

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ухта – 2014

Работа выполнена в филиале Общества с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий – Газпром ВНИИГАЗ» в г. Ухта

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
Кузьбожев Александр Сергеевич

Официальные оппоненты:

Земенков Юрий Дмитриевич, доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Транспорт углеводородных ресурсов»
ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный нефтегазовый университет»

Юшманов Валерий Николаевич, кандидат технических наук, начальник
производственно-диспетчерской службы ООО «Газпром трансгаз Ухта»

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Национальный минерально-
сырьевой университет «Горный», г. Санкт-Петербург

Защита диссертации состоится «22» октября 2014 г. в 12-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.291.02 в Ухтинском государственном техническом университете по адресу: 169300, Республика Коми, г. Ухта, ул. Первомайская, д. 13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ухтинского государственного технического университета и на сайте www.ugtu.net.

Автореферат разослан «22» августа 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук

Мария Михайловна Бердник

Общая характеристика работы

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 привести 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 которой 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 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.

Содержание работы

Во введении обоснованы актуальность и значимость выбранной темы, степень ее разработанности, охарактеризованы научно-методические пути ее решения.

В первой главе выполнен обзор и анализ мировой практики средств и методов диагностирования газопроводов в многолетнемерзлых грунтах, дан анализ мерзлотным явлениям и процессам, раскрыты проблемы диагностирования газопроводов существующими методами.

Исследованиями проблем устойчивости промышленных объектов, построенных на многолетнемерзлых грунтах, в разное время занимались академические институты - институт мерзлотоведения им. П.И.Мельникова СО РАН, учебные институты РГУ Нефти и газа им. И.М. Губкина, МГУ им. М.В. Ломоносова, отраслевые ВНИИСТ, ВНИИГАЗ, Гипроспецгаз, ЮжНИИгипрогаз и другие.

Несмотря на существенный прогресс в достижении высоких качественных показателей надежности новых газопроводов, отмечен ряд проблем в области их диагностирования в многолетнемерзлых грунтах. Анализ работ по проблеме устойчивости газопроводов в многолетнемерзлых грунтах, показывает, что достоверность расчетных оценок связана, в первую очередь, с надежностью исходных данных о перемещениях газопроводов в условиях сезонного промерзания-оттаивания грунта. Однако, применяемые для определения пространственного положения газопроводов существующие трассовые методы поиска подземных стальных коммуникаций оказываются недостаточно информативны в условиях многолетнемерзлых грунтов из-за существенной погрешности измерений. Ситуация усугубляется возникновением мешающих конструктивных факторов, например, балластирующих устройств, которые независимо от конструкции имеют металлические элементы, изменяющие информативную конфигурацию индукционного сигнала приборов. Поэтому, при большом проектном заглублении газопроводов, как правило, диагностирование устойчивости не производится, на практике работы начинаются к моменту прямого обнаружения деформационных явлений, связанных с выходом газопровода из грунта.

Тогда, в качестве параметров, описывающих напряженно-деформированное (НДС) состояние газопроводов, используют исходные материалы геодезической съемки фактического искривленного состояния газопроводов, на основе чего рассчитывают параметры НДС газопроводов с использованием различных численных методов.

Однако, не менее опасными могут быть скрытые деформации газопроводов в многолетнемерзлых грунтах при сезонном изменении их свойств, уменьшении несущей и балластирующей способности, что требует своевременного диагностирования и применения упреждающих мероприятий по недопущению развития критических нарушений устойчивого положения газопроводов.

Как правило, прогнозирование изменения свойств многолетнемерзлых грунтов, ореолов оттаивания вокруг газопровода выполняется на базе различных расчетных программ, например, программы «Тепло», разработанной на кафедре геокриологии МГУ проф. Л.Н. Хрустальевым. Недостатком расчетных методов

прогнозирования является обобщенный характер зависимостей, положенных в основу расчетов. Между тем, на практике поведение многолетнемерзлых грунтов, сезонные изменения температуры подчиняются гораздо более сложным закономерностям, требующим дополнительного учета множества факторов – физико-механических свойств и строения грунта нарушенной структуры засыпки газопровода в траншее, гидрогеологических условий прокладки и множества других. Гораздо более точными могут оказаться экспериментальные методы диагностирования мерзлого и талого состояния грунтов, однако применительно к грунтам засыпки газопроводов в траншее такие методы отработаны недостаточно.

В отраслевых нормативных документах, касающихся вопросов диагностирования и оценки устойчивости газопроводов в многолетнемерзлых грунтах, данные вопросы также отражены недостаточно. В таких условиях необходима разработка новых методов диагностирования геокриологических условий прокладки и обеспечения устойчивости газопроводов в нестабильных многолетнемерзлых грунтах с малой несущей способностью, адаптированных к современным конструктивным и эксплуатационным параметрам газопроводов.

Во второй главе выполнено экспериментальное исследование свойств многолетнемерзлых грунтов и дан анализ конструктивных особенностей участков газопроводов Бованенково-Ухта. Исследования проводились на участке газопровода 0–27 км, расположенном на полуострове Ямал.

Участок характеризуется чередованием равнинных и пересеченных форм рельефа, на равнинах - тундра, местами заболоченная. Грунты находятся в мерзлом состоянии, толщина слоя сезонного промерзания-оттаивания определяется рельефом. Подземные льды распространены на глубину от 1,5 до 8 м и более, протяженность по оси газопровода составляет от 50 до 800 м. В период таяния снега происходит интенсивное обводнение низинных участков.

Газопровод при строительстве укладывался на песчаное основание, и засыпался привозным песком на высоту до 0,2 м над верхом труб. Балластировка газопровода выполнена полимерно-контейнерными грунтозаполняемыми устройствами ПКБУ – МК. На участках подземных льдов применялась надземная прокладка с теплоизоляцией трубы сегментами «Пеноплекс» толщиной 100 мм и основания газопровода теплоизоляционными плитами толщиной 50 мм. Для исключения вымывания грунта засыпки из траншеи на склонах установлены грунтозадерживающие барьеры из синтетических мешков, заполненных песком. Для определения температуры многолетнемерзлых грунтов на участке газопровода было пробурено 24 скважины глубиной 4 м для измерения температуры (рис. 1)

Скважины располагались парами – по одной в грунте засыпки траншеи и в многолетнемерзлом грунте. Измерение температуры выполняли с помощью цифрового контроллера ПКЦД – 1/100 и термоизмерительной косы. Термоизмерения проводили непосредственно перед началом георадиолокационного обследования.

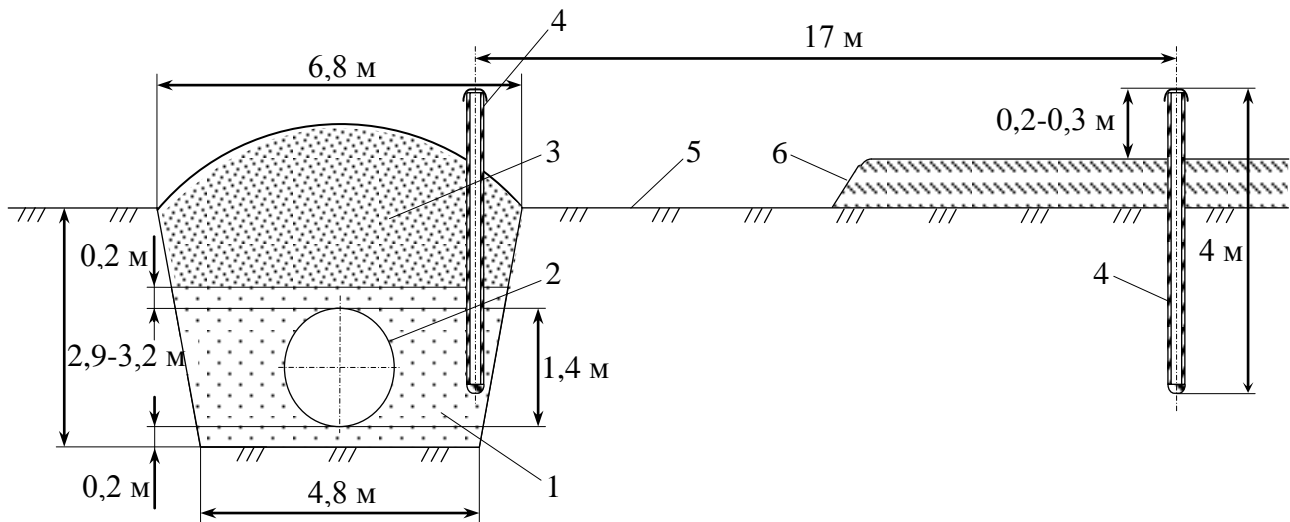


Рис. 1 Схема расположения скважин для измерения температуры грунта
 1 – подушка и обсыпка газопровода; 2 – газопровод; 3 – грунт засыпки; 4 – скважина; 5 – проезд вдоль трассы; 6 – слой снега

По результатам термоизмерений определялось фактическое положение границы сезонного промерзания-оттаивания и кровли многолетнемерзлых грунтов. Результаты термоизмерений использовались при последующей интерпретации результатов георадиолокационного обследования газопроводов.

Установлено, что температура грунта обратной засыпки газопровода на уровне заложения трубы может быть как выше, так и ниже температуры естественного (ненарушенного) грунта на этой же глубине. Степень отличия температуры грунта обратной засыпки от температуры естественного (ненарушенного) грунта, в первую очередь, зависит от времени прошедшего с момента окончания строительно-монтажных работ. В том случае, если засыпка траншеи выполнена более одного года назад, температура грунта на глубине заложения трубопровода практически не отличается от температуры естественного (ненарушенного) грунта на аналогичной глубине (рис. 2, а). Более низкая температура грунта обратной засыпки по сравнению с температурой естественного (ненарушенного) грунта (рис. 2, б) обусловлена проведением строительно-монтажных работ на газопроводе (подготовка траншеи, укладка и засыпка трубопровода) в зимний период (январь), предшествующий проведению измерений. При этом подготовленная траншея до засыпки грунтом подвергалась в течение достаточно длительного периода времени воздействию отрицательных температур. Более высокая температура грунта обратной засыпки по сравнению с температурой естественного (ненарушенного) грунта (рис. 2, в) обусловлена проведением строительно-монтажных работ на газопроводе (подготовка траншеи, укладка и засыпка трубопровода) в весенний период (май), предшествующий проведению измерений. При этом подготовленная траншея до засыпки грунтом подвергалась в течение некоторого периода времени воздействию положительных температур.

Изменения температуры естественного (ненарушенного) грунта и грунта обратной засыпки МГ по глубине не имеют единой тенденции, хотя в некоторых сечениях контроля наблюдается однотипный характер изменения температуры грунта по глубине во всех пробуренных скважинах.

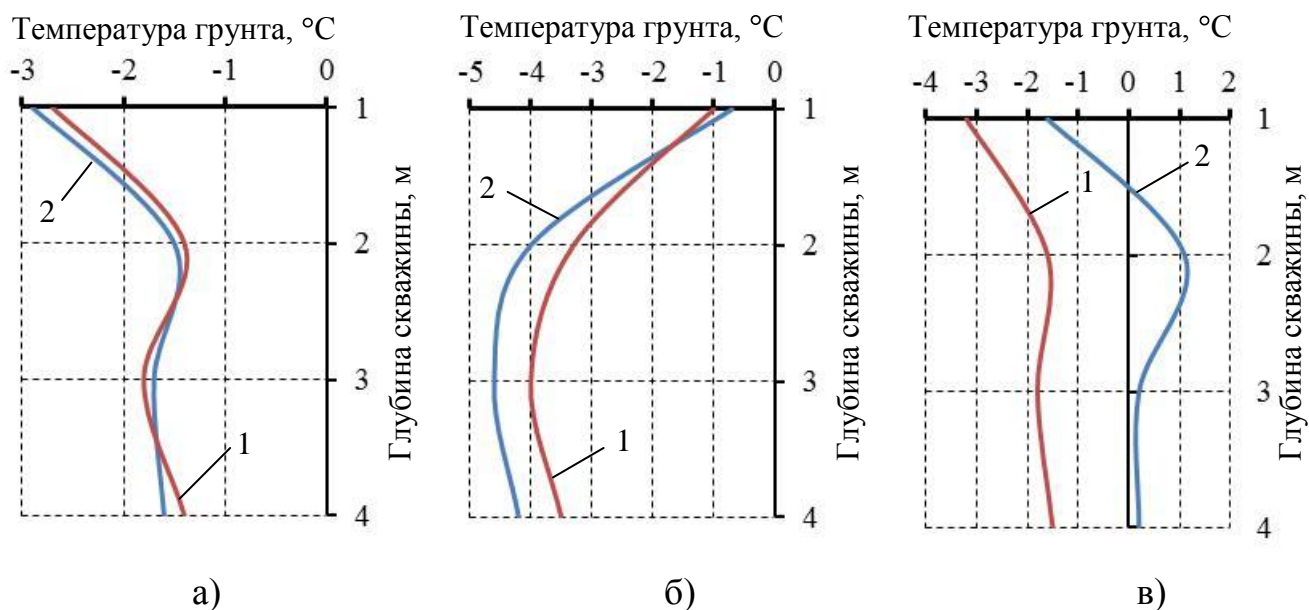


Рис. 2 Характерные температуры грунта по глубине скважин: а) после засыпки траншеи до момента измерений прошло более года; б) засыпка траншеи в зимний период; в) – засыпка траншеи в весенний период
1 – многолетнемерзлый грунт; 2 – грунт обратной засыпки

Анализ грунтовых условий участка выполнен по результатам отбора проб грунта при бурении термоизмерительных скважин. По результатам анализа грунтовых условий было установлены следующие закономерности свойств многолетнемерзлых грунтов в зависимости от рельефа местности.

Суммарная влажность мерзлого грунта увеличивается в верхних слоях на глубине до 2 м с понижением рельефа, что объясняется накоплением талых вод в период таяния снега. Максимальные значения зафиксированы на ПК 266, что соответствует точке профиля с минимальной высотной отметкой. На глубине 3 м наблюдается увеличение суммарной влажности на ПК 264, что также связано с отопляющим 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 точке профиля, расположенной перед местом перехода склона в заболоченную тундру, что возможно, также связано с отопляющим действием талых и атмосферных вод, дренирующихся вниз по склону.

Так как грунт участка большую часть года находится в мерзлом состоянии, соответственно характер изменения льдистости по длине и по глубине профиля будет соответствовать суммарной влажности с теми же механизмами формирования. На всех глубинах отмечается увеличение влажности между ледяными включениями в месте перехода склона в болотистую тундру (рис. 3).

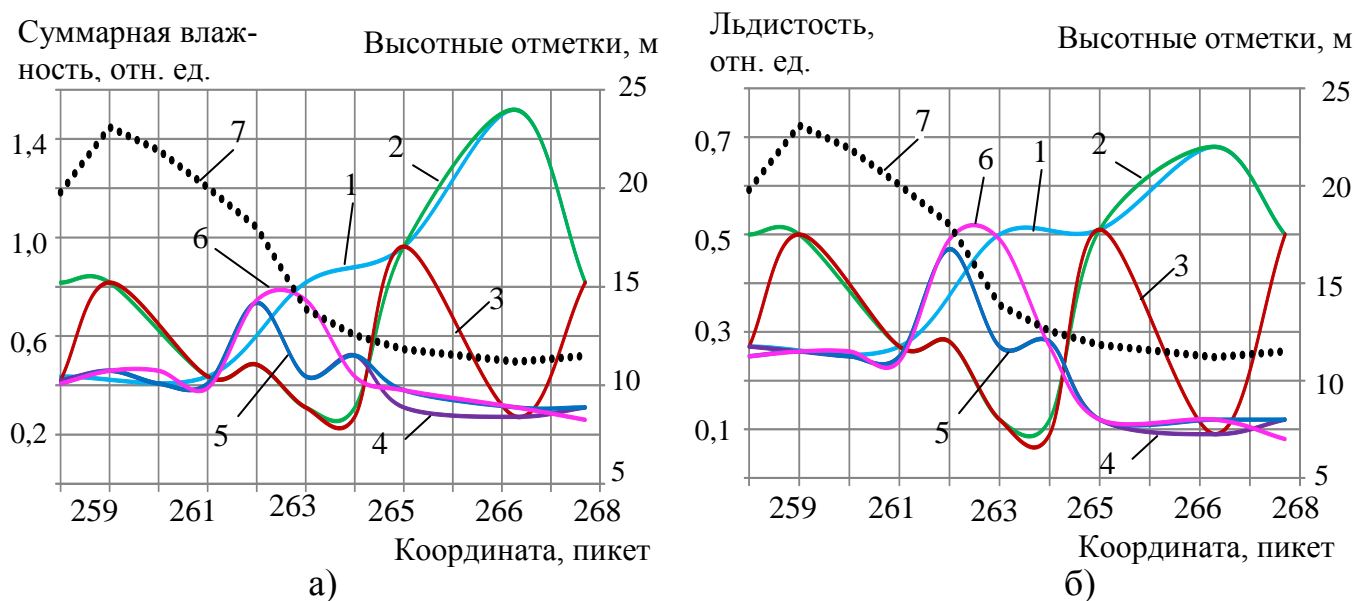


Рис. 3 Распределение суммарной влажности (а) и льдистости грунтов на участке газопровода
 1, 2, 3, 4, 5, 6 – характеристики грунта на глубине, соответственно 1, 2, 3, 4, 5 и 6 м; 7 – рельеф местности

В третьей главе описана методика георадиолокационного диагностирования участков газопроводов в многолетнемерзлых грунтах с применением георадара, состоящего из следующих основных элементов: импульсного генератора, приёмника, состоящего из стробоскопического преобразователя и аналого-цифрового преобразователя, передающих и приёмных антенн, блока управления, портативного компьютера (рис. 4).

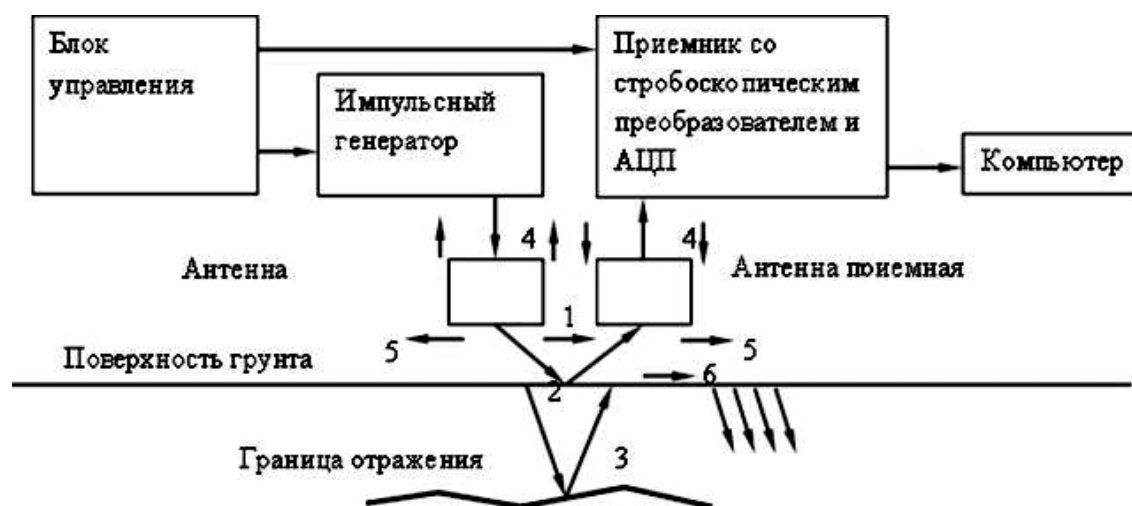


Рис. 4 Блок-схема георадара
 1 – сигнал прямого прохождения между антеннами; 2 – сигнал, отражённый от поверхности; 3 – полезный сигнал, отражённый от объекта; 4, 5 – сигналы, идущие в обратном и боковом направлениях; 6 – боковая волна

Радиоволновой 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 объекты, на рис. 1 показаны также сигнал прямого прохождения между антеннами (1), сигнал, отраженный от поверхности грунта (2), сигналы 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. Основной задачей последующих исследований являлось минимизация помех и погрешностей измерений, для чего были разработаны рациональные методики георадиолокационного сканирования: с дискретной установкой антенн по профилю с шагом не более 0,5 м на пересеченной местности (рис. 5, а); непрерывное сканирование с автоматизированным датчиком перемещения на равнинных участках (рис. 5, б).

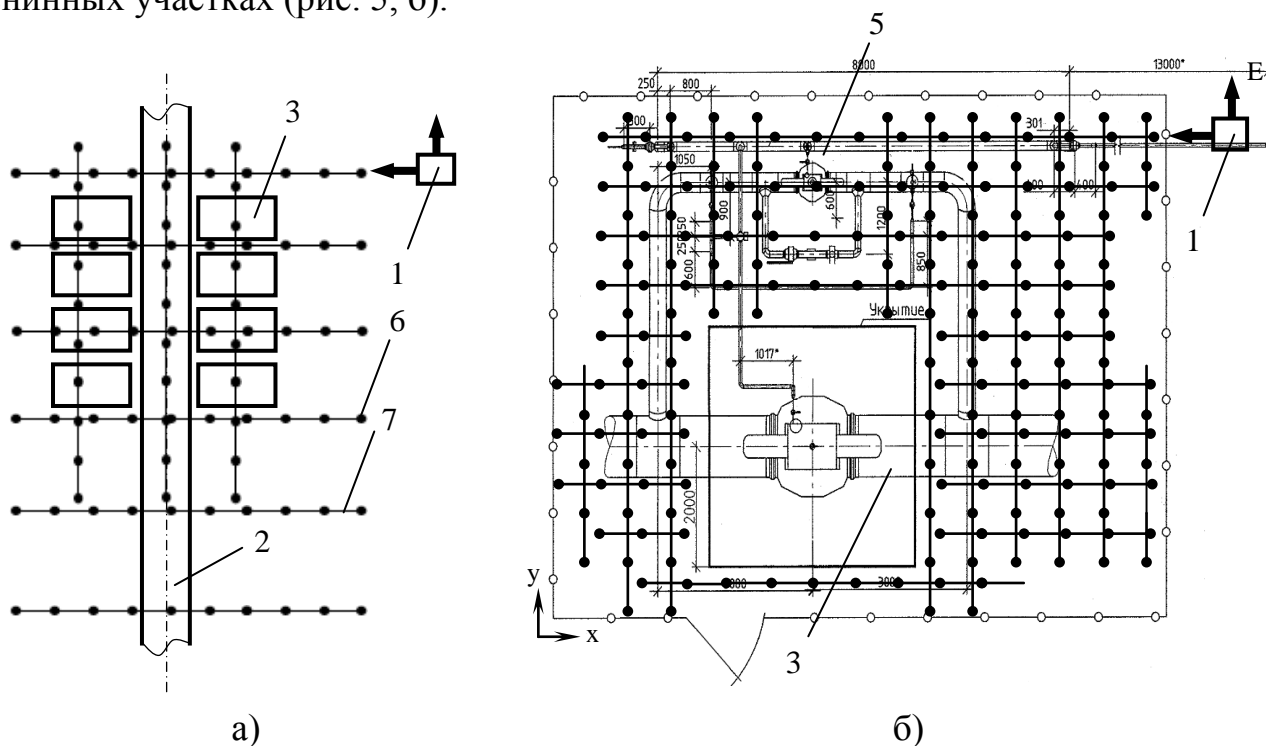


Рис. 5 Схемы сканирования: линейных газопроводов (а) и распределенных газопроводов (б)

- 1 – антенна, 2 – магистральный газопровод, 3 – балластирующее устройство, 4 – запорная арматура, 5- трубопроводы обвязки кранового узла, 6 – точки установки антенны, 7 – профили

Было задано, что расстояние между соседними профилями $S_{пр}$ не должно превышать ширины антенного блока (0,4-1,0 м), что позволит выявить отражения от локальных объектов на участке зондирования и обеспечит качественное прове-

дение трехмерной фокусировки. Тогда, требуемая минимальная ширина W_{\min} участка проведения исследований и необходимое минимальное число профилей сканирования на длине участка $N_{\text{пр}}$ определяются из выражений:

$$W_{\min} \approx D; \quad N_{\text{пр}} \approx W_{\text{пр}}/S_{\text{пр}}, \quad (1)$$

где D - диаметр (ширина) подземного газопровода, включая установленные балластирующие устройства, элементы инженерной защиты, м; $S_{\text{пр}}$ - шаг между соседними профилями, который составляет не более 0,4-1 м.

Для исследований применялся георадар SIR-3000 с набором антенн с центральной частотой 40, 100 и 270 МГц. Исследования выполнялись с целью определения возможности оценки критериев выявления георадиолокационным методом состояния (талый, мерзлый) зондируемого грунта, глубины сезонного оттаивания грунта, балластирующих грузов различных конструкций, грунтозадерживающих барьеров.

В результате анализа данных радиолокационного зондирования на пяти участках газопровода получены 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. Полученные результаты согласуются с данными измерения температуры грунтов в скважинах, на основании которых получена информация о фактическом положении границы сезонного оттаивания грунтов на момент проведения диагностирования радиолокационным методом. В результате интерпретации данных на первой и второй нитках газопровода выделены характерные волновые картины и интенсивности отражений, соответствующие определенному типу грунта, с учетом его геокриологического состояния (рис. 6).

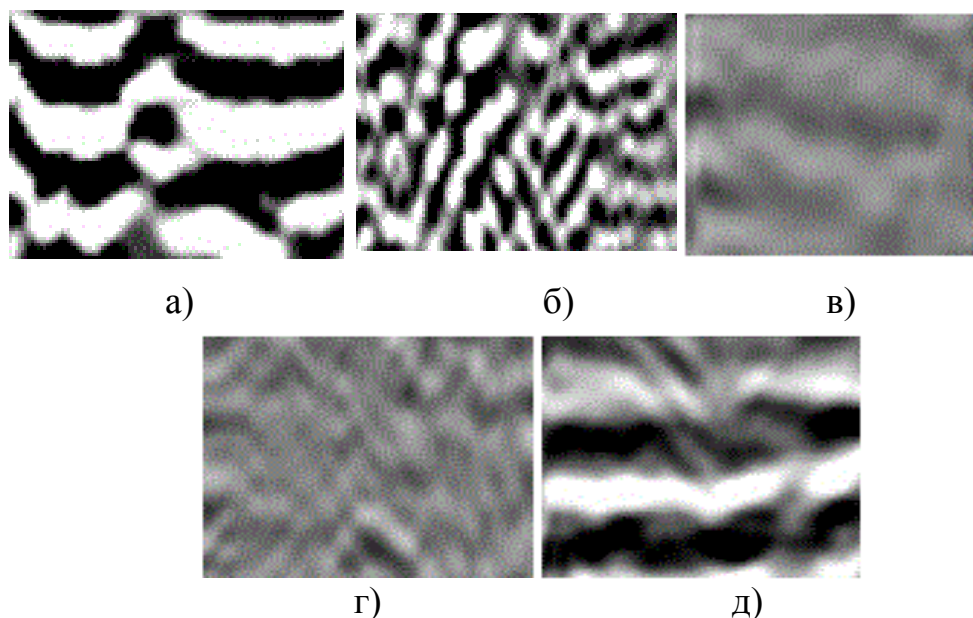


Рис. 6 Характерные волновые картины, соответствующие определенному типу грунта, с учетом его геокриологического состояния: а) торф, частичное оттаивание, б) суглинок, песок мерзлый льдистый незасоленный, в) суглинок мерзлый слабозасоленный, г) торф, песок мерзлый, д) оттаивание грунта около газопровода

Найдены оптимальные частоты радиолокационного зондирования для выявления конструктивных особенностей газопровода и состояния многолетнемерзлых грунтов. Вертикальное разрешение оценивалось по средним амплитудным спектрам принятых отражений, вертикальное разрешение рассчитывалось по формуле:

$$R_{\text{верт}} = \frac{\nu}{4 \cdot f_c}, \quad (2)$$

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

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 (таблица 1).

Антенна с частотой 40 МГц характеризуется разрешением в диапазоне 0,5-1,9 м, такая точность является недостаточной. Таким образом, с точки зрения достигаемых разрешений не более 0,5 м для практического применения были рекомендованы антенны с частотой 100 и 270 МГц.

Таблица 1. Вертикальное разрешение антенн с рабочими частотами 270, 100 и 40 МГц

Рабочая частота антенны	Скорость отраженной волны, м/мкс	Центральная частота возврата, МГц	Вертикальное разрешение, м
270 МГц	69	180	0,1
	154	180	0,2
100 МГц	69	80	0,2
	154	80	0,5
40 МГц	69	20	0,9
	154	20	1,9

Экспериментально обоснованы критерии выявления балластирующих устройств газопровода типа ПКБУ – МК. На первой нитке газопровода, с момента строительства которой прошло 2 года, после проседания валика грунта над трубой в летний период положение газопровода хорошо определяется по наличию на разрезе с антенной 270 МГц отражения параболического вида (рис. 8, а). На второй нитке, построенной в текущий зимний период, положение конструкций менее отчетливо, так как валик над трубой состоит из блоков мерзлого грунта, между которыми возможны локальные пустоты, которые вносят помехи, «затеняющие» информативные отражения в виде параболы от газопровода и элементов ПКБУ – МК (рис. 8, б).

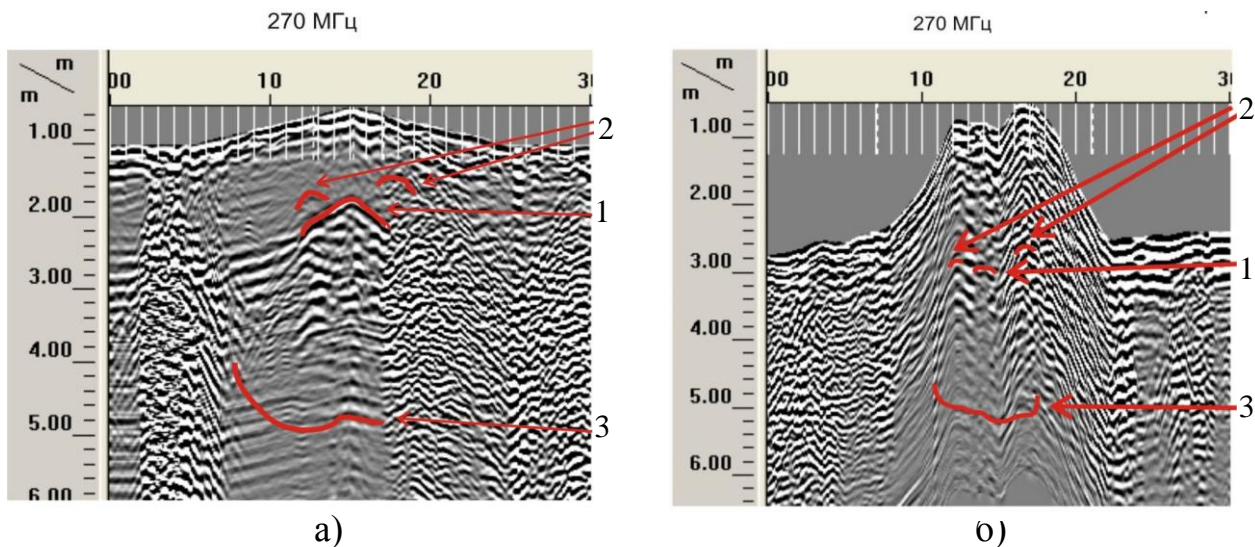


Рис. 8 Глубинные разрезы с использованием антенн 270 МГц: а) первая нитка, б) вторая нитка газопровода

В четвертой главе выполнена расчетная оценка параметров напряженно-деформированного состояния, проведен анализ прочности и устойчивости газопровода Бованенково-Ухта при его осадке и всплытии, являющихся следствием оттаивания многолетнемерзлых грунтов основания.

Осадка газопровода на участке оттаявших мерзлых грунтов возможна при отрицательной плавучести газопровода, 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.

Если бы по длине газопровода располагались грунты с одинаковым параметром просадочности, то 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 неравномерной осадки грунта под трубопроводом, т.е. на границе смены грунтов с разными просадочными свойствами, и, в первую очередь, на границе мерзлого и талого грунтов.

В зависимости от протяженности деформируемого участка и максимальной осадки грунта рассмотрим два случая: 1) максимальная стрела прогиба f участка

МГ меньше осадки грунта s_{np} ; 2) максимальная стрела прогиба f превышает значение осадки грунта s_{np} .

В первом случае (рис. 9) вследствие изгиба участка l , а также удлинения труб на участке l и прилегающих к нему участках l_1 , в трубах появляется растягивающая продольная сила P и участок начинает работать как жесткая нить. Прогиб f участка определяется из совместного решения дифференциального уравнения изгиба и его возможного удлинения от температурных деформаций и воздействия внутреннего давления.

Для определения допустимой стрелы прогиба $[f]$, приняв, что положение оси МГ на деформируемом участке описывается синусоидальной зависимостью, было получено следующее выражение

$$0,25[f]^2 + [f]D_n - \frac{(0,9\sigma_y - 0,5\sigma_{кц})\ell^2}{\pi^2 E} = 0, \quad (3)$$

где D_n – наружный диаметр газопровода; σ_y – нормативный предел текучести материала труб; $\sigma_{кц}$ – кольцевые напряжения от внутреннего давления; E – модуль упругости материала труб.

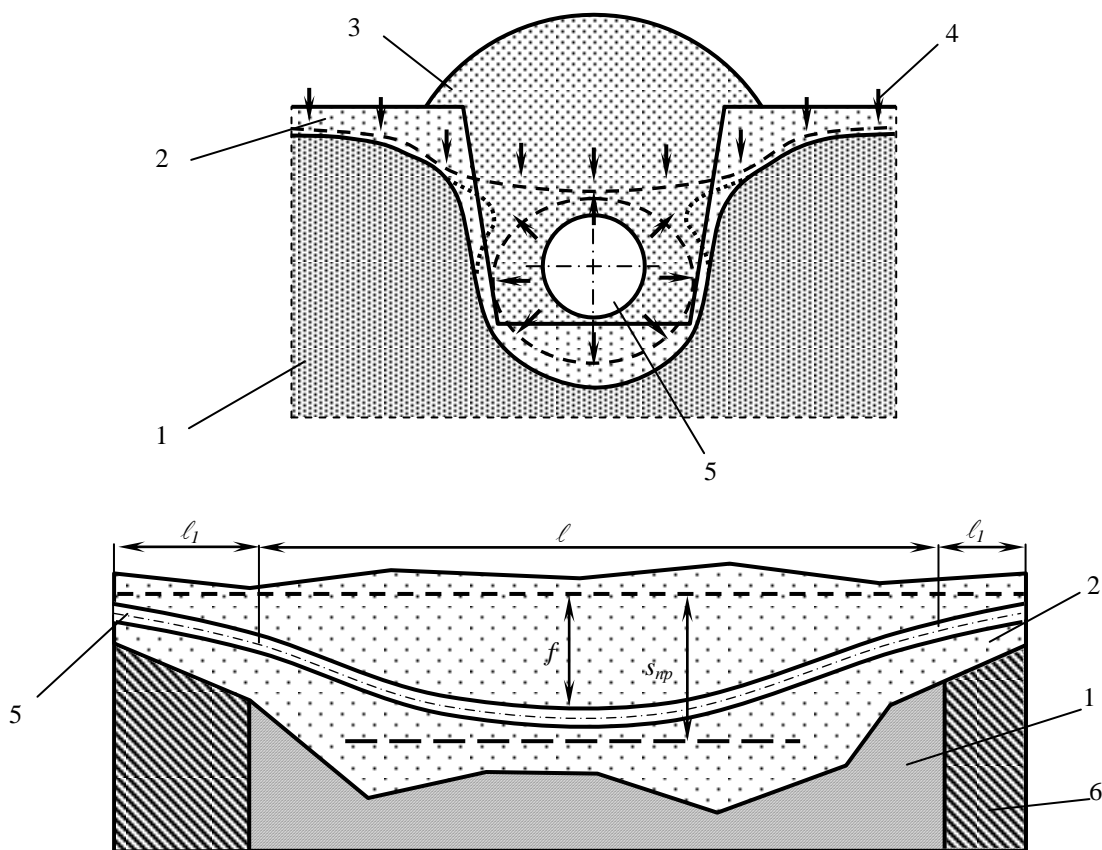


Рис. 9 Схема газопровода при его неограниченной осадке в оттаявшем грунте

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

Во втором случае, т.е. при $f > s_{np}$, средняя часть деформирующегося газопровода лежит на грунтовом основании, а кривизна этого участка газопровода и изгибающий момент равны нулю (рис. 10).

Для определения допустимой осадки $[s_{np}]$ было получено следующее выражение

$$[s_{np}] = \frac{I}{Eg(D_n)^2} \left[1,62(\sigma_y)^2 - \frac{0,9\sigma_y p_p (D_n - 2\delta)}{\delta} + \frac{0,125(p_p)^2 (D_n - 2\delta)^2}{\delta^2} \right], \quad (4)$$

где I – осевой момент инерции сечения трубы; p_p – расчетное внутреннее давление; δ – толщина стенки трубы; q – интенсивность поперечной распределенной нагрузки, направленной вниз.

Результаты расчетов, выполненных для МГ Бованенково – Ухта, показали, что при оттаивании мерзлых грунтов и их обводнении осадка газопровода возможна только на участках с дополнительной пригрузкой балластирующими устройствами. Изменение параметров напряженно деформированного участка МГ на просадочных грунтах в зависимости от его протяженности происходит нелинейно. 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.

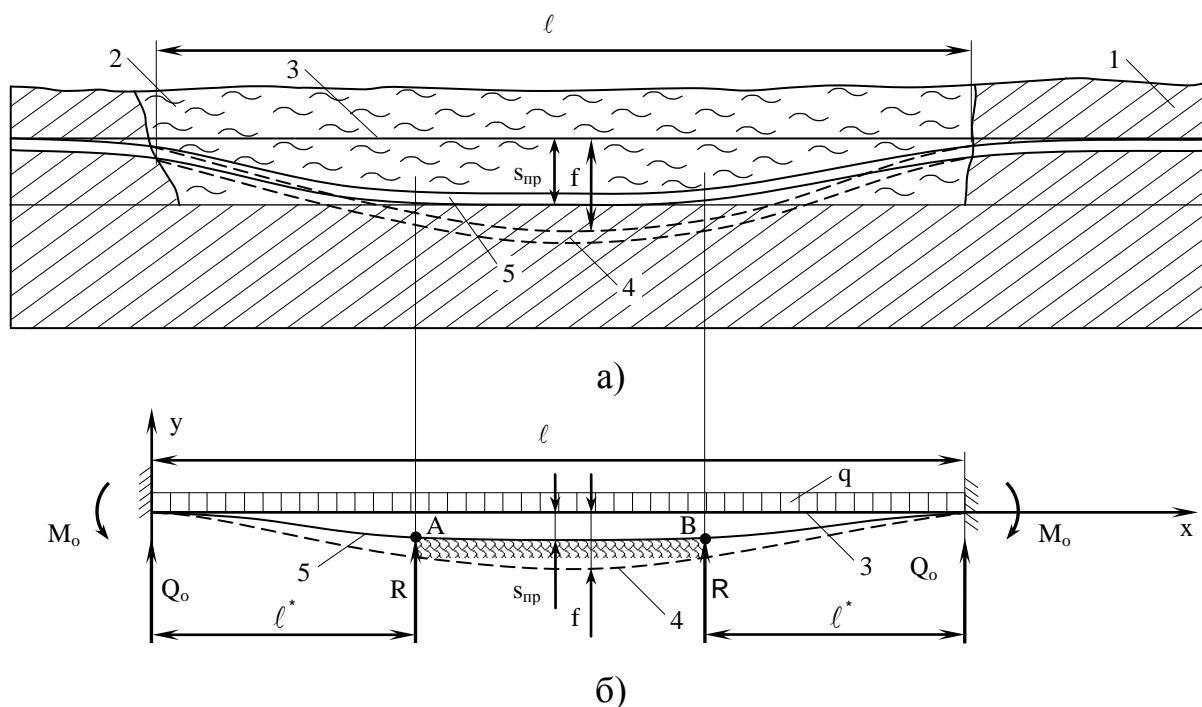


Рис. 10 Общий вид (а) и расчетная схема (б) участка газопровода при осадке грунта менее возможного прогиба деформируемого участка

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

При проектном рабочем давлении 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.

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 СТО Газпром 2-2.1-249-2008 «Магистральные газопроводы». 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 допустимых прогибов меньше фактических деформаций газопровода, т.е. обеспечение соответствия НДС МГ нормативным требованиям, установленным в СТО Газпром 2-2.1-249-2008, возможно только при ограничении осадок слабого грунта.

При ограниченном значении осадки слабого грунта и при условии, что осадка меньше возможного прогиба участка МГ ($s_{np} < f$), т.е. когда газопровод будет ложиться на осевший грунт, значение допустимой осадки при рабочем давлении 11,8 МПа составит:

- на участках из труб с толщиной стенки 26,4 мм 1,07 м;
- на участках из труб с толщиной стенки 27,7 мм 1,72 м.

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.

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_{mp} , направленной вниз (вес трубы, изоляции, транспортируемого продукта, дополнительного балласта).

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 $q_{mp} < q_v$ происходит совместное воздействие выталкивающей силы воды и продольной сжимающей силы. Результатом такого воздействия являются значительные изгибные деформации трубы. Для расчета газо-

провода 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.

Рассмотрим два характерных случая для всплывающего газопровода:

- 1) грунт над трубой оттаял на всю высоту засыпки (рис. 11, а);
- 2) верхняя часть грунта засыпки находится в мерзлом состоянии (рис. 11, б).

Опасность произошедшего деформирования участка МГ вследствие его всплытия и выпучивания оценивается по условию $f < [f]$, в котором допустимую стрелу прогиба $[f]$ участка для первого случая, т.е. когда грунт над трубой оттаял на всю высоту засыпки, определяют по формуле

$$[f] = \min \left[\frac{\ell^2}{\pi^2 E D_n} \left(0,9 \sigma_y - \frac{1,1 p D_n}{4 \delta} \right); \frac{\ell^2}{\pi^2 E D_n} \left(0,9 \sigma_y \sqrt{1 - 0,28 \left(\frac{p D_n}{\delta \sigma_y} \right)^2} \right) \right], \quad (5)$$

где E – модуль упругости материала труб; D_n – наружный диаметр газопровода; σ_y – нормативный предел текучести материала труб; p – нормативное (рабочее) давление; δ – толщина стенки трубы.

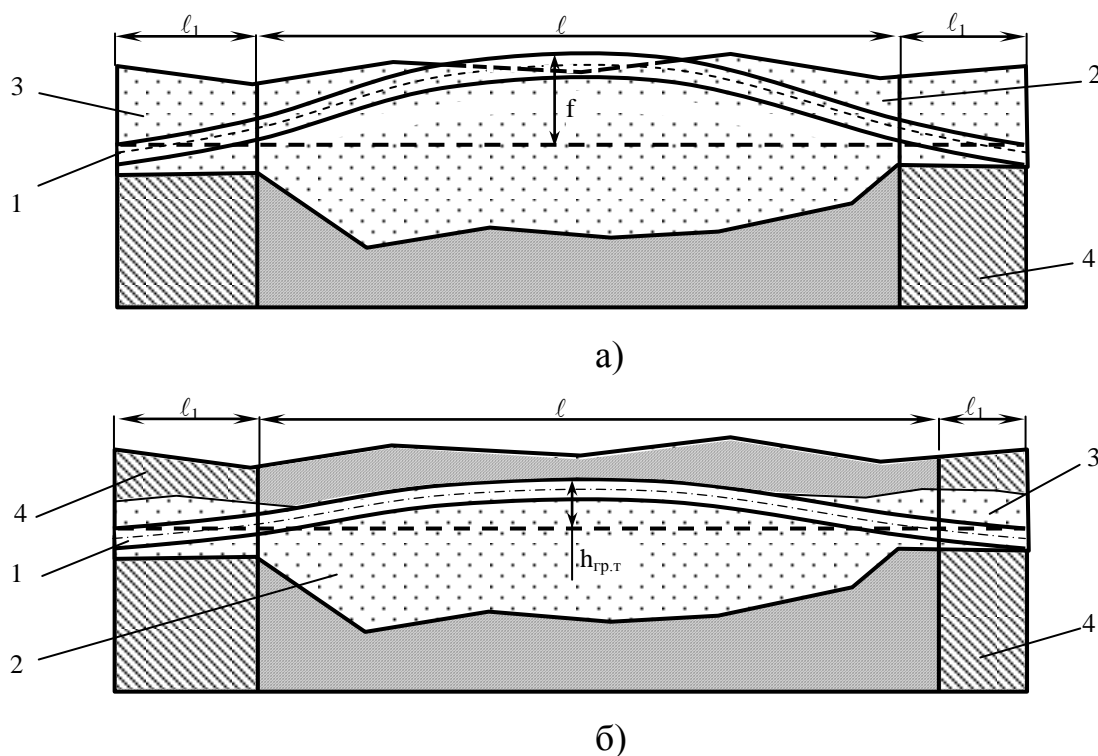


Рис. 11 Схема участка газопровода при всплытии и выпучивании в талом грунте: а) – грунт над трубой оттаял на всю высоту засыпки; б) – верхняя часть грунта засыпки находится в мерзлом состоянии

1 – трубопровод; 2 – оттаявший сильноувлажненный грунт; 3 – оттаявший слабоувлажненный грунт; 4 – мерзлый грунт

Следует отметить, что в том случае, если фактическая стрела прогиба f деформировавшегося участка МГ не превышает предельного значения $[f]$, вычисленного по формуле (5), 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.

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 профиль участка газопровода будет определяться профилем кровли на границе с областью оттаивания. Наибольшую высоту талого слоя грунта засыпки, при которой обеспечена прочность деформировавшегося газопровода, можно определить из следующего выражения

$$[h_{гр.т}] = \min \left[\frac{(\ell_1^*)^2}{6ED_n} \left(0,9\sigma_y - \frac{1,1pD_n}{4\delta} \right); \frac{(\ell_1^*)^2}{6ED_n} \left(0,9\sigma_y \sqrt{1 - 0,28 \left(\frac{pD_n}{\delta\sigma_y} \right)^2} \right) \right], \quad (6)$$

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 формулы (5).

Результаты расчетов, выполненных для МГ Бованенково – Ухта ($D_n = 1420$ мм; $\delta = 27,7$ мм), показали, что при оттаивании мерзлых грунтов и их обводнении будет происходить всплытие участков МГ Бованенково – Ухта, не имеющих дополнительной пригрузки балластирующими устройствами. 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 уро-

вень механических напряжений в стенках трубы превысит допускаемые значения даже в тех случаях, когда труба не достигнет дневной поверхности (рис. 12, а).

Если верхняя часть грунта засыпки находится в мерзлом состоянии, то 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 рис. 12, б, а для участков с обеспеченным условием прочности – ниже соответствующих графиков. 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.

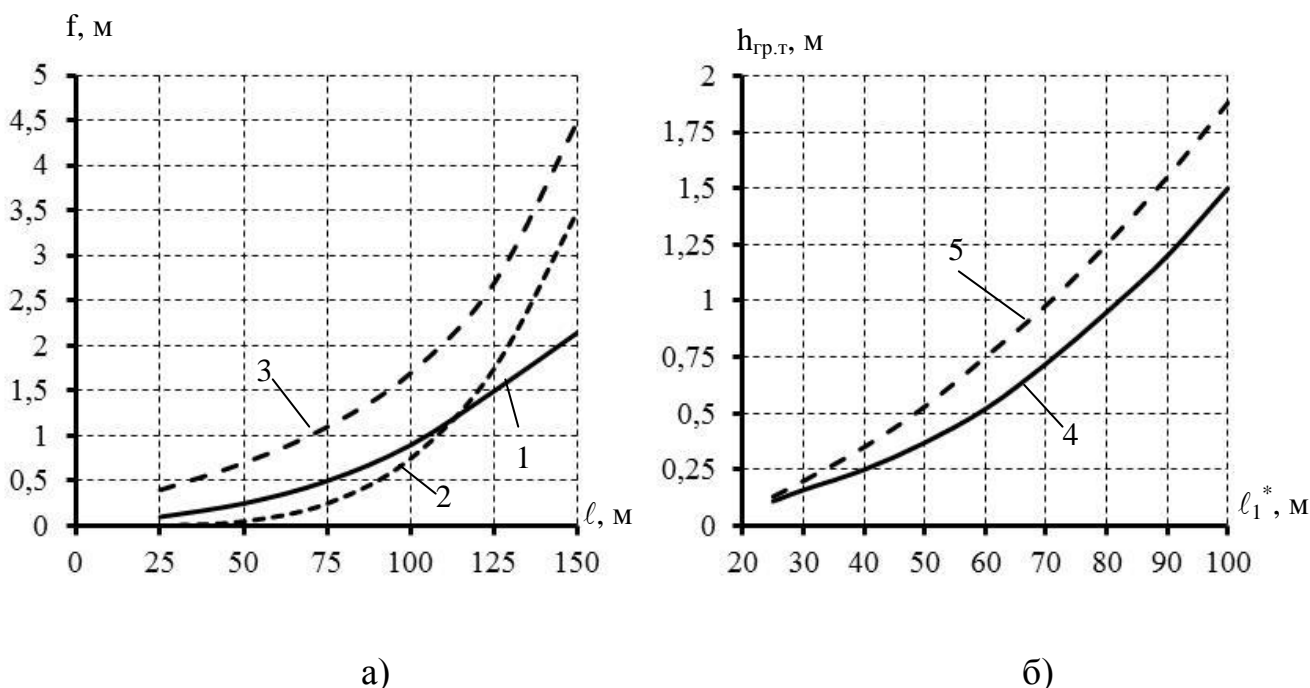


Рис. 12 Зависимости стрелы прогиба газопровода при всплытии от длины участка (а) и допустимой высоты талого слоя грунта засыпки, при которой обеспечена прочность деформировавшегося участка газопровода, от его протяженности ℓ_1^* (б)

1 – предельная стрела прогиба, при которой требования прочности выполняются; 2 – от действия выталкивающей силы воды; 3 – от совокупности действующих нагрузок, 4 – участки с толщиной стенки 26,4 мм; 5 – участки с толщиной стенки 27,7 мм

Основные выводы:

1. Усовершенствованы 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 сезонных изменений 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, 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 разрешающей способности метода 0,1-0,2 м 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 К65 (Х80), 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 проч-

ности 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.

**Основные положения диссертации опубликованы
в следующих работах:**

1. Яковлев А.Я., Аленников С.Г., Романцов С.В., Шишкин И.В., и др. Расчетная модель всплытия и осадки магистрального газопровода Бованенково-Ухта при оттаивании многолетнемерзлых грунтов // Газовая промышленность, 2014. - № 2. – С. 39-43.
2. Яковлев А.Я., Аленников С.Г., Шарыгин В.М., Шишкин И.В., и др. Методы обеспечения устойчивого положения магистрального газопровода при оттаивании многолетнемерзлых грунтов // Наука и техника в газовой промышленности, 2013. - № 4. – С. 83-92.
3. Шишкин И.В., Кузьбожев А.С., Бирилло И.Н. Осадка газопровода в талом грунте и оценка ее опасности // Известия вузов. Нефть и газ, 2013. - № 6. – С. 53-56.
4. Шишкин И.В., Кузьбожев А.С., Бирилло И.Н. Оценка всплытия газопровода в талом грунте // Известия вузов. Нефть и газ, 2014. - № 1. – С. 70-74.
5. Шишкин И.В., Кузьбожев А.С., Бирилло И.Н. Деформирование газопровода от морозного пучения грунта // Издательство Вузов. Нефть и газ, 2014. - № 2. – С. 56-60.
6. Кузьбожев А.С., Шишкин И.В., Новоселов Ф.А. Способ предотвращения развития дефектов стенок трубопроводов Патент РФ № 2474752. Заявл. 20.01.2012 г. Оpubл. 10.02.2013 г.
7. Шишкин И.В. Особенности применения георадиолокационного метода для оценки состояния многолетнемерзлых грунтов на участках прокладки магистрального газопровода Бованенково-Ухта // В сб. докл. V Открыт. науч.-практ. конф. молод. раб. и спец. инж.-техн. центра «Новые технологии в газовой отрасли. Актуальные проблемы развития газотранспортной системы. Экология на производстве» (26-28 июня 2013 г.). – Ухта: ИТЦ Газпром трансгаз Ухта – 2013. – С. 24.
8. Шишкин И.В., Кузьбожев А.С., Бирилло И.Н. Анализ и классификация криогенных текстур грунта в северных регионах прокладки газопровода Бованенково-Ухта // В сб. докл. междунаро. сем-ра «Рассохинские чтения» (8-9 февраля 2013 г.). – Ухта: УГТУ – 2013. – С. 82-84.

9. Шишкин И.В., Кузьбожев А.С., Бирилло И.Н. Классификация мерзлотных явлений и процессов, оценка их влияния на надежность газопровода Бованенково-Ухта // В сб. докл. международ. сем-ра «Рассохинские чтения» (8-9 февраля 2013 г.). – Ухта: УГТУ – 2013. – С. 91-94.

10. Шишкин И.В., Кузьбожев А.С., Бирилло И.Н. Анализ факторов сезонного промерзания и оттаивания грунтов на северных участках газопровода Бованенково-Ухта // В сб. докл. международ. сем-ра «Рассохинские чтения» (8-9 февраля 2013 г.). – Ухта: УГТУ – 2013. – С. 84-91.

11. Шишкин И.В., Кузьбожев А.С. Прогноз изменения параметров напряженно-деформированного состояния газопроводов при оттаивании мерзлых грунтов // В сб. докл. Юбилейной X всерос. конф. молод. уч-х, спец-ов и студ-ов «Новые технологии в газовой промышленности» (8-11 октября 2013 г.). – Москва: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина – 2013. – С. 130.

12. Шишкин И.В., Кузьбожев А.С., Бирилло И.Н. и др. Расчетная оценка осадки, всплытия и выпучивания газопровода Бованенково – Ухта в мерзлых грунтах // В сб. докл. V Межд. науч.-техн. конф. и выставки GTS-2013 Газотранспортные системы: настоящее и будущее (29-30 окт. 2013 г.). – Москва: Газпром ВНИИГАЗ. – 2013. – 152 с.

13. Шишкин И.В., Кузьбожев А.С., Бирилло И.Н. Всплытие и выпучивание газопровода в талом грунте // В сб. докл. международ. сем-ра «Рассохинские чтения» (8-9 февраля 2013 г.). – Ухта: УГТУ – 2013. – С. 41-45.

14. Шишкин И.В., Кузьбожев А.С., Бирилло И.Н. Деформирование газопровода, обусловленное морозным пучением грунта // В сб. докл. международ. сем-ра «Рассохинские чтения» (8-9 февраля 2013 г.). – Ухта: УГТУ – 2013. – С. 45-48.

15. Некрасова Е.Ю., Кузьбожев А.С., Бирилло И.Н., Шишкин И.В. Анализ особенностей определения температуры мерзлых грунтов на участках прокладки газопровода Бованенково-Ухта // В сб. докл. международ. сем-ра «Рассохинские чтения» (6-7 февраля 2014 г.). – Ухта: УГТУ – 2014. – С.119-123.

16. Шишкин И.В., Кузьбожев А.С., Бирилло И.Н., Шкулов С.А. Анализ методов диагностирования пространственного положения газопроводов в нестабильных мерзлых грунтах // В сб. докл. международ. сем-ра «Рассохинские чтения» (6-7 февраля 2014 г.). – Ухта: УГТУ – 2014. – С.194-197.