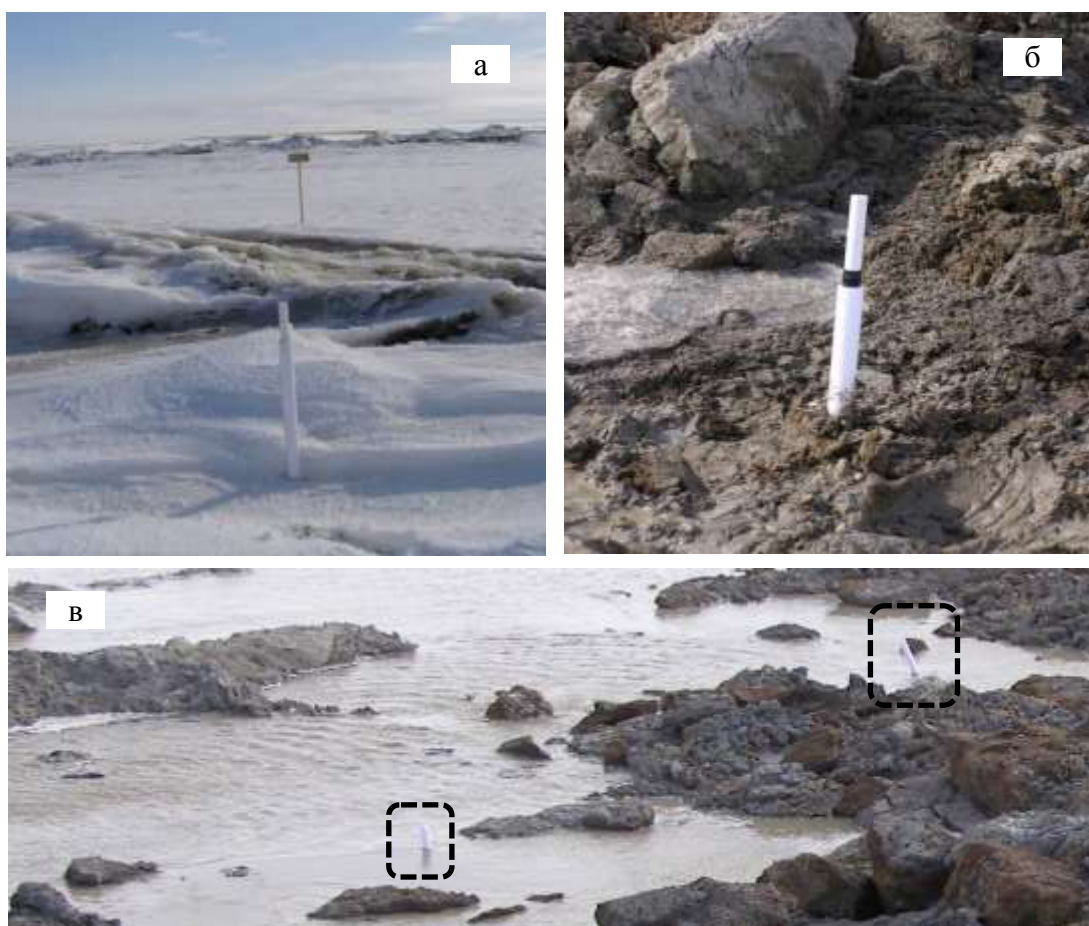


Рисунок 2.9 – Состояние скважин в период проведения термоизмерений:
а) скважина в многолетнемерзлом грунте; б) скважина в грунте засыпки; в) скважины, подтопленные талыми водами

В местах сбора талых вод на участке №1 предполагается оценить:

- интенсивность оттаивания многолетнемерзлого грунта в летний период;
- интенсивность промерзания переувлажненного талого грунта в осенний и зимний периоды.

Следует отметить, что в местах накопления талых вод, для исключения обводнения внутренней полости скважин, длина наземной части обсадных труб составляет 0,5 - 0,6 м.

2.3.2. Результаты измерения температуры грунта и их анализ

Для проведения измерений использовались следующее оборудование:

- контролер цифровых датчиков ПКЦД – 1/100;
- термоизмерительная коса;
- персональный компьютер с установленным программным обеспечением для переноса данных термоизмерений из памяти контроллера;

Исследования выполняются в следующей последовательности [59, 60]:

- подготовка термоизмерительного оборудования (подключение термоизмерительной косы к контроллеру цифровых датчиков, установка элементов питания);
- проверка работоспособности оборудования (включение контроллера, настройка, проверка показаний, получаемых с каждого датчика);
- размещение термоизмерительной косы в скважину, периодический опрос датчиков термоизмерительной косы до полной стабилизации показаний, считываемых контроллером;
- извлечение термоизмерительной косы из скважины.

Для исключения теплообмена между полостью скважины и окружающей средой, верхний торец обсадной трубы с проведенной через него термоизмерительной косой герметизировался быстросъемной заглушкой.

Пример размещения термоизмерительной косы в скважине представлен на рисунке 2.10.

Данные, считываемые с датчиков термоизмерительной косы, периодически сохраняются в памяти контроллера. Сохранение данных может выполняться, как в ручном, так и автоматических режимах, временной интервал между сериями замеров составляет 5 – 10 минут.

Извлечение данных термоизмерений из памяти контроллера выполняется с помощью портативного персонального компьютера с установленным программным обеспечением, входящим в комплект поставки прибора. Из полученных данных автоматически формируется электронная таблица, в которой указывается:

- номер замера;
- время проведения измерения;
- показания всех датчиков термоизмерительной косы.

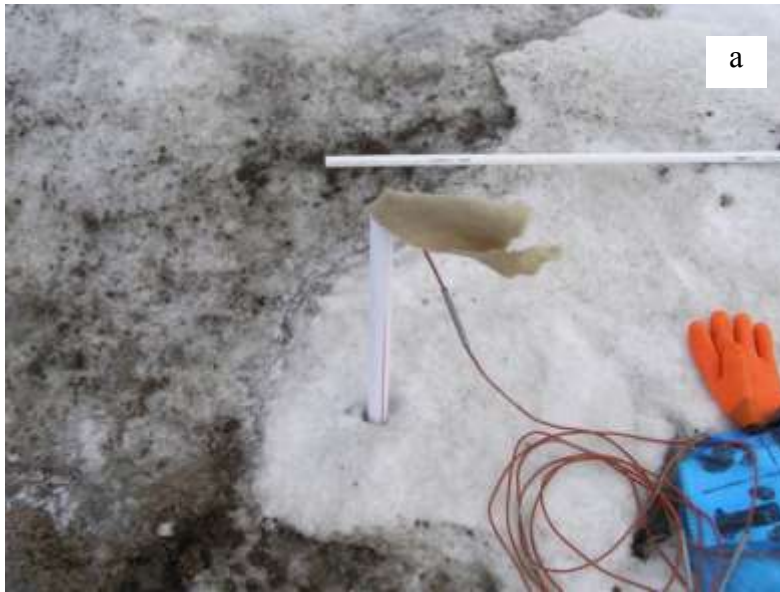


Рисунок 2.10 – Определение температуры многолетнемерзлого грунта:
а) размещение термоизмерительной косы в скважине; б) выдержка термоизмерительной косы на воздухе перед спуском в скважину

Время выдержки термоизмерительной косы в скважине определяется скоростью стабилизации показаний, считываемых прибором. На рисунке 2.11 приведена графическая зависимость, характеризующая распределение температуры по глубине грунта. Сохранение данных выполнялось с интервалом в 5 мин. Анализ полученных данных показывает, что оптимальное время выдержки термоизмерительной косы в скважине составляет 25 – 30 мин.

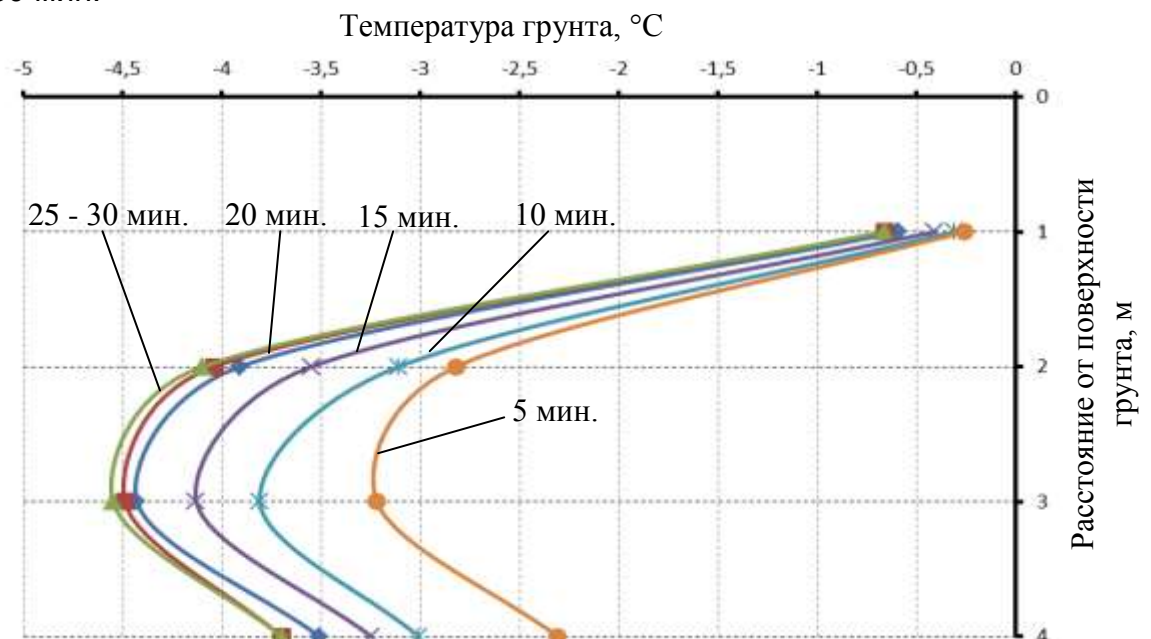


Рисунок 2.11 – Определение временного интервала стабилизации температуры, измеряемой датчиками термоизмерительной косы

По результатам проведенных измерений для каждой пары контрольных скважин формировался паспорт (приложение А), в котором указывались:

- графики распределения температур по глубине в скважинах в грунте засыпки и многолетнемерзлом грунте;
- план и профиль участка с указанием грунтов;
- характеристики грунтов.

Ниже приведен пример паспорта, составленного по результатам термоизмерений в скважинах, выполненных на ПК 262 (км 26,2). Термоизмерительные скважины выполнены у основания склона. Грунт представлен суглинками и супесями различной степени льдистости. Верхний слой грунта сформирован растительными остатками, мощность слоя составляет 0,3 м.

По результатам термоизмерений установлено, что температура многолетнемерзлых грунтов на глубине до 3 м снижается от 0 до минус 1,6° С и далее стабилизируется. Для грунта засыпки характер распределения температур по глубине аналогичен многолетнемерзлым грунтам, однако стабилизация наблюдается, начиная с 2 м, и минимальная температура составляет минус 1,3° С.

Толщина слоя сезонного промерзания-оттаивания составляет 0,8 м, что в данном случае подтверждается результатами термоизмерений. Из представленных графиков распределения температур видно, что область нулевых значений находится на глубине до 1 м.

Характеристики грунтов получены по результатам инженерных изысканий. Рассматриваются следующие контрольные параметры:

- показатели влажности (суммарная влажность, льдистость, влажность между ледяными включениями; влажность на границе текучести и границе раскатывания);
- механические характеристики грунтов (плотность, пористость, расчетное сопротивление сжатию, относительная деформация пучения, относительная деформация осадки).

Полученные данные позволят установить особенности применения георадиолокационного метода в зависимости от грунтовых условий прокладки МГ, а именно:

- от типов грунтов;
- механических характеристик грунтов;
- температуры
- влажности.

2.4. Результаты экспериментального определения физических характеристик мерзлых грунтов

Участок № 1 характеризуется сочетанием двух форм рельефа, и представляет собой склон, переходящий в заболоченную тундру. Анализ грунтовых условий участка выполнен на основании данных инженерных изысканий, а также по результатам отбора проб грунта при бурении термоизмерительных скважин (таблицы 2.1 и 2.2, рисунок 2.12). По результатам анализа грунтовых условий было установлено:

- особенности водонасыщения грунта, в зависимости от глубины, а также высотной отметки контрольного сечения;

- изменение эксплуатационных характеристик грунта по длине участка и по глубине.

Влагонасыщение грунтов на участке определяется:

- пористостью грунта (в данном случае, грунты участка на глубинах от 1,5 м и глубже представлены супесями и суглинками примерно идентичными по фракционному составу и соответственно по показателю пористости);

- рельефом местности;

- глубиной.

Таблица 2.1 – Типы грунтов на участке ПК 262

Грунт	Толщина, м	Глубина (кровля – подошва), м
Торф мерзлый, среднеразложившийся	0,19	0,00 – 0,19
Суглинок мягкопластичный	0,76	0,19 – 0,95
Суглинок мерзлый, сильнольдистый, незасоленный	0,97	0,95 – 1,92
Суглинок мерзлый, слабольдистый, незасоленный	1,85	1,92 – 3,77
Суглинок мерзлый, льдистый, незасоленный	1,64	3,77 – 5,41
Супесь мерзлая, сильнольдистая, слабозасоленная	1,12	5,41 – 6,53

Выявлены следующие закономерности:

1. Суммарная влажность мерзлого грунта увеличивается в верхних слоях на глубине до 2 м с понижением рельефа, что в данном случае объясняется интенсивным накоплением талых вод в период таяния снега. Максимальные значения показателя зафиксированы на ПК 266, что соответствует точке профиля с минимальной высотной отметкой. На

глубине 3 м наблюдается увеличение суммарной влажности на ПК 264, что в данном случае также связано с обогревающим действием талых вод, которые насыщают грунт на склоне и постепенно дренируются вниз по подстилающему слою многолетнемерзлых грунтов и далее накапливаются у подножия склона. На глубинах 4, 5 и 6 м суммарная влажность остается практически на одном уровне, с небольшим увеличением, приуроченным к точке профиля, расположенной перед местом перехода склона в заболоченную тундру, что возможно, также связано с обогревающим действием талых и атмосферных вод, дренирующихся вниз по склону.

2. Так как грунт участка большую часть года находится в мерзлом состоянии, соответственно характер распределения показателя по длине и по глубине будет соответствовать суммарной влажности с теми же механизмами формирования.

3. На всех глубинах отмечается увеличение влажности между ледяными включениями в месте перехода склона в болотистую тундру (рисунок 2.13).

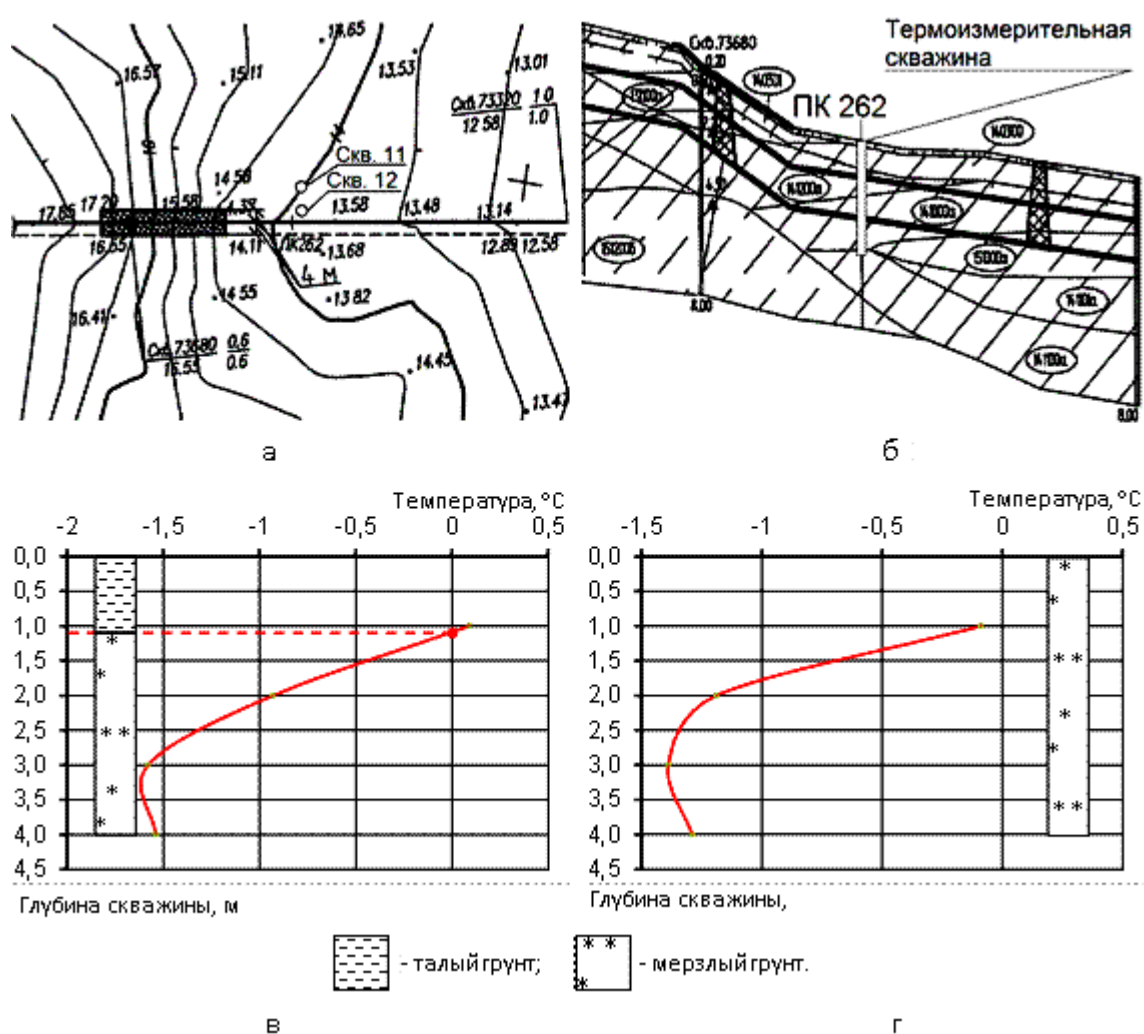


Рисунок 2.12 – План (а), профиль (б) и графики температуры многолетнемерзлых грунтов (в) и грунтов засыпки (г)

Таблица 2.2 – Физико-механические характеристики грунтов на участке ПК 262

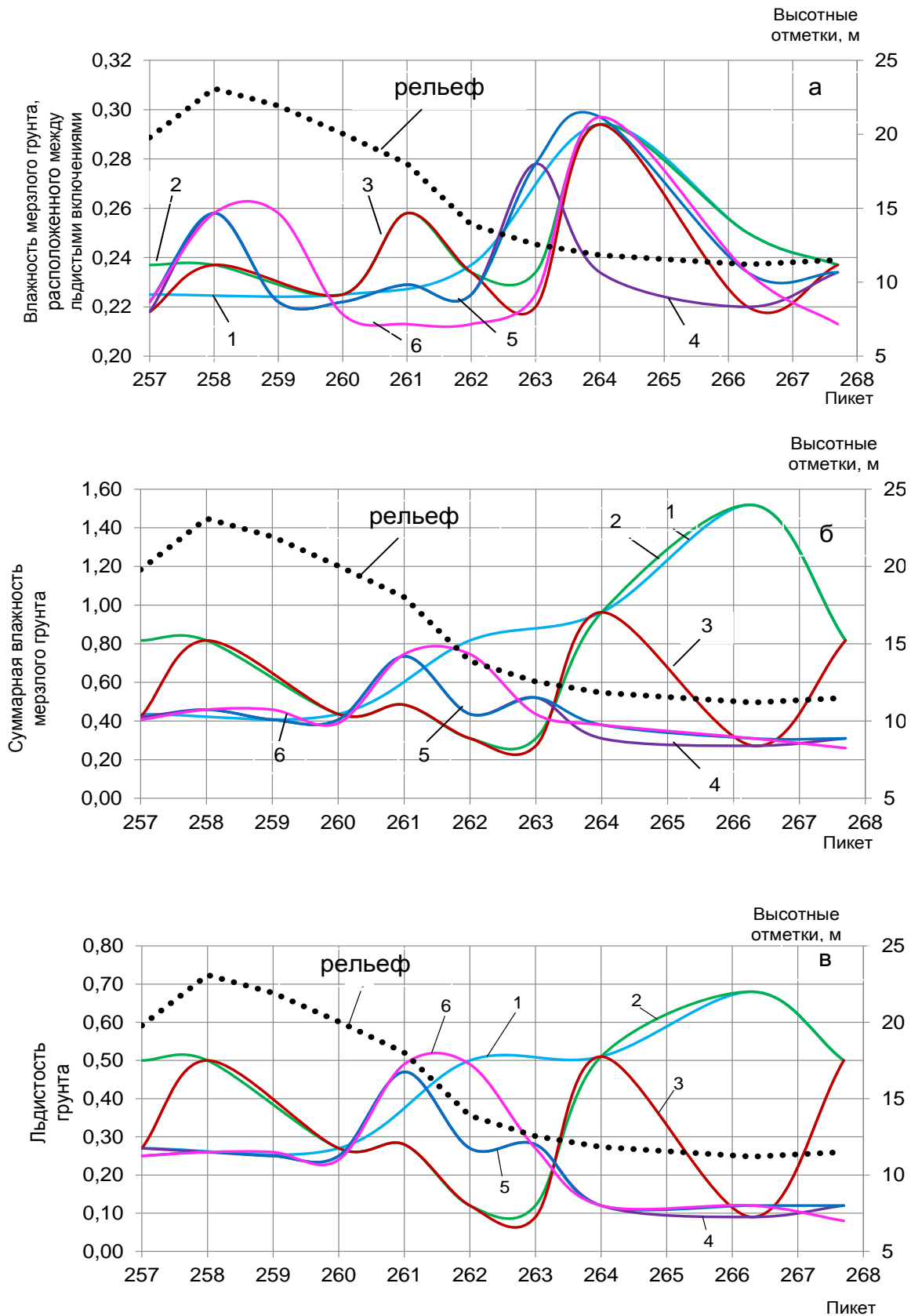
Характеристики грунта	Тип грунта					
	торф мерзлый, средне-разложившийся	суглинок мягкопластичный	суглинок мерзлый, сильнотлистый, незасоленный	суглинок мерзлый, слаботлистый, незасоленный	суглинок мерзлый, тлистый, незасоленный	супесь мерзлая, сильнотлистая, слабозасоленная
Природная влажность, доли единицы	–	0,29	–	–	–	–
Влажность мерзлого грунта, расположенного между льдистыми включениями, доли единицы	–	–	0,237	0,234	0,225	0,213
Суммарная влажность мерзлого грунта, доли единицы	> 1,0	–	0,817	0,31	0,436	0,746
Влажность грунта на границе текучести, доли единицы	–	0,336	0,344	0,34	0,339	0,258
Влажность грунта на границе раскатывания, доли единицы	–	0,207	0,23	0,227	0,218	0,207
Число пластичности, доли единицы	–	0,129	0,114	0,113	0,121	0,051
Плотность грунта при природной влажности, г/см ³	–	1,97	–	–	–	–
Плотность мерзлого грунта, г/см ³	0,95	–	1,40	1,80	1,62	1,53
Плотность частиц грунта, г/см ³	–	2,66	2,65	2,66	2,66	2,67
Плотность талого грунта в сухом состоянии, г/см ³	–	1,53	–	–	–	–
Плотность мерзлого грунта в сухом состоянии, г/см ³	–	–	0,77	1,37	1,13	0,88
Степень заполнения объема пор мерзлого грунта льдом и незамерзшей водой (коэффициент водонасыщения), доли единицы	–	–	0,89	0,88	0,86	0,98

Продолжение таблицы 2.2

Удельное сцепление (нормативное), МПа	–	0,02	–	–	–	–
Льдистость грунта за счет ледяных включений, доли единицы	> 0,40	–	0,50	0,12	0,27	0,49
Показатель текучести, доли единицы	–	0,643	–	–	–	–
Расчетное сопротивление грунта, МПа	–	0,2	–	–	–	–
Степень засоленности (для морского типа засоления), %	–	–	0,08	0,11	0,09	0,29
Коэффициент пористости, доли единицы	–	0,74	–	–	–	–
Коэффициент пористости мерзлого грунта, доли единицы	–	–	2,44	0,94	1,35	2,03
Модуль деформации, МПа	–	12	–	–	–	–
Угол внутреннего трения (нормативное значение), град	–	18°	–	–	–	–
Относительная деформация пучения, доли единицы	–	> 0,07	–	–	–	–
Относительная осадка при оттаивании	–	–	0,523	0,103	0,269	0,513

В данном случае это явление может объясняться следующим. Известно, что влажность между ледяными включениями представляет собой связанную поровую или засоленную воду, которая перемещается по поровому пространству грунта даже при отрицательной температуре и соответственно насыщает грунт на всех глубинах. Общий переизбыток влаги в данном месте, возможно, способствует повышению влажности грунта, расположенного между ледяными включениями.

Величина усадки грунтов при оттаивании под собственным весом (или весом газопровода) будет определяться их льдистостью, то есть чем больше ледяных включений, тем на большую величину осядет грунт при оттаивании. В начальный период эксплуатации наибольшая осадка грунта засыпки наблюдается на первой нитке МГ Бованенково – Ухта – на текущий период за счет оттаивания и уплотнения она составила более 2 м.



1, 2, 3, 4, 5, 6 – кривые распределения влажности грунта на глубинах соответственно 1, 2, 3, 4, 5 и 6 м; 7 – рельеф местности

Рисунок 2.13 – Особенности влагонасыщения грунтов на участке №1

Просадка грунта у основания валика грунта засыпки под собственным весом может способствовать накоплению осадков и дальнейшему растеплению грунта на большую глубину. Пористость мерзлого грунта может рассматриваться как функция льдистости, так как поры и пустоты в грунте могут формироваться в процессе замерзания поровой влаги, с последующим образованием ледяных прослоев.

Плотность мерзлого грунта будет тем меньше, чем выше его суммарная влажность (рисунок 2.14, а). Из представленного графика видно, что меньшую плотность в мерзлом состоянии имеют грунты на глубинах до 2 м в точках профиля, имеющих минимальную высотную отметку. Как указывалось ранее, в таких точках наблюдаются максимальные значения суммарной влажности. Характер изменения плотности частиц грунта по длине МГ на участке № 1 представлен на рисунке 2.14, б. Из представленных графиков видно, что большую плотность имеют частицы грунтов, расположенных в верхней части склона с постепенным снижением значения параметра с понижением высоты.

На основании вышесказанного следует:

- грунты на склоновых участках обладают лучшей балластирующей способностью, так как имеют больший вес частиц, а также больший вес в мерзлом состоянии, по сравнению с грунтами на низинных участках;

- наибольшей осадкой при оттаивании характеризуются грунты в верхних слоях на глубинах до 3 м.

- грунты в основании газопровода менее влагонасыщенные и соответственно обладают лучшей несущей способностью при оттаивании (дают меньшую усадку), чем грунты в верхних слоях.

2.5. Анализ конструктивных особенностей газопровода Бованенково-Ухта, оценка возможности их диагностирования

При строительстве МГ реализованы следующие технические решения:

- при сооружении газопровода используются стальные прямошовные трубы диаметром 1420 мм с толщиной стенки 27,7 мм, класс прочности – К65, с гладкостным внутренним покрытием и внешним защитным трехслойным полиэтиленовым покрытием заводского нанесения. Изоляция стыков выполнена термоусаживаемыми манжетами;

- повороты трассы МГ в ориентальной плоскости выполняются с использованием отводов, как заводского, так и трассового исполнения. На пересеченных участках трассы, вертикальный изгиб выполняется с использованием холодногнутых вставок;

- балластировка МГ выполнена с использованием полимерно-контейнерных устройств ПКБЦ-МК, заполняемых минеральным грунтом. Балластирующие устройства устанавливаются в группах равномерно вдоль трассы, частота установки определяется проектом. На переходах через водные преграды используют чугунные и железобетонные утяжелители.

- теплоизоляция выполнена с использованием сегментов «Пеноплекс».

Теплоизоляционное покрытие применяется:

а) на участках распространения талых грунтов (таликов под руслами рек, ручьев);

б) на склоновых участках, в местах стока атмосферных осадков и талых вод;

МГ укладывается на песчаную подушку и обсыпается песком на высоту 0,2 м;

- для исключения перемещения и размыва грунта засыпки применяются грунтозадерживающие барьеры, устанавливаемые с определенным шагом в траншее МГ перед засыпкой;

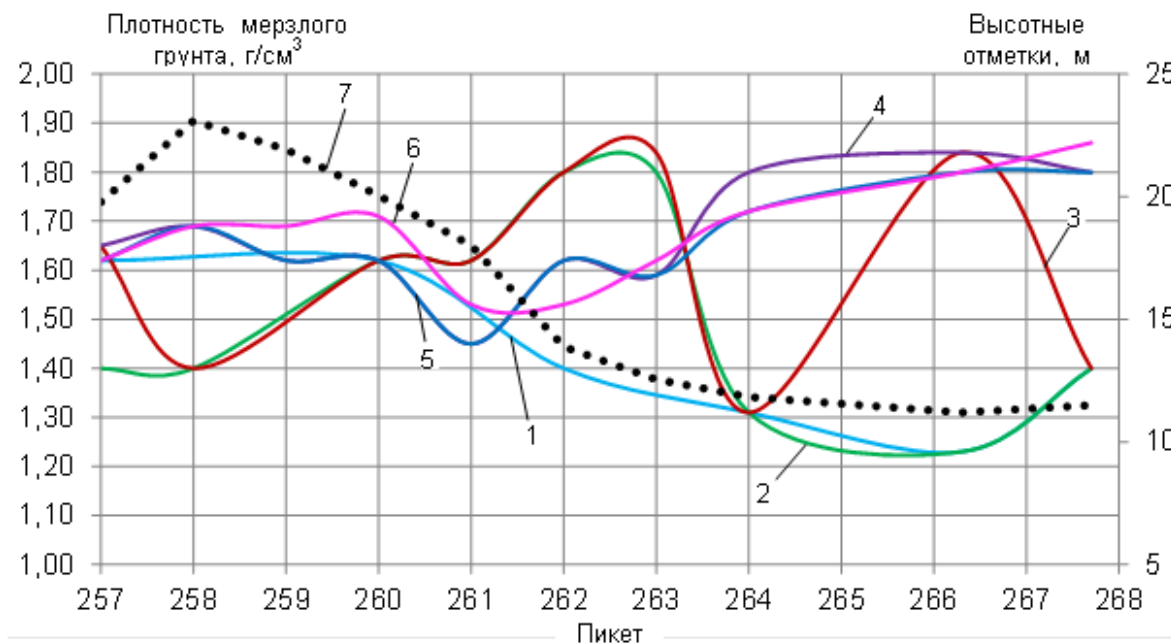
- для предотвращения сползания грунта на склонах при оттаивании предусмотрены средства инженерной защиты – геомодули и георешетки;

- в местах распространения подземных льдов предусмотрена наземная прокладка или замена льда привозным минеральным грунтом (в зависимости от глубины распространения).

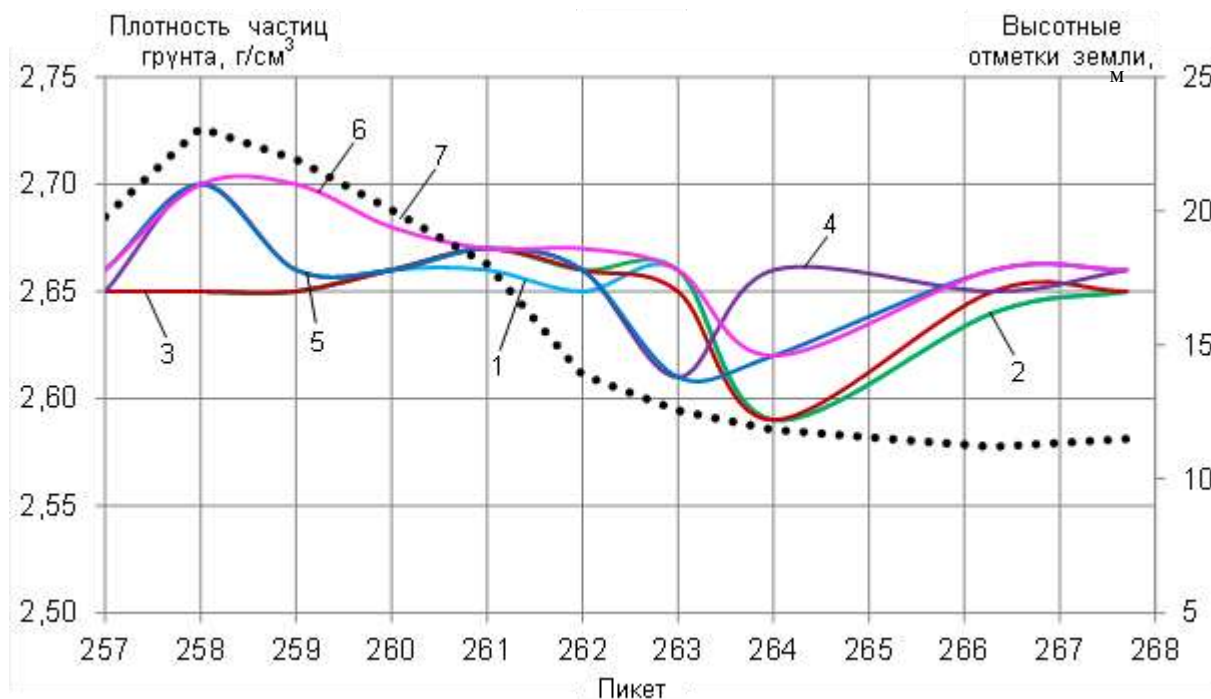
Грунтозадерживающие подземные барьеры формируются из противоэрозионных контейнеров КП-Р-1.8, заполненных минеральным грунтом. Контейнеры противоэрозионные изготавливаются из полиамидной технической высокопрочной ткани ТБГ и представляют собой оболочку с горловиной для засыпки минеральным грунтом с монтажными грузовыми ручками. Грунтозадерживающие барьеры полностью перекрывают поперечное сечение траншеи и тем самым препятствуют выносу нарушенного при строительстве грунта из траншеи в теплое время года. Конструкция барьера приведена на рисунке 2.15.

Полимерно-контейнерные балластирующие устройства ПКБУ предназначены для балластировки магистральных газопроводов диаметром до 1420 мм и состоят из двух контейнеров, соединенных четырьмя силовыми лентами, а также металлических распорных рамок, включающих в себя четыре продольных и четыре поперечных трубы соединенных между собой. Контейнеры изготавливают из мягких синтетических материалов (например, стеклохолст), которые должны обладать высокой прочностью. В процессе монтажа конструкции на трубопровод на рамные конструкции одевают ткань, после чего собранную конструкцию устанавливают на трубопровод. ПКБУ-МК опирается на трубо-

провод двумя грузовыми лентами, выполненными заодно с тканью. Общий вид ПКБУ-МК приведен на рисунке 2.16.



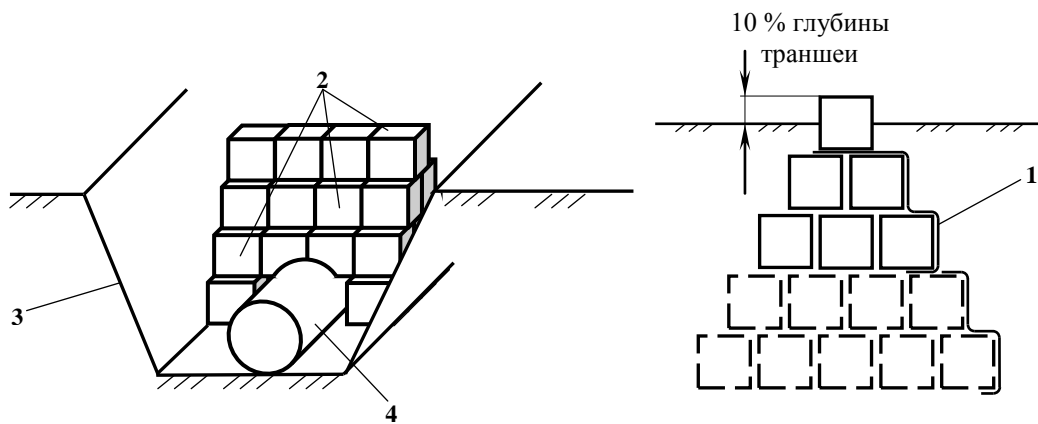
а



б

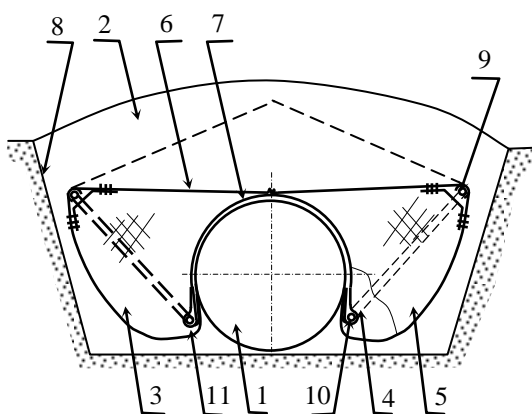
1, 2, 3, 4, 5, 6 – кривые распределения плотностей на глубинах соответственно 1, 2, 3, 4, 5, 6 м; 7 – рельеф местности

Рисунок 2.14 – Плотность мерзлого грунта (а) и плотность частиц грунта (б) на участке 2-й нитки МГ Бованенково – Ухта ПК 257 – ПК 267



1 – фильтрующая прослойка из НСМ с верхней стороны;
2 – контейнер КП-Р-1.8; 3 – траншея; 4 – газопровод

Рисунок 2.15 – Конструкция грунтозадерживающих барьеров из КП-Р-1.8



1 – трубопровод; 2 – грунт засыпки; 3 – емкости ПКБУ-МК; 4 – рамки жесткости;
5 – перегородки; 6 – верхние силовые пояса; 7 – нижний силовой пояс; 8 – траншея;
9 – верхние продольные стороны – прогоны рамок жесткости; 10 – нижние
(внутренние) продольные стороны – прогоны рамок жесткости; 11 – проушины

Рисунок 2.16 – Полимерно-контейнерные балластирующие устройства ПКБУ

Полимерконтейнерное балластирующее устройство (ПКБУ-МК) содержит две размещенные по обе стороны от трубопровода и заполняемые грунтом емкости из полотнищ полимерной технической ткани, каждая из которых снабжена рамками жесткости и перегородками. Нижний силовой пояс и заполняемые грунтом емкости выполнены в виде единого налагаемого на трубопровод полотнища, снабженного проушинами для размещения в них продольных прогонов рамок жесткости. Каждая перегородка скреплена с образующим емкость полотнищем и соответствующим верхним силовым поясом, при этом каждая рамка жесткости располагается в плоскости, касательной к наружной поверхности трубопровода, и относительно дна траншеи размещена с уклоном в сторону трубопровода без опирания на него и на грунт дна траншеи.

Комплект ПКБУ-МК в сборе навешивают на трубопровод вплотную друг к другу или группами по четыре комплекта в группе и более, затем засыпают грунтом с помощью спецтехники.

На переходах через реки балластировка МГ выполняется чугунными кольцевыми пригрузами с футеровкой поверхности труб деревянными рейками (рисунок 2.17). На участках распространения слабонесущих обводненных грунтов используются утяжелители бетонные УБО-1420. На участке проведения исследований данные типы балластирующих устройств не применяются.



а



б

Рисунок 2.17 – Балластировка МГ бетонными (а) и чугунными пригрузами (б)

Пример исполнения теплоизоляционного слоя на участке наземной прокладки представлен на рисунке 2.18.



а



б

Рисунок 2.18 – Термоизоляция МГ сегментами «Пеноплекс» толщиной 100 мм (а) и защита теплоизоляционного слоя стальным оцинкованным листом (б)

Теплоизоляционное покрытие состоит из отдельных сегментов, монтируемых по окружности трубы и закрепляемых с помощью стальных лент с фиксирующими элементами. Для защиты теплоизоляционного покрытия от механических повреждений служит экран из стального оцинкованного листа толщиной 0,05 – 0,1 мм, монтируемый вокруг теплоизоляционного покрытия и также закрепляемый стальными лентами. В данном случае назначение теплоизоляционного покрытия – исключение обледенения труб на наземном участке МГ в процессе эксплуатации при насыщении грунта валика водой в весенний, летний и осенний периоды.

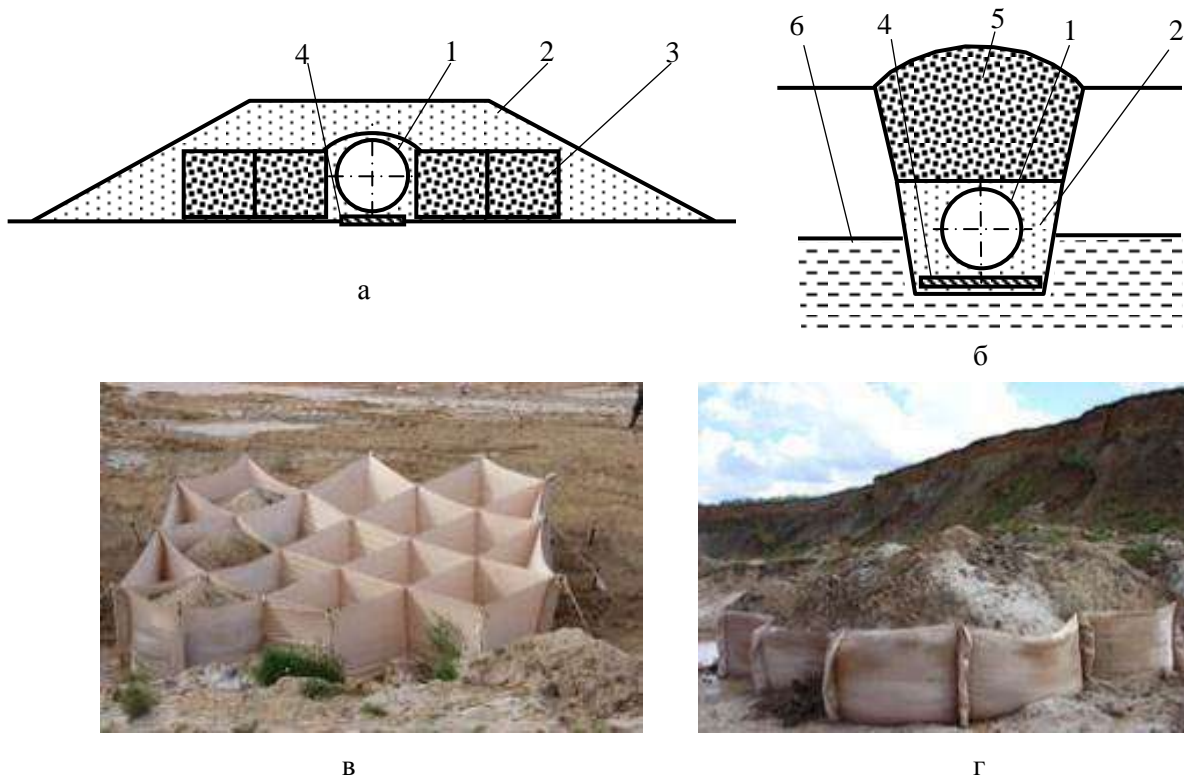
Теплоизоляционные плиты «Пеноплекс» применяются для термоизоляции поверхности грунта на склонах (под георешетками), а также в основании МГ на участках распространения подземных льдов (рисунок 2.19, а, б) совместно с грунтовыми модулями.

Грунтовые модули (рисунок 2.19, в, г) представляют собой ячеистые конструкции, заполняемые местным или привозным грунтом. Изготавливаются из лент технической ткани расчетной ширины с различными размерами ячеек, меняя которые добиваются требуемой несущей способности грунтового основания с учетом динамических нагрузок.

На участках проведения исследований грунтовые модули используют:

- для закрепления валика грунта засыпки на склонах;
- на участках наземной прокладки для закрепления грунтовой обсыпки (рисунок 2.20,

а).



1 – МГ; 2 – минеральный привозной грунт; 3 – геомодуль; 4 – теплоизоляционная плита «Пеноплекс»; 5 – грунт засыпки; 6 – подземный лед

Рисунок 2.19 – Инженерные решения, реализованные на участках распространения подземных льдов: наземная прокладка (а); выемка льда с заменой привозным грунтом (б); крупноразмерные геомодули (в, г)

Предполагаются следующие особенности выявления георадиолокационным методом приведенных выше элементов МГ:

- магистральный трубопровод выполнен из стальных труб, покрытых защитным покрытием, имеющим электрическое сопротивление, значительно превышающее сопротивление грунтов засыпки. Массивный стальной объект также является отражающим экраном для электромагнитных волн высокой частоты, излучаемых антенной прибора;

- теплоизоляционное покрытие МГ обладает значительным электрическим сопротивлением и высокой влагостойкостью, соответственно его поверхность также должна отражать высокочастотный радиосигнал, излучаемый антенной прибора. Отличия в результирующих радиограммах от радиограмм, полученных при исследований на участках МГ без термоизоляции возможно будут заключаться в более пологих и растянутых параболических осях синфазности, формируемых отраженными от поверхности МГ радиоволнами. Возможно также отличие характеристик отраженного сигнала, так как в данном слу-

чае, часть сигнала отразится от поверхности теплоизоляционного покрытия, а часть от поверхности трубы;

- выявление теплоизоляционного покрытия в основании МГ, возможно, будет затруднено, вследствие экранирования трубами всех объектов, находящихся под ними;

- в грунтозаполняемых балластирующих устройствах отражение высокочастотного радиосигнала в основном будет происходить от поверхностей металлических элементов каркаса. Грунт, заполняющий устройство, в ходе эксплуатации будет или мало отличаться от грунта засыпки или определяться как грунтовый массив малого размера (в зависимости от электрических характеристик грунта засыпки и грунта-заполнителя). Нижняя граница грунтового контейнера, возможно, также будет выступать как граница раздела сред с разными электрическими характеристиками;

- грунтозадерживающие барьеры и крупные геомодули могут рассматриваться как крупноячеистые структуры, которые на начальный период эксплуатации будут иметь электрические характеристики, отличающиеся от характеристик грунта засыпки. По результатам исследований на радиограммах возможно выделение или отдельных грунтовых контейнеров или всего объекта, причем в этом случае отражающая граница будет соответствовать дну траншей. При эксплуатации, при постепенном насыщении грунта в грунтозаполняемых контейнерах и геомодулях грунтовыми или поверхностными водами с последующим их замерзанием, электрические характеристики объекта могут приблизиться к характеристикам грунта засыпки, соответственно выделение этих объектов на радиограммах может быть затруднено;

- в том случае, если теплоизоляционное покрытие МГ перекрыто защитным стальным экраном, то характер отражения радиосигнала будет определяться геометрией экрана. Если экран исправен, то отраженные радиосигналы на радиограммах будут формировать изображение, характерное для цилиндрического горизонтального объекта. При нарушении геометрии или целостности экрана оси синфазности отраженных сигналов, будут приобретать различные сложные формы.

3. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ГАЗОПРОВОДОВ В МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ

3.1. Основные характеристики радиолокационного метода

3.1.1. Глубинность, разрешающая способность и детальность метода

Мощность принятого сигнала P_r при радиолокации локальных объектов в однородной среде определяется выражением [56]:

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{4\pi} \cdot \frac{1}{4\pi R^2} \cdot \frac{S_{эфф}}{4R^2} \cdot \exp\left[-4 \operatorname{Im}(\sqrt{\varepsilon}) R \cdot \frac{2\pi}{\lambda}\right], \quad (3.1)$$

где P_t – мощность излучаемого сигнала; G_t , G_r – коэффициенты усиления передающей и приёмной антенн; R – расстояние зондирования; $S_{эфф}$ – эффективная площадь рассеяния объекта; ε – диэлектрическая проницаемость среды распространения.

От формулы, описывающей мощность принятого излучения при радиолокации в воздухе, выражение (3.1) отличается экспоненциальным множителем, описывающим затухание в среде. Под длиной волны λ в формуле (3.1) следует понимать длину волны, соответствующую средней частоте спектра радиоимпульса георадара. Первый множитель R^2 описывает сферическую расходимость волны, излучаемой передающей антенной, второй множитель R^2 описывает расходимость волны, отражённой от объекта.

При распространении в среде с поглощением сигнал может сильно менять свою форму, и средняя частота спектра может существенно понижаться. Объект зондирования, если он имеет небольшие электрические размеры, сдвигает среднюю частоту спектра отражённого сигнала в сторону более высоких частот. Для точных оценок принятого сигнала проводится детальное численное моделирование, включающее расчёт характеристик антенн и отражающих свойств объектов в широкой полосе частот (или излучаемого и отражаемого импульса во временной области) и моделирование распространения импульса в поглощающей среде.

Мощность минимального обнаруживаемого сигнала P_{\min} (Вт) на фоне тепловых шумов и шумов приёмника определяется выражением [56]:

$$P_{\min} = \frac{kB(T_0 F_n + T)E_{s/n}}{N}, \quad (3.2)$$

где k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура зондируемой среды (или антенны при низком КПД антенны); B – ширина рабочей полосы частот радара, при-

нимаемых и поступающих на вход приёмника, Гц; F_n – шум-фактор приёмника; $T_0 = 290$ °К, $kT_0 = 4 \cdot 10^{-21}$ Вт/Гц.

Мощность тепловых шумов в выражении (3.2) даётся формулой Найквиста. Величина s/n – минимальное отношение мощностей сигнала и шума, необходимое для надёжного обнаружения. Обычно отношение сигнал-шум, при котором сигнал различим на фоне помех, принимают равным $E_{s/n} = 10 \lg(s/n) \approx 10$ дБ. При суммировании большого числа N сигналов при одном и том же положении антенн мощность шумов в суммарном сигнале увеличивается в N раз амплитуда сигнала в N раз мощность сигнала в N^2 раз. Отношение сигнал-шум увеличивается в N раз.

Приравнявая P_{\min} (4.2) и P_r из (3.1), находим максимальную дальность зондирования $R = R_{\max}$.

Мощность принятого сигнала P_r при зондировании плоской границы раздела сред даётся формулой:

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{4\pi} \cdot \frac{1}{16\pi R^2} \cdot |\Gamma|^2 \cdot \exp\left[-4 \operatorname{Im}(\sqrt{\varepsilon}) R \cdot \frac{2\pi}{\lambda}\right], \quad (3.3)$$

где Γ – комплексный коэффициент отражения от границы раздела:

$$\Gamma = \frac{(Z_2 - Z_1)}{(Z_2 + Z_1)}, \quad Z_1 = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_1}}, \quad Z_2 = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_2}},$$

где Z_1, Z_2 – волновое сопротивление среды распространения и расположенной ниже среды с комплексной диэлектрической проницаемостью ε_1 и ε_2 соответственно.

Под энергетическим потенциалом (энергетическим запасом) радара понимают отношение напряжений на выходе генератора U_r и минимального напряжения на входе приёмника U_{\min} при котором сигнал хорошо различим на фоне помех. Обычно энергетический потенциал выражают в децибелах:

$$E = 20 \lg\left(\frac{U_r}{U_{\min}}\right) = 20 \lg\left(\frac{U_r}{U_{\text{менл}}}\right) + 10 \lg N - E_{s/n}, \quad (3.4)$$

где $E_{s/n}$ (дБ) - отношение сигнал-шум; N - число накоплений сигнала.

Амплитуда тепловых флуктуаций напряжения на входе приёмника, поступающего с антенны, $U_{\text{тепл}}$ (В) выражается формулой:

$$U_{\text{менл}} \approx \sqrt{2kTRB}, \quad (3.5)$$

где k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура антенны; R – действительная часть входного импеданса антенны на средней частоте f рабочего диапазона радара; B – ширина рабочего частотного диапазона радара, Гц.

Теоретически достижимый предел энергетического потенциала георадара составляет около 190 - 200 дБ для средней частоты радара 100 - 10 МГц соответственно. При этой оценке предполагается число накоплений сигнала $5 \cdot 10^4$ амплитуда напряжения генератора $U = 300$ В, уровень собственных шумов приёмника (кроме тепловых) предполагается малым по сравнению с тепловыми шумами. При использовании генераторов с амплитудой импульса $U_r = 3000$ В энергетический потенциал может составлять 210 - 220 дБ.

3.1.2. Отражения от объектов

Величиной, характеризующей отражательную способность объекта, является эффективная площадь рассеяния $S_{эфф}$. На рисунке 3.1 показан график характеризующий зависимость параметра $S_{эфф}$ металлической сферы от её размеров в долях длины волны [56].

В релеевской низкочастотной области, где размер объекта меньше чем $\approx \lambda_{гр}/\pi$, $S_{эфф}$ меняется обратно пропорционально четвёртой степени длины волны. Эта зависимость характерна для любого объекта, наибольший размер которого намного меньше длины волны [58]. Следовательно, если размеры локального объекта по всем направлениям существенно меньше, чем $\approx \lambda_{гр}/\pi$, где $\lambda_{гр}$ - средняя длина волны (в грунте) спектра сигнала георадара, объект не будет обнаружен радаром ввиду малости отражённого сигнала.

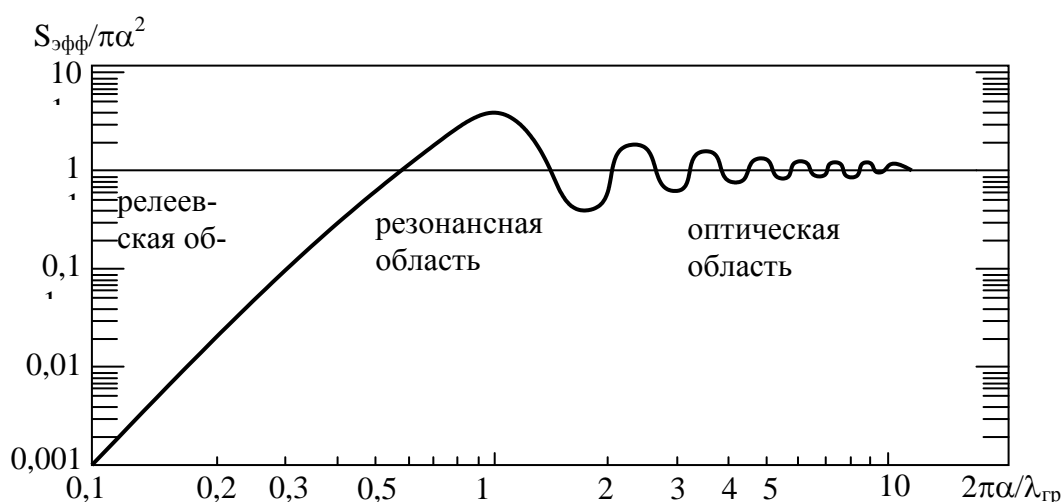


Рисунок 3.1 – Эффективная площадь рассеяния металлической сферы:
 a - радиус; $\lambda_{гр}$ -длина волны

Резонансная область ограничена пределами $1 < \pi\alpha/\lambda_{гр} < 10$. После первого резонансного максимума в зависимости $S_{эфф}$ от частоты начинаются колебания, вызванные интерференцией волны, отражённой от облучённой части сферы, с дифракционными волнами, обтекающими вокруг сферы и идущими затем в обратном направлении (рисунок 3.1). Эти волны экспоненциально затухают, обтекая сферу. Подобные дифракционные волны характерны для любых тел с высокой проводимостью или высокой действительной частью диэлектрической проницаемости ε' , которые существенно превышают эти параметры для окружающей среды.

Любое тело характеризуется собственными комплексными резонансными частотами. Рассеянный локальным объектом радиоимпульс содержит помимо основной волны, отражённой от освещённой части, ещё и сумму затухающих колебаний, каждое из которых характеризуется своей комплексной резонансной частотой. Собственные колебания электромагнитного поля вокруг тела могут быть вызваны многократным обтеканием дифракционных волн вокруг тела. Такие собственные колебания обычно характеризуются большим декрементом затухания.

Для расчёта отражения от границы раздела сред используются формулы Френеля. Особым случаем является падение волны с вектором поля E , параллельным плоскости падения, под углом Брюстера. В этом случае отражённая волна равна нулю. Этот эффект используется для подавления волны отражённой от поверхности грунта в высокочастотных радарных системах для поиска объектов вблизи поверхности. При зондировании слоёв следует избегать этого эффекта и располагать приёмную и передающую антенны в H -плоскости антенн.

Приближённый расчёт распространения плоской волны в слоистой среде и отражения от слоёв, в том числе при наклонном падении волны на поверхность, можно осуществить с использованием теории линий передачи и расчётом компонент поля E , H последовательно во всех слоях. Сферическую расходимость волнового фронта можно при этом также учесть, используя закон Снелля. Если граница между средами не резкая и диэлектрическая проницаемость плавно меняется на расстояниях больших, чем $\approx \lambda_{гр}/4$, где $\lambda_{гр}$ - длина волны в грунте, импульс проходит без заметного отражения из одной среды в другую. Такая ситуация может наблюдаться при зондировании с поверхности земли уровня грунтовых вод [49].

Для протяжённых и линейных (протяжённых по одной из координат) объектов можно использовать следующий приближённый способ оценки отражённого сигнала, основанный на принципе Гюйгенса и построении зон Френеля. Для оценки используется значение

средней частоты спектра георадара. Каждая следующая зона Френеля отличается сдвигом фазы на 180° на пути распространения волн. Разность длин путей TAR и TOR, TBR и TAR (рисунок 3.2) составляет $\lambda/2$. Радиус первой зоны Френеля равен:

$$R_1 = \frac{\sqrt{R\lambda}}{2}, \quad (3.6)$$

где R - глубина.

Основная доля потока энергии приходится на часть первой зоны Френеля с радиусом ρ_0 :

$$\rho_0 = \frac{1}{2} R\lambda. \quad (3.7)$$

Вклады от последующего участка и последовательно всех других зон Френеля имеют чередующиеся знаки и в сумме компенсируют друг друга. Обозначив S - площадь части протяжённого объекта, попадающего в круг радиусом ρ_0 . $S_{эфф}$ можно оценить по выражению:

$$S_{эфф} \approx \frac{4\pi S^2}{\lambda^2} \cdot |\Gamma|^2. \quad (3.8)$$

Из выражений (3.6), (3.7) следует, что для протяженного двумерного объекта эффективная площадь рассеяния $S_{эфф} \approx R^2$, для линейного:

$$S_{эфф} \approx \frac{RD^2}{\lambda}, \quad (3.9)$$

где D - ширина объекта (которая меньше первой зоны Френеля $D < R_1$).

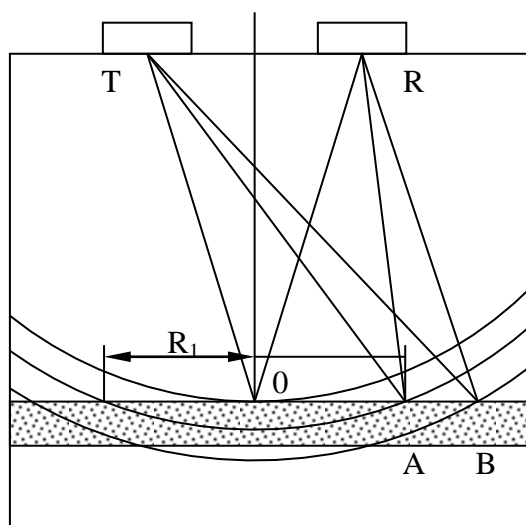


Рисунок 3.2 – Зоны Френеля на отражающем слое в грунте

Из формулы (3.1) следует, что зависимость принимаемой мощности от расстояния зондирования R имеет вид:

$$\frac{P_r}{P_t} \approx R^{-\alpha} \cdot \exp\left\{-4 \cdot \operatorname{Im}(\sqrt{\varepsilon}) R \cdot \frac{2\pi}{\lambda}\right\}, \quad (3.10)$$

где $\alpha = 4$ для локальных объектов, размеры которых существенно меньше первой зоны Френеля, $\alpha = 3$ для линейных объектов, $\alpha = 2$ для протяженных двумерных объектов (слоёв и границ раздела) [1].

В случае если протяжённые объекты имеют резкие границы, рёбра или острия, эти неоднородности являются источниками отражённых краевых волн (дифракционных лучей в геометрической теории дифракции). Существенное отражение может давать не только край протяжённого объекта, обращённый навстречу падающему полю, но и обращённый вдоль направления распространения. Сильным источником отражённой краевой волны является конец вытянутого тонкого металлического предмета, обращённый в сторону вдоль вектора k падающей волны, если волна падает в определённом интервале углов k оси объекта.

В таблице 3.1 даны максимальные амплитуды отражённых сигналов от линейных и локальных объектов $U_{\text{лин}}$ и $U_{\text{лок}}$, делённые на амплитуду сигнала, отражённого от металлической плоскости $U_{\text{пл}}$. Рассмотрены металлические трубы и пустые трубы с диэлектрическими стенками, металлические и диэлектрические сферы (валуны). Все объекты располагались на одном и том же расстоянии $R_0 = 0,85$ м. Приведены пределы изменения указанных величин при изменении диаметра объекта от 15 до 45 - 55 см. Расчёты проводились для грунтов с различными значениями диэлектрической проницаемости и проводимости. Длительность импульса генератора 1,5 нс. Порог обнаружения сигнала при указанном расстоянии R_0 для линейного и для локального объектов:

$$\frac{U_{\text{лин}}}{U_{\text{пл}}} = 0,2; \quad \frac{U_{\text{лок}}}{U_{\text{пл}}} = 0,05..$$

Эти требования к минимальным обнаруживаемым уровням сигнала позволяют обнаружить объекты, поперечный размер которых составляет не менее 0,3 - 0,6 длины волны в грунте. При размерах антенн около 40 - 50 см и длительности импульса генератора 1,5 - 3 нс для локальных и линейных объектов минимальный диаметр составляет 30 см, для труб при их благоприятной ориентации к вектору E (металлическая труба параллельна E , пустая диэлектрическая перпендикулярна E) - около 15 см.

Таблица 3.1 – Относительные амплитуды сигналов, отражённых от линейных и локальных объектов

Объект	Параметры грунта		
	$\varepsilon' = 10,$ $\sigma = 0,01$ См/м	$\varepsilon' = 10,$ $\sigma = 0,08$ См/м	$\varepsilon' = 20,$ $\sigma = 0,08$ См/м
Металлическая труба, расположенная параллельно полю E	0,32-0,48	0,4-0,56	0,41-0,57
Металлическая труба расположенная перпендикулярно полю E	0,29-0,47	0,18-0,41	0,2-0,42
Диэлектрическая труба, расположенная параллельно полю E	0,13-0,34	0,1-0,38	0,12-0,36
Диэлектрическая труба, расположенная перпендикулярно полю E	0,29-0,67	0,23-0,8	0,3-0,71
Металлическая сфера	0,11-0,225	0,06-0,2	0,1-0,18
Диэлектрическая сфера	0,025-0,075	0,03-0,17	0,05-0,175

Указаны пределы изменения относительной амплитуды при изменении диаметра объекта от 15 до 45 - 55 см. Указаны действительная часть диэлектрической проницаемости ε' и проводимость σ (См/м) грунтов

3.1.3. Разрешающая способность георадара по расстоянию

Различают разрешающую способность по глубине (по расстоянию до объекта) и по горизонтали вдоль поверхности грунта (разрешение в плане).

Разрешающая способность по дальности определяется как расстояние между объектами, при котором их можно различить как отдельные отражения на осциллограмме сигнала. Она пропорциональна длине волны средней частоты спектра георадара. Путём обработки сигналов можно в принципе «сжать» исходный отражённый сигнал практически до одного полупериода методом обратной фильтрации. Поэтому объекты можно уверенно различить если расстояние между ними будет примерно $\lambda_{гр}/3 - \lambda_{гр}/2$ где $\lambda_{гр}$ - длина волны в грунте. Если по тем или иным причинам не удаётся использовать обработку сжимающую сигнал разрешающая способность будет хуже в зависимости от числа паразитных колебаний сигнала. Длина волны в грунте [57]:

$$\lambda_{gp} = \frac{\lambda}{\operatorname{Re}(\sqrt{\varepsilon})}, \quad (3.11)$$

где ε - комплексная диэлектрическая проницаемость грунта на средней частоте спектра георадара.

Если проводимость σ грунта мала или проводимость σ велика, но частота не очень низка, замедление $\text{Re}(\varepsilon)^{0,5}$ радиоволн в грунте приближённо равно $(\varepsilon')^{0,5} \sqrt{\varepsilon'}$, то есть $\lambda_{\text{гр}}$ определяется действительной частью диэлектрической проницаемости грунта ε' .

Объекты, существенно меньшие, чем указанная разрешающая способность радара, находятся в релеевской области и дают очень слабый отражённый сигнал.

3.1.4. Разрешающая способность георадара в плане

Следующие величины определяют разрешающую способность по горизонтали вдоль поверхности грунта в зависимости от типа объекта и методов обработки: длина волны в грунте $\lambda_{\text{гр}}$, радиус зоны Френеля R_1 . Играет роль также ширина диаграммы направленности антенны [56].

Локальный объект или края протяжённого объекта дают отражения, если они попадают в область пересечения главных лепестков диаграмм направленности приёмной и передающей антенн. Ширина этой области пропорциональна глубине зондирования. При попадании нескольких локальных объектов в область пересечения главных лепестков излучения антенн отражение от одного объекта может накладываться на другое. В этом случае отражение от малоконтрастного объекта будет маскироваться более сильным отражением.

При сканировании антенн вдоль линии изображение локального объекта или края протяжённого объекта на получаемом профиле имеет вид гиперболы. Если не применять синтеза апертуры (фокусировки) и использовать для интерпретации непосредственно получаемый профиль, разрешающая способность по расстоянию вдоль поверхности определяется верхней частью этой гиперболы, где амплитуда отражённого сигнала максимальна. Ширина этой области примерно пропорциональна глубине объекта. При значительных потерях в грунте ширина этой области меньше (пропорциональна корню квадратному из глубины объекта).

По положению «боковых частей» этой гиперболы можно определить положение более точно. Понимаемая таким образом разрешающая способность пропорциональна длине волны в грунте $\lambda_{\text{гр}}$. Эта разрешающая способность достижима, если «боковые части» гиперболы имеют достаточно большую амплитуду и хорошо различимы на фоне помех и других отражений. Это возможно, если среда имеет не слишком высокие потери, диаграммы направленности антенн достаточно широки а локальный объект или край протяжённого объекта дает достаточно высокое отражение. Используя фокусировку (в грун-

тах с невысокими потерями) также можно сфокусировать полученные отражения в пятно с размером по горизонтали пропорциональным длине волны в грунте $\lambda_{гр}$.

При зондировании протяжённых объектов и слоёв в качестве величины, характеризующей разрешающую способность по расстоянию вдоль поверхности, можно принять размер первой зоны Френеля R_1 , или, точнее, ρ_0 . Если в протяжённом слое находится небольшой участок, имеющий более сильный коэффициент отражения, на получаемом профиле при сканировании антенн вдоль поверхности этот участок будет выглядеть как пятно с шириной по половинному уровню амплитуды отражения не менее чем ρ_0 . Кроме этого края участка, если они достаточно резкие будут давать небольшие отражённые краевые волны, которые выглядят на профиле как части гиперболы.

3.1.5. Волновая картина и способы ее отображения

Волновая картина (радарограмма) представляет собой серию записей сигналов (трасс), пришедших к приемной антенне в интервал времени от $t = 0$ - момента посылки зондирующего импульса до конца интервала записи (развертки) $t=t_p$, выставленного оператором. Горизонтальная ось радарограммы - ось x , ось профиля в метрах. Начальные точки трасс располагаются на этой оси с тем шагом, с которым они были записаны на профиле. Вертикальная ось волновой картины - ось времени с началом $t = 0$ - моментом посылки зондирующего импульса и концом t_{max} , соответствующим концу интервала записи (развертки). Различия в способах изображения волновой картины состоят в различном изображении амплитуды сигнала в каждый момент времени [55].

Первый способ - изображение амплитуд отклонениями, то есть чем больше амплитуда сигнала, тем больше отклонение трассы от нулевого положения. При этом, отклонения вправо соответствуют положительным амплитудам, а отклонения влево соответствуют отрицательным амплитудам сигнала (рисунок 3.3, а).

Второй способ - представление трассы методом отклонений с зачернением положительных амплитуд (отклонений вправо). Этот способ помогает выделять на соседних трассах одноименные фазы, например, положительные или отрицательные фазы импульсов, отразившихся от соседних участков границы (рисунок 3.3, б).

Третий способ - изображение методом переменной плотности, то есть когда нулю амплитуды сигнала соответствует серый фон, положительным амплитудам соответствуют все более темные тона вплоть до черного, а отрицательным амплитудам сигнала соответствуют все более светлые тона вплоть до белого. В этом случае трасса на экране дисплея занимает вертикальную полосу шириной в одну точку и на экране (в зависимости от его типа) может быть размещено до 1000 трасс (рисунок 3.3, в)).

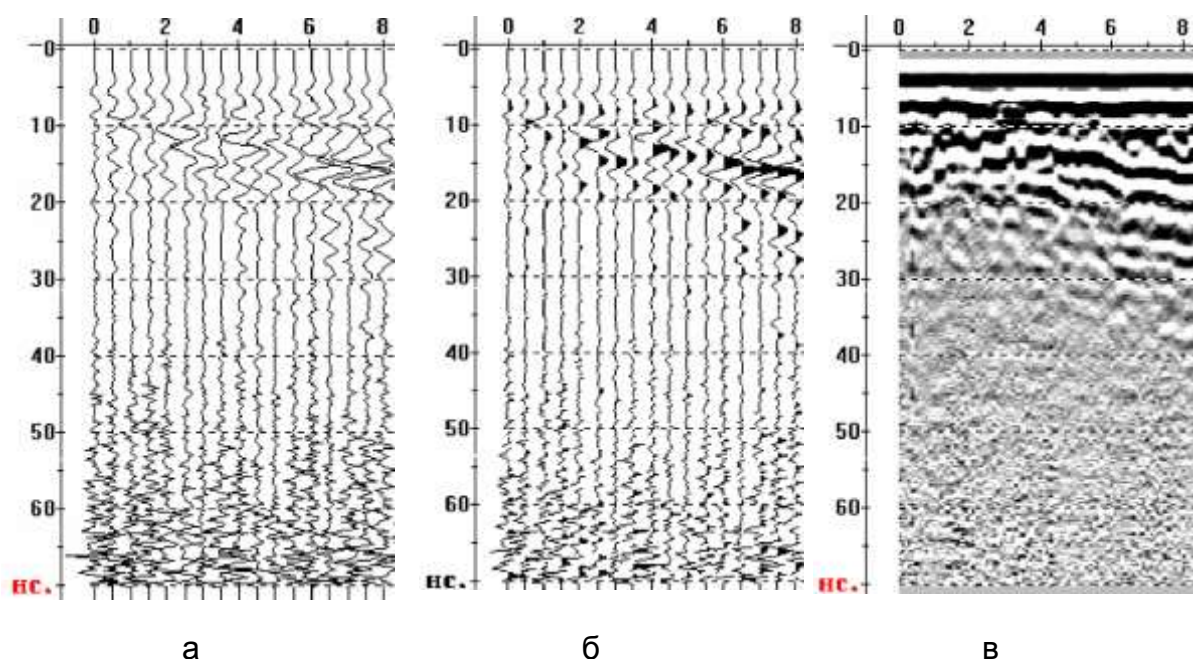


Рисунок 3.3 – Изображение радарограммы способом отклонений (а), способом отклонений с зачернением положительных экстремумов (б) и способом переменной плотности (в)

3.1.6. Особенности обработки данных георадиолокационных исследований

Сущность обработки георадиолокационных данных состоит, прежде всего, в выделении полезного сигнала (осей синфазностей полезных волн) на фоне помех и шума с последующим определением параметров контролируемой среды и выделения локальных объектов искусственного или естественного происхождения. Для выделения полезных сигналов используют отличие их характеристик от соответствующих характеристик шума и волн - помех. Опираясь на эти отличия, с помощью разнообразных приемов преобразования сигналов, волны-помехи ослабляют, удаляют с записи или опознают их на записи [56].

Ниже приводится описание основных приемов анализа и преобразования сигналов для выделения полезных волн на фоне помех и шумов и улучшения отображения особенностей реального разреза на радарограмме.

Ввод данных - первая процедура в системе обработки. Ввод осуществляется, как правило, с электронных носителей информации, на которые были скопированы данные из памяти компьютера георадара. Данные исследований обычно записываются в формате, принятом производителем каждого конкретного прибора. Записи цифровых данных выполняются в виде одномерного массива, где числа, соответствующие амплитуде сигнала в каж-

дый момент времени, представляют собой правило формирования файла данных, состоящее из внешней характеристики формата и его описания.

Внешняя характеристика формата состоит из следующих позиций:

- числа байт, отводимых на паспорт файла записи;
- числа байт, отводимых на паспорт каждой трассы;
- числа точек в каждой трассе;
- указания типа чисел, последовательность которых составляет трассу.

Паспорта файла и трассы могут содержать информацию о параметрах сбора данных - профиле наблюдений, усилениях, фильтрациях, дате работ, метках оператора и т.д. Описания паспортов файлов и трасс, как правило, представляют собой многостраничные тексты. Опираясь только на характеристику формата можно ввести записи в программу обработки, не расшифровывая паспорта файла и трасс. Если есть необходимость воспользоваться информацией, содержащейся в паспортах, то система обработки должна быть снабжена соответствующей данному формату процедурой чтения информации в паспортах.

Вывод промежуточных или окончательных результатов обработки в цифровом виде производится в формате, который позволяет задать данная система обработки.

Просмотр и редактирование проводится с целью подготовки данных к последующей обработке. Обычно экспериментальные данные не нуждаются в редакции, но всегда производится их просмотр. Для этого введенные радарограммы визуализируются на экране компьютера, прежде всего методом переменной плотности в максимально сжатом виде - по трассе на каждую точку экрана по горизонтали. Это позволяет рассмотреть сразу максимальный объем материала. Определяются следующие параметры:

- наличие участков записи, не подлежащих включению в процесс дальнейшей обработки - записи калибровочных сигналов, пропуски на записи, бракованные в результате аппаратных сбоев участки записи;

- выбирается интервал времени для последующей обработки, который может быть равен или меньше интервала времени при записи в поле;

- выбирается количество трасс на единицу длины профиля исходя из условий задачи исследований;

- выбирается количество трасс на экране для будущей печати результатов обработки - печати в заданном горизонтальном масштабе.

На основании просмотра при необходимости производится редакция данных:

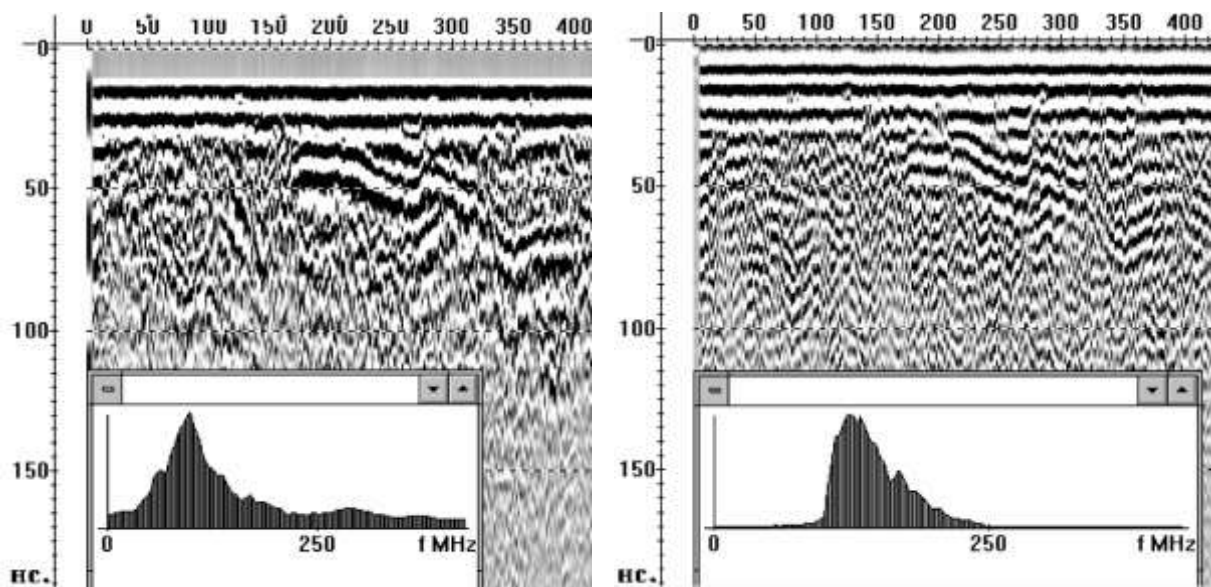
- удаление отдельных трасс или групп трасс;
- уменьшение интервала времени для обработки;
- прореживание или интерполяция в соответствии с новым шагом по профилю;
- выделяются в самостоятельные объекты обработки части файлов экспериментальных записей или производится объединение нескольких файлов полевых записей в единый файл.

Коррекция амплитуд возможна в двух видах [57].

Во-первых, это изменение коэффициента усиления записи - единого множителя для всех отсчетов вдоль трассы (по оси времени) и по профилю (для всех трасс). Операция производится для того, чтобы сделать волновую картину более «яркой», или для того, чтобы дискретно уменьшая величину общего коэффициента усиления увидеть, как относительно слабые отражения «исчезают» с волновой картины.

Во-вторых, возможно производство операций с целью выравнивания динамического диапазона записи волнового поля. Это введение коэффициента усиления линейно или экспоненциально растущего с увеличением времени вдоль трассы для компенсации уменьшения амплитуд за счет затухания. При этом, позже приходящие отражения с больших глубин становятся большими по амплитуде и сравнимыми с волнами в начале записи. Параметрами такой регулировки усиления являются величина начального коэффициента усиления, скорость роста коэффициента усиления со временем и закон увеличения коэффициента усиления со временем. Параметры регулировки задаются, как правило, в системе обработки в соответствии с инструкцией пользователя.

Автоматическая регулировка усиления также служит для выравнивания или сжатия динамического диапазона записи. Выполняется она следующим образом: в выбранном скользящем окне высокоамплитудные сигналы ослабляются, а низкоамплитудные усиливаются. В результате на выровненной записи могут быть прокоррелированы оси синфазности слабых отражений. Параметрами автоматической регулировки усиления являются ширина окна выравнивания амплитуд, степень выравнивания в окне, шаг скольжения окна вдоль трассы и величина интервала времени, где действует автоматическая регулировка усиления. Эти параметры процедуры также устанавливаются пользователем.



а

б

Рисунок 3.5 – Полевая запись и модуль ее спектра (а), результат полосовой фильтрации и модуль спектра результата (б).

Повышение разрешающей способности выполняется для сжатия зарегистрированного импульса, с которым получена радарограмма, уменьшения его длительности. В результате происходит уменьшение интервала времени на трассе, «закрытого» отраженной волной и тем самым повышается возможность выделения на записи осей синфазности отраженных волн от близких границ или объектов.

При восстановлении местоположения и конфигурации локальных объектов (миграции) форма криволинейной оси синфазности отраженной волны приводится к форме отражающей границы в масштабе времени.

Такая процедура обработки основана на принципе Гюйгенса - каждая точка волнового фронта является вторичным источником колебаний. Отсюда следует:

- ось синфазности отражений от границы является огибающей вершин гиперболических осей синфазности порожденных вторичными источниками - элементами границы;
- каждая трасса является суммой восходящих к приемнику волн, пришедших не только вертикально снизу, но и под разными углами с боков от других элементов границы;
- положение и наклон элементов оси синфазности волн, отразившихся от криволинейной границы может не точно соответствовать положению и наклону элементов границы в вертикальном сечении профиля.

Задача миграции состоит в том, чтобы все волны (не видимые на полученном материале) от элементарных источников просуммировать по своим гиперболическим осям

синфазности, то есть собрать энергию колебаний в вершину гиперболы - истинное местоположение элементарного источника колебаний.

При этом истинные отражающие элементы границы займут свое настоящее местоположение в плоскости разреза «расстояние по профилю – глубина». Очевидно, что для выполнения этой процедуры необходимо задать скорость распространения волн в среде для правильного задания формы гипербол суммирования сигналов с соседних трасс. В случае неправильного задания значения скорости полученный результат будет еще дальше от истинного разреза, чем исходный.

Если на радарограмме имеют место ярко выраженные гиперболические оси синфазности дифрагированных волн от локальных объектов - трубопроводов, углов фундаментов или подземных сооружений, то применение миграции позволит «стянуть» гиперболу в небольшую область с интенсивным сигналом, соответствующую местоположению верхней точки трубопровода или угла сооружения и освободить оставшуюся запись от дифрагированных волн.

Параметрами процедуры являются, прежде всего, скорость распространения волн и размеры (интервалы по времени и по профилю) скользящего окна, в котором осуществляется суммирование по гиперболической оси.

Определение скорости распространения волн. Независимое от других методов, результатов лабораторных измерений и априорных данных определение скорости распространения электромагнитных волн в среде при георадарных исследованиях возможно с использованием двух приемов. Первый из них и самый распространенный основан на использовании дифрагированных волн. В большинстве систем обработки этот способ предусмотрен в следующем виде. На экран компьютера вместе с радарограммой вызывается теоретическая гипербола, параметры которой и местоположение на экране регулируются пользователем. Теоретическая гипербола накладывается на ось синфазности на экране и ее параметры регулируются до максимально близкого совмещения с реальной. Таким образом, путем сравнения (компарационный метод измерений) определяются скорость распространения волн в толще от поверхности до дифрагирующего объекта, глубина его залегания и место проекции на профиль.

Второй прием основан на использовании результатов наблюдений на переменной базе (см. выше) с использованием уравнения годографа отраженной волны при постоянной скорости в покрывающей толще. Технически этот прием может быть реализован в системе обработки подобно предыдущему, с той лишь разницей, что теоретическая гипербола построена на основании уравнения годографа отраженной, а не дифрагирован-

ной волны. Этот прием бывает необходим при отсутствии в разрезе дифрагирующих объектов и какой либо иной возможности получения сведений о скоростях распространения волн в среде.

Ввод статических поправок выполняется с целью учета рельефа поверхности вдоль профиля и (или) в удалении задержки сигнала при записи, введенной оператором.

При вводе статической поправки каждая трасса смещается по времени на интервал соответствующий двойному пробегу волны в воздухе по вертикали от линии приведения к горизонту, выбранной пользователем, до поверхности грунта или на интервал, соответствующий величине задержки сигнала при записи. Параметрами процедуры являются значения задержки при записи, значения относительных превышений точек профиля.

При пикировании границ и объектов пользователем на радарограмме выставляются маркирующие знаки в качестве выделителей объекта на радарограмме, например, выбранной оси синфазности отраженных волн, границ выделенной области на временном разрезе и тому подобное. В зависимости от конкретной реализации в системе обработки, результат пикировки может быть либо просто выведен на принтер вместе с радарограммой, либо записан в отдельном файле и представлен отдельно уже без радарограммы, на фоне которой был создан, либо при указании скорости в разрезе преобразован в глубинный разрез, где выделенные объекты займут истинное положение по профилю и по глубине.

В системах, оснащенных блоком интерпретации, предусматривается возможность нанесения уже на глубинный разрез с результатами пикировки крапа, отражающего природу выделенных объектов и дополнительных сведений типа данных по геологическим скважинам и результатам других видов исследований. Более удобна программа, наносящая крап в процессе записи радарограммы, но она обычно не входит в поставляемое программное обеспечение для георадара и может быть приобретена отдельно у «третьей стороны».

3.1.7. Особенности интерпретации данных георадиолокационных исследований

Интерпретация результатов георадиолокационного обследования выполняется в два этапа [56].

На первом этапе анализируются основные особенности волновой картины - протяженность осей синфазности отраженных волн, их конфигурация, наличие дифрагированных волн и участков «звучащей» записи, изменение интенсивности и частотного со-

става. На этом этапе рассматриваются только особенности волнового поля и данные о грунтовых условиях, как правило, не привлекаются.

На втором этапе анализируются тонкие особенности волновой картины на участках между выделенными ранее осями синфазности отраженных волн. На этой стадии используется вся доступная информация (скважины, шурфы.), а также данные об электрофизических свойствах грунтов - проводимости или диэлектрической проницаемости. При наличии этих сведений производится оценка скорости распространения электромагнитных волн и, если полученные значения скорости не противоречат известным данным натурных измерений, они используются затем при преобразовании временного разреза в глубинный.

При отсутствии геологических данных о разрезе удается только построить временной разрез, качественно отражающий поведение геологических границ.

Перед началом интерпретации необходимо убедиться в том, что оси синфазности отраженных волн на радарограмме являются однократными отражениями. При наличии на радарограмме интенсивных протяженных осей синфазности отраженных волн (в основном связанных с уровнем грунтовых вод или со значительным увеличением влагонасыщенности в какой либо части разреза, могут возникать многократные отражения, которые являются волнами-помехами и должны быть исключены.

Особый интерес в этом отношении представляют участки записи, на которых наблюдаются пересекающиеся оси синфазности. Очевидно, что в этом случае с большой долей вероятности можно утверждать, что одна из систем осей синфазности не связана со строением изучаемого участка и является волной-помехой.

Одним из основных признаков, характеризующих заглобленные объекты (трубопроводы, балластирующие устройства), является появление на радарограмме характерных дифрагированных волн, которые образуются, если размеры тела сопоставимы, либо меньше длины волны излучаемого сигнала. В некоторых случаях дифрагированные волны образуются на отдельных частях изучаемого объекта, например, на каркасах балластирующих устройств.

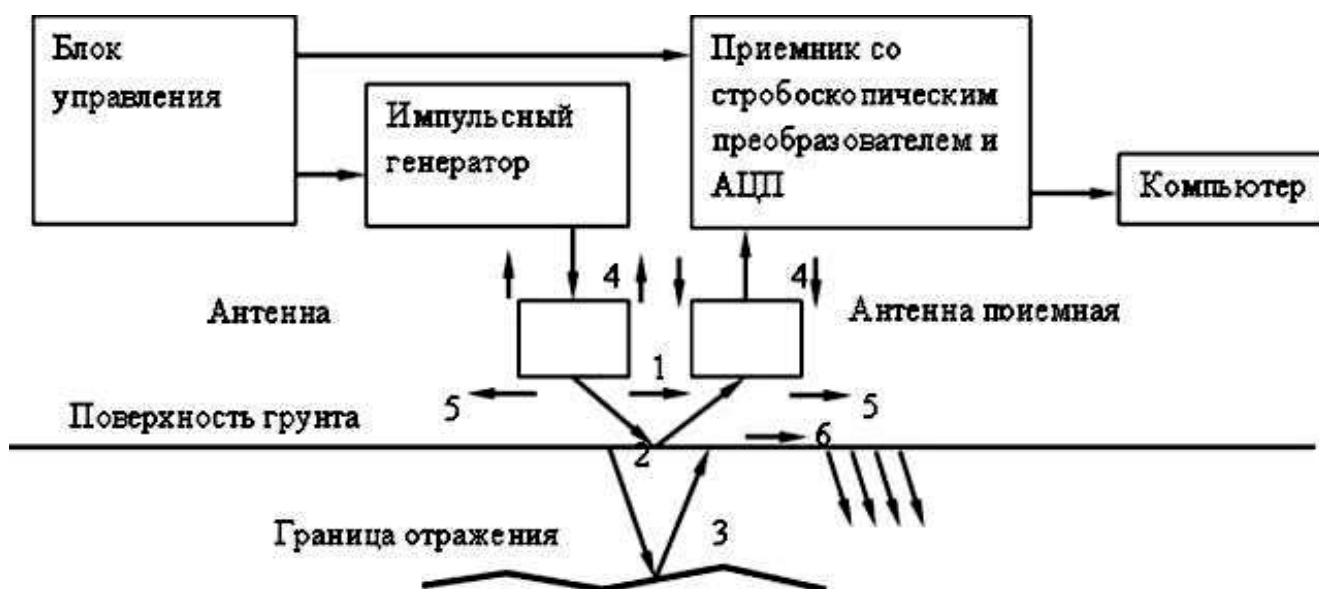
При поиске линейных объектов достоверность их выделения проверяется по системе поперечных профилей. Используя годографы дифрагированных волн определяют глубину залегания объекта.

3.2. Физические основы метода георадиолокации

Функциональная схема прибора для георадиолокационного обследования грунтов (георадара) показана на рисунке 3.6. Георадар состоит из следующих основных элементов [55]:

- импульсного генератора;
- приёмника, состоящего из стробоскопического преобразователя и аналого-цифрового преобразователя;
- передающих и приёмных антенн;
- блока управления;
- портативного компьютера.

Конструктивно генератор и приёмник могут быть объединёнными с передающей и приёмной антеннами. Одна и та же антенна может использоваться на приём и передачу. В этом случае используют быстродействующие переключатели, обеспечивающие защиту приёмника от сигнала генератора в момент генерации импульса и последующего отключения генератора. Две антенны применяются для обеспечения большей развязки между приёмным и передающим каналом. В большинстве георадаров антенны располагаются по одну сторону от исследуемого объёма.



1 – сигнал прямого прохождения между антеннами; 2 – сигнал, отражённый от поверхности; 3 – полезный сигнал, отражённый от объекта; 4,5 – сигналы, идущие в обратном и боковом направлениях; 6 – боковая волна

Рисунок 3.6 – Блок-схема георадара

Импульс излучается передающей антенной, распространяется в грунте, отражается от объектов, расположенных главным образом впереди антенного блока, и принимается затем приёмной антенной. Приёмная антенна располагается рядом с передающей антенной и обычно соединена с ней в один антенный блок.

Кроме полезного сигнала, зондирующего подповерхностные объекты, на рисунке 3.6 показаны также сигнал прямого прохождения между антеннами (1), сигнал, отраженный от поверхности грунта (если антенны отодвинуты далеко от поверхности) (2), сигналы, идущие в боковых направлениях (5). Показан сигнал, огибающий край антенны за счёт дифракции и идущий в заднем направлении (4). Показана также боковая волна (5), распространяющаяся сначала в воздухе, а затем под критическим углом в грунте (6). Сигналы, излучаемые и принимаемые в направлениях назад и сбоку, могут давать мешающие отражения при наличии вблизи радара посторонних предметов. Все эти сигналы являются паразитными, дающими помехи.

Опыт работы с георадарами показывает, что оптимальным диапазоном частот для зондирования верхних нескольких метров во влажном песчаном или сухом глинистом грунте является диапазон 50-150 МГц (длины волн в воздухе 6-2 м) [56].

Отражённый сигнал даёт любая достаточно большая по размерам локальная или протяжённая неоднородность в грунте, отличающаяся по диэлектрической проницаемости от окружающего или лежащего выше грунта. Отражающими границами являются границы между влажным и сухим грунтом, между песчаным грунтом и глинистым слоем, между мёрзлым и талым грунтом, уровень грунтовых волн в песчаном грунте. Кроме того краевые волны отражаются от краёв, рёбер и любых других резких изменений проводящих предметов или слоёв.

3.3. Виды георадиолокационных антенн

Конструкция применяемых в георадарах антенн определяется [57]:

- целями и задачах зондирования;
- требуемой дальности зондирования;
- свойствами исследуемых сред.

Применяемые в георадарах антенны относятся к типу сверхширокополосных. В таких антеннах соотношение верхней и нижней рабочих частот $f_1/f_2 \approx 3$.

Принимаемый приёмной антенной радиоимпульс состоит из небольшого числа полуволн (полупериодов). Информативными являются 1 - 2 полупериода, имеющие

наибольшую амплитуду, остальные являются помехами. Обычно число полупериодов с заметной амплитудой не превышает 3 - 4.

На рисунке 3.7 (а) показан зондирующий импульс георадара, содержащего щелевые антенны, на входе приёмника. Этот импульс излучается и принимается в направлении, перпендикулярном поверхности среды. Антенны имеют размер 40x40x7 см. Сигнал измерялся, когда антенны находились в песчаном грунте и были ориентированы навстречу друг другу. Сигнал показанный на рисунке 3.7 (а), является импульсной характеристикой приёмо-передающего тракта георадара. Поэтому он также называется калибровочным. Калибровочный (зондирующий) импульс содержит два основных полупериода колебаний.

Импульс, отражённый от объекта, несёт также информацию об объекте. Он отличается по форме и часто по средней частоте спектра от импульсной характеристики радара.

На рисунке 3.7 (б) показан сигнал прямого прохождения между передающей и приёмной антеннами георадара. Расстояние между центрами антенн - 65 см. Число колебаний в импульсе меньше - одно основное колебание (полупериод) и экспоненциально затухающее второе колебание отрицательного знака. Длительность первого полупериода по уровню 0,5 от максимума более чем в два раза превышает длительность первого полупериода калибровочного сигнала.

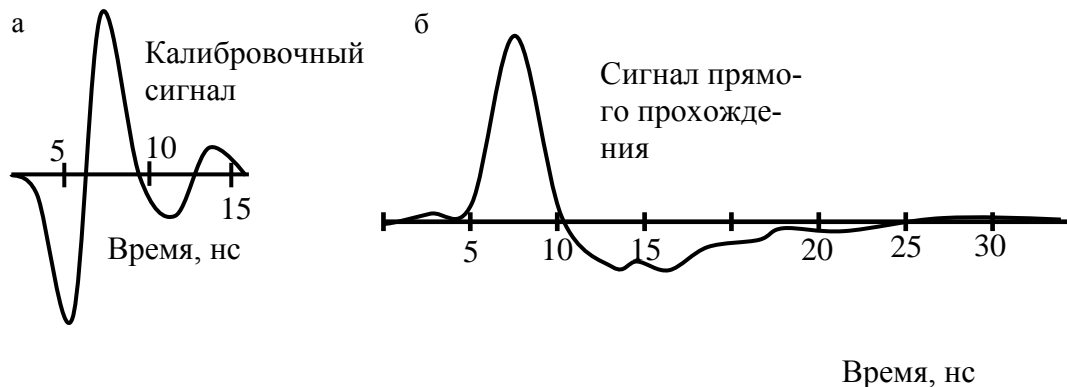


Рисунок 3.7 – Зондирующий (калибровочный) сигнал (а) и сигнал прямого прохождения между щелевыми антеннами (б)

В качестве величины, характеризующей направленность излучения антенны в сторону исследуемой среды по отношению к обратному излучению в сторону воздуха, часто используют так называемую развязку «верх-низ». Развязка «верх-низ» - это отношение потока энергии, излучаемой в переднем направлении, к потоку энергии, излучаемой в обратном направлении [56].

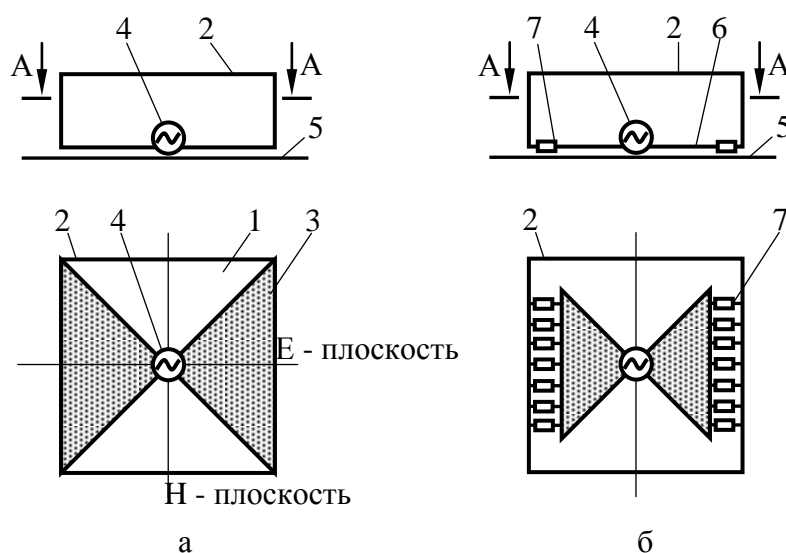
3.3.1. Неэкранированные дипольные антенны

Неэкранированные дипольные антенны применяются в основном при зондировании грунта на большие глубины, где необходимо применять сигналы с низкими частотами в спектре (от нескольких МГц до сотен МГц). Обычно они располагаются на поверхности грунта или переносятся на высоте 10 - 20 см. Плечи диполей изготавливаются из проводников, толщина которых намного меньше применяемых длин волн. Часто используют диполи с распределённым сопротивлением для улучшения импульсной характеристики приёмо-передающего тракта радара [1]. Для неэкранированной дипольной антенны развязка «верх-низ» определяется только диэлектрической проницаемостью грунта ε . Для грунта без потерь и при расположении дипольной антенны непосредственно на грунте развязка «верх-низ» составляет $\varepsilon^{1,5}$ [57].

3.3.2. Щелевые и экранированные дипольные антенны

Щелевые антенны (рисунок 3.8, а) характеризуются хорошей степенью экранирования при малых электрических размерах и удовлетворительными импульсными характеристиками.

Развязка «верх-низ» щелевых антенн, расположенных вплотную на грунте, значительно превышает развязку «верх-низ» для неэкранированных дипольных антенн, однако при подъёме антенн она существенно уменьшается.



- 1 – щель; 2 – экранирующий короб 3 – металлические лепестки; образующие края щели; 4 – место включения генератора или приёмника (точка питания);
5 – грунт; 6 – плечи вибратора; 7 – резистивные элементы

Рисунок 3.8 – Конструкция щелевой антенны (а) и дипольной антенны с экраном и резистивными элементами (б)

Диаграммы направленности щелевой антенны приведены на рисунке 3.9. Диаграммы направленности показаны в Е - и Н - плоскостях, проходящих через ось антенны и где соответственно расположены векторы электрического и магнитного поля излучения антенны. При увеличении частоты свыше определённого значения (определяемого размерами антенны, высотой подъёма антенны h и диэлектрической проницаемостью грунта) диаграмма распадается на отдельные лепестки а вдоль оси антенны наблюдается уменьшение уровня излучения. При подъёме антенны на высоту $h = 5 - 10$ см на нижнем крае частотного диапазона антенны наблюдается глубокий минимум в диаграмме направленности в Н-плоскости (рисунок 3.9, б) [56].

Вдоль поверхности грунта объёмные волны в грунте и воздухе в пределе больших расстояний не возбуждаются, поэтому диаграммы направленности в дальней зоне в направлениях вдоль поверхности грунта равны нулю. Поле вблизи поверхности грунта определяется боковой волной. Распределение потока энергии в грунте под щелевой антенной показано на рисунке 3.10. Показана область $1,2 \times 2$ м в Е - и Н - плоскостях. Центр антенны располагается над левым верхним углом каждого графика. Высота подъёма антенны $h = 0$ (графики слева) и 10 см (графики справа) и частота $f = 150$ МГц. Показаны уровни постоянного потока энергии: 1×10^{-9} , 2×10^{-9} , 5×10^{-9} мВт/см², уровни 1×10^{-9} обозначены номерами p . Амплитуда напряжения в центре щели $1,41$ В. Размер щелевой антенны (рисунок 3.10, а) – $40 \times 40 \times 10$ см.

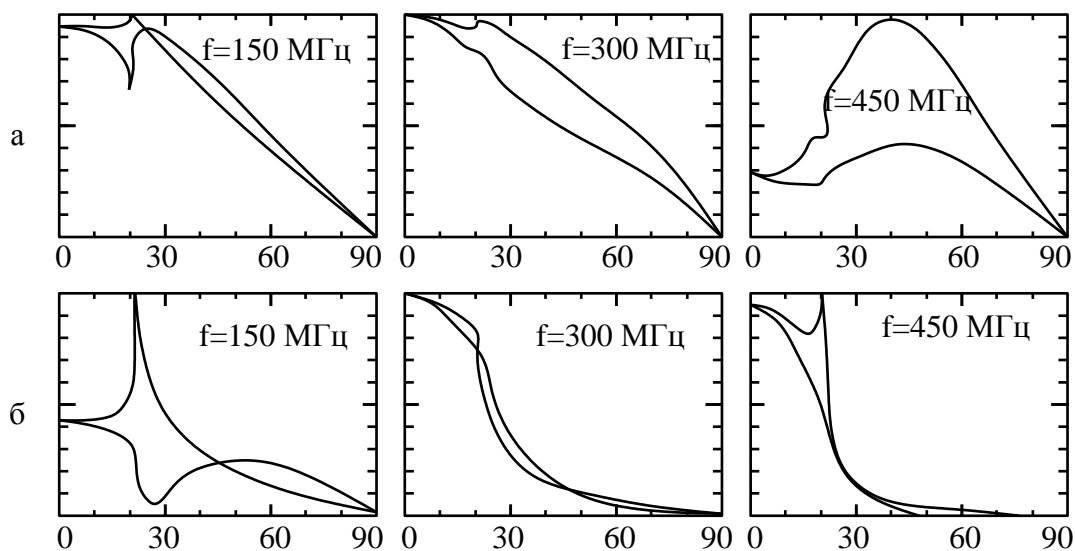


Рисунок 3.9 – Результаты расчёта диаграмм направленности щелевой антенны по полю в дальней зоне для различных частот f и высот подъёма антенны h над поверхностью грунта: а) $h = 0$ (антенна расположена вплотную на грунте); б) $h = 11$ см.

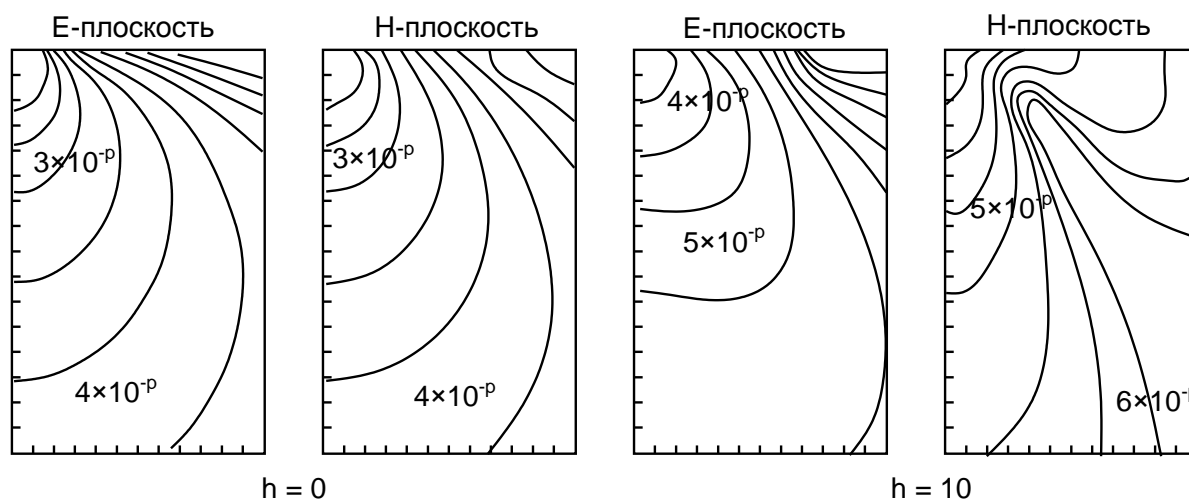


Рисунок 3.10 – Результат расчёта потока энергии под щелевой антенной для грунта без потерь с диэлектрической проницаемостью $\epsilon_{гр} = 8$.

Щелевые антенны с резистивными элементами в металлических пластинах, составляющих края щели, можно рассматривать как нагруженные дипольные антенны с металлическим экраном (рисунок 3.8, б). Экранированные дипольные антенны используются на частотах выше, чем примерно 100 МГц, где из-за сравнительно небольших размеров антенн использование экрана возможно по конструктивным соображениям. Часто используют диполи из двух треугольников, которые нагружают резистивными элементами. В некоторых конструкциях пространство между диполем и экраном заполняют поглощающим радиоволны материалом для улучшения импульсной характеристики антенны [56].

Для увеличения развязки «верх-низ» применяется также дополнительное экранирование щелевых антенн путём окружения их блоками резистивного материала. Экспериментально и путём численного моделирования исследовались следующие способы покрытия щелевых антенн резистивным материалом [56-58]:

- 1) прокладывание слоя резистивного материала между передней стороной антенны и поверхностью грунта;
- 2) окружение антенн по бокам блоками резистивного материала;
- 3) комбинация указанных двух способов.

Были найдены оптимальные значения проводимости блоков и слоёв резистивного материала в зависимости от вида покрытия при различных электрических параметрах грунта. В частности, было обнаружено, что окружение антенны блоками резистивного материала по бокам с тех сторон, которые пересекаются Е-плоскостью, даёт большее значение развязки «верх-низ», чем помещение блоков резистивного материала на другой паре сторон, которые пересекаются Н-плоскостью [49].

Хорошие результаты даёт прокладывание слоя или блоков резистивного материала с проводимостью около 0,05 См/м. В случае большой проводимости грунта оптимальные значения проводимости блоков резистивного материала на краях антенн будут несколько большими, до 0,1 См/м.

Оба способа 1, 2 (в отдельности и, в особенности, вместе) уменьшают относительный уровень волн, излучаемых передающей антенной в верхнее полупространство, и отражённых волн, поступающих на приёмную антенну со стороны верхнего полупространства.

3.3.3. Антенны бегущей волны

Антенны такого типа состоят из двух металлических лепестков, расположенных под некоторым углом в форме буквы V, симметрирующего устройства и резистивной нагрузки на концах пластин [1]. Лепестки бывают заострены на концах, в некоторых конструкциях вдоль лепестков идут рёбра, обеспечивающие плавный переход и сглаженную частотную характеристику. антенны с продольными ребрами экспоненциальной формы обеспечивают полосу частот $f_2/f_1 > 10$ [1]. Из-за больших электрических размеров рупорные антенны используются в высокочастотных радарах.

Встречаются также комбинированные сверхширокополосные антенны, включающие рупорные элементы, обеспечивающие излучение на высоких частотах, и дипольные элементы больших размеров, дающие излучение на низких частотах [56].

3.4. Разработка общих требований к георадиолокационному диагностированию газопроводов

3.4.1. Планирование и организация диагностирования

Планирование и организация исследований по оценке состояния многолетнемерзлых грунтов, а также определения положения подземного газопровода георадиолокационным методом предполагает проведение следующих мероприятий:

- планирование объема работ, определение целей и задач георадиолокационных исследований (назначение участков проведения исследований);
- обзор проектной и исполнительной документации, данных инженерных изысканий (геологические разрезы, данные о гидрогеологической обстановке), планов местности с обозначением положения контролируемого объекта и подъездных путей);

- изучение гидрогеологической обстановки места предстоящих работ, характера местности и условий проведения работ (определение положения водных преград, болот, уровня грунтовых вод);

- отбор образцов грунта (бурение контрольных скважин) и проведение их анализа в лаборатории для исследования затухания радиоволн в грунте на частотах работы георадаров;

- уточнение уровня электромагнитных помех, которые могут быть значительными вблизи радиорелейных станций, ретрансляционных вышек, ЛЭП и т.п.

По результатам выполненного обзора определяется тип оборудования для проведения георадиолокационного обследования (определяется марка прибора, а также назначается тип антенн). В соответствии с разработанной методикой георадиолокационного зондирования определяются размеры участков зондирования, число и длина профилей, шаг между соседними профилями на участке. Если зондирование проводится в отдельных точках (положениях антенного блока), то определяются шаг перемещения антенн и число точек зондирования, выбор шага между отдельными положениями антенного блока и между соседними профилями. Методика проведения георадиолокационных исследований на участке МГ должна содержать:

- перечень необходимых приборов и оборудования;

- тип используемых антенн георадара вместе с блоком управления, расстояние между антеннами в антенном блоке (если оно переменное) и т.п.;

- указание мер безопасности при работе с георадиолокационным оборудованием;

- указание всех существенных особенностей работы (состояние поверхности грунта на участке контроля, расположение антенн, использование дополнительных блоков резистивного материала для экранировки антенн; возможность работы или ограничения при проведении работ вблизи опор ЛЭП, сооружений и элементов системы ЭХЗ, подстанций;

- специальные требования к процессу проведения измерений с указанием особенностей перемещения антенн георадара, использование датчика пути и т.п.);

- указание режимов работы аппаратуры или конкретные указания по настройке аппаратуры на месте в зависимости от условий работы;

- указание скорости (темпа) проведения измерений. Для георадаров скорость измерений зависит от заданного числа накопления сигналов, которое, в свою очередь, определяется шумовой обстановкой и требуемым отношением сигнал-шум; оговаривается максимальная скорость перемещения антенного блока георадара;

- указание размера участка зондирования, числа и длины профилей, шага между соседними профилями, ориентации оси антенного блока относительно линии профиля и т.д.

3.4.2. Выбор размера участка и длины профилей

Для получения достоверного изображения при пространственно-временной фокусировке необходимо иметь сигналы, записанные с некоторым запасом по расстоянию вдоль поверхности, вокруг проекции предполагаемого объекта на поверхность грунта. Это необходимо для обеспечения снятия полной серии данных, суммирование по которой вдоль годографа отраженной от объекта волны даст максимально возможный вклад в получаемое изображение объекта. Таким образом, необходимо записать сигналы на некотором участке длиной L над предполагаемым объектом (газопроводом), где минимальная длина L пропорциональна глубине зондирования D : $L/D = 1-2$. Указанная длина определяется шириной диаграммы направленности антенного блока. При расположении проекции объекта на краю исследуемой области результат фокусировки не вполне достоверен, так как суммирование проводилось не по всей возможной серии сигналов, а только по половине, и еще меньше, если проекция объекта находится в углу области.

3.4.3. Определение расстояния между профилями

Для простоты последующего просмотра и проведения фокусировки антенны должны перемещаться вдоль нескольких параллельных профилей.

Шаг между соседними положениями антенного блока вдоль профиля $S_{\text{ант}}$ должен быть не более чем 25 см. Соблюдение этого условия обеспечивает необходимое качество построения изображения и прослеживание годографа отраженных волн от локальных объектов на вертикальном сечении вдоль профиля. Шаг между соседними положениями антенной системы вдоль профиля задается шагом датчика пути или скоростью перемещения антенн при сканировании в режиме постоянной скорости.

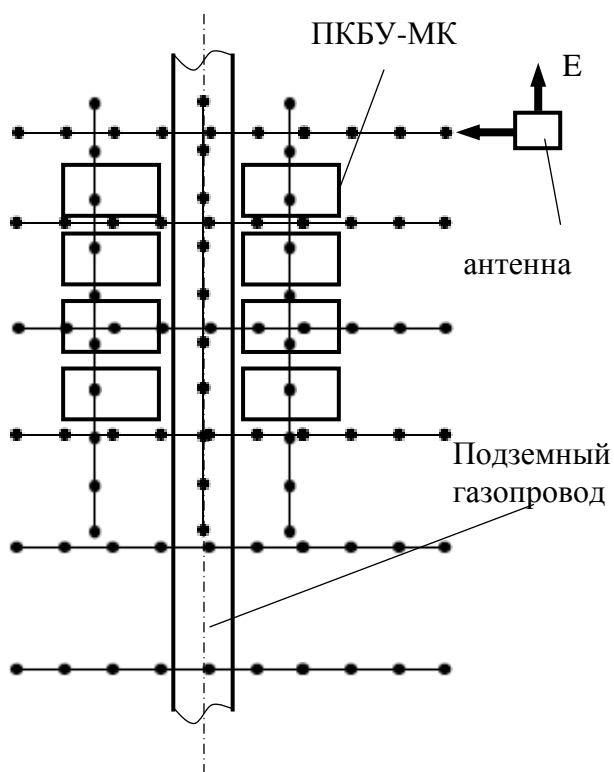
Расстояние между соседними профилями $S_{\text{пр}}$ не должно превышать ширины антенного блока (0,4-1,0 м). Соблюдение этого условия позволит выявить отражения от локальных объектов на участке зондирования. Оно также обеспечит качественное проведение трехмерной фокусировки. Требуемая минимальная ширина W_{min} участка проведения исследований и необходимое минимальное число профилей сканирования на длине участка $N_{\text{пр}}$ определяются по выражениям:

$$W_{\text{min}} \approx D;$$

$$N_{\text{пр}} \approx W_{\text{пр}}/S_{\text{пр}},$$

где D - диаметр (ширина) подземного сооружения (газопровода с установленными пригрузами, элементов инженерной защиты и т.д), м; $S_{пр}$ - шаг между соседними профилями, который составляет не более 0,4 - 1 м.

При поиске локальных объектов (грунтозадерживающих барьеров, отдельных балластирующих устройств), положение которых примерно известно, расстояние между соседними дорожками сканирования (профилями) не может браться более 0,2 - 0,4 D , где D - предполагаемая минимальная глубина возможных объектов зондирования. В противном случае такие объекты могут быть пропущены, так как окажутся вне области пересечения главных лепестков диаграмм передающей и приемной антенн. Для надежного выявления тонких линейных или сильно вытянутых объектов (трубопроводов) следует проводить измерения поочередно при двух ортогональных поляризациях излучения. Оптимальная ориентация антенного блока и направления профиля сканирования относительно направления МГ показаны на рисунке 3.11.



а



б

Рисунок 3.11 – Оптимальная ориентация антенного блока и направления дорожки (профиля) сканирования относительно МГ (а) и особенности перемещения антенны при сканировании в направлении, перпендикулярном МГ

3.5. Методика георадиолокационного диагностирования участков газопроводов в мерзлых грунтах

3.5.1. Выбор схемы сканирования

Схемы проведения сканирования на площадке кранового узла показаны на рисунке 3.12. Стрелки показывают направление движения антенного блока вдоль дорожки (профиля) и направление перехода от профиля к профилю. Зондирование может проводиться при одном направлении профилей или поочередно для двух ортогональных направлений.

Антенный блок георадара перемещается вдоль параллельных друг другу профилей сканирования. Для простоты последующей обработки и анализа данных профили сканирования должны быть параллельны друг другу (рисунок 3.25) или проходить вдоль двух перпендикулярных направлений x и y . Начало или конец профиля могут быть сдвинутыми по отношению к началу или концу другого профиля. Для получения более качественных результатов допускается проводить повторное сканирование по схеме движения, показанной на рисунке 3.12, но при другой ориентации антенного блока относительно профиля, чтобы получить качественные результаты.

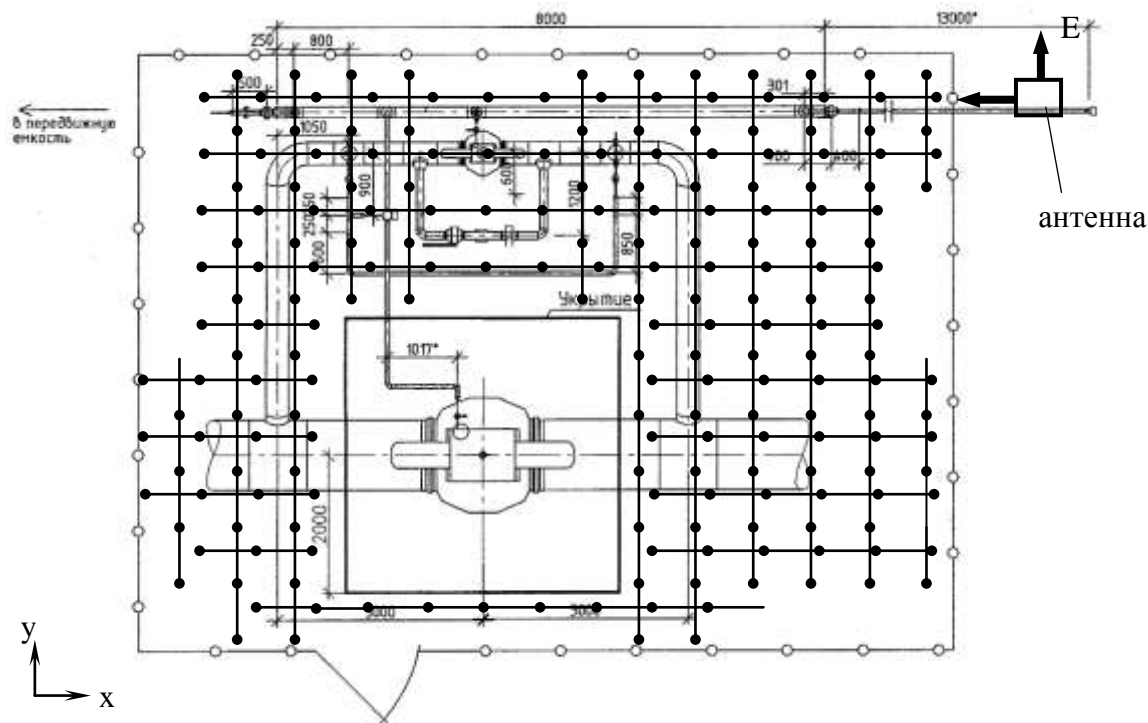


Рисунок 3.12. Схема сканирования грунта площадки кранового узла

Если участок зондирования имеет большую протяженность, то он разбивается на отдельные площадки длиной не более 50-100 м. Это делается для того, чтобы точность привязки была выше. При использовании для пространственной привязки датчика пути возможны ошибки из-за неровностей грунта, которые могут быть значительными, если профиль будет слишком длинным. По этим площадкам и производится сканирование, как показано на рисунках 2 и 3. Затем данные, полученные на отдельных площадках, объединяются программой обработки данных в один общий файл для всей исследуемой площади. При наличии препятствий, не позволяющих проводить зондирование вдоль прямолинейных и параллельных друг другу профилей, допускается проводить измерения с произвольными местами расположения антенного блока.

3.5.2. Порядок проведения исследований

Георадолокационные исследования проводятся вручную в соответствии с требованиями по технике безопасности. Перед началом проведения исследований определяются схемы проведения сканирования, размеры участков зондирования, размещение и число профилей, поляризация поля, ориентация антенного блока и другие параметры сканирования. По характеру работы режимы сканирования подразделяются на автономный и режим «реального времени» с использованием компьютера. Имеется три режима работы, различающихся по характеру записи сигналов и измерению положения антенного блока.

1-й режим. С использованием датчика пути в виде колеса, укрепленного на антенном блоке георадара. В этом режиме измерение координаты антенного блока вдоль профиля сканирования ведется автоматически датчиком пути. Оператор задает требуемое число программных усреднений сигнала, меняя скорость перемещения. Программа считывания данных в компьютер (со встроенной флэш-памятью или в режиме реального времени) производит усреднение всех сигналов георадара, снятых на каждом отрезке переключения датчика пути. Проводя сканирование с малой скоростью, оператор может получить большое число таких программных усреднений сигнала и, следовательно, высокое отношение сигнал-шум.

2-й режим. Режим постоянной скорости. В этом режиме координаты положений антенного блока будут устанавливаться в предположении постоянной скорости перемещения антенного блока. Оператор должен по возможности равномерно, без рывков и выдерживая постоянную скорость, перемещать антенный блок. Оператор задает требуемое число программных усреднений сигнала, устанавливая ту или иную скорость перемещения антенного блока (рисунок 3.13, а, б).



а



б



в



г

Рисунок 3.13 – Георадиолокационное сканирование грунта на участке МГ: а, б); при перемещении антенного блока по профилю; в, г) при размещении антенного блока в определенных точках

3-й режим. Режим записи сигналов в отдельных точках (положениях антенного блока). В этом режиме оператор дискретно перемещает антенный блок с заданным шагом вдоль профиля и в каждой такой точке профиля включает и затем выключает запись сигналов. Оператор задает требуемое число программных усреднений сигнала, устанавливая число усреднений сигналов в каждой точке либо регулируя время измерений сигналов в каждой точке. Этот способ является наиболее подходящим для измерений, когда

необходимо получить очень высокое отношение сигнал-шум. Время измерения сигналов в каждой точке может составлять несколько десятков секунд, в зависимости от уровня случайных помех техногенного характера (радиостанции, мобильная связь) и от желаемого уровня отношения сигнал-шум. Чем дольше проводятся измерения, тем выше отношение сигнал-шум, пропорционально корню квадратному от времени измерения сигналов (рисунок 3.13, в, г).

3.5.3. Подготовка к проведению исследований

Если зондирование проводится по открытому грунту, перед зондированием следует (при возможности) выровнять площадку зондирования и убрать мешающие предметы.

Размеры участка зондирования и длины профилей должны быть измерены рулеткой или лазерным дальномером. Расположение площадки или профилей должно быть привязано к ориентирам на местности. План местности с подробным описанием условий измерений и ориентиров привязки должен быть занесен в полевой журнал. Необходимо проводить фотодокументацию участка зондирования. пример выполнения мероприятий по назначению участка к проведению контроля показаны на рисунке 3.14.

При измерениях без датчика пути сканируемый участок большой длины следует разбить на множество коротких участков, длиной не более 10 м каждый. После окончания измерений данные, полученные на этих отдельных участках, должны объединяться в общий профиль. Такое разбиение участка сканирования позволит получить удовлетворительную точность привязки выявленных объектов и неоднородностей грунта к местности.

Занесение в журнал сведений о посторонних предметах, которые могут впоследствии оказаться на радиолокационном изображении и представлять помехи при интерпретации. Таковыми предметами являются столбы, опоры ЛЭП, металлические и железобетонные ограждения, металлические сооружения и механизмы, строительная техника и т.п.

При проведении георадиолокационных исследований в условиях распространения многолетнемерзлых грунтов необходимо на контрольных участках оборудовать термоизмерительные скважины, имеющие глубину, соответствующей предполагаемой глубине зондирования. Количество скважин определяется протяженностью участков контроля и расположением контролируемых объектов (например, в многолетнемерзлом грунте с ненарушенной структурой и в грунте засыпки МГ).



а)



б)



в)



г)



д)



е)

**Рисунок 3.14 – Подготовка к георадиолокационному обследованию участка МГ:
а) фотодокументирование общего вида участка; б) фотодокументирование наземных элементов МГ; в, г) разметка профиля с помощью рулетки; д) оборудование для определения геометрии профилей; е) измерение температуры грунтов в подготовленных скважинах**

Термоизмерения необходимо проводить непосредственно перед началом георадиолокационного обследования. По результатам термоизмерений определяется положение границ слоя сезонного промерзания-оттаивания и подстилающих его многолетнемерзлых грунтов. Результаты термоизмерений используются при последующей интерпретации радиограмм, полученных в ходе проведения георадиолокационного обследования участков МГ.

3.5.4. Порядок обработки и интерпретация результатов

Перечень исходных данных для проведения предварительной обработки и интерпретации результатов георадиолокационного обследования участка МГ следующий:

- данные, полученные при измерениях и сохраненные в памяти прибора или управляющего ПК;

- данные о расположении профилей на участке зондирования. Должны прилагаться план местности с нанесенными МГ и инженерно-геологические разрезы с продольным профилем подземного сооружения (газопровода);

- план и описание местности;

- характеристика условий проведения измерений. Необходимо указать наличие осадков или факт недавнего выпадения осадков, насколько был влажным или сухим грунт и т.п. Указываются характер и примерная величина неровностей поверхности, по которой перемещался антенный блок.

- описание и пробы грунта. Для грунта необходимо указать влажность, тип (глинистый, песчаный). Желательно знать уровень грунтовых вод. Иметь геологический разрез и информацию о геологическом строении участка.

Обработка данных предполагает предварительную, а также дополнительную и более детальную обработку сигналов и фокусировку. Предварительная обработка во многих случаях сразу дает достаточно хорошее представление о некоторых объектах зондирования, так что последующих обработки и фокусировки может не потребоваться.

Перед проведением обработки сигналов проверяется правильность ввода координат и длин профилей сканирования, положений антенного блока. Изучаются результаты предварительной обработки в виде вертикальных радиолокационных профилей или горизонтальных сечений. Проводится анализ выявленных объектов или других аномалий радиолокационного изображения.

Программа обработки должна обеспечивать необходимый набор средств визуализации результатов зондирования, который должен позволить провести качественную интерпретацию результатов:

- изображение вертикальных радиолокационных профилей с результатами предварительной обработки вдоль каждого профиля сканирования;
- изображение вертикальных и горизонтальных сечений исследуемого объема.

3.6. Адаптация георадиолокационного метода для диагностирования особенностей газопровода в многолетнемерзлых грунтах

3.6.1. Применяемое оборудование

Для исследований был использован георадар SIR-3000 (рисунок 3.15, а) с набором антенн с центральной частотой 270 МГц (рисунок 3.15, б), 100 МГц (рисунок 3.16, а) и бистатические антенны Subecho - 40 (то есть, излучающая и приемная антенны находились в отдельных корпусах) на 40 МГц (рисунок 3.16, б). Для скоростного анализа использовались две антенны на 100 МГц (GSSI) с оптоволоконной связью между ними. Для учета превышений поверхности по профилям использовался оптический нивелир AT20D. Для исключения переизлучения с передающей антенны для контроля расстояний применялись немагнитные рулетки. Профили в цифровом виде записывались в память блока управления SIR-3000 и в дальнейшем редактировались и обрабатывались в программном обеспечении RADAN 6.6 (GSSI, США). Для уменьшения влияния шума на всех участках съемка проводилась по точкам. Интервал стоянок по профилю с антеннами 270 МГц и при съемке скоростного профиля составлял 0,1 м, а при съемках с антеннами 100 МГц и 40 МГц – 0,2 м. На всех участках в блоке управления устанавливались следующие параметры перед съемкой (таблица 3.2).

Таблица 3.2 – Предустановки параметров съемки

Антенна (МГц)	40	100 (моно)	100 (пара)	270
Скорость передачи (кГц)	12	50	25	100
Режим съемки	По точкам			
Выборка	1024	1024	512	1024
Диапазон (нс)	2000	500	600	175
Усиление (число точек)	5	5	5	5
Фильтр LP_FIR (МГц)	80	300	300	700
Фильтр HP_FIR (МГц)	10	25	25	75

Под скоростью передачи понимают коэффициент передачи антенны в кГц. Имеет тактовую частоту 100 кГц. Выборкой называется каждая кривая развертки, составленная из ряда отдельных точек данных, которые называются выборками. Чем больше число выборок, тем более плавным будет контур кривой развертки и лучше вертикальное разрешение. Диапазон - это временное окно в наносекундах, в котором радар будет записывать отражения (время на двустороннее прохождение сигнала). Фильтр FIR – фильтр с конечной импульсной характеристикой без изменения фазы сигнала используется для уменьшения внешних помех. LP – для нижних частот, что означает, что любая частота ниже введенной будет пропускаться и регистрироваться системой. HP – для верхних частот. То есть любая частота выше введенной, также будет пропускаться и записываться системой.



а)

б)

Рисунок 3.15 – Блок управления (а) и антенна 270 МГц (б)



а)

б)

Рисунок 3.16 – Антенна 100 МГц (а) и бистатическая антенна 40 МГц (б)

3.6.2. Характеристика участка газопровода Бованенково-Ухта, 25,3 км

Работы на участке выполнялись с целью оценки эффективности георадиолокационного метода в условиях заболоченной тундры с возможным оттаиванием грунтов на отдельных участках. На рисунке 3.17 представлена схема расположения контрольных профилей на участке МГ в окрестности ПК 253.

Профиль, пересекающий первую нитку газопровода, расположен на удалении 285 м от контрольно-измерительной колонки КИК 256 + 15, в направлении против хода газа, и на удалении 335 м от вертолетного знака «25 км» по ходу газа. Профиль, пересекающий вторую нитку МГ, расположен на удалении 36 м от временного указателя ПК 254 в направлении по ходу газа.

Расстояние между осями газопроводов составляет 100 м. Участок измерений находится в низине. На 1-й нитке вперед по ходу газа от участка измерений справа от оси газопровода местность подтоплена талыми водами. Вследствие того, что на 2-й нитке, от отметки 252,45 и далее с правой стороны валика по ходу газа местность подтоплена, профиль контроля смещен относительно профиля, пересекающего первую нитку на 116 м.

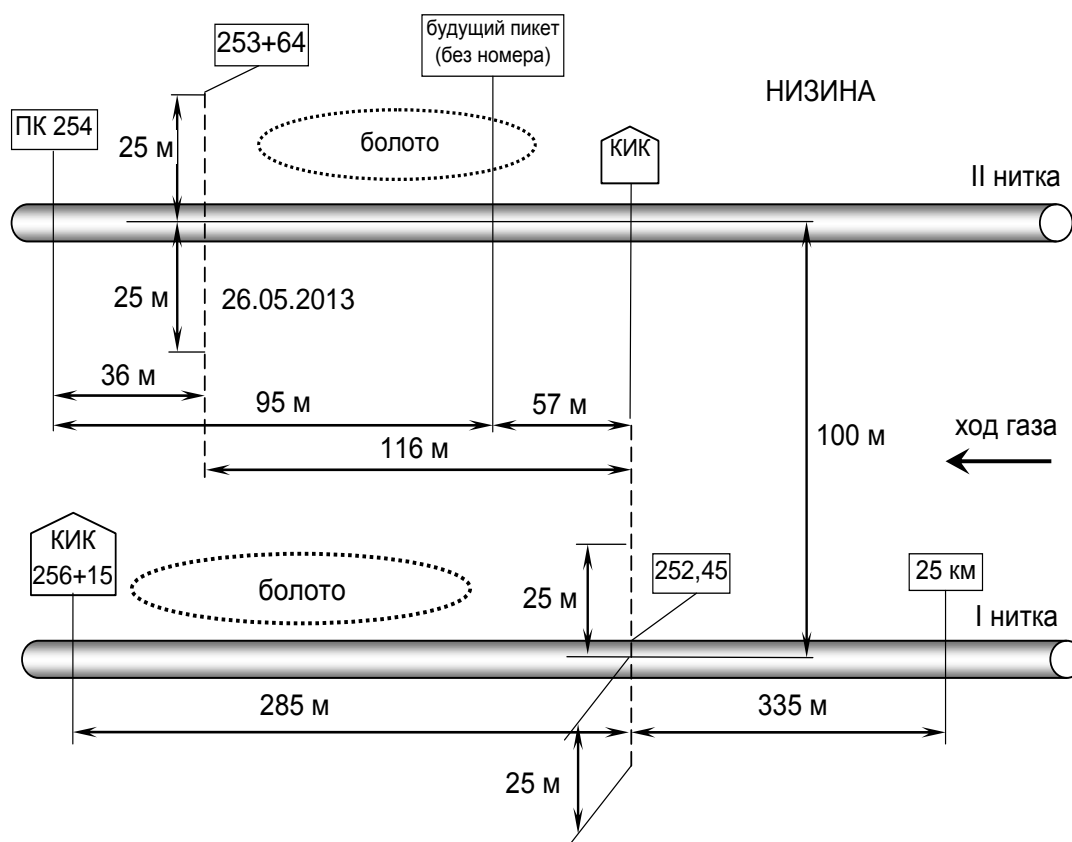
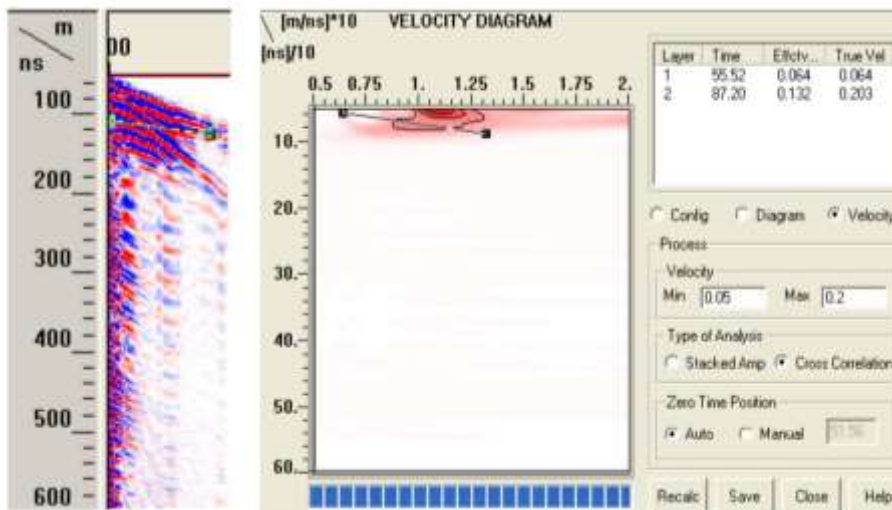


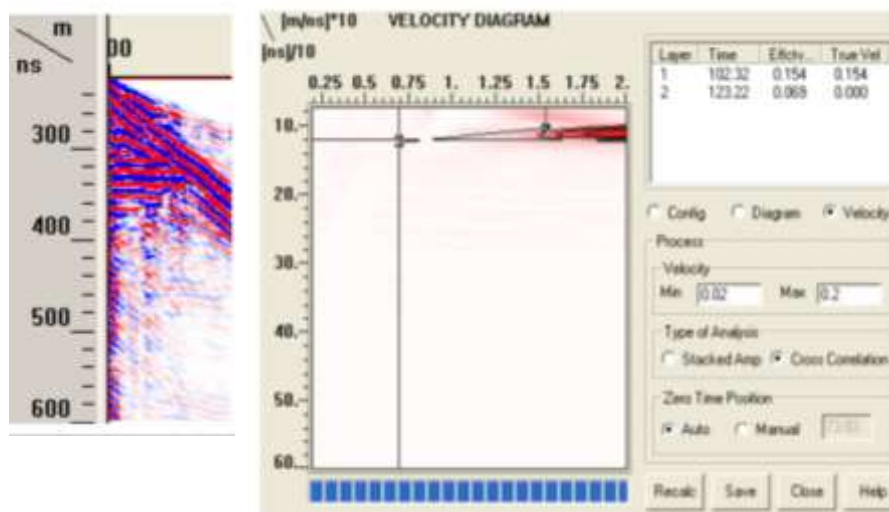
Рисунок 3.17 – Схема расположения георадарных профилей на 25,3 км МГ Бованенково-Ухта 1-я и 2-я нитки

3.6.3. Определение типа грунтов и выделение границы талый – мерзлый грунт на основе скоростного анализа

Для выделения информативных признаков георадиолокационного метода выполнен скоростной анализ радиоволновых диаграмм (рисунок 3.18).



а)



б)

Рисунок 3.18 – Результаты скоростного анализа данных: 2-я (а) и 1-я (б) нитки газопровода

По результатам скоростного анализа на обеих нитках выделяется два интервала скоростей:

- 0,06 – 0,07 м/нс, соответствующий приповерхностному слою оттаивания грунта;
- 0,13 – 0,15 м/нс, соответствующий мерзлым грунтам.

Особенности распределения грунтов на участке проведения исследований показаны на рисунке 3.19 и в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Грунтовые условия участка на 25,3 км МГ

Тип грунта	Мощность, м
торф мерзлый, среднеразложившийся	1,09
песок пылеватый, мерзлый, слабльдистый, незасоленный	0,52
суглинок мерзлый, льдистый, незасоленный	2,44
суглинок мерзлый, льдистый, слабзасоленный	3,38

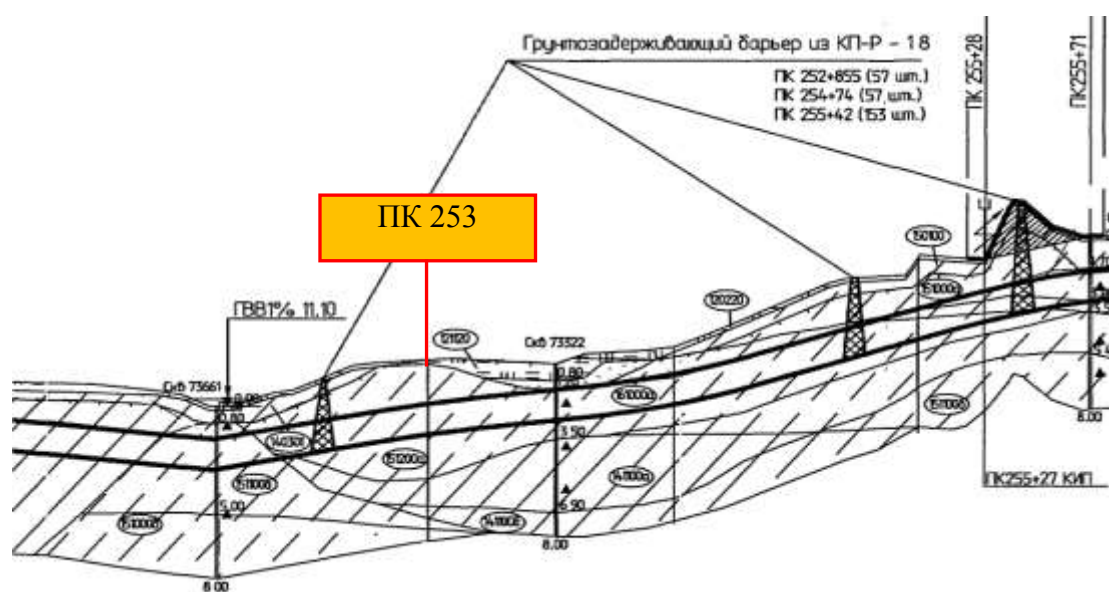
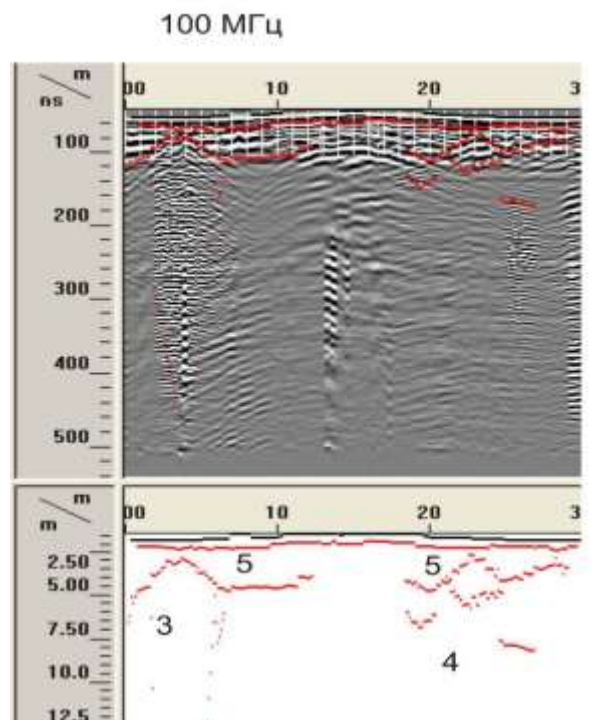
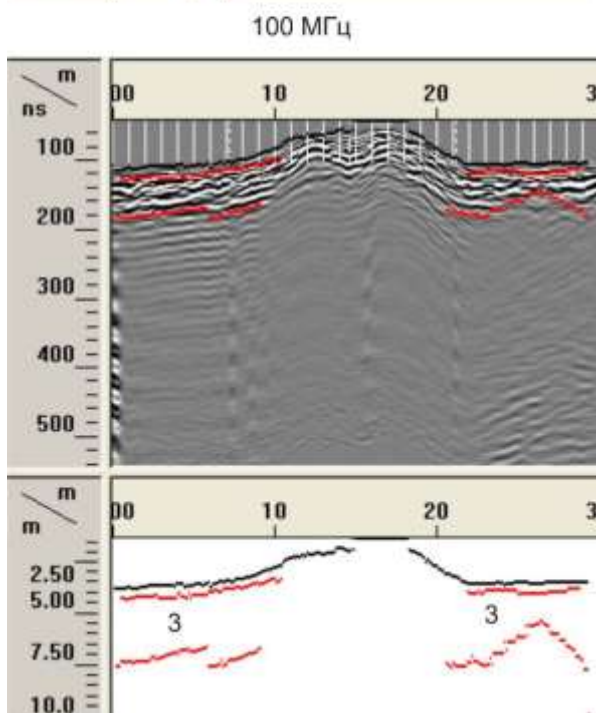
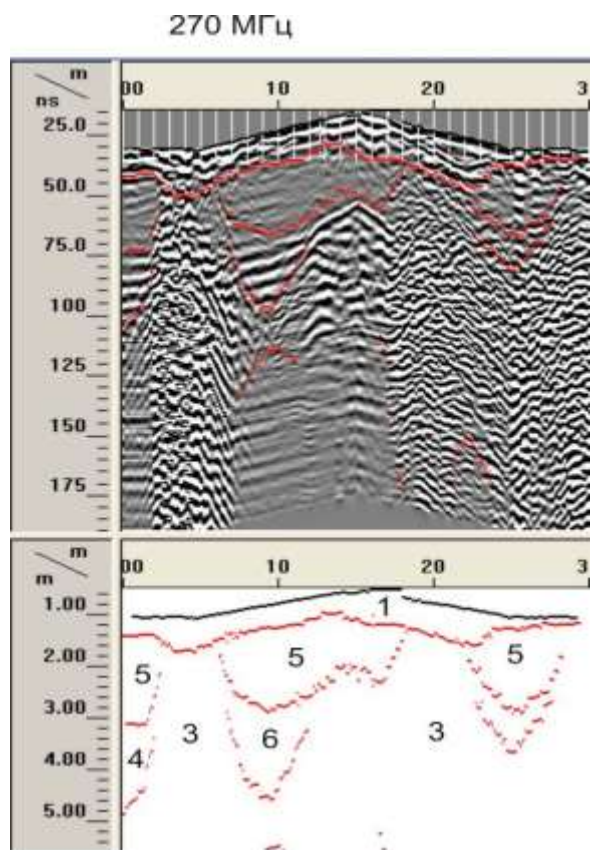
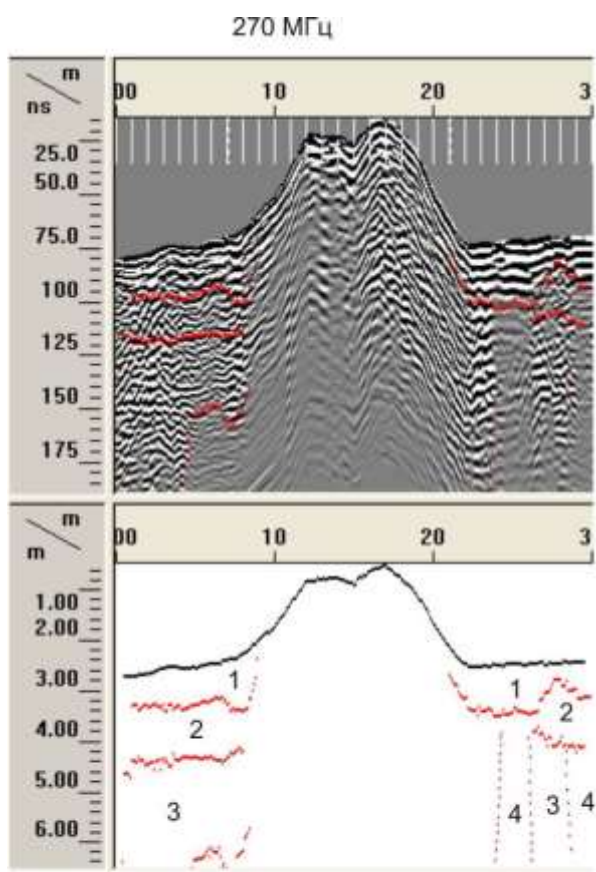


Рисунок 3.19 – Продольный профиль МГ на 25,3 км

Результаты интерпретации профилей на 1-й и 2-й нитках МГ представлены на рисунке 3.20. Было выделено несколько областей, отличающихся по типу волновой картины и интенсивности отражений (рисунок 3.21). Мощность оттаивания торфа по разрезам 270 МГц изменяется от 0,1 м в интервале 25-30 м на 1-й нитке до 0,5 м на краях валика на 2-й нитке. Отражения на краях валика на 2-й нитке (8-й и 22-й м на разрезе 270 МГц), возможно, связаны с сильным обводнением участка и протечкой поверхностной воды в образовавшиеся трещины при оседании грунта валика. На 1-й нитке в интервале 6-12 м на разрезе 270 МГц выявлена зона оттаивания околотрубного пространства (6).



а)

б)

1) Рисунок 3.20 – Результаты интерпретации георадарных профилей на 2-й (а) и 1-й (б) нитках МГ (25,3 км)



Рисунок 3.21 – Особенности формирования волновой картины на радиограммах, в зависимости от типа и состояния грунта (25,3 км)

3.6.4. Обоснование оптимальной частоты экранированных антенн

Для обоснования оптимальной частоты выявления конструктивных особенностей газопровода и состояния многолетнемерзлых грунтов были опробованы антенны на трех частотах: 40, 100, 270 МГц. Для оценки вертикального разрешения использовались средние амплитудные спектры принятых отражений, представленные на рисунке 3.22.

Вертикальное разрешение рассчитывалось по формуле:

$$R_{\text{верт}} = \frac{v}{4 \cdot f_c}, \quad (3.13)$$

где v - скорость отраженной волны, м/мкс; f_c – центральная частота возврата, МГц.

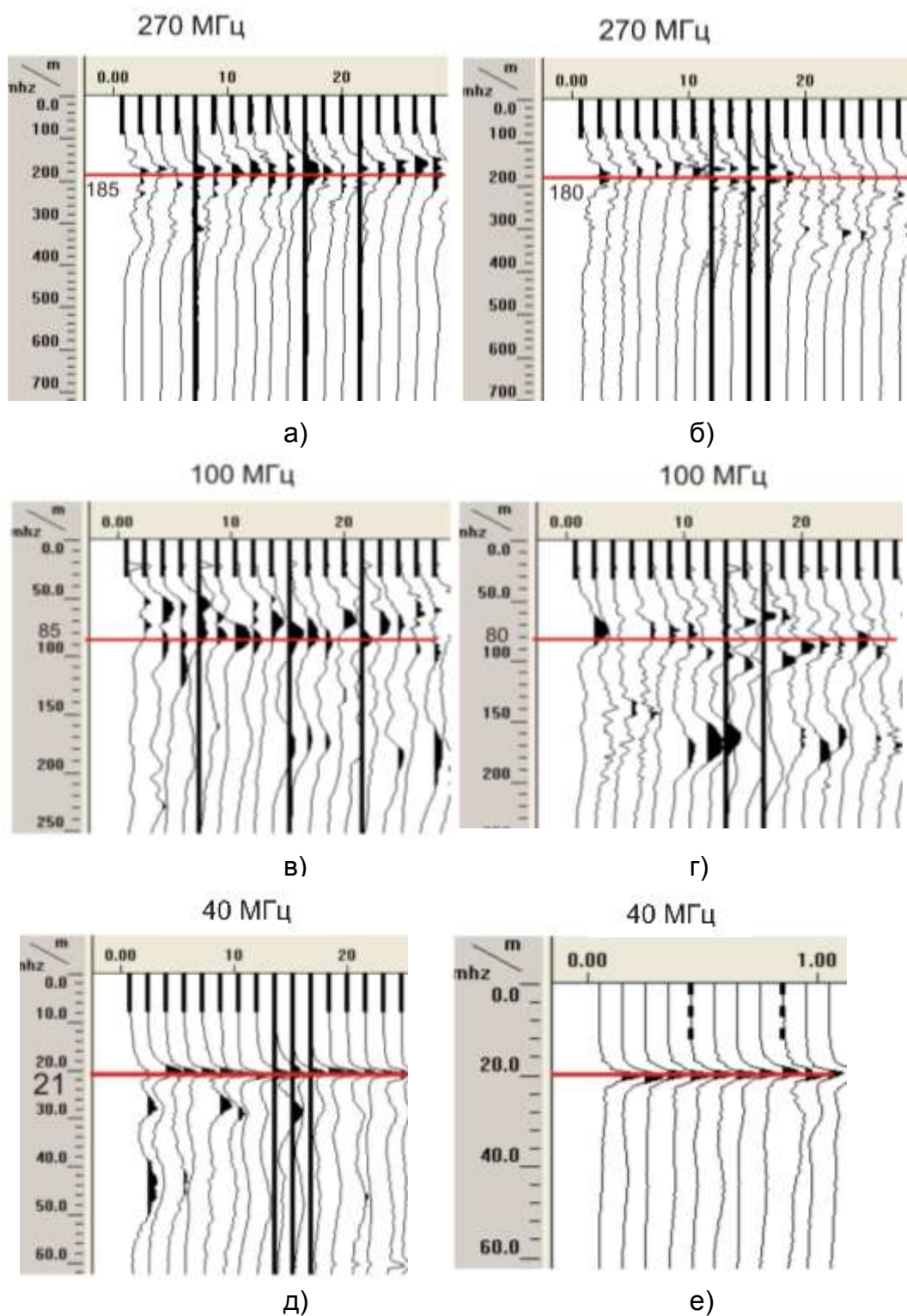


Рисунок 3.22 – Средние амплитудные спектры для антенн 270 МГц, 100 МГц и 40 МГц на 25,3 км МГ Бованенково-Ухта в пределах 2-й (а, в, д) и 1-й (б, г, е) ниток

Так как при скоростном анализе на обоих участках было выделено по два интервала скоростей, вертикальное разрешение рассчитывалось для обоих интервалов. Результаты расчета сведены в таблицу 3.4.

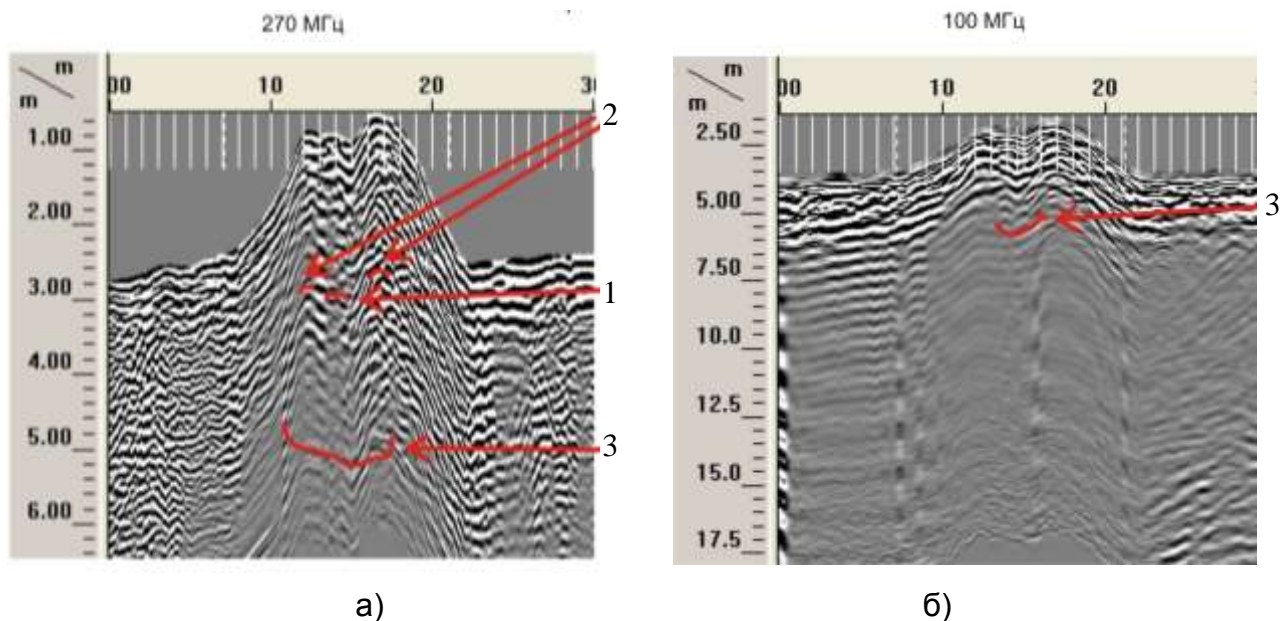
Таблица 3.4 – Результаты расчета вертикальных разрешений в зависимости от центральной частоты возврата и скорости отраженной волны (25,3 км)

Профиль	v , м/мкс	f_c , МГц	$R_{\text{верт}}$, м
270 МГц 2-я нитка	64	185	0,1
	132	185	0,2
270 МГц 1-я нитка	69	180	0,1
	154	180	0,2
100 МГц 2-я пнитка	64	85	0,2
	132	85	0,4
100 МГц 1-я нитка	69	80	0,2
	154	80	0,5
40 МГц 2-я нитка	64	21	0,8
	132	21	1,6
40 МГц 1-я нитка	69	20	0,9
	154	20	1,9

Очевидно, что наилучшим разрешением 0,1-0,2 м обладает антенна с частотой 270 МГц, несколько худшим разрешением 0,2-0,5 м антенна 100 МГц. Антенна с частотой 40 МГц характеризуется разрешением в диапазоне 0,5-1,9 м. Таким образом, наиболее оптимальным с точки зрения достигаемых разрешений является применение антенн с частотой 100 и 270 МГц.

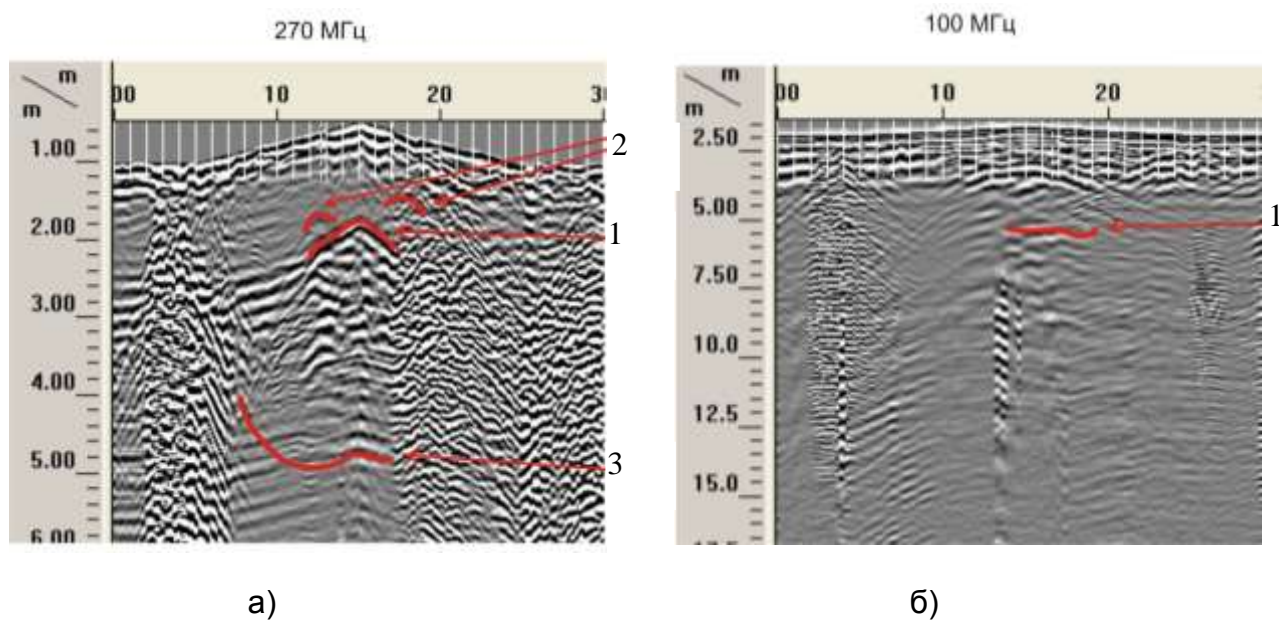
3.6.5. Исследование информативных признаков выявления конструктивных особенностей газопроводов

Положение трубы и фрагментов ПКБУ - МК по георадарным данным были выделены по разрезам, полученным с антенной 270 МГц (рисунок 3.23, 3.24). На 1-й нитке после проседания валика над трубой в летний период положение трубы хорошо определяется по наличию на разрезе гиперболы. На 2-й нитке положение конструкций менее отчетливо, так как валик над трубой состоит из блоков мерзлого грунта, между которыми возможны локальные пустоты, которые вносят отражения «затеняющие» отражения в виде гиперболы от трубы и элементов ПКБУ - МК. На разрезах с антенной 100 МГц уверенно выделяется дно траншеи. На 2-й нитке верхняя точка трубопровода на разрезе 270 МГц расположена на расстоянии 14 метров от начала профиля и на глубине 3,2 м от поверхности валика, фрагменты балластирующих устройств на расстоянии 12 и 16 метров и на глубине 2,9 метра от поверхности валика.



1 – газопровод; 2 – фрагменты балластирующих устройств; 3 – дно траншеи

Рисунок 3.23 – Глубинные разрезы, полученные по результатам измерений на 25,3 км МГ (2-я нитка) с использованием антенн 270 МГц (а) и 100 МГц (б)



1 – газопровод; 2 – фрагменты балластирующих устройств; 3 – дно траншеи

Рисунок 3.24 – Глубинные разрезы, полученные по результатам измерений на 25,3 км МГ (1-я нитка) с использованием антенн 270 МГц (а) и 100 МГц (б)

На 1-й нитке на разрезе 270 МГц верхняя точка трубопровода расположена на отметке 15,05 м от начала профиля и на глубине 1,74 м. Фрагменты балластирующих устройств расположены на расстоянии 12,76 м и 16,64 м от начала профиля на глубине 1,76 и 1,67 м соответственно. Дно траншеи расположено на глубине 3,56 м по разрезу 270 МГц и 3,64 м по разрезу 100 МГц от поверхности валика.

4. РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ ГАЗОПРОВОДОВ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ СВОЙСТВ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

4.1. Анализ нормативных требований к прочности подземных магистральных газопроводов

4.1.1. Нормативные требования

Магистральные газопроводы с избыточным рабочим давлением до 9,8 МПа (100 кгс/см²). Прочность магистральных газопроводов условным диаметром до 1400 мм включительно с избыточным рабочем давлением свыше 1,18 МПа (12 кгс/см²) до 9,8 МПа (100 кгс/см²) при одиночной прокладке и прокладке в технических коридорах регламентируется СП 36.13330.2012 [61]. В соответствии со СП 36.13330.2012 проверка прочности магистрального газопровода заключается в оценке уровня продольных и кольцевых напряжений, возникающих в стенках труб от действующих нагрузок и воздействий.

Условие прочности для продольных осевых напряжений имеет следующий вид [61, 62]:

$$|\sigma_{пр.Н}| \leq \psi_2 R_1, \quad (4.1)$$

где R_1 – расчетное сопротивление растяжению (сжатию) металла труб, МПа, определяемое по формуле:

$$R_1 = \frac{R_1^H m}{k_1 k_H}, \quad (4.2)$$

где R_1^H – нормативное сопротивление растяжению (сжатию) металла труб, принимаемое равным минимальному значению временного сопротивления по государственным стандартам и техническим условиям на трубы, МПа; m – коэффициент условий работы газопровода, принимаемый равным 0,6 для участков категории В, 0,75 для участков категорий I и II, 0,9 для участков категорий III и IV; k_1 – коэффициент надежности по материалу, принимаемый по таблице 4.1; k_H – коэффициент надежности по назначению газопровода, принимаемый по таблице 4.2.; ψ_2 – коэффициент, учитывающий двухосное напряженное состояние металла труб; при растягивающих продольных напряжениях ($\sigma_{пр.Н} \geq 0$) принимаемый равным единице, при сжимающих ($\sigma_{пр.Н} < 0$) определяемый по формуле:

$$\psi_2 = \sqrt{1 - 0,75 \left(\frac{\sigma_{кц}}{R_1} \right)^2} - 0,5 \frac{\sigma_{кц}}{R_1}. \quad (4.3)$$

Таблица 4.1 – Значения коэффициента k_1

Характеристика труб	k_1
Сварные из малоперлитной и бейнитной стали контролируемой прокатки и термически упрочненные трубы, изготовленные двусторонней электродуговой сваркой под флюсом по сплошному технологическому шву, с минусовым допуском по толщине стенки не более 5 % и прошедшие 100 % - ный контроль на сплошность основного металла и сварных соединений неразрушающими методами	1,34
Сварные из нормализованной, термически упрочненной стали и стали контролируемой прокатки, изготовленные двусторонней электродуговой сваркой под флюсом по сплошному технологическому шву и прошедшие 100%-ный контроль сварных соединений неразрушающими методами. Бесшовные из катаной или кованой заготовки, прошедшие 100 % - ный контроль неразрушающими методами	1,40
Сварные из нормализованной и горячекатаной низколегированной стали, изготовленные двусторонней электродуговой сваркой и прошедшие 100 % - ный контроль сварных соединений неразрушающими методами	1,47
Сварные из горячекатаной низколегированной или углеродистой стали, изготовленные двусторонней электродуговой сваркой или токами высокой частоты. Остальные бесшовные трубы	1,55

Таблица 4.2 – Значения коэффициента k_n

Условный диаметр трубопровода	Для газопроводов в зависимости от внутреннего давления p			Для нефтепроводов и нефтепродуктопроводов
	$p \leq 5,4$ МПа	$5,4 < p \leq 7,4$ МПа	$7,4 < p \leq 9,8$ МПа	
500 и менее	1,00	1,00	1,00	1,00
600 - 1000	1,00	1,00	1,05	1,00
1200	1,05	1,05	1,10	1,05
1400	1,05	1,10	1,15	-

Продольные осевые напряжения $\sigma_{пр.Н}$ МПа, определяются от расчетных нагрузок и воздействий с учетом упругопластической работы металла. В частности, для прямолинейных и упруго-изогнутых участков трубопроводов при отсутствии продольных и поперечных перемещений, просадок и пучения грунта продольные осевые напряжения определяются по формуле:

$$\sigma_{пр.Н} = \mu \sigma_{кц} - \alpha_t E \Delta t, \quad (4.4)$$

где μ – коэффициент Пуассона; α_t – коэффициент линейного расширения металла труб; E – модуль упругости материала труб; Δt – температурный перепад; $\sigma_{кц}$ – кольцевые напряжения от расчетного внутреннего давления, определяемые по следующей формуле:

$$\sigma_{\text{кц}} = \frac{p_p(D_H - 2\delta_H)}{2\delta_H}, \quad (4.5)$$

где p_p – расчетное внутреннее давление, вычисляемое по формуле

$$p_p = k_p p, \quad (4.6)$$

где k_p – коэффициент надежности по внутреннему давлению, принимаемый равным 1,10; p – рабочее давление; D_H – наружный диаметр трубы; δ_H – номинальная толщина стенки трубы.

Для предотвращения недопустимых пластических деформаций должны выполняться следующие условия:

$$\sigma_{\text{кц}}^H \leq \frac{m}{0,9k_H} R_2^H. \quad (4.7)$$

$$|\sigma_{\text{пр}}^H| \leq \psi_3 \frac{m}{0,9k_H} R_2^H, \quad (4.8)$$

где $\sigma_{\text{кц}}^H$ – кольцевые напряжения от нормативного внутреннего давления, МПа, определяемые по формуле (4.5) при $k_p = 1,0$; m , k_H – обозначения те же, что в формуле (4.2); R_2^H – нормативное сопротивление растяжению (сжатию) металла труб, принимаемое минимальному значению предела текучести по государственным стандартам и техническим условиям на трубы, МПа; $\sigma_{\text{пр}}^H$ – максимальные (фибровые) суммарные продольные напряжения в трубопроводе от нормативных нагрузок и воздействий; ψ_3 – коэффициент, учитывающий двухосное напряженное состояние металла труб; при растягивающих продольных напряжениях ($\sigma_{\text{пр}}^H \geq 0$) принимаемый равным единице, при сжимающих ($\sigma_{\text{пр}}^H < 0$) определяемый по формуле:

$$\psi_3 = \sqrt{1 - 0,75 \left(\frac{\sigma_{\text{кц}}^H}{\frac{m}{0,9k_H} R_2^H} \right)^2} - 0,5 \frac{\sigma_{\text{кц}}^H}{\frac{m}{0,9k_H} R_2^H}, \quad (4.9)$$

Максимальные суммарные продольные напряжения $\sigma_{\text{пр}}^H$ определяют от нормативных нагрузок и воздействий в соответствии с правилами строительной механики. В частности, для прямолинейных и упруго-изогнутых участков трубопроводов при отсутствии продольных и поперечных перемещений трубопровода, просадок и пучения грунта максимальные суммарные продольные напряжения от нормативных нагрузок и воздействий (внутренне-

го давления, температурного перепада и упругого изгиба) $\sigma_{\text{пр}}^H$, МПа, определяют по формуле:

$$\sigma_{\text{пр}}^H = \mu \sigma_{\text{кц}}^H - \alpha_t E \Delta t \pm \frac{E D_H}{2\rho}, \quad (4.10)$$

где μ , α_t , E , Δt – обозначения те же, что в формуле (4.4); ρ – минимальный радиус упругого изгиба оси трубопровода, м.

Магистральные газопроводы с избыточным рабочим давлением свыше 9,8 МПа (100 кгс/см²). Прочность магистральных газопроводов условным диаметром до 1400 мм включительно с избыточным рабочим давлением свыше 9,8 МПа (100 кгс/см²) до 24,52 МПа (250 кгс/см²) при одиночной прокладке и прокладке в технических коридорах регламентируется СТО Газпром 2-2.1-249 [62]. В соответствии с [62] проверка прочности магистрального газопровода заключается в оценке уровня кольцевых, продольных и эквивалентных напряжений, возникающих в стенках труб от действующих нагрузок и воздействий.

Условие прочности для кольцевых напряжений имеет следующий вид:

$$\sigma_{\text{кц}} \leq \min \{ F_y \sigma_y; F_u \sigma_u \}, \quad (4.11)$$

где $\sigma_{\text{кц}}$ – кольцевые напряжения от внутреннего давления, определяемые по следующей формуле

$$\sigma_{\text{кц}} = \frac{p_p D_H}{2\delta_H}, \quad (4.12)$$

где p_p – расчетное внутреннее давление, вычисляемое по формуле (4.6); D_H , δ_H – обозначения те же, что в формуле (1.5); σ_y – нормативный предел текучести материала труб; σ_u – нормативный предел прочности материала труб; F_y – расчетный коэффициент по пределу текучести; F_u – расчетный коэффициент по пределу прочности.

Значения коэффициентов F_y и F_u принимают в зависимости от категории участка газопровода по таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Значения коэффициентов F_y и F_u

Категория участка газопровода*	F_y	F_u
Н	0,72	0,63
С	0,60	0,52
В	0,50	0,43
* Н – нормальная, С – средняя, В – высокая		

На стадии эксплуатации газопровода условия прочности для продольных и эквивалентных напряжений имеют следующий вид

$$\sigma_{\text{пр}} \leq 0,9\sigma_y, \text{ если } \sigma_{\text{пр}} \geq 0, \quad (4.13)$$

$$\sigma_{\text{экр}} \leq 0,9\sigma_y, \text{ если } \sigma_{\text{пр}} < 0, \quad (4.14)$$

где $\sigma_{\text{пр}}$ – продольные напряжения, определяемые от расчетных нагрузок и воздействий с учетом поперечных и продольных перемещений газопровода в соответствии с правилами строительной механики; $\sigma_{\text{экр}}$ – эквивалентные напряжения, вычисляемые по формуле:

$$\sigma_{\text{экр}} = \sqrt{\sigma_{\text{кц}}^2 - \sigma_{\text{кц}}\sigma_{\text{пр}} + \sigma_{\text{пр}}^2}. \quad (4.15)$$

Для прямолинейных и упругоизогнутых участков газопроводов при отсутствии продольных и поперечных перемещений газопровода, просадок и пучения грунта продольные напряжения определяют по формуле

$$\sigma_{\text{пр}} = \mu\sigma_{\text{кц}} - E\alpha_t\Delta t \pm \sigma_{\text{и}}, \quad (4.16)$$

где μ , α_t , E , Δt – обозначения те же, что в формуле (4.4); $\sigma_{\text{и}}$ – изгибные напряжения, определяемые по одной из следующих формул:

$$\sigma_{\text{и}} = \frac{ED_{\text{н}}}{2\rho}, \quad (4.17)$$

$$\sigma_{\text{и}} = \frac{M_{\text{и}}}{W}, \quad (4.18)$$

где ρ – обозначение то же, что в формуле 4.10; $M_{\text{и}}$ – изгибающий момент; W – момент сопротивления сечения трубы.

При наличии поперечных перемещений газопровода вследствие просадок грунта продольные напряжения могут быть определены по формуле:

$$\sigma_{\text{пр}} = \frac{P}{F} + 0,5\sigma_{\text{кц}} \pm \sigma_{\text{и}}, \quad (4.19)$$

где P – продольное растягивающее усилие, возникающее вследствие поперечного перемещения трубопровода при просадке грунта; F – площадь поперечного сечения трубы.

4.2. Постановка задач расчета, исходные данные

Цель, задачи расчета:

- разработка и обоснование основных требований к участкам, на которых возможно возникновение оттаивания мерзлых грунтов, на основании классических методов расчета трубопроводов, проложенных в слабых просадочных грунтах;

- автоматизация расчета параметров НДС газопроводов на участках, на которых возможно возникновение оттаивания мерзлых грунтов, путем разработки алгоритма, основанного на применении метода конечных элементов;

- прогнозный расчет по проектным данным;

- расчет фактического напряженного состояния по результатам диагностики.

В рамках первой задачи необходимо провести анализ параметров напряженно-деформированного состояния газопроводов в пределах ореола оттаивания. При этом требуется рассмотреть все четыре различных варианта поведения трубопровода: осадка трубопровода в оттаивающем грунте (ограниченная и неограниченная), и всплытие трубопровода в пределах ореола оттаивания (ограниченное и неограниченное). Анализ проводится по классическим методикам расчета трубопроводов в слабых нестабильных грунтах [63-68]. На основе результатов расчета газопровода Бованенково-Ухта необходимо выработать основные положения, обеспечивающие нормальную эксплуатацию рассматриваемого объекта

В рамках второй задачи необходимо разработать универсальный алгоритм расчета газопровода с переменными значениями характеристик труб и грунта по длине рассматриваемого участка. Наиболее подходящим методом для реализации автоматического расчета является метод конечных элементов (МКЭ).

Разрабатываемый алгоритм должен позволять проводить прогнозный расчет изменения параметров НДС на участках с предполагаемым оттаиванием грунта, а также при необходимости определения фактического НДС учитывать уточняющие данные, полученные в ходе проведения диагностики.

Исходными данными для осуществления прогнозных расчетов являются [70, 71]:

- координаты контрольных точек участка (в соответствии с проектом). Контрольными (узловыми), как правило назначаются точки, соответствующие границам участков с различными характеристиками используемых труб; границам участков с различными характеристиками грунтов; границам участков с дополнительной балластировкой (в соответствии с проектом); углам поворота трассы; крановым узлам и т.п.).

- характеристики трубопровода (диаметр, толщина стенки, предел текучести материала, предел прочности);

- характеристики грунта;

- характеристики изоляции, футеровки и пр. покрытий, оказывающих равномерное давление по длине рассчитываемого участка;

- вес и длина балластирующих устройств, устанавливаемых на трубопровод в соответствии с проектом;

- вес и размеры крановых узлов и другой трубопроводной арматуры, предусмотренной проектом.

При проведении расчета фактического напряженного состояния трубопроводов требуется ввод дополнительных исходных данных, заключающихся в виде новых координат положения контрольных точек, а именно значений перемещений узловых точек, произошедших в ходе эксплуатации и выявленных при проведении диагностики.

4.3. Схемы перемещений газопровода в оттаивающих грунтах

Обычно сооружение газопровода на участках распространения многолетнемерзлых грунтов осуществляется в период, когда грунт находится в мерзлом состоянии, так как при сезонном оттаивании проведение строительно-монтажных работ становится практически невозможным [63, 72].

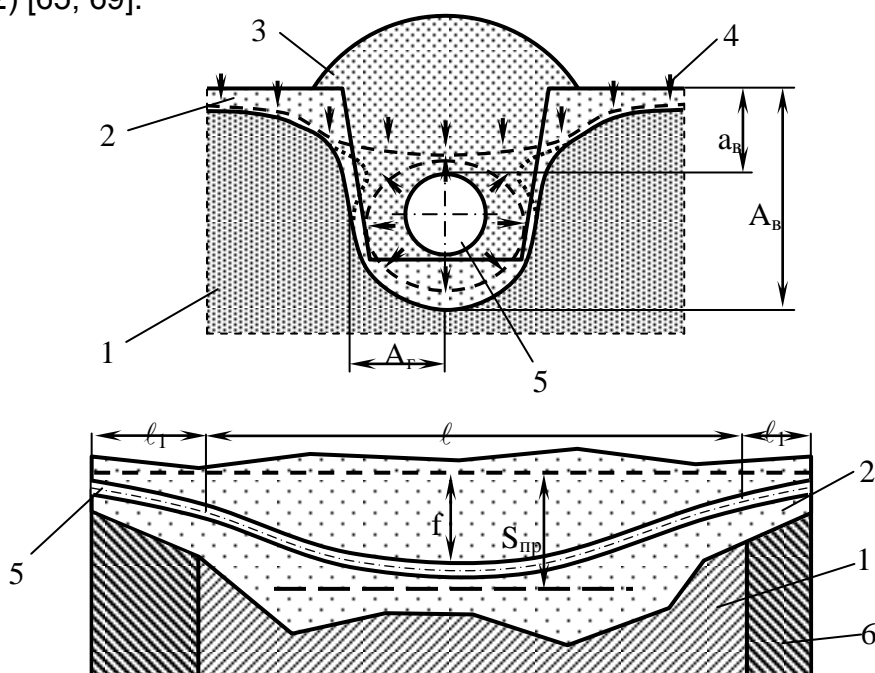
Начальное состояние подземного газопровода определяется положением уложенной в траншею и засыпанной грунтом трубы. Поскольку трубы засыпаются мерзлым рыхленным грунтом, то цементационных связей между трубой и мерзлым грунтом нет. Газопровод может относительно свободно перемещаться в грунте, если в нем появляются незначительные продольные усилия.

Ввод газопровода в эксплуатацию может осуществляться с пропуском по нему продукта, имеющего температуру ниже 0°C и выше 0°C . В первом случае условия эксплуатации не ухудшаются, поскольку оттаивания мерзлого грунта не происходит. Во втором случае между газопроводом и грунтом устанавливается тепловой поток, который постепенно оттаивает грунт вокруг трубы в некоторой области. Вследствие изменения физических свойств грунта вдоль трубопровода за один и тот же промежуток времени в различных сечениях труб величина оттаивания будет различной. Следовательно, и величина поперечных перемещений отдельных участков также будут различаться. Особенно характерно такое положение для грунтов, имеющих слоистую и ячеистую текстуру, а также грунтов с жильными и повторно-жильными льдами. В таких грунтах возникают провалы грунта, в результате чего в местах провалов трубопровод провисает и изгибается [63, 64, 71].

Потеря устойчивости газопровода может происходить в результате его всплытия при подъёме уровня грунтовых вод на участках с распространения многолетнемерзлых грунтов

несливающегося типа, а также при таянии льдистых многолетнемерзлых грунтов сливающегося типа. В последнем случае талый грунт представляет собой взвешенную массу, в которой вследствие её большой плотности может всплывать даже оснащенный пригрузами газопровод. Также возможно, в таких условиях, контейнерные балластирующие устройства, заполняемые минеральным грунтом, не будут достаточными для обеспечения отрицательной плавучести газопровода.

Схемы подземного газопровода в оттаивающем грунте в летний период показаны на рисунках 4.1 и 4.2. Предполагается, что в начальный момент времени на данном участке труба располагалась в горизонтальном положении. Через некоторый период времени, вследствие оттаивания грунта, газопровод опускается (рисунок 4.1) или всплывает (рисунок 4.2) [65, 69].

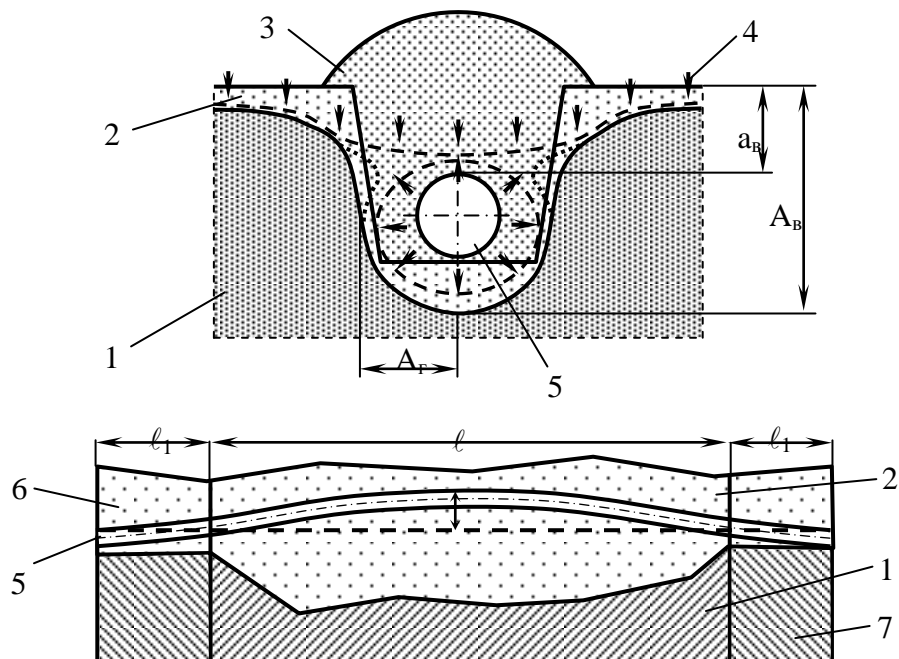


1 – промороженный водонасыщенный грунт; 2 – оттаявший грунт; 3 – грунт засыпки; 4 - направление распространения границ оттаивания; 5 – трубопровод; 6 – слабоувлажнённый промороженный грунт

Рисунок 4.1 – Просадка газопровода в талом грунте

В летний период, вследствие сезонного растепления грунта в приповерхностном слое (под действием солнечного излучения, осадков, воздушного теплообмена), граница зоны оттаивания вокруг газопровода может сливаться с сезонноталым грунтом, в результате чего формируется область грунта, обладающая низкой несущей способностью и имеющая глубину, превышающую глубину заложения газопровода. Потеря устойчивости участка газопровода, расположенного в такой области может выражаться в следующем [72]:

- всплытие или всплытие и выпучивание;
- образование горизонтального искривлённого участка;
- осадка или осадка и выпучивание.



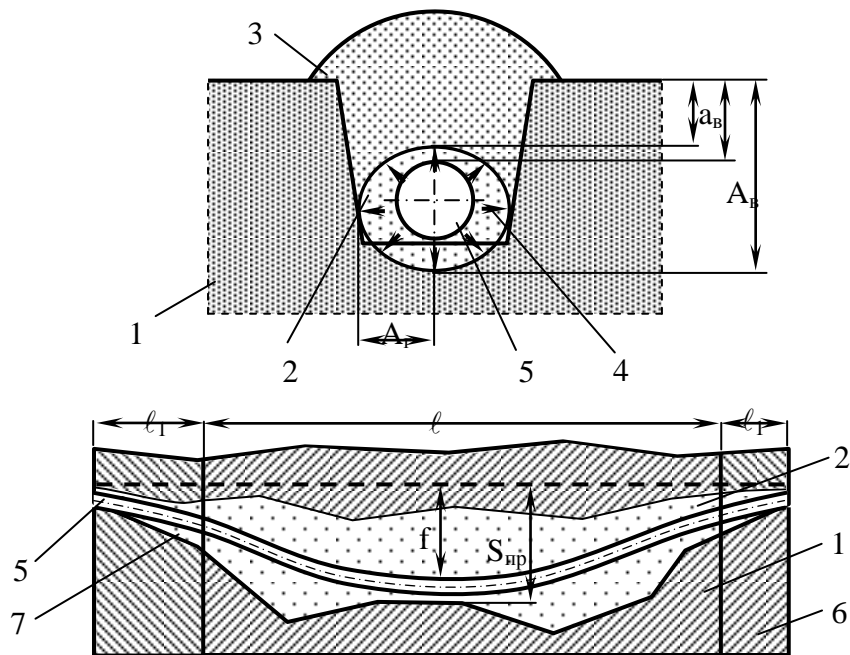
1 – промороженный водонасыщенный грунт; 2 – оттаявший сильноувлажнённый грунт; 3 – грунт засыпки; 4 – направление распространения границ оттаивания; 5 – трубопровод; 6 – оттаявший слабоувлажнённый грунт; 7 – промороженный слабоувлажнённый грунт

Рисунок 4.2 – Всплывший в талом грунте участок газопровода

При вертикальных или горизонтальных перемещениях участков газопровода в точках перегиба возникает опасное для прочности труб напряженное состояние.

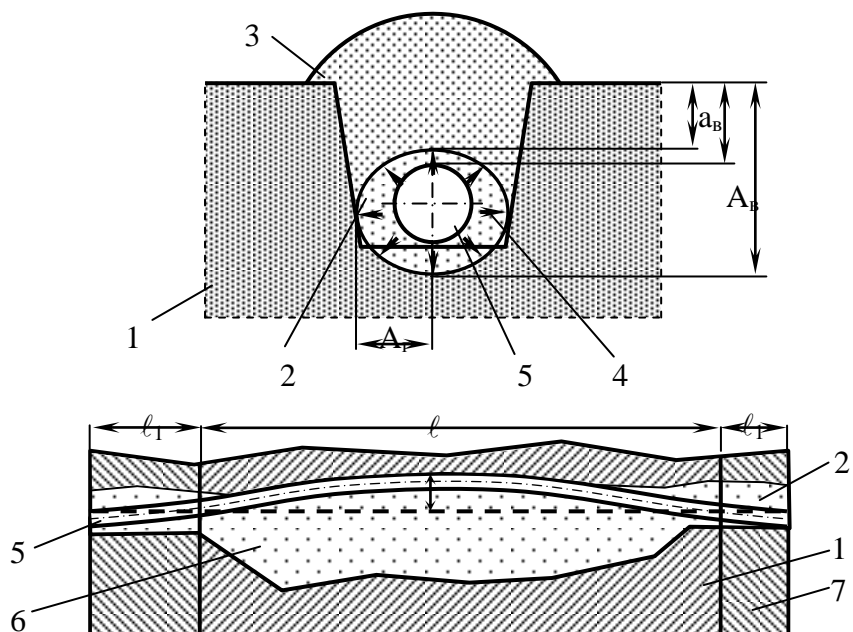
В том случае, если в летний период граница оттаивания промороженного грунта вокруг газопровода не сливается с сезонно-талым слоем или в зимний период эксплуатации сезонно-талый слой грунта промерзает на некоторую глубину, возможные перемещения газопровода будут ограничиваться областью талого грунта вокруг газопровода. Возможный вертикальный профиль участка газопровода в данном случае будет определяться геометрией границ области оттаявшего грунта, которые в свою очередь определяются грунтовыми условиями (рисунок 4.3).

При всплытии участка газопровода в пределах изолированной от поверхности талой области, верхняя образующая всплывающих труб, взаимодействуя с мёрзлой кровлей, будет способствовать её оттаиванию, с последующим возможным выходом участка на поверхность (рисунок 4.4).



1 – промороженный водонасыщенный грунт; 2 – оттаявший грунт; 3 – грунт засыпки; 4 - направление распространения границ оттаивания; 5 – трубопровод; 6 – слабоувлажнённый промороженный грунт; 7 – слабоувлажнённый оттаявший грунт

Рисунок 4.3 – Просадка газопровода в пределах области талого грунта, изолированной от земной поверхности мёрзлой кровлей



1 – промороженный водонасыщенный грунт; 2 – оттаявший слабоувлажнённый грунт; 3 – грунт засыпки; 4 - направление распространения границ оттаивания; 5 – трубопровод; 6 – оттаявший сильноувлажнённый грунт; 7 – промороженный слабоувлажнённый грунт

Рисунок 4.4 – Всплытие газопровода в пределах области талого грунта, изолированной от земной поверхности мёрзлой кровлей

В том случае, если всплывающий участок газопровода не сможет преодолеть сопротивление мёрзлой кровли, его профиль будет определяться профилем кровли на границе с областью оттаивания.

4.4. Нагрузки и воздействия на газопровод в мерзлых и оттаивающих нестабильных грунтах

Функциональные нагрузки на трубопроводы. Функциональные нагрузки – это нагрузки, обусловленные процессом эксплуатации трубопровода. К функциональным нагрузкам относят внутреннее давление транспортируемого продукта, температурные воздействия, весовые нагрузки, упругий изгиб газопровода [63, 64, 72].

Под термином нормативное рабочее давление понимается наибольшее внутреннее давление, при котором обеспечивается заданный режим эксплуатации трубопровода. расчетным давлением является значение нормативного рабочего давления увеличенного на коэффициент надежности по нагрузке.

Температурные воздействия обуславливаются разностью между максимальной (минимальной) температуры стенки трубопровода во время эксплуатации и минимальной (максимальной) температурой, при которой фиксируется расчетная схема трубопровода (свариваются захлесты, привариваются компенсаторы и т.п.).

Весовые нагрузки определяются с учетом веса труб, транспортируемого продукта, противокоррозионного и теплоизоляционного покрытий.

Нормативные значения весовых нагрузок (Н/м) вычисляются по следующим формулам:

- собственный вес трубы:

$$q_{\text{тр}} = 7850gF_{\text{тр}}, \quad (4.20)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с²; $F_{\text{тр}}$ – площадь поперечного сечения трубы, м².

- вес изоляционного (теплоизоляционного) покрытия:

$$q_{\text{из}} = \frac{\pi}{4} ((D_{\text{из}})^2 - (D_{\text{н}})^2) g \gamma_{\text{из}}, \quad (4.21)$$

где $D_{\text{из}}$ – диаметр трубопровода с учетом изоляции, м; $D_{\text{н}}$ – наружный диаметр трубопровода, м; $\gamma_{\text{из}}$ – плотность изоляционного (теплоизоляционного) покрытия, кг/м³.

- вес транспортируемого газа:

$$q_{\text{газ}} = 2150 \gamma_{\text{газ}} g \frac{p_a D_{\text{вн}}^2}{zT}, \quad (4.22)$$

где $\gamma_{\text{газ}}$ – плотность газа, кг/м³ (при 0 °С и 1013 гПа); p_a – абсолютное давление газа в газопроводе, МПа; $D_{\text{вн}}$ – внутренний диаметр трубы, м; z – коэффициент сжимаемости газа; T – абсолютная температура, К.

Допускается вычислять погонный вес природного газа по следующей формуле

$$q_{\text{газ}} = 10^2 p D_{\text{вн}}^2, \quad (4.23)$$

где p – рабочее давление, МПа.

Весовые нагрузки, в совокупности с воздействиями со стороны мерзлого грунта приводят к возникновению изгибающего момента, и, как следствие, к повышению уровня механических напряжений. Величину изгибных напряжений, возникших в металле трубы под действием этих нагрузок ($\sigma_{\text{изг}}$), определяем при помощи разработанного алгоритма, основанного на методе конечных элементов.

При этом методикой необходимо предусмотреть учет влияния внутреннего давления, температурных воздействий, а также упругого изгиба оси трубопровода, появившегося в процессе его сооружения, если таковой имеется.

Упругий изгиб трубопровода появляется в процессе его сооружения на участках, где происходит изменение направления его оси, которое возможно осуществить без применения кривых холодного гнутья. Упругий изгиб трубопровода учитывают при проверке его прочности.

Расчетные значения нагрузок получают умножением нормативных значений на коэффициенты надежности по нагрузке n , приведенные в таблице 4.4.

Таблица 4.4 - Значения коэффициентов надежности по нагрузке

Нагрузка	n
Масса (собственный вес) трубопровода и обустройств	1,10
Воздействие предварительного напряжения трубопровода (упругий изгиб и др.)	1,00
Внутреннее давление для газопроводов	1,10
Масса продукта	1,00
Температурные воздействия	1,00

Нагрузки со стороны мерзлого грунта. Все вечномерзлые грунты относятся к категории нестабильных структурно-неустойчивых просадочных грунтов. При оттаивании таких грунтов возникают дополнительные внешние воздействия, проявляющиеся в возник-

новении осадки трубопровода, подъемной силы воды, выделившейся при оттаивании, а также в изменении веса грунта засыпки [65, 66, 71].

Осадку оттаивающего основания следует определять по формуле

$$S = S_{th} + S_p \quad (4.24)$$

где S_{th} – составляющая осадки основания, обусловленная действием собственного веса оттаивающего грунта, определяемая экспериментально и представленная в проектной документации;

S_p – составляющая осадки основания, обусловленная дополнительным давлением на грунт от действия веса трубопровода и грунта засыпки. Величина этой составляющей осадки зависит от механических свойств грунта и может быть определена по выражению:

$$S_p = \frac{q}{C} \quad (4.25)$$

где q – давление на грунт основания, C – коэффициент постели грунта, который может быть определен по формуле:

$$C = \frac{E}{H_c(1 - 2\mu^2)} \quad (4.26)$$

где E и μ – средние (в пределах зафиксированной глубины сжимаемой толщи H_c) значения модуля деформации и коэффициента Пуассона, которые в свою очередь определены проектом.

Величина коэффициента постели грунта, в случае, если значения модуля деформации и коэффициента Пуассона на рассматриваемом участке проектом не установлены, может быть ориентировочно принята по справочным данным. Для некоторых типов грунтов данная характеристика представлена в таблице 4.5.

Нагрузка от выталкивающей силы воды, приходящаяся на единицу длины трубопровода, в соответствии с ВСН 007-88 «Строительство магистральных и промысловых трубопроводов [35]. Конструкции и балластировка», определяется по выражениям:

$$q_B = F_{обв} \gamma_B g \quad (4.27)$$

$$F_{обв} = \frac{D_H^2}{8} (\alpha - \sin \alpha) \quad (4.28)$$

$$\alpha = \begin{cases} 2\pi, & \text{если } h_B < h \\ 2\pi - \arccos \frac{2(h_0 - h_B)}{D_H}, & \text{если } h < h_B < h_0 \\ 2\arccos \frac{2(h_B - h_0)}{D_H}, & \text{если } h_0 < h_B < H \\ 0, & \text{если } h_B > H \end{cases} \quad (4.29)$$

где γ_B - плотность воды с учетом растворенных в ней солей. g - ускорение свободного падения ($g = 9,81 \text{ м/с}^2$); D_H - наружный диаметр трубы с учетом изоляционного покрытия и футеровки; h_B - расстояние от верха засыпки до расчетного уровня воды; h , h_0 , H - соответственно расстояния от верха засыпки до верхней образующей, оси и нижней образующей трубы.

Таблица 4.5 – Значения коэффициента постели грунтов естественного основания

Грунт основания	Содержание по массе зерен, крупнее	Коэффициент постели K_s , МН/м ³ , при расположении грунта основания	
		выше зоны опасного капиллярного поднятия грунтовых вод	в зоне опасного капиллярного поднятия грунтовых вод
Песок крупный и гравелистый	0,5 мм, более 50 %	85	80
Песок средней крупности	0,25 мм, более 50 %	70	65
Песок мелкий	0,1 мм, более 75 %	60	45
Песок пылеватый	0,1 мм, менее 75 %	50	35
Супесь	0,05 мм, более 50 %	40	30
Суглинок, глина	0,05 мм, более 40 %	75	55
Супесь, суглинок и глина пылеватые	0,05 мм, менее 40 %	65	45

1 Высоту опасного капиллярного поднятия грунтовых вод надлежит принимать от горизонта грунтовых вод:

0,3 м - для крупного песка; 0,5 м - для песка средней крупности; 1,5 м - для песка пылеватого; 2 м - для суглинка, суглинка и супеси пылеватых и глины.

Примечание - Приведенные значения коэффициентов постели грунтов соответствуют естественной плотности их сложения при коэффициенте пористости e , равном 0,5 - 0,7; при $e > 0,7$ значения коэффициентов следует понижать на 35 %.

На обводненных участках трубопроводов, сложенных грунтами, которые могут перейти в текучепластическое состояние, при определении выталкивающей силы воды вместо плотности воды γ_B следует принимать плотность разжиженного грунта, определяемую по данным изысканий;

Вес грунта засыпки должен определяться с учетом оттаивания содержащейся в нем воды.

Удельный вес грунта с учетом взвешивающего действия воды γ_{sb} определяется по формуле

$$\gamma_{sb} = \frac{10(\rho_s - \rho_w)}{1 + e} \quad (4.30)$$

где ρ_s - плотность частиц грунта, определяемая проектом; ρ_w - плотность воды, принимаемая равной 1000 кг/м^3 ; e - коэффициент пористости грунта также определяется проектом.

Таким образом, вес грунта засыпки на единицу длины трубопровода в пределах ореола оттаивания может быть определен по выражению

$$q_{гр} = \gamma_{sb} V_{гр}, \quad (4.31)$$

где $V_{гр}$ – объем занимаемый грунтом засыпки, приближенно может быть определен по выражению:

$$V_{гр} = D_n h_{ср}, \quad (4.32)$$

где D_n – наружный диаметр трубопровода с учетом, изоляции, теплоизоляции, а также балластирующих устройств (при их наличии), м; $h_{ср} = h_b + (h_o - h_b)/2$, м; h_o , h_b - глубина залегания оси и верхней образующей трубопровода соответственно, м.

Величина $q_{гр}$, определенная по формуле (4.31) должна суммироваться с другими весовыми нагрузками.

4.5. Особенности поведения участков газопровода в нестабильно мерзлых грунтах

К категории нестабильных структурно-неустойчивых просадочных грунтов относятся все вечномерзлые грунты. В этих грунтах при оттаивании резко нарушается структура, что обуславливает увеличение осадок, уменьшение несущей способности, ухудшение физико-механических свойств. Значительные осадки этих грунтов обусловлены тем, что в природных условиях они являются недоуплотненными, так как при незавершенной консолидации образовались структурные связи, препятствующие их уплотнению, а при оттаивании эти связи нарушаются [64, 83].

Газопровод может быть уложен в пределах слоя сезонного промерзания и оттаивания грунта (деятельный слой), ниже деятельного слоя, а также в пределах слоя многолетнемерзлого грунта. Температура транспортируемого продукта по газопроводу может

быть как положительной, так и отрицательной, причем технология транспорта может предусматривать изменение режимов температур, которые связаны с условиями подготовки газа к транспорту на компрессорных станциях. В зависимости от температуры транспортируемого газа участки газопровода делятся на горячие, холодные и теплые [63]. Под горячим понимается участок, температура которого в течение всего года выше 0 °С, под теплым – участок, на котором температура может быть выше и ниже 0 °С, но среднегодовая – ниже нуля, под холодным – участок, температура труб на котором ниже 0 °С, в любое время года. Очевидно, что на горячем участке будет происходить только оттаивание грунта, на теплом – периодическое оттаивание-замерзание, а на холодном оттаивания не будет.

Изменение температуры грунта, окружающего трубопровод, с положительной на отрицательную, вне зависимости от того вызвано ли это температурой окружающего воздуха или продукта, обуславливает морозное пучение грунта. Эксплуатация газопроводов в условиях вечномерзлых грунтов может осуществляться по одному из двух принципов использования грунта в качестве оснований: первый – сохранение вечномерзлого грунта в основании газопровода в естественном мерзлом состоянии, второй – допущение оттаивания грунта в основании газопровода. В первом случае предполагается неизменность первоначальное положение трубопровода, что гарантирует возможность его безопасной эксплуатации. Во втором случае оттаивание грунта в основании газопровода будет вызывать пространственные перемещения трубы, в том числе провисания локальных участков, которые при определенных условиях могут вызвать даже разрушение газопровода. Для предотвращения аварийных ситуаций в процессе эксплуатации газопровода требуется прогнозирование потенциально опасных участков и мониторинговое наблюдение за их поведением.

Наиболее опасные места с точки зрения прочности газопровода возникают в районе неравномерной деформации грунта (осадки, пучения), т.е., в первую очередь, на границе смены грунтов с разными свойствами, например мерзлый и талый или пучинистый и непучинистый грунт. В общем случае подземный трубопровод, находящийся под воздействием внутренних и внешних сил, может изменить свое положение относительно положения, занимаемого им в период укладки, и занять любое пространственное положение [63]. Перемещение какого-либо участка труб вверх называется выпучиванием или всплытием, перемещение вбок – боковым перемещением, а вниз – осадкой.

Выпучивание труб на непучинистых грунтах может быть только при сжимающей продольной силе. Вертикальное перемещение типа «всплытие» может иметь место только при условии положительной плавучести труб, уложенных в полностью водонасыщенный

грунт (коэффициент водонасыщения более 0,8). Всплытие может быть как при отсутствии в трубопроводе продольной силы, так и при ее наличии. В последнем случае всплытие сопровождается выпучиванием [65,66]. Вбок трубопровод может перемещаться только в том случае, если в нем имеется сжимающее или растягивающее продольное усилие. Боковые перемещения при сжимающей продольной силе могут быть только в сторону увеличения начальной стрелки прогиба. При уменьшении продольной сжимающей силы по сравнению с начальной или при возникновении растягивающей продольной силы искривленный трубопровод будет перемещаться к прямолинейному состоянию, т.е. стрелка прогиба будет уменьшаться [65,66].

Осадка трубопровода в вертикальной плоскости вниз в пределах талого грунта складывается из двух составляющих: перемещение, соответствующее осадке оттаивания, и перемещение, соответствующее осадке уплотнения. При этом осадка может проходить как при наличии в трубопроводе продольной силы, так и без нее. Характерные признаки поперечных перемещений газопровода сведены в таблицу 4.6.

Таблица 4.6 – Признаки поперечных перемещений газопровода

Направление перемещения	Характеристика газопровода и грунта	Вид возможного перемещения
Вверх	Положительная плавучесть труб, водонасыщенный грунт: а) продольной силы нет; б) продольная сила есть пучинистый грунт.	Всплытие Всплытие и выпучивание Выпучивание
Вниз	Отрицательная плавучесть труб, любой грунт: а) продольной силы нет; б) сжимающая продольная сила; в) растягивающая продольная сила, трубопровод уложен прямолинейно; г) растягивающее продольная сила, трубопровод имеет искривление в вертикальной плоскости;	Осадка Осадка или выпучивание Осадка Уменьшение стрелки прогиба
Горизонтальное	Трубопровод прямолинейный, сжимающая продольная сила превышает критическое значение Трубопровод уложен с искривлением: а) сжимающая продольная сила б) растягивающая продольная сила	Потеря устойчивости с образованием искривленного участка Увеличение стрелки прогиба Уменьшение стрелки прогиба

4.6. Расчетная схема осадки газопровода при оттаивании мерзлых грунтов

Классификация процессов осадки газопровода

В процессе оттаивания грунты ведут по-разному. Согласно [63] 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.

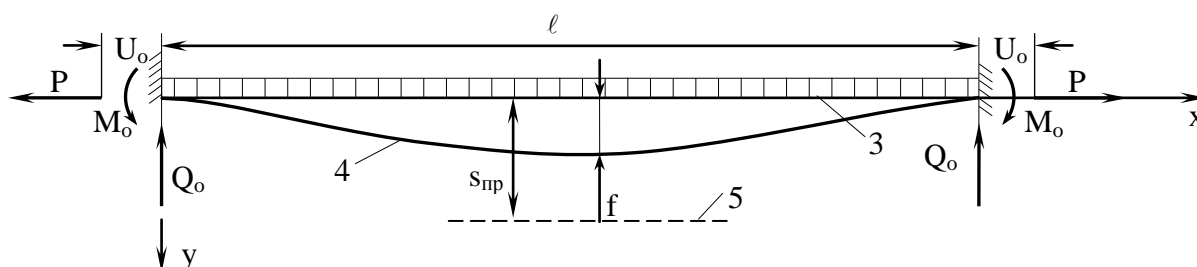
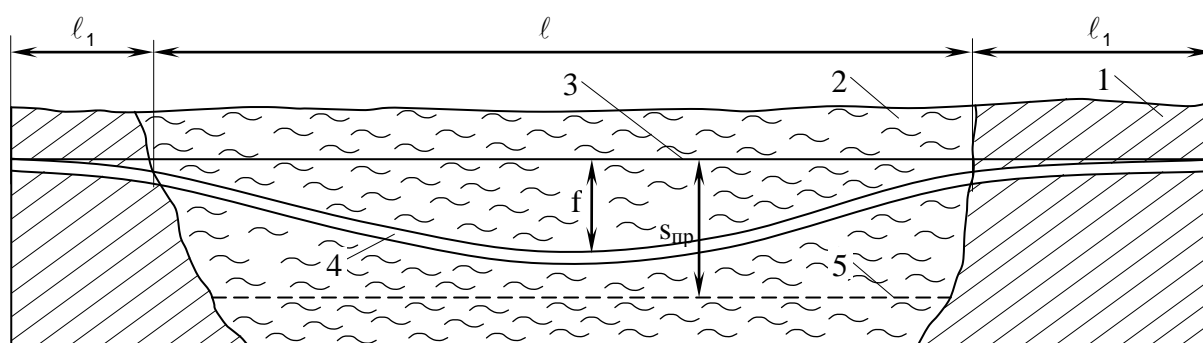
Осадку газопровода на участке оттаявших мерзлых грунтов возможна только в том случае, если участок газопровода обладает отрицательной плавучестью, т.е. интенсивность поперечной весовой нагрузки $q_{тр}$, направленной вниз (вес трубы, изоляции, транспортируемого продукта, дополнительного балласта), превышает выталкивающую силу воды $q_в$, действующую на трубу [64, 65]:

$$q_{тр} > q_в. \quad (4.33)$$

Если бы по длине магистрального газопровода (МГ) располагались грунты с одинаковым параметром просадочности, то при выполнении условия (4.33) в процессе их оттаивания однотипные участки МГ с одинаковой результирующей интенсивностью поперечной нагрузки получили бы и одинаковое вертикальное перемещение вниз. В этом случае, несмотря на изменение начального положения газопровода, параметры его напряженного состояния остались бы без изменений. На практике для трассы МГ характерно чередование грунтов. Понятно, что на непросадочных грунтах осадка практически равна нулю независимо от их состояния, а на участках с просадочными грунтами при их оттаивании осадка может достичь какого-либо предельного значения $s_{пр}$. В том случае трубопровод на участке просадочного грунта будет деформироваться путем изгиба, а вследствие этого уровень механических напряжений в стенках труб будет возрастать. Кроме того развитию изгиба способствует наличие продольной сжимающей силы, возникающей в стенках трубопровода от внутреннего давления и температурных деформаций. Таким образом, наиболее опасные места с точки зрения прочности газопровода возникают в районе не-

равномерной осадки грунта под трубопроводом, т.е. на границе смены грунтов с разными просадочными свойствами, и, в первую очередь, на границе мерзлого и талого грунтов.

Неограниченная осадка газопровода в оттаявшем грунте. Неограниченная осадка газопровода в оттаявшем грунте – это расчетный случай, который предполагает, что значение максимальной стрелки прогиба f участка трубопровода протяженностью ℓ меньше предельного значения осадки грунта $s_{пр}$. Схема изгиба трубопровода для этого расчетного случая показана на рисунке 4.5. Поскольку удлинение труб возможно только вследствие их растяжения на участке ℓ и прилегающих к нему участках ℓ_1 , то в трубах появляется растягивающая продольная сила P и участок начинает работать как жесткая нить [66].



1 – условно непросадочный грунт; 2 – слабый (просадочный) грунт; 3 – начальное (проектное) положение газопровода; 4 – положение газопровода в результате осадки слабого грунта; 5 – уровень предельной осадки слабого грунта

Рисунок 4.5 – Общий вид и расчетная схема участка газопровода при его неограниченной осадке в оттаявшем грунте

Дифференциальное уравнение изгиба запишется в следующем виде [66]:

$$EI \frac{d^2y}{dx^2} = M_0 + P(y - \omega_0) - x \int_0^{\ell} \frac{g(x)dx}{2} + \int_0^x g(\xi)(x - \xi)d\xi, \quad (4.34)$$

где E – модуль упругости материала труб; I – осевой момент инерции сечения труб; M_0 – изгибающий момент на границе слабого грунта и грунта, обладающего достаточной несущей способностью; P – продольное усилие на границе слабого грунта и грунта, обладающего достаточной несущей способностью; ω_0 – прогиб газопровода на границе слабого грунта и грунта, обладающего достаточной несущей способностью; $g(x)$, $g(\xi)$ – интенсивность распределенной нагрузки в сечениях x , ξ .

При $g = \text{const}$ дифференциальное уравнение (4.34) запишется в следующем виде:

$$Ely'' = M_0 + P(y - \omega_0) + \frac{gx^2}{2} - \frac{g\ell x}{2}. \quad (4.35)$$

Общее решение дифференциального уравнения (2.4) и значения его производных имеют вид:

$$y = C_1 \text{ch}(kx) + C_2 \text{sh}(kx) - \frac{g}{P} \left(\frac{M_0}{g} - \frac{P\omega_0}{g} + \frac{x^2}{2} - \frac{\ell x}{2} \right) - \frac{g}{k^2 P}, \quad (4.36)$$

$$y' = C_1 k \text{sh}(kx) + C_2 k \text{ch}(kx) - \frac{g}{P} \left(x - \frac{\ell}{2} \right), \quad (4.37)$$

$$y'' = C_1 k^2 \text{ch}(kx) + C_2 k^2 \text{sh}(kx) - \frac{g}{P} = \frac{M(x)}{EI}. \quad (4.38)$$

Произвольные постоянные C_1 и C_2 определяем из граничных условий:

$$x=0, y=\omega_0; x=\ell, y=\omega_0. \quad (4.39)$$

$$C_1 = \frac{M_0}{P} + \frac{g}{k^2 P}, C_2 = - \left(\frac{M_0}{P} + \frac{g}{k^2 P} \right) \text{th} \left(k \frac{\ell}{2} \right), \quad (4.40)$$

где $k = \sqrt{P/(EI)}$.

Наибольшее значение прогиба участка из формулы (4.36) при $x = \ell / 2$:

$$f = \frac{g\ell^2}{8P} - \left(\frac{M_0}{P} + \frac{g}{k^2 P} \right) \frac{\text{ch}(k \frac{\ell}{2}) - 1}{\text{ch}(k \frac{\ell}{2})} + \omega_0. \quad (4.41)$$

Прогиб газопровода на границе слабого грунта и грунта, обладающего достаточной несущей способностью может быть определено из выражения:

$$\omega_0 = \frac{2\alpha}{k_0 D_H} \left(\frac{g\ell}{2} + \alpha M_0 \right), \quad (4.42)$$

где $\alpha = \sqrt[4]{k_0 D_H / (4EI)}$; k_0 – коэффициент постели грунта при сжатии; D_H – наружный диаметр газопровода.

Неизвестными в формуле (4.40) являются параметры M_0 и P .

Принимаем, что за пределами участка газопровода со слабым грунтом грунт является практически несжимаемым. В этом случае $\omega_0 = 0$, а значение изгибающего момента M_0 в сечениях участка $x = 0$ и $x = \ell$ можно определить по формуле [66, 67];

$$M_0 = \frac{g\ell}{2kth\left(k\frac{\ell}{2}\right)} - \frac{g}{k^2}. \quad (4.43)$$

Для определения продольной силы P будем иметь в виду, что полное удлинение участка газопровода ℓ можно найти из двух условий:

$$u = \frac{P\ell}{EF} + u_{01} + u_{02} + u_{сл}, \quad (4.44)$$

$$u = 0,5 \int_0^{\ell} (y')^2 dx, \quad (4.45)$$

Где F – площадь поперечного сечения трубы; u_{01} , u_{02} – продольные перемещения сечений $x = 0$ и $x = \ell$; $u_{сл}$ – продольное перемещение труб за счет слабины участка ℓ , учитывающее удлинение газопровода на участке ℓ вследствие его перемещений от прямолинейного положения, а также вследствие удлинения, возникающего при положительном температурном перепаде стенок труб и при повышении внутреннего давления:

$$u_{сл} = u_{от} + \alpha_t \ell \Delta t + \frac{\mu p \ell (D_H - 2\delta)}{2\delta E}, \quad (4.46)$$

где $u_{от}$ – удлинение в результате отклонений оси трубопровода от прямолинейного положения, которое может быть принято равным 1 – 1,5 см на каждые 100 м длины газопровода; α_t – коэффициент линейного расширения металла труб; $\Delta t = t - t_0$ – температурный перепад; t – температура стенки газопровода в рассматриваемый момент времени; t_0 – температура стенки труб при выполнении захлестов газопровода, т.е. в момент фиксации его расчетной схемы; μ – коэффициент Пуассона; p – внутреннее давление; δ – толщина стенки труб.

Приравнивая значения u из зависимостей (4.44) и (4.45), получим:

$$P = \frac{EF}{\ell} \left[0,5 \int_0^{\ell} (y')^2 dx - u_{01} - u_{02} - u_{сл} \right]. \quad (4.47)$$

Решение выражения (4.47) существенно упрощается, если вместо (4.45) принять следующую приближенную зависимость, которая дает погрешность 3 – 5 %

$$u = \frac{\pi^2 f^2}{4\ell}, \quad (4.48)$$

где f – прогиб газопровода в средней части деформируемого участка.

В этом случае, приравнявая (4.44) и (4.48), получим:

$$f = \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{P\ell^2}{EF} + (u_{01} + u_{02} + u_{сн})\ell}. \quad (4.49)$$

Задавая ряд значений P , по формуле (4.49) находим соответствующие им значения f . Аналогичную процедуру при тех же значениях P проводим по формуле (4.41). Координаты точки пересечения обеих зависимостей f от P являются фактическими значениями прогиба участка газопровода и продольной растягивающей силы P .

Значение изгибающего момента в сечении $x = \ell/2$ определится из (4.39)

$$M_{\ell/2} = \left(M_0 + \frac{g}{k^2} \right) \frac{1}{\operatorname{ch}\left(k \frac{\ell}{2}\right)} - \frac{g}{k^2}. \quad (4.50)$$

Допустимый прогиб газопровода на участке слабых грунтов может быть определен из условия обеспечения требуемого напряженно деформированного состояния стенок труб. С целью снижения трудоемкости выполняемых для этого расчетов можно использовать не вышеприведенную методику определения параметров МГ на участке осадки грунта, а воспользоваться следующей зависимостью, которая описывает конфигурацию МГ на таких участках [66, 72]]

$$y(x) = f \sin^2\left(\frac{\pi x}{\ell}\right). \quad (4.51)$$

Изгибающий момент в сечениях МГ определится путем двойного дифференцирования зависимости (4.51) с вводом коэффициента изгибной жесткости EI

$$M(x) = -\frac{2\pi^2}{\ell^2} fEI \cos\left(\frac{2\pi x}{\ell}\right). \quad (4.52)$$

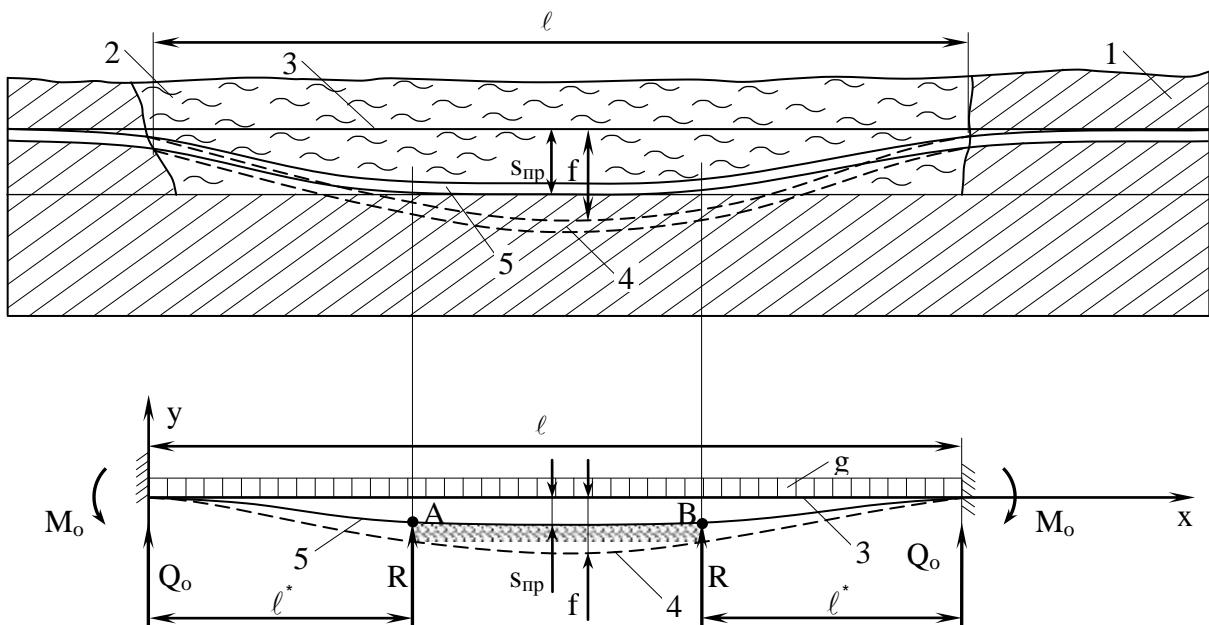
Продольное усилие, возникающее вследствие поперечного перемещения трубопровода при просадке грунта, может быть определено по формуле

$$P = \frac{\pi^2 f^2}{4\ell^2} EF. \quad (4.53)$$

Из формулы (4.51) с учетом зависимостей (4.45), (4.52) и (4.53) можно получить следующее выражение, позволяющее определять допустимую стрелу $[f]$ прогиба МГ с рабочим давлением более 9,8 МПа на участке оттаявших грунтов

$$0,25[f]^2 + [f]D_H - \frac{(0,9\sigma_y - 0,5\sigma_{кц})l^2}{\pi^2 E} = 0. \quad (4.54)$$

Ограниченная осадка газопровода в оттаявшем грунте. Ограниченная осадка газопровода в оттаявшем грунте – это расчетный случай, который предполагает, что значение максимальной стрелки прогиба f участка трубопровода протяженностью l больше предельного значения осадки грунта $s_{пр}$. Ограниченная осадка МГ характерна для малопросадочных грунтов. В этом случае $f > s_{пр}$, средняя часть деформирующегося газопровода лежит на грунтовом основании, а кривизна этого участка газопровода и изгибающий момент равны нулю. Схема изгиба трубопровода для этого расчетного случая показана на рисунке 4.6.



1 – условно непросадочный грунт; 2 – слабый (просадочный) грунт; 3 – начальное (проектное) положение газопровода; 4 – положение газопровода при неограниченной осадке s слабого грунта; 5 – положение газопровода при ограниченной осадке $s_{пр}$ слабого грунта; АВ – участок газопровода, лежащий на грунтовом основании после осадки слабого грунта

Рисунок 4.6 – Общий вид (а) и расчетная схема (б) участка газопровода при осадке грунта менее возможного прогиба деформируемого участка

Реакция основания R в точках А и В, в которых газопровод начинается касаться грунта, составит

$$R = g(\ell^*)^2/3, \quad (4.55)$$

где ℓ^* – расстояние от границы непросадочного грунта до места опирания газопровода на осевший грунт, вычисляемое по формуле

$$\ell^* = \sqrt[4]{72s_{\text{пр}}EI/g}. \quad (4.56)$$

Максимальный изгибающий момент на границе слабого (просадочного) и непросадочного грунтов может быть вычислен по формуле

$$M_0 = \frac{g(\ell^*)^2}{6} = \frac{12s_{\text{пр}}EI}{(\ell^*)^2}. \quad (4.57)$$

Конфигурация оси МГ в вертикальной плоскости на участке ℓ^* описывается следующей зависимостью:

$$y(x) = -\frac{g(\ell^*)^4}{24EI} \left[3 - 4 \frac{\ell^* - x}{\ell^*} + \left(\frac{\ell^* - x}{\ell^*} \right)^4 \right] + \frac{R(\ell^*)^3}{6EI} \left[2 - 3 \frac{\ell^* - x}{\ell^*} + \left(\frac{\ell^* - x}{\ell^*} \right)^3 \right]. \quad (4.58)$$

Подставив в выражение (4.58) значение g из (4.56) и значение R из (4.55) и выполнив преобразования, получим следующую зависимость, описывающую конфигурацию оси МГ в вертикальной плоскости на участке ℓ^* :

$$y(x) = s_{\text{пр}} \left[-1 + 4 \left(\frac{\ell^* - x}{\ell^*} \right)^3 - 3 \left(\frac{\ell^* - x}{\ell^*} \right)^4 \right]. \quad (4.59)$$

Конфигурация оси МГ в вертикальной плоскости, получающаяся по (2.27), приведена на рисунке 4.7 в безразмерных координатах по отношению к значениям $s_{\text{пр}}$ и ℓ^* .

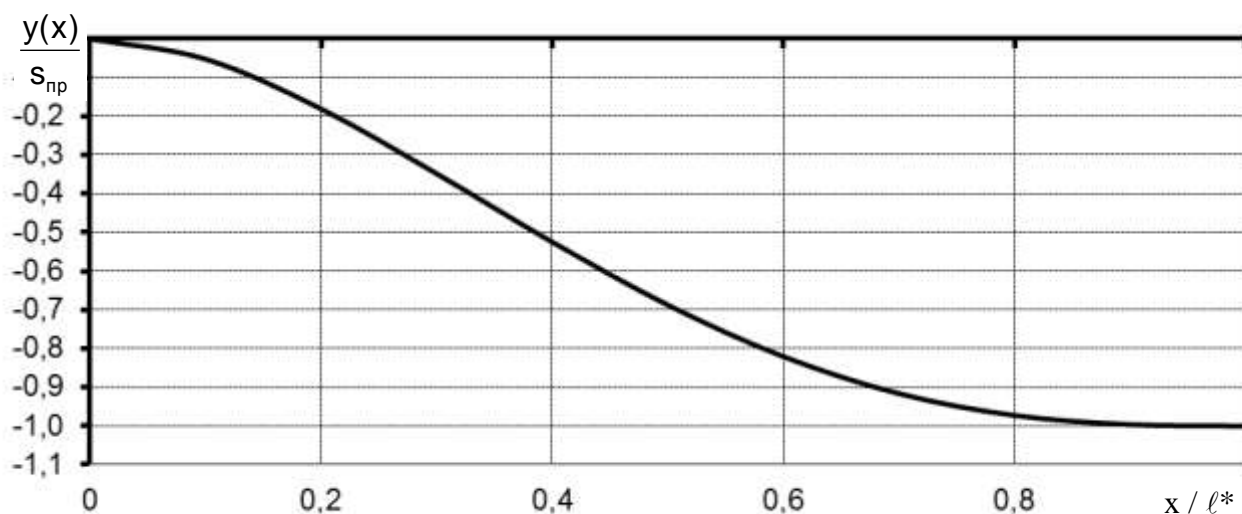


Рисунок 4.7 – Конфигурация оси конечного участка магистрального газопровода в вертикальной плоскости при его деформировании вследствие осадки грунта (для $f > s_{\text{пр}}$)

Выражение для определения допустимой осадки $[s_{пр}]$ участка газопровода получаем из (4.59) и зависимостей (4.13), (4.18), (4.19) без учета продольной растягивающей силы P :

$$[s_{пр}] = \frac{l}{Eg(D_n)^2} \left[1,62(\sigma_y)^2 - \frac{0,9\sigma_y p_p (D_n - 2\delta)}{\delta} + \frac{0,125(p_p)^2 (D_n - 2\delta)^2}{\delta^2} \right]. \quad (4.60)$$

4.7. Расчетная схема всплытия и выпучивания газопровода при оттаивании мерзлых грунтов

Всплытие газопровода на участке оттаявших мерзлых грунтов возможно только в том случае, если участок газопровода обладает положительной плавучестью, т.е. выталкивающая сила воды q_v , действующая на трубу, превышает интенсивность поперечной весовой нагрузки $q_{тр}$, направленной вниз (вес трубы, изоляции, транспортируемого продукта, дополнительного балласта) [63, 68]

$$q_{тр} < q_v. \quad (4.61)$$

Значение выталкивающей силы воды, действующей на погруженный в воду трубопровод, вычисляют по формуле (4.27).

Выпучивание участка обуславливается воздействием продольной сжимающей силы, возникающей от наличия внутреннего давления и температурных деформаций. При этом выпучивание прямолинейного участка возможно только в том случае, когда продольная сжимающая сила превысит критическое значение и произойдет потеря устойчивости участка. Если же продольная ось газопровода имеет отклонение от прямолинейного положения, обусловленное, например, всплытием трубы, то наличие любой продольной сжимающей силы увеличивает степень искривления участка, т.е. способствует его выпучиванию.

На стадии эксплуатации МГ на участках где выполняется условие (4.61) происходит совместное воздействие выталкивающей силы воды и продольной сжимающей силы. Результатом такого воздействия являются значительные изгибные деформации трубы. Для расчета газопровода с вышеназванным нагружением возможно применение способа, заключающегося в следующем: сначала выполняется расчет на воздействие только поперечной нагрузки от выталкивающей силы воды, затем действие поперечной нагрузки заменяется начальным прогибом, вызванным этой нагрузкой, и выполняется расчет на воздействие продольного усилия [65].

Прогиб f_q от воздействия выталкивающей силы воды q_B может быть определен по формуле:

$$f_q = \frac{q_B \ell^4}{384EI}, \quad (4.62)$$

где ℓ – длина всплывающего участка, т.е. участка на котором выполняется условие (4.59); EI – изгибная жесткость участка газопровода.

Рассмотрим два характерных случая для всплывающего газопровода:

- 1) грунт над трубой оттаял на всю высоту засыпки;
- 2) верхняя часть грунта засыпки находится в мерзлом состоянии.

Неограниченное всплытие и выпучивание газопровода

Для первого случая, т.е. когда грунт над трубой оттаял на всю высоту засыпки, предельное значение прогиба $f_{qпр}$ определяется следующей зависимостью:

$$f_{qпр} = h_{гр} + D_n - h_{тр}, \quad (4.63)$$

где $h_{гр}$ – толщина слоя грунта, находящегося над верхом трубы; $h_{тр}$ – глубина погружения газопровода в воду, при которой выталкивающая сила воды равна интенсивности поперечной нагрузки от веса трубы, которая может быть приближенно определена по формуле:

$$h_{тр} = 25\delta + 0,1D_n. \quad (4.64)$$

При $f_q > f_{qпр}$, т.е. когда прогиб f_q участка газопровода от воздействия выталкивающей силы воды превысит высоту грунта $h_{гр}$, находящегося над трубой, на значение $(D_n - h_{тр})$, то средняя часть участка газопровода от этой нагрузки будет находиться на плаву. Кривизна средней части такого плавающего участка газопровода и изгибающий момент равны нулю. Расстояние ℓ^* от границы плавающего участка до места, где труба погружена в воду на $h_{тр}$, может быть определено по формуле:

$$\ell^* = \sqrt[4]{72(h_{гр} + D_n - h_{тр})EI/q_B}. \quad (4.65)$$

Максимальный изгибающий момент на границе плавающего участка может быть вычислен по формуле:

$$M_{max} = \frac{12(h_{гр} + D_n - h_{тр})EI}{(\ell^*)^2}. \quad (4.66)$$

Для учета воздействия температуры и внутреннего давления продукта влияние поперечной нагрузки от выталкивающей силы воды заменяем первоначальным прогибом,

обусловленным этой нагрузкой. С достаточной для практических расчетов точностью конфигурацию верха трубы в вертикальной плоскости можно представить в следующем виде:

$$y(x) = f_q \sin^2 \frac{\pi x}{L}. \quad (4.67)$$

Стрелка начального прогиба f_q здесь определяется в соответствии с формулой (4.62).

Удлинение участка МГ протяженностью ℓ , обусловленное температурными деформациями, составит:

$$u_t = \alpha_t \ell \Delta t. \quad (4.68)$$

Удлинение этого же участка вследствие наличия внутреннего давления составит:

$$u_p = \frac{0,4p(D_H - 2\delta)\ell}{E\delta}. \quad (4.69)$$

Принимаем, что компенсация удлинений u_p и u_t происходит за счет прогиба трубы в вертикальной плоскости. Прогиб $f_{p,t,q}$ от воздействия выталкивающей силы воды, внутреннего давления и температурных деформаций найдем, имея в виду, что:

$$u_t + u_p = s_{p,t,q} - s_q, \quad (4.70)$$

где $s_{p,t,q}$ – длина участка газопровода после деформирования всеми приложенными нагрузками (внутреннее давление, температурные деформации, выталкивающая сила воды); s_q – длина участка газопровода после деформирования только от выталкивающей силы воды:

$$s_{p,t,q} = \ell + \frac{\pi^2 f_{p,t,q}^2}{4\ell}; \quad s_q = \ell + \frac{\pi^2 f_q^2}{4\ell}. \quad (4.71)$$

Из (4.37) с учетом (4.67), (4.68) и (4.70) получим:

$$f_{p,t,q} = \sqrt{\frac{0,4p(D_H - 2\delta)\ell^2}{\pi^2 E\delta} + \frac{4\alpha_t \ell^2 \Delta t}{\pi^2} + f_q^2}. \quad (4.72)$$

Принимаем, что конфигурация участка МГ после выпучивания также описывается зависимостью (4.68) в которой вместо параметра f_q используют параметр $f_{p,t,q}$. После двойного дифференцирования уравнения конфигурации деформированного участка МГ и введения коэффициента изгибной жесткости EI получим выражение для определения изгибающего момента в сечениях МГ:

$$M(x) = -\frac{2\pi^2}{\ell^2} f_{p,t,q} EI \cos\left(\frac{2\pi x}{\ell}\right). \quad (4.73)$$

С учетом вышеизложенного продольные напряжения, возникающие в стенках газопровода, можно определить по формуле:

$$\sigma_{пр} = 0,5\sigma_{кц} \pm \sigma_{и}. \quad (4.74)$$

Опасность произошедшего деформирования участка МГ вследствие его всплытия и выпучивания оценивается по условиям (4.8) и (4.13), соответственно при рабочем давлении до и свыше 9,8 МПа. Из формулы (4.74) получим следующие выражения для определения допустимой стрелы прогиба [f] деформировавшегося участка МГ

- при рабочем давлении до 9,8 Мпа:

$$[f] = \min \left[\frac{\ell^2}{\pi^2 E D_H} \left(\frac{m}{0,9k_H} R_2^H - \frac{\rho(D_H - 2\delta)}{4\delta} \right); \frac{\ell^2}{\pi^2 E D_H} \left(\psi_3 \frac{m}{0,9k_H} R_2^H + \frac{\rho(D_H - 2\delta)}{4\delta} \right) \right]; \quad (4.75)$$

- при рабочем давлении свыше 9,8 Мпа:

$$[f] = \min \left[\frac{\ell^2}{\pi^2 E D_H} \left(0,9\sigma_y - \frac{1,1\rho D_H}{4\delta} \right); \frac{\ell^2}{\pi^2 E D_H} \left(0,9\sigma_y \sqrt{1 - 0,28 \left(\frac{\rho D_H}{\delta \sigma_y} \right)^2} \right) \right], \quad (4.76)$$

где m, k_H – обозначения те же, что в формуле (4.2); R_2^H, ψ_3 – обозначения те же, что в формуле (4.8); σ_y – обозначение то же, что в формуле (4.12); ρ – нормативное (рабочее) давление.

Следует отметить, что в том случае, если фактическая стрела прогиба f деформировавшегося участка МГ не превышает предельного значения [f], вычисленного по формулам (4.74) и (4.75), то прочность участка обеспечена, однако на таком участке не соблюдаются два других условия – это условие общей устойчивости МГ в продольном направлении и условие устойчивости МГ против всплытия, т.е. такие участки все равно требуют проведения стабилизационных мероприятий по устранению произошедшего деформирования МГ. При этом индикатором произошедшего нарушения вышеназванных условий может служить состояние грунтовой засыпки. Опыт эксплуатации МГ показывает, что признаки разрушения грунтовой засыпки начинают проявляться при вертикальном перемещении трубы вверх на величину, равную 20 % от высоты засыпки грунта над верхней образующей газопровода [4].

При $f_{p,t,q} > f_{q,пр}$ необходимая компенсация удлинений может происходить не только за счет выпучивания участка МГ, но и за счет его искривления в горизонтальной плоскости. При наличии искривления участка МГ в горизонтальной плоскости изгибные напряжения $\sigma_{и}$ определяют исходя из значения суммарного изгибающего момента $M_{\Sigma}(x)$, вычисляемого по следующей формуле:

$$M_{\Sigma}(x) = \sqrt{(M_B(x))^2 + (M_T(x))^2}, \quad (4.77)$$

где $M_B(x)$, $M_T(x)$ – изгибающий момент, соответственно, в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

Всплытие и выпучивание газопровода, ограниченное мерзлым грунтом засыпки

Для второго случая, т.е. когда верхняя часть грунта засыпки находится в мерзлом состоянии, мерзлый грунт кровли будет препятствовать всплытию и выпучиванию газопровода. При этом трубопровод с положительной температурой стенки, контактируя с мерзлым грунтом, будет осуществлять его оттаивание и уменьшать толщину мерзлого слоя. Когда интенсивность поперечной нагрузки, обусловленная выталкивающей силой воды и сжимающей продольной силой от внутреннего давления и температурных деформаций, достигнет прочности мерзлого слоя грунта, то произойдет его разрушение и выход участка газопровода на поверхность. До разрушения верхнего мерзлого слоя грунта засыпки расчет параметров напряженно деформированного состояния участка может быть выполнен с использованием зависимостей (4.73), (4.5), (4.12), (4.18), (2.42), (4.8), (4.13) и (4.14). При этом в формуле (4.66) вместо параметра $(h_{гр} + D_H - h_{гр.т})$ следует использовать значение высоты талого слоя грунта засыпки над трубой $h_{гр.т}$. Наибольшую высоту талого слоя грунта засыпки, при которой обеспечена прочность деформировавшегося газопровода, можно определить из следующих выражений

- при рабочем давлении до 9,8 МПа:

$$[h_{гр.т}] = \min \left[\frac{(\ell_1^*)^2}{6ED_H} \left(\frac{m}{0,9k_H} R_2^H - \frac{\rho(D_H - 2\delta)}{4\delta} \right); \frac{(\ell_1^*)^2}{6ED_H} \left(\psi_3 \frac{m}{0,9k_H} R_2^H + \frac{\rho(D_H - 2\delta)}{4\delta} \right) \right]; \quad (4.78)$$

- при рабочем давлении свыше 9,8 МПа:

$$[h_{гр.т}] = \min \left[\frac{(\ell_1^*)^2}{6ED_H} \left(0,9\sigma_y - \frac{1,1\rho D_H}{4\delta} \right); \frac{(\ell_1^*)^2}{6ED_H} \left(0,9\sigma_y \sqrt{1 - 0,28 \left(\frac{\rho D_H}{\delta \sigma_y} \right)^2} \right) \right], \quad (4.79)$$

где ℓ_1^* – фактическое расстояние от границы плавающего участка до места, где газопровод касается мерзлого грунта насыпи.

После выхода участка газопровода на поверхность опасность произошедшего деформирования участка МГ вследствие его всплытия и выпучивания оценивается так же, как и при полностью оттаявшем грунте засыпки, т.е. с использованием формул (4.75) и (4.76).

4.8. Расчетное обоснование требований к участкам осадки газопроводов при оттаивании мерзлых грунтов

Согласно данным проектной и исполнительной документации линейная часть газопровода Бованенково – Ухта на участках категории «Н» смонтирована из труб класса прочности К60 с толщиной стенки 26,4 мм, имеющих нормативный предел прочности 588 МПа и нормативный предел текучести 485 МПа. На участках категории «С» ЛЧ МГ смонтирована из труб класса прочности К65 с номинальной толщиной стенки 27,7 мм, имеющих нормативный предел прочности 638 МПа и нормативный предел текучести 555 МПа.

Выполним проверку условия (4.61), приняв значение интенсивности поперечной нагрузки от веса трубы и изоляционного покрытия $q_{тр} = 9031$ Н/м при толщине стенки труб 26,4 мм и $q_{тр} = 9467$ Н/м при толщине стенки труб 27,7 мм.

Выталкивающая сила воды, действующая на полностью погруженный в воду газопровод, составляет (формула 2.2) $q_{в} = 15536$ Н/м. Таким образом, условие 2.1 имеет вид $q_{тр} < q_{в}$, т.е. при оттаивании мерзлых грунтов и их обводнении осадка МГ Бованенково – Ухта возможна только на участках с дополнительной пригрузкой балластирующими устройствами.

Для вышеприведенных значений интенсивности поперечной нагрузки $q_{тр}$ осадка МГ возможна при глубине погружения в воду участков из труб с толщиной стенки 26,4 мм не более, чем на 0,8 м, а участков из труб с толщиной стенки 27,7 мм не более, чем на 0,83 м.

Значения допустимых напряжений, вычисленные по формулам (4.11, 4.13 и 4.14) для проверки прочности участков МГ сведены в таблицу 4.7.

Выполним проверку прочности участков магистрального газопровода по уровню кольцевых напряжений.

При проектном давлении $p = 11,8$ МПа и $k_p = 1,1$ значения кольцевых напряжений составят:

- в трубах с толщиной стенок 26,4 мм $\sigma_{кц} = 336,1$ МПа;
- в трубах с толщиной стенок 27,7 мм $\sigma_{кц} = 319,7$ МПа.

Условие прочности (1.11) для кольцевых напряжений на участках МГ из труб с толщиной стенки 26,4 мм запишется в следующем виде:

$$\sigma_{кц} = 336,1 \text{ МПа} < 349,2 \text{ МПа} .$$

Таблица 4.7 – Значения допустимых напряжений (МПа) для проверки прочности участков магистрального газопровода

Проверяемые напряжения	Для участков из труб с толщиной стенки 26,4 мм	Для участков из труб с толщиной стенки 27,7 мм
Кольцевые	349,2	331,7
Продольные	436,5	499,5
Эквивалентные	436,5	499,5

Условие прочности (1.11) для кольцевых напряжений на участках МГ из труб с толщиной стенки 27,7 мм запишется в следующем виде:

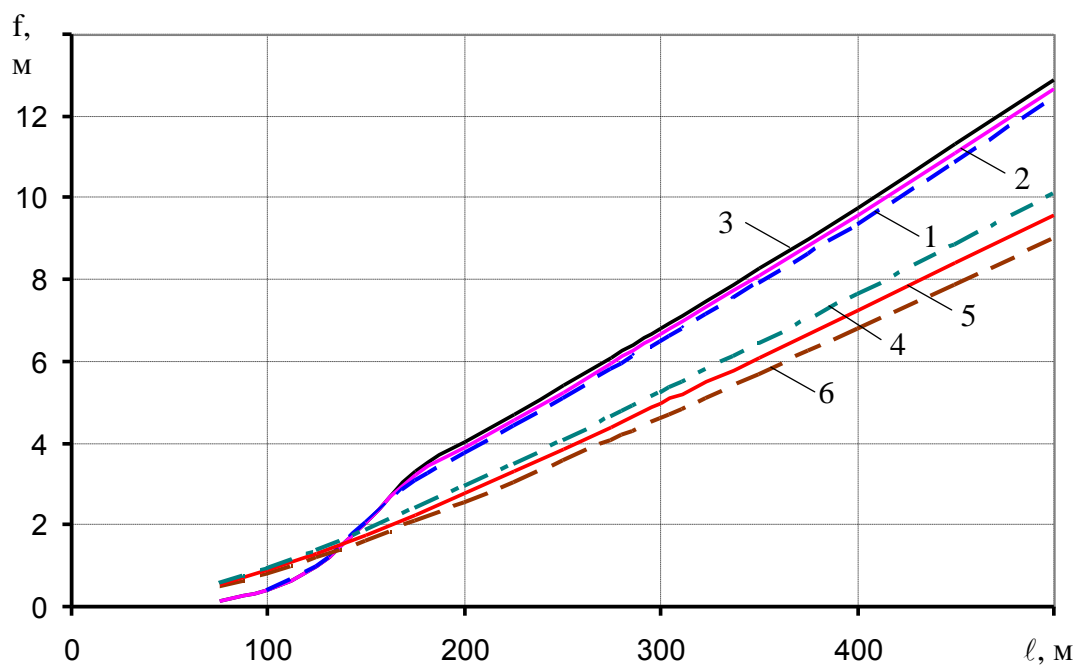
$$\sigma_{\text{кд}} = 319,7 \text{ МПа} < 331,7 \text{ МПа} .$$

Таким образом, условие прочности для кольцевых напряжений выполняется как на участках МГ категории «Н», так и на участках МГ категории «С». При этом имеется дополнительный запас прочности, равный на участках МГ категории «Н» 3,8 %, а на участках МГ категории «С» 3,6 %.

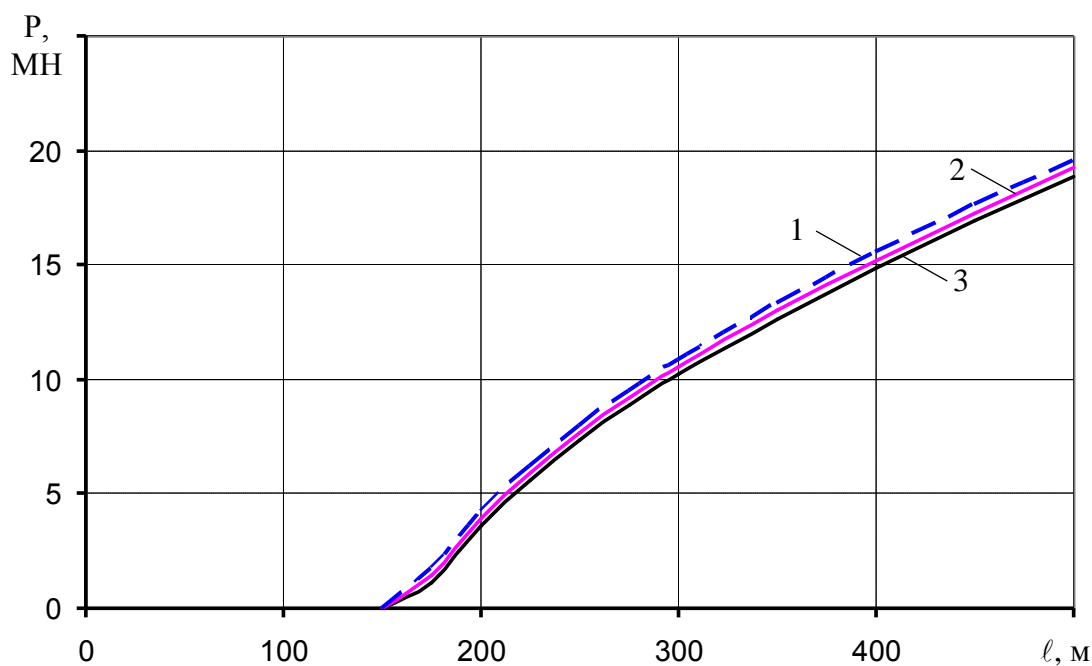
. Расчет выполнен для участков газопровода из труб с толщиной стенки 26,4 и 27,7 мм при трех значениях рабочего давления: 11,8, 9,8 и 7,9 МПа. Результаты расчетов приведены в приложении А, а в графическом виде показаны на рисунках 4.8 – 4.12.

На рисунках 4.8, 4.9 и 4.10 приведено изменение прогиба, продольной растягивающей силы и изгибных напряжений в зависимости от протяженности участка МГ с просадочными грунтами. Кроме этого на рисунках 4.8 и 4.9 показаны допустимые значения прогибов деформируемых участков МГ, рассчитанные по формуле (4.49), при которых выполняются условия прочности (4.13) и (4.14). Следует отметить, что при выполнении расчетов была принята возможность неограниченной осадки слабого грунта. На рисунках 4.11 и 4.12 приведены результаты расчета параметров напряженно деформированного состояния участка МГ при ограниченной осадке грунта. При этом было принято, что фактическая осадка грунта меньше, чем возможный прогиб участка газопровода заданной протяженности от действующих нагрузок и воздействий. Кроме того следует отметить, что во всех выполненных расчетах в качестве интенсивности распределенной поперечной нагрузки была принята весовая нагрузка, состоящая из собственного веса трубы и веса изоляционного (противокоррозионного) покрытия.

Результаты расчета напряженно деформированного состояния магистрального газопровода Бованенково – Ухта при его всплытии и выпучивании.



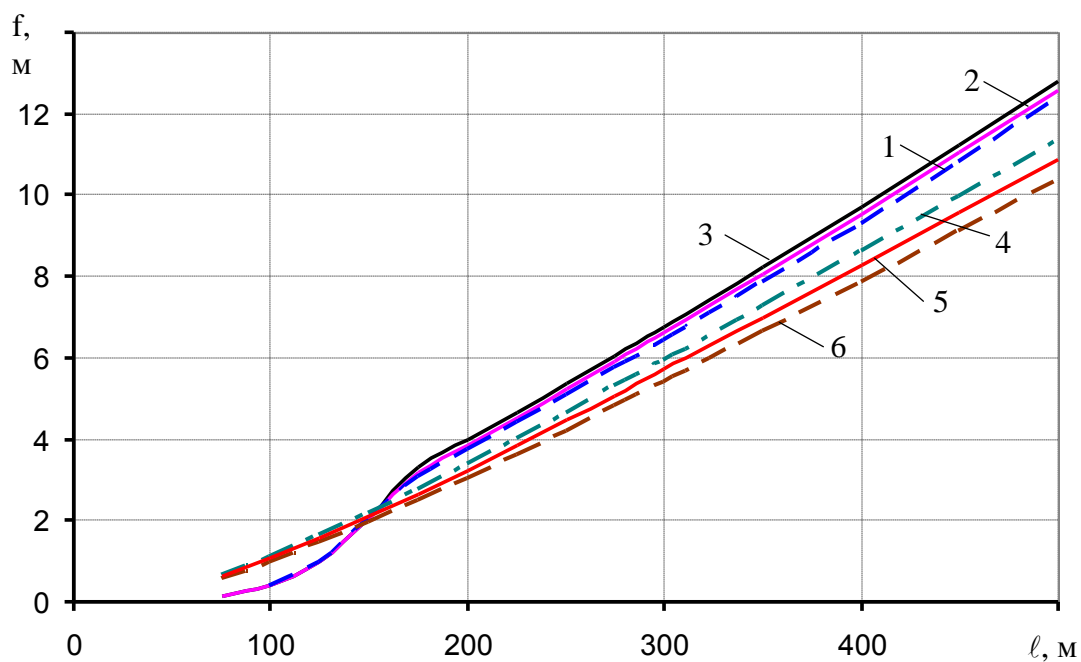
а)



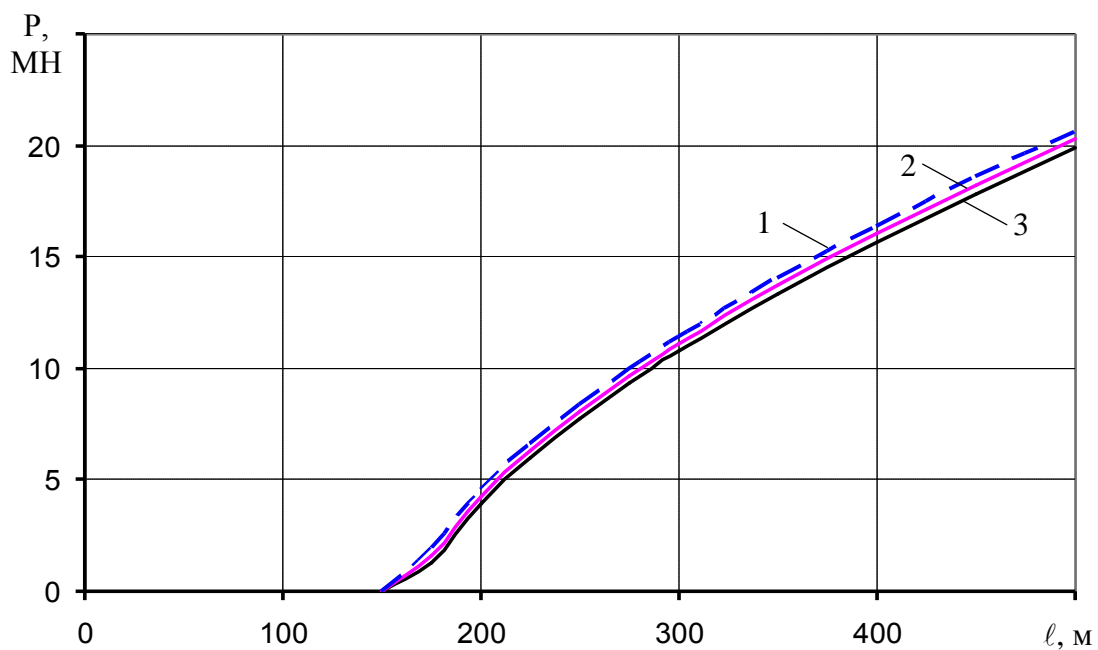
б)

1, 2, 3 – фактические значения; 4, 5, 6 – допустимые значения;
 1, 4 – $p = 7,9$ МПа; 2, 5 – $p = 9,8$ МПа; 3, 6 – $p = 11,8$ МПа

Рисунок 4.8 – Изменение прогиба (а) и продольной растягивающей силы (б) от протяженности участка с просадочными грунтами (наружный диаметр газопровода 1420 мм, толщина стенки трубы 26,4 мм)



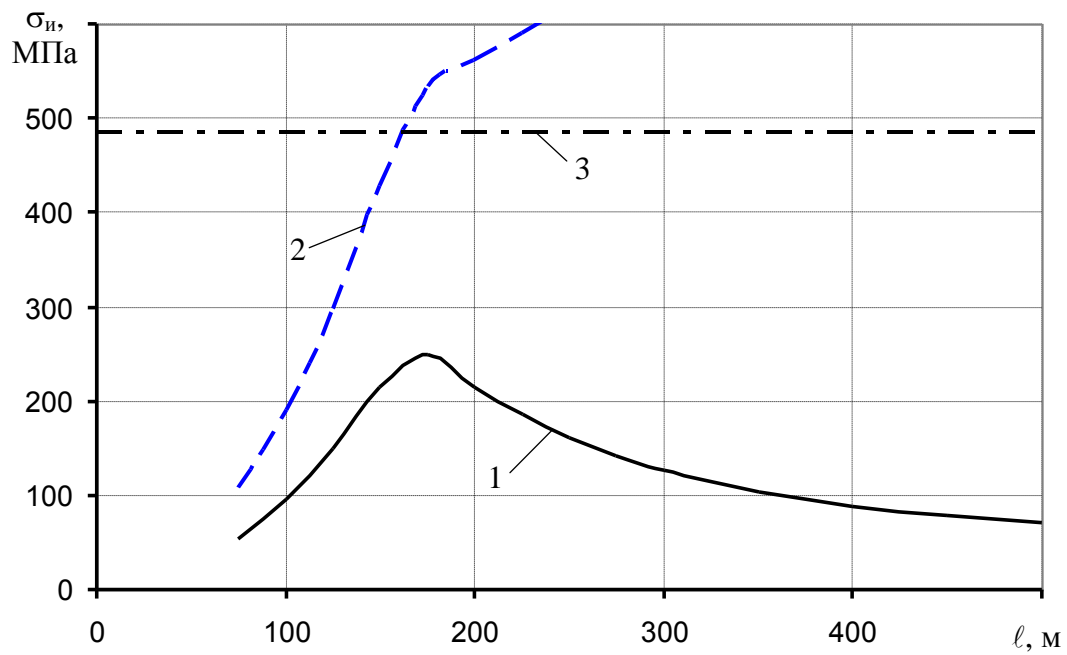
а)



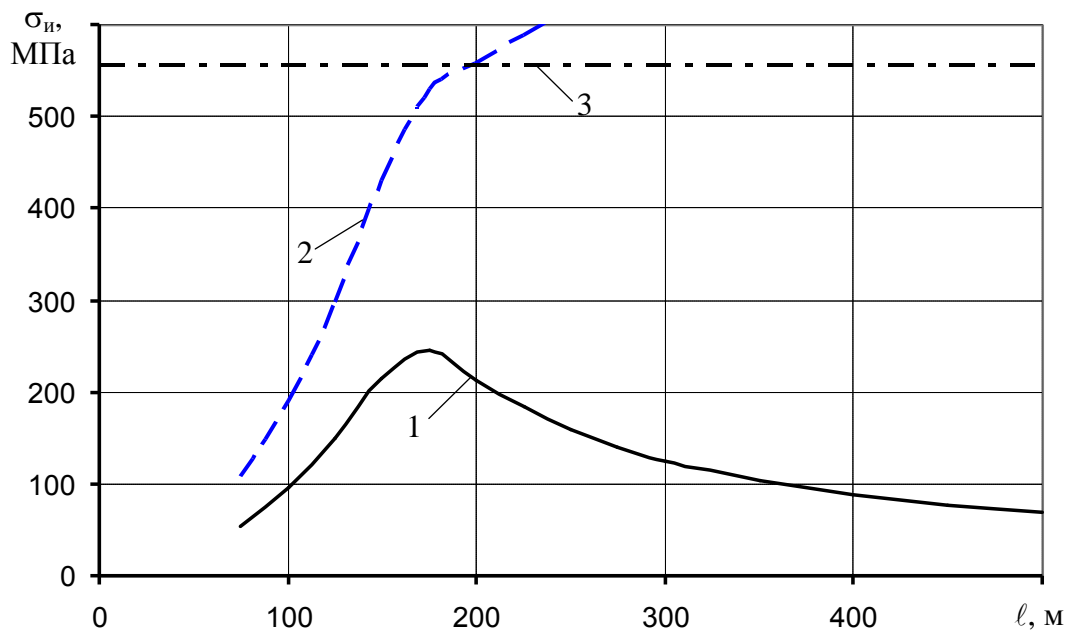
б)

1, 2, 3 – фактические значения; 4, 5, 6 – допустимые значения;
 1, 4 – $p = 7,9$ МПа; 2, 5 – $p = 9,8$ МПа; 3, 6 – $p = 11,8$ МПа

Рисунок 4.9 – Изменение прогиба (а) и продольной растягивающей силы (б) от протяженности участка с просадочными грунтами (наружный диаметр газопровода 1420 мм, толщина стенки трубы 27,7 мм)



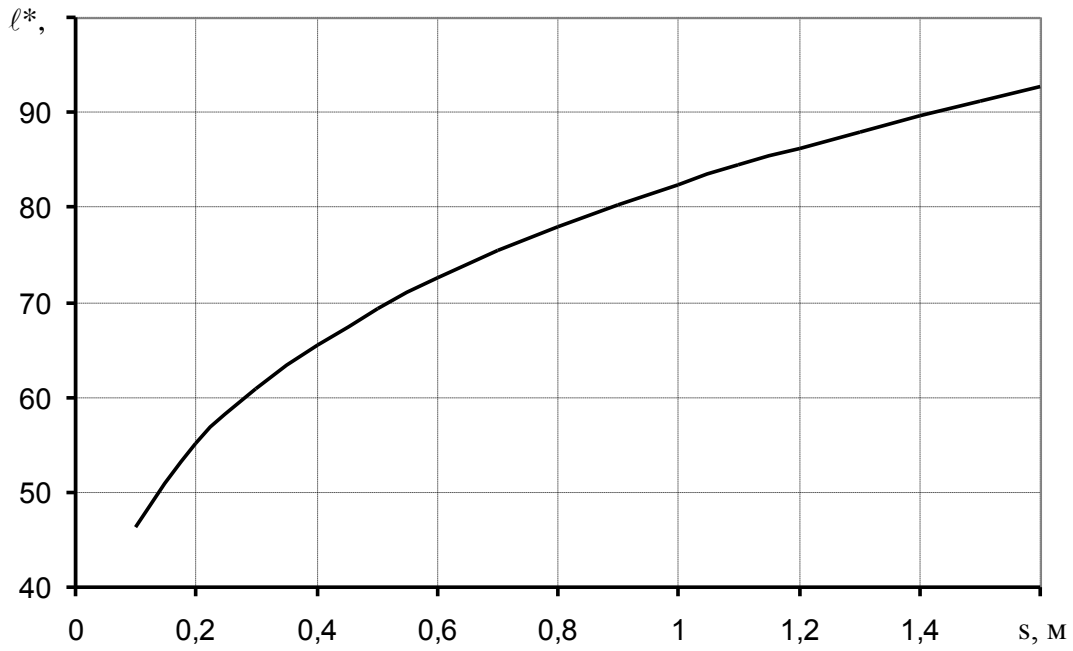
a)



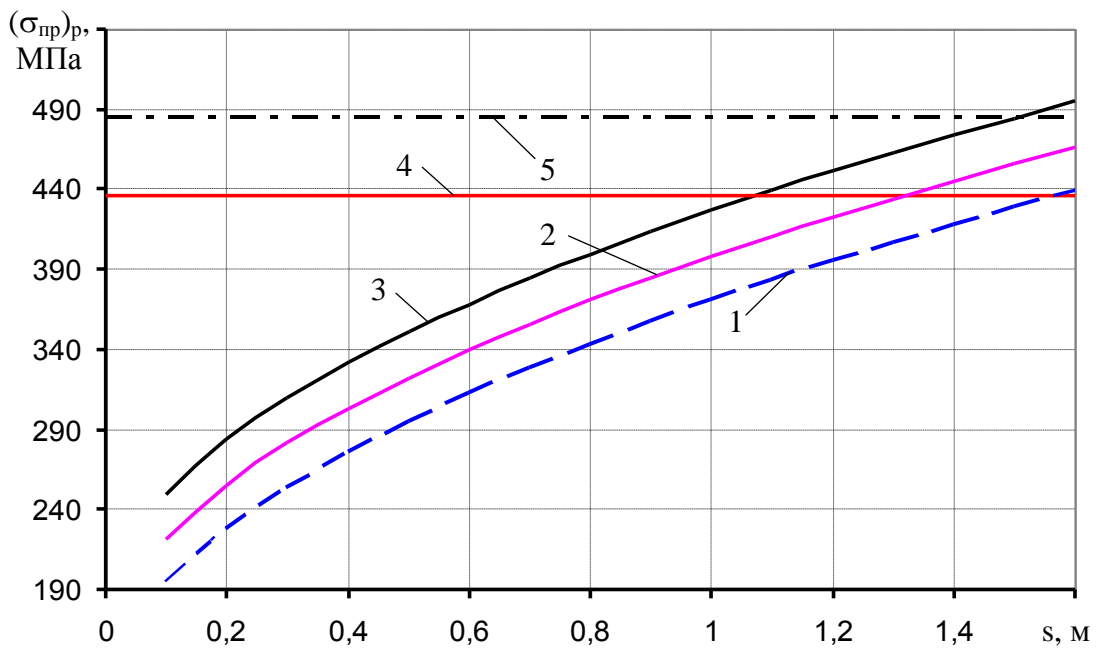
б

1 – в средней части участка; 2 – на границах участка с просадочными грунтами; 3 – нормативный предел текучести материала труб

Рисунок 4.10 – Изменение изгибных напряжений от протяженности участка с просадочными грунтами: толщина стенки трубы 26,4 мм (а); толщина стенки трубы 27,7 мм (б)



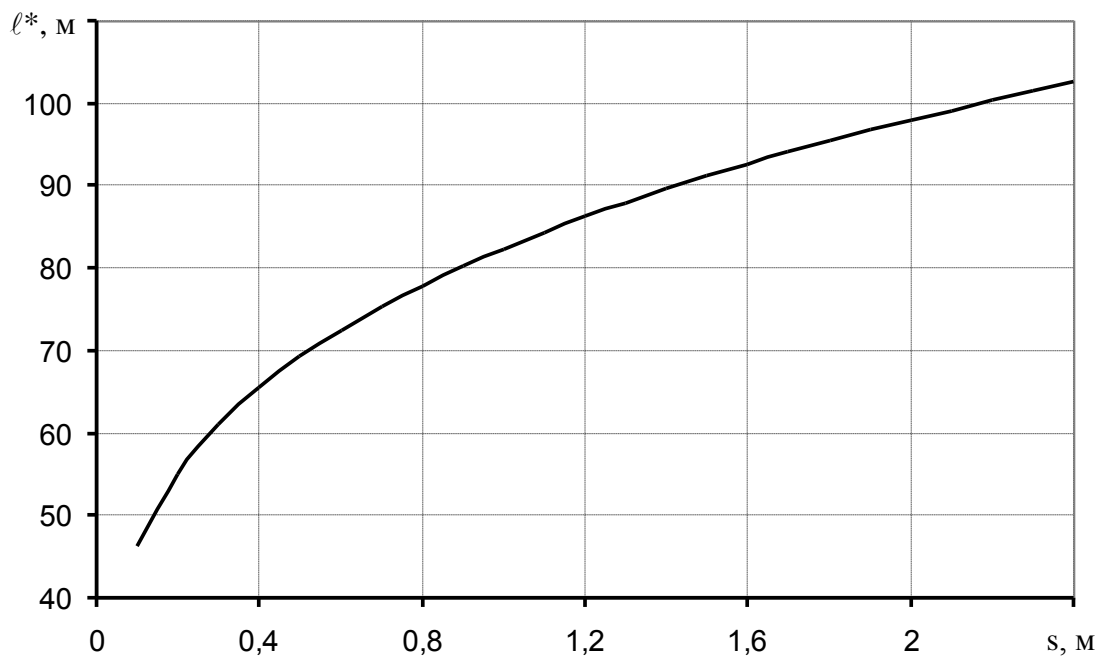
а



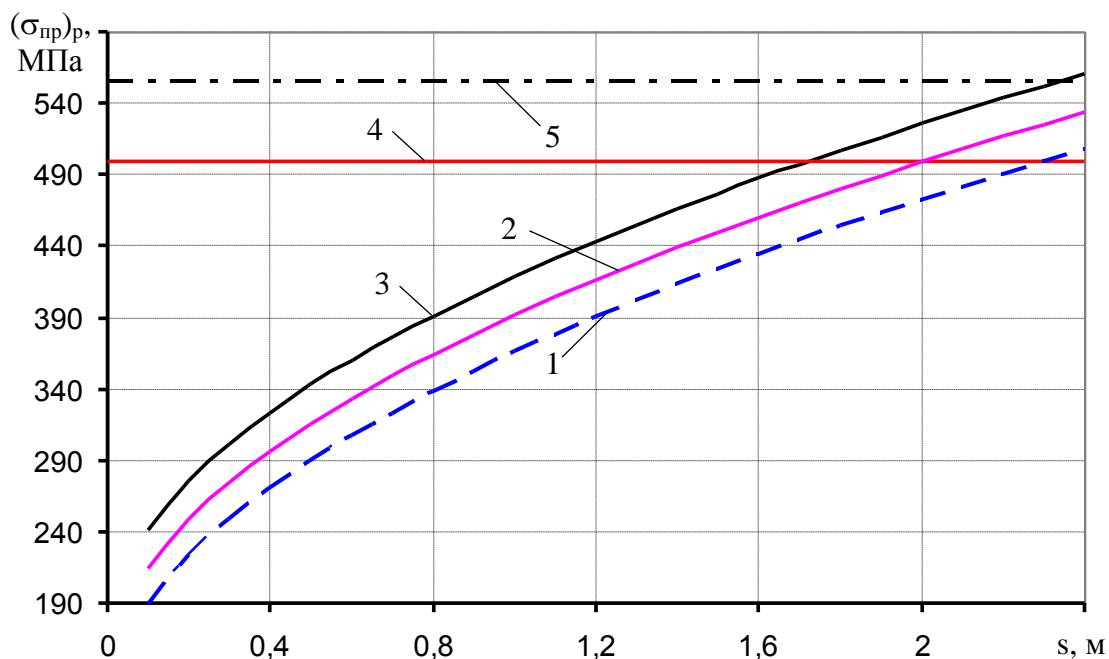
б

1 – $p = 7,9$ МПа; 2 – $p = 9,8$ МПа; 3 – $p = 11,8$ МПа; 4 – допустимые продольные растягивающие напряжения по [5]; 5 – нормативный предел текучести материала труб

Рисунок 4.11 – Изменение протяженности деформирующегося участка газопровода (а) и максимальных продольных растягивающих напряжений (б) от осадки грунта (наружный диаметр газопровода 1420 мм, толщина стенки трубы 26,4 мм)



a)



б)

1 – $p = 7,9$ МПа; 2 – $p = 9,8$ МПа; 3 – $p = 11,8$ МПа; 4 – допустимые продольные растягивающие напряжения по [5]; 5 – нормативный предел текучести материала труб

Рисунок 4.12 – Изменение протяженности деформирующегося участка газопровода (а) и максимальных продольных растягивающих напряжений (б) от осадки грунта (наружный диаметр газопровода 1420 мм, толщина стенки трубы 27,7 мм)

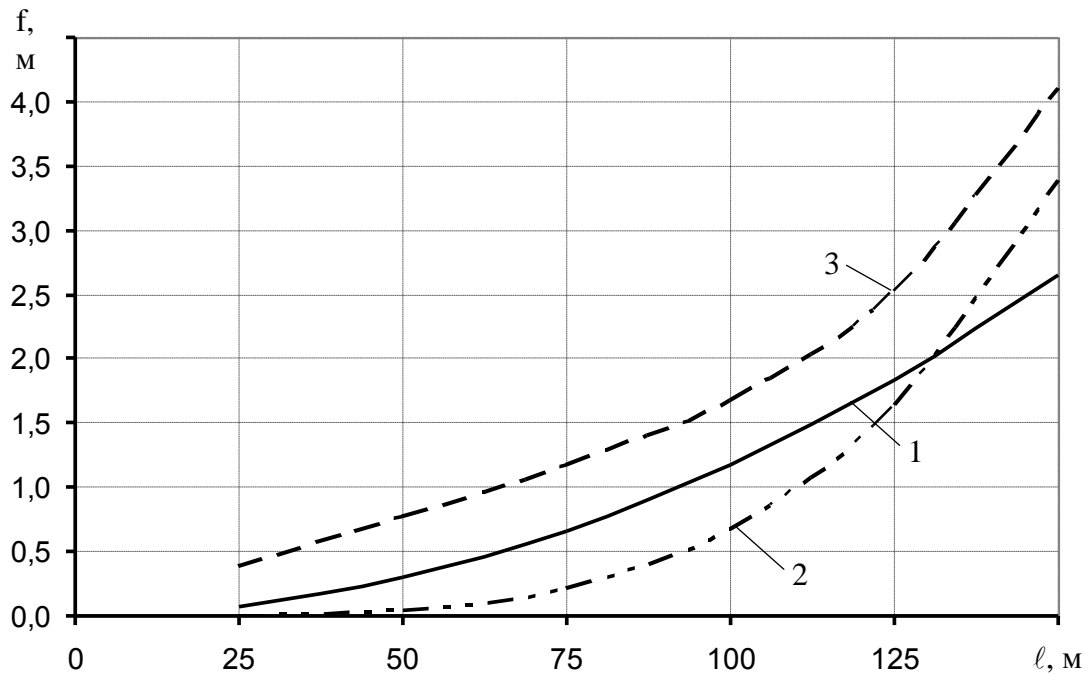
Как уже отмечалось линейная часть газопровода Бованенково – Ухта на участках категории «Н» смонтирована из труб класса прочности К60 с толщиной стенки 26,4 мм, имеющих нормативный предел прочности 588 МПа и нормативный предел текучести 485 МПа. На участках категории «С» ЛЧ МГ смонтирована из труб класса прочности К65 с номинальной толщиной стенки 27,7 мм, имеющих нормативный предел прочности 638 МПа и нормативный предел текучести 555 МПа.

Выполним проверку условия (4.33), приняв значение интенсивности поперечной нагрузки от веса трубы и изоляционного покрытия $q_{тр} = 9031$ Н/м при толщине стенки труб 26,4 мм и $q_{тр} = 9467$ Н/м при толщине стенки труб 27,7 мм.

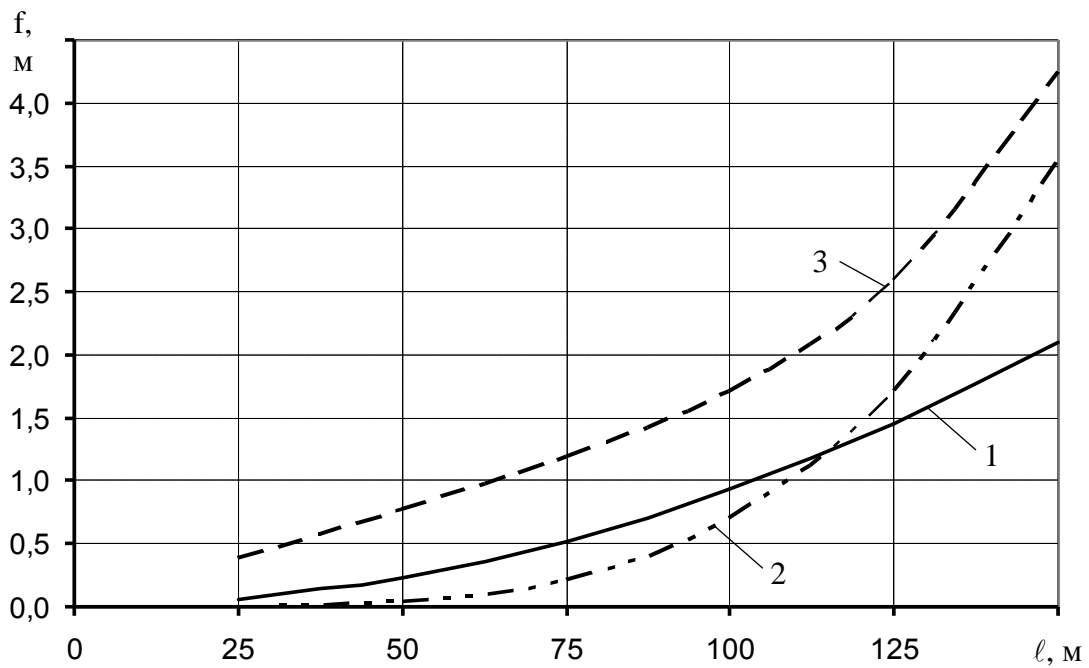
Выталкивающая сила воды, действующая на полностью погруженный в воду газопровод, составляет $q_b = 15536$ Н/м. Таким образом, условие (4.33) имеет вид $q_{тр} < q_b$, т.е. при оттаивании мерзлых грунтов и их обводнении будет происходить всплытие участков МГ Бованенково – Ухта, не имеющих дополнительной пригрузки балластирующими устройствами. Результаты расчета параметров деформирования эксплуатирующегося МГ при оттаивании мерзлых грунтов показывают, что при отсутствии внутреннего давления и температурных деформаций, т.е. при простом всплытии газопровода, прочность участков с нормативной высотой насыпи, равной 1 м, будет обеспечена независимо от их протяженности.

При наличии внутреннего давления и температурных деформаций, т.е. при всплытии с выпучиванием, верх трубы на участках с нормативной высотой насыпи, равной 1 м, окажется на дневной поверхности при протяженности всплывающего участка около 65 м. При этом уровень механических напряжений в стенках трубы превысит допускаемые значения даже в тех случаях, когда труба не достигнет дневной поверхности. Далее для случая, когда верхняя часть грунта засыпки находится в мерзлом состоянии, используя выражение (4.79), оценим характер и степень изменения наибольшей высоты талого слоя грунта засыпки, при которой обеспечена прочность деформировавшегося участка газопровода, от его протяженности ℓ_1^* . Результаты расчетов представлены на рисунке 4.14.

Выполненные расчеты показали, что напряженно-деформированное состояние газопровода вследствие его всплытия и выпучивания в пределах талого слоя грунта засыпки, не достигая дневной поверхности, может не соответствовать установленным требованиям. Для участков МГ с необеспеченным условием прочности точки с координатами $(\ell_1^*; h_{гр.т})$ будут находиться выше кривых, приведенных на рисунке 4.14, а для участков с обеспеченным условием прочности – ниже соответствующих графиков.



а)

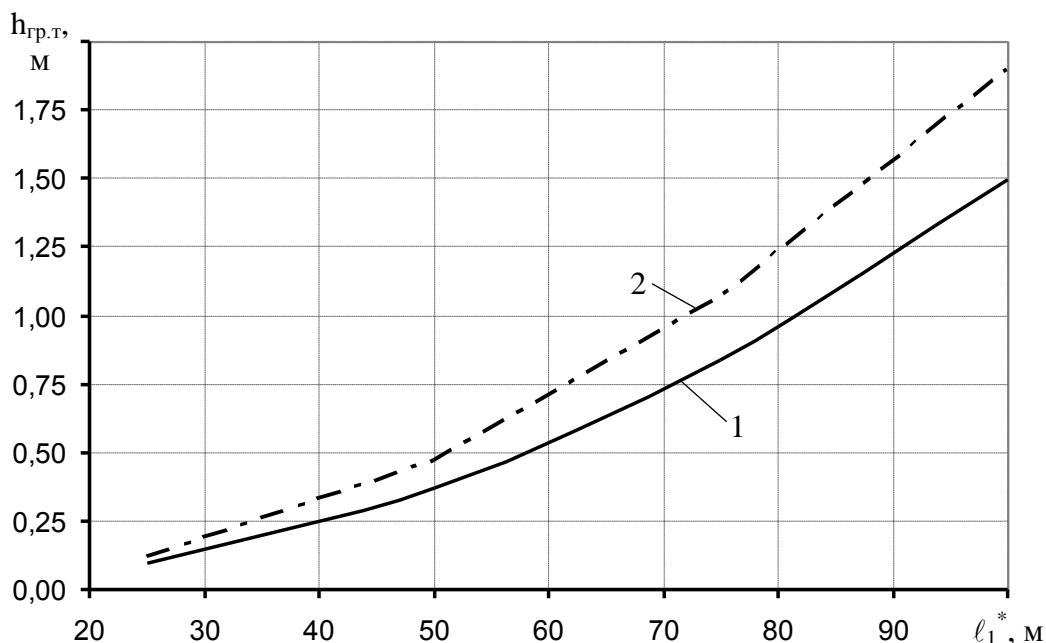


б)

1 – предельная стрела прогиба участка при которой требования прочности выполняются; 2 – от действия выталкивающей силы воды; 3 – от совокупности действующих нагрузок

Рисунок 4.13 – Зависимость стрелы прогиба всплывающего участка газопровода от его длины: а – толщина стенки 26,4 мм; б – толщина стенки 27,7 мм

Следует отметить, что с увеличением расстояния ℓ_1^* от границы плавающего участка до места, где газопровод касается мерзлого грунта насыпи, допустимая высота талого слоя, в котором происходит деформирование участка МГ, также возрастает.



1 – участки с толщиной стенки 26,4 мм; 2 – участки с толщиной стенки 27,7 мм

Рисунок 4.14 – Зависимость допустимой высоты талого слоя грунта засыпки, при которой обеспечена прочность деформировавшегося участка газопровода, от его протяженности ℓ_1^*

Основные требования к расчету участков МГ «Бованенково-Ухта», на которых возможна осадка трубопровода.

По результатам проведенных расчетов были сформулированы следующие

1. Вследствие незначительного (4,9 %) отличия толщины стенок труб, использованных при сооружении участков категории «Н» и «С» МГ Бованенково - Ухта, изменение параметров напряженно деформированного состояния (прогиб участка, напряжения в стенках труб) на участках из труб с толщиной стенки 26,4 мм и на участках из труб с толщиной стенки 27,7 мм тоже незначительное. В частности при одинаковой длине участка МГ на слабых грунтах отличие прогиба не превышает 1,0 %, отличие продольной силы составляет 5 – 14 %, отличие изгибных напряжений не превышает 1,2 %. В этой связи при анализе изменения параметров НДС МГ на просадочных грунтах допускается не выполнять деление участков по толщине стенок труб.

2. Изменение параметров НДС участка МГ на просадочных грунтах в зависимости от его протяженности происходит нелинейно. При этом увеличение протяженности участка с 150 до 175 м вызывает изменение характера кривых, что связано с изменением расчет-

ной схемы участка МГ, а именно: при длине участка до 150 м включительно участок необходимо рассматривать как балку, а при длине участка 175 м и более – как жесткую нить. Наиболее существенное изменение наблюдается у зависимости «протяженность деформируемого участка – изгибные напряжения в средней части участка» (см. кривую 1 на рисунке 4.11). До тех пор пока участок МГ работает, как балка происходит увеличение изгибных напряжений в средней части участка с увеличением его протяженности, а после того, как участок начинает работать, как жесткая нить наблюдается снижение изгибных напряжений в средней части участка с увеличением его протяженности. Изгибные напряжения в концевых сечениях участка МГ на границе с просадочными грунтами монотонно возрастают с увеличением протяженности участка, однако после того, как деформируемый участок начинает работать, как жесткая нить, градиент увеличения изгибных напряжений снижается. При этом изгибные напряжения в концевых сечениях на границе участка с просадочными грунтами превышают изгибные напряжения в средней части участка в несколько раз, т.е. именно концевые сечения являются потенциально опасными, так как именно в них возникают максимальные механические напряжения.

3. При проектном рабочем давлении, равном 11,8 МПа, и неограниченной осадке слабого грунта изгибные напряжения в концевых сечениях участка МГ на границе с непросадочными грунтами превысят нормативное значение предела текучести материала труб с толщиной стенки 26,4 мм когда длина деформирующегося участка МГ будет не менее 165 м, а нормативное значение предела текучести материала труб с толщиной стенки 27,7 мм когда длина участка деформирующегося МГ будет не менее 195 м.

4. Допустимые значения прогибов участков МГ из труб с толщиной стенки 27,7 мм превышают допустимые значения прогибов участков МГ из труб с толщиной стенки 26,4 мм на 12 – 24 %, т.е. значительно в большей степени, чем отличаются фактические прогибы этих участков. Обусловлены такие результаты тем, что трубы с толщиной стенки 27,7 мм выполнены из стали более высокого класса прочности (К65), чем трубы с толщиной стенки 26,4 мм (К60), и имеющие по этой причине более высокие значения механических характеристик (предел прочности, предел текучести), которые учитываются при расчете значений допустимых прогибов.

5. При протяженности деформируемого участка МГ из труб с толщиной стенки 26,4 мм до 140 м, а из труб с толщиной стенки 27,7 мм до 150 м значения допустимых прогибов превышают фактические деформации газопровода, т.е. на таких участках при любой осадке слабого грунта НДС МГ будет соответствовать нормативным требованиям, установленным в [61]. При протяженности деформируемого участка МГ из труб с толщиной стенки 26,4 мм более 140 м и из труб с толщиной стенки 27,7 мм более 150 м значения допу-

стимых прогибов меньше фактических деформаций газопровода, т.е. обеспечение соответствия НДС МГ нормативным требованиям, установленным в [2], возможно только при ограничении осадок слабого грунта.

6. При ограниченном значении осадки слабого грунта и при условии, что осадка меньше возможного прогиба участка МГ ($s_{пр} < f$), т.е. когда газопровод будет ложиться на осевший грунт, значение допустимой осадки при рабочем давлении 11,8 МПа составит:

- на участках МГ из труб с толщиной стенки 26,4 мм 1,07 м;
- на участках МГ из труб с толщиной стенки 27,7 мм 1,72 м.

Протяженность деформирующегося участка МГ (расстояние от границы непросадочного грунта до места опирания газопровода на осевший грунт) при допустимых значениях осадок составит:

- на участках МГ из труб с толщиной стенки 26,4 мм 84 м;
- на участках МГ из труб с толщиной стенки 27,7 мм 94 м.

При осадках грунта более 1,07 м на участках МГ из труб с толщиной стенки 26,4 мм и 1,72 м на участках МГ из труб с толщиной стенки 27,7 мм напряженно-деформированное состояние газопровода не будет соответствовать требованиям СТО Газпром 2-2.1-249 [62]. Следует отметить, что при осадке, равной 1,5 м на участках МГ с толщиной стенки труб 26,4 мм и 2,33 м на участках МГ с толщиной стенки труб 27,7 мм, продольные растягивающие напряжения в стенках труб достигнут нормативных значений предела текучести их материала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1) Разработаны методы диагностирования и оценки устойчивости газопроводов, проложенных в многолетнемерзлых грунтах, включая методы стационарного исследования сезонной кинетики изменения температуры грунтов ненарушенной структуры и засыпки газопровода, георадиолокационного диагностирования грунтов и конструктивных элементов обустройства газопроводов, расчетного обоснования прочности и устойчивости газопроводов при изменении свойств многолетнемерзлых грунтов.

2) Выполнено экспериментальное обоснование методов прогнозирования сезонной кинетики изменения температуры грунтов засыпки газопровода в стационарных скважинах на основе сравнительного анализа с термометрическими глубинными кривыми многолетнемерзлого грунта ненарушенной структуры с учетом продолжительности периода земляных работ и средних отрицательных температур при строительстве газопровода, и физико-механических свойств грунта.

3) Предложен для промышленного применения и опробован георадиолокационный метод диагностирования газопроводов в многолетнемерзлых грунтах, экспериментально обоснованы рациональные методики георадиолокационного сканирования, при которых выявляется не менее 85 % конструктивных особенностей газопровода. Предложены схемы дискретной установки антенн по профилю с шагом не более 0,5 м на пересеченной местности для диагностирования линейной части газопроводов, непрерывное сканирование с автоматизированным датчиком перемещения для диагностирования сложноразветвленных газопроводов.

4) Найдены информативные признаки диагностирования балластирующей и несущей способности грунтов засыпки газопровода в траншее, критерии выявления границы сезонного оттаивания многолетнемерзлого грунта в траншее газопровода. Экспериментально обоснован выбор из стандартного ряда оборудования оптимальных типов экранированных антенн, позволяющих достигнуть достаточной разрешающей способности метода для диагностирования пространственных координат положения газопровода, подземных льдов, стенок и дна траншеи газопровода.

5) Разработан метод расчетного обоснования прочности и устойчивости газопроводов с учетом характеристик механических свойств новых высокопрочных труб класса прочности K65 (X80), рабочего давления в газопроводах 11,8 МПа, а также изменения несущей и балластирующей способности многолетнемерзлых грунтов, приводящих к осадке и всплыванию газопроводов. Найдены граничные расчетные критерии устойчивого положения газопроводов в этих условиях.

6) По результатам работы разработаны рекомендации ОАО «Газпром» «Порядок мониторинга геокриологических условий прокладки и обеспечения устойчивости газопроводов в нестабильных грунтах с малой несущей способностью», устанавливающие требования к методике проведения работ по георадиолокационному диагностированию многолетнемерзлых грунтов и технических конструкций обустройства газопровода, методам расчетного обоснования прочности и устойчивости газопроводов в многолетнемерзлых грунтах. Разработанные рекомендации внедрены на начальном этапе эксплуатации газопроводов Бованенково-Ухта, что позволит своевременно диагностировать и применить упреждающие мероприятия по недопущению развития критических нарушений устойчивого положения газопроводов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Перечень приоритетных научно-технических проблем ОАО «Газпром» на 2011-2020 гг., утвержденный Председателем Правления ОАО «Газпром» А.Б. Миллером (№ 01-114 от 04.10.2011), п. 5.5 «Технологии, обеспечивающие повышение эффективности магистрального транспорта газа, диверсификацию способов поставок газа потребителям».
2. Мерзлотоведение / Под ред. проф. В.А. Кудрявцева. - М.: Изд-во Моск. ун-та, 1981. – 240 с.
3. ГОСТ 25100-95 Грунты. Классификация. – М. МНТКС, 1996. – 19 с.
4. Общая геокриология / Под ред. Э.Д. Ершова. М.: Недра, 2002. - 219 с
5. Достовалов Б.Н., Кудрявцев В.А. – Общее мерзлотоведение. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1967. - 404 с.
6. Мельников П.И., Толстихин Н.И., Некрасов И.А., Акимов А.Т. и др. Общее мерзлотоведение.- Новосибирск.: Наука, 1974. – 291 с.
7. Кудрявцев В.А. Общее мерзлотоведение. - М.: Недра, 1978. - 151 с.
8. Чевереv В.Г. Природа криогенных свойств грунтов. - М.: Наука, 2004. – 167 с.
9. Ржевский В.В., Добрецов В.Б. Физические свойства горных пород и процессы при отрицательных температурах. - М.: Наука., 1969. - 126 с.
10. Гречищев С.Е., Чистотинов Л.В., Шур Ю.Л. Криогенные физико-геологические процессы и их прогноз. - М., Недра, 1980. – 320 с.
11. Инженерная геокриология: Справочное пособие / Э.Д. Ершов, Л.Н. Хрусталёв; Г.И. Дубиков, С.Ю. Пармузин. - М.: Недра, 1991. - 439 с.
12. Амарян Л. С. Свойства слабых грунтов и методы их изучения. - М.: Недра, 1990.-220 с.
13. Бабков В.Ф., Безрук В.М. Основы грунтоведения и механики грунтов: Учеб. пособие для автомоб. дор. спец. вузов. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Высшая школа, 1986. - 239 с.
14. Цытович Н.А. Механика грунтов (краткий курс). - М.: Высшая школа, 1983. - 268 с.
15. Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов. - М.: Высшая школа, 1973. - 447 с.
16. Лабораторные исследования мерзлых пород / Под ред. Э.Д. Ершова. М., 1985.
17. Роман Л. Т. Механика мерзлых грунтов. - М.: Изд-во МГУ, 2002. - 115 с.
18. Савельев Б.А. Методы изучения мерзлых пород и льдов. - М.: Недра, 1985.
19. Руководство по определению физических, теплофизических и механических

характеристик мерзлых грунтов. - М.: Стройиздат, 1973. – 75 с.

20. Савельев Б.А. Термодинамика и механика природных льдов. - М.: Наука, 1983.

21. Вялов С.С, Городецкий С.Э., Пекарская Н.К. Рекомендации по определению длительной прочности и ползучести мерзлых и оттаявших грунтов. - М.: НИИОСП, 1970. - 144 с.

22. Мустафаев А.А. Фундаменты на просадочных и набухающих грунтах. — М.: Высшая школа, 1989. - 591 с.

23. Гольдштейн М. Н. Деформации земляного полотна и оснований сооружений при промерзании и оттаивании. М.: Трансжелдориздат, 1948. - 211 с.

24. Далматов Б.И. Механика грунтов, основания и фундаменты. 2-е изд. перераб. и доп. - Л.: Стройиздат, 1988. - 415 с.

25. Бородавкин П.П. Механика грунтов в трубопроводном строительстве: Учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1986. – 224 с.

26. Геокриологический прогноз при строительном освоении территорий /Под ред. В.В. Баулина - М.: Наука. 1987. - 269 с.

27. А.К. Дерцакян, Н.П. Васильев. Строительство трубопроводов на болотах и многолетнемерзлых грунтах - М.: Недра, 1978. - 165 с.

28. В.Е. Полуэктов. Устройство фундаментов в вечноммерзлых грунтах - Л. : Стройиздат, 1982. - 195 с.

29. ГОСТ-23253-78. Грунты. Методы полевых испытаний мерзлых грунтов». - М.: Изд-во стандартов, 1980. – 23 с.

30. СНиП 2.02.04-88. Основания и фундаменты на вечноммерзлых грунтах. . М.: Центр проектной продукции массового применения Минстроя России, 1995. – 65 с.

31. СНиП 2.02.01-83. Основания зданий и сооружений. – М.: Центр проектной продукции массового применения Минстроя России, 1995. – 50 с.

32. СТО Газпром 2-2.1-435-2010. Проектирование оснований, фундаментов, инженерной защиты и мониторинга объектов ОАО «Газпром» в условиях крайнего севера. - М.: Газпром экспо, 2010. - 224 с.

33. СТО Газпром 2-3.1-071-2006. Регламент организации работ по геотехническому мониторингу объектов газового комплекса в криолитозоне. - М.: ИРЦ Газпром, 2006. – 26 с.

34. СТО Газпром 2-3.1-072-2006. Регламент на проведение геотехнического мониторинга объектов газового комплекса в криолитозоне. М.: ИРЦ Газпром, 2006. - 62 с.

35. ВСН 013 - 88 Строительство магистральных и промысловых трубопроводов в условиях вечной мерзлоты. - М.: Изд-во стандартов 1990. - 19 с.

36. Пособие по проектирования полотна автодорог на слабых грунтах. - М.: Изд-во стандартов, 2006. - 159 с.
37. Черняк Г.Я. Электромагнитные методы в гидрогеологии и инженерной геологии. - М.: Недра, 1987. - 213 с.
38. Пархоменко Э.И. Электрические свойства горных пород. М.: Наука, 1965. - 346 с.
39. Рекомендации по определению физико-механических свойств мерзлых дисперсных грунтов геофизическими методами. М.: ПНИИИС Госстроя СССР, 1989. - 55 с.
40. Фролов А.Д. Электрические и упругие свойства мёрзлых пород и льдов. Пушкино. ОНТИ ПНЦ РАН. 1998. - 515 с.
41. Фролов А.Д. Электрические и упругие свойства криогенных пород. - М.: Недра, 1976. 254 с.
42. Зыков Ю.Д. Геофизические методы исследования криолитозоны; Учебное пособие. - М.: Изд-во МГУ. - 243 с.
43. Заборовский А.И. Электроразведка. - М.: Высшая школа, 1963. - 415 с.
44. Рекомендации по определению физико-механических свойств мерзлых дисперсных грунтов геофизическими методами - М.: Изд-во стандартов, 1989. – 76 с.
45. Рекомендации по геофизическим работам при инженерных изысканиях для строительства (электроразведка). - М.: Изд-во стандартов, 1984. - 143 с.
46. Методы геофизики в гидрогеологии и инженерной геологии. - М.: Недра, 1985. - 257 с.
47. Дудлер И.В. Комплексные исследования грунтов полевыми методами. - М.: Стройиздат, 1979. - 132 с.
48. Мельник Ю.А, Зубкович С.Г., Степаненко В.Д. и др. Радиолокационные методы исследования Земли. - М.: Советское радио, 1980. – 264 с.
49. Мельников В.П. Электрофизические исследования мерзлых пород,- Новосибирск.: Наука, 1977. – 108 с.
50. Петровский А.Д. Радиоволновые методы в подземной геофизике. - М.: Недра, 1971. – 223 с.
51. Применение сейсмоакустических методов в гидрогеологии и инженерной геологии. - М.: Недра, 1992. - 224 с.
52. Седов В.М. Сейсмические исследования в районах многолетней мерзлоты. - М.: Наука, 1988. – 180 с.
53. Лисин Ю. В., Александров А. А., Ларионов В. И., Козлов М. А. Оценка планово-высотного положения трубопровода на участках с многолетнемерзлыми грунтами. Вестн.

МГТУ. Сер. Машиностр. 2012, N 3, с. 68-79.

54. Инструкция по оценке прочности и контролю участков газопроводов в слабонесущих грунтах. - М.: ВНИИГАЗ, 1986. - 57 с.

55. Финкельштейн М.И., Карпухин В.И., Кутев В.А., Метелкин В.Н. Подповерхностная радиолокация. - М.: Радио и Связь, 1994. – 189 с.

56. Владов М.Л., Старовойтов А.В. Георадиолокационные исследования верхней части разреза. Учебное пособие.- М.: Издательство МГУ, - 1999. - 167 с.

57. Финкельштейн М.И., Кутев В.А., Золотарев В.П. Применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии.- М.: Недра, 1986.- 128 с.

58. Черняк Г.Я., Мясковский О.М. Радиоволновые методы исследования в гидрогеологии и инженерной геологии. - М.: Недра, 1973. - 196 с.

59. Коновалов А.А. К учету изменения температуры вечномерзлого грунта во времени при определении его длительной прочности // Строительство в районах Восточной Сибири и Крайнего Севера. Красноярск, 1974. Вып. 29. С. 159-166.

60. Сосновский А. Г., Столярова Н. И. Измерение температур. - М.: Изд-во стандартов, 1970.

61. СП 36.13330.2012. Магистральные трубопроводы (Актуализированная редакция СНиП 2.05.06-85*). – М.: Госстрой, ФАУ ФЦС, 2013. – 93 с.

62. СТО Газпром 2-2.1-249-2008 Магистральные газопроводы. - М.: ООО ИРЦ Газпром, 2008. - 150 с.

63. Бородавкин П.П., Березин В.Л. Сооружение магистральных трубопроводов. - М.: Недра, 1977. - 407 с.

64. Бородавкин П.П. Подземные магистральные трубопроводы (проектирование и строительство). - М.: Недра, 1982. - 384 с.

65. Айнбиндер А.Б. Расчет магистральных и промысловых трубопроводов на прочность и устойчивость: справочное пособие. - М.: Недра, 1991. - 287 с.

66. Айнбиндер А.Б., Камерштейн А.Г. Расчет магистральных трубопроводов на прочность и устойчивость. - М.: Недра, 1982. -341 с.

67. Клейн Г. К. Расчет подземных трубопроводов. - М.: Недра, 1969. - 156 с.

68. Расчет и конструирование трубопроводов. Справочное пособие. - Л.: Машиностроение, 1979. - 268 с.

69. Шувалов А.Н., Замятин А.В. Стабилизация грунтовых насыпей в зимний период. – Тюмень.: Известия высших учебных заведений. Нефть и газ, №7, 2010. с. 93 - 97

70. Губароков А.А., Алешин Г.А., Идрисов Н.Р., Кириллов А.В. Мониторинг экзогенных геологических процессов на магистральном газопроводе «Заполярье – Новый Урен-

гой». – Тюмень.: Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. №3, 2011. с. 7 - 13

71. Лимарь О. В. Напряженно-деформированное состояние трубопровода на переходе через границу, разделяющую грунты с различными физико-механическими свойствами. Теплофизика, гидродинамика, теплотехника: Сборник статей. Вып. 3. Тюмень: ТюмГУ; Тюмень: Мир. 2008, с. 17-24

72. Яценко В. В. Особенности проектирования магистральных трубопроводов на участках с многолетнемерзлыми грунтами. Разработка, эксплуатация и обустройство нефтяных месторождений: Сборник научных трудов. Вып. 66. Самара: Самар. дом печати. 2008, с. 234-238

73. Соколов С. М. Многолетнемерзлые грунты в качестве основания промышленных трубопроводов. Нефт. х-во. 2008, N 10, с. 126-127

74. Хрусталева Л.Н. Никифоров В.В. Стабилизация вечномерзлых грунтов в основании зданий. - Новосибирск.: Наука, 1990. – 319 с.

75. Дрынкина Т. Н., Гусев В. В. Применение комплекса проектных решений для защиты трубопроводов на участках мерзлых грунтов. Естеств. и техн. науки. 2008, N 2, с. 238-241

76. Кушнир С. Я. Особенности проектирования и строительства нефтегазопроводов в условиях мерзлых грунтов. Международная конференция «Криогенные ресурсы полярных регионов», Салехард, июнь, 2007: Материалы. Т. 2. М.: Науч. сов. по криол. Земли РАН. 2007, с. 327-328

77. Справочник по строительству на вечномерзлых грунтах. Под ред. Я.Ю. Велли - Л. : Стройиздат, 1977. - 415 с.

78. Голубин С. И. Мерзлотные процессы и деформации газопроводов. Энергия: Экон., техн., экол.. 2007, N 8, с. 60-62

79. Харионовский В.В. Повышение прочности газопроводов в сложных условиях. - Л.: Недра, 1990. - 180 с.

80. Димов Л.А., Димов И.Л. Проектирование прочности и общей устойчивости промышленных газопроводов в слабых грунтах. - М.: Газовая промышленность, №11, 2012. с. 65 – 67

81. Димов Л.А., Димов И.Л. Обеспечение общей устойчивости магистральных газопроводов для длительной эксплуатации. - М.: Газовая промышленность, №3, 2012 . с. 45 – 50

82. Демченко В.Г., Гараев С.И., Могушков Н.А. Качество проектирования линейной части магистральных газопроводов. - М.: Газовая промышленность, №5, 2012. с. 46 - 51

83. Идрисова Я.Р., Гумеров А.К., Идрисов Р.Х. Методические основы определения

напряженно-деформированного состояния трубопроводов на участках многолетнемерзлых грунтов. - М.: Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе, №12, 2010. с. 89 – 91