

На правах рукописи



**ГОЛУБИН СТАНИСЛАВ ИГОРЕВИЧ**

**НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОГНОЗА  
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОДЗЕМНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ С  
ЗАСОЛЕННЫМИ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫМИ ГРУНТАМИ  
ПОЛУОСТРОВА ЯМАЛ**

Специальность: 25.00.08 – «Инженерная геология, мерзлотоведение и  
грунтоведение»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

Москва - 2012

Работа выполнена в Обществе с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий – Газпром ВНИИГАЗ»

Научный руководитель: доктор геолого-минералогических наук, профессор  
**Пендин Вадим Владимирович**

Научный консультант: кандидат технических наук  
**Баясан Рефик Мамедович**

Официальные оппоненты: доктор геолого-минералогических наук  
**Ганова Светлана Дмитриевна**

кандидат геолого-минералогических наук  
**Кошурников Андрей Викторович**

Ведущая организация: Открытое акционерное общество «Якутский государственный проектный, научно-исследовательский институт строительства» (ОАО «ЯкутПНИИС»), г.Якутск

Защита состоится «16» февраля 2012г. в 15 час. в ауд. 5-49 на заседании диссертационного совета ДМ 212.121.01 при Российском Государственном Геологоразведочном Университете имени Серго Орджоникидзе по адресу: 117997, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д.23.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГРИ-РГГРУ.

Автореферат разослан «29» декабря 2011 г.

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах, заверенных печатью) просьба отправлять по адресу 117997, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д.23, Российский государственный геологоразведочный университет, ученому секретарю Диссертационного совета ДМ212.121.01.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат геолого-минералогических наук,  
доцент



**О.Е. Вязкова**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Территория полуострова Ямал характеризуется наличием высокольдистых глинистых засоленных многолетнемерзлых грунтов. Наличие морского типа засоления мерзлых грунтов обуславливает специфические особенности теплового и механического взаимодействия в литотехнической системе «подземный газопровод – мерзлые грунты», что влияет на устойчивость подземных газопроводов.

Изменение естественного температурного поля многолетнемерзлых грунтов (ММГ) является главным фактором активизации негативных геокриологических процессов, влияющих на прочность конструкций зданий и сооружений. Опыт строительства и эксплуатации северных газопроводов показал, что во многих случаях в результате теплового и механического взаимодействия трубопроводов с окружающей средой происходит нарушение динамического равновесия в литотехнической системе «газопровод – вмещающий грунт» со значительным нарушением естественных ландшафтов и с активизацией негативных геокриологических процессов, приводящих к деформациям трубопроводов, нарушению их проектного положения и, нередко, к аварийным ситуациям. Подземный газопровод – это сооружение, наиболее динамично влияющее на естественные температурные поля многолетнемерзлых грунтов основания. От температурного режима транспортировки газа зависит развитие тех или иных негативных геокриологических процессов. Освоение полуострова Ямал осложняется наличием засоленных многолетнемерзлых грунтов, взаимодействие которых с подземными газопроводами не изучено.

Поэтому решение задачи прогноза взаимодействия подземных газопроводов с засоленными многолетнемерзлыми грунтами полуострова Ямал является актуальной темой исследования.

**Цель исследования** состоит в развитии методов прогноза теплового и механического взаимодействия подземных газопроводов с засоленными многолетнемерзлыми грунтами для принятия решений по обеспечению устойчивости подземных газопроводов.

### **Основные задачи исследования:**

- сбор, изучение и анализ опубликованной, фондовой и нормативной литературы по вопросу инженерно-геокриологических особенностей засоленных многолетнемерзлых грунтов полуострова Ямал;
- изучение вопроса влияния засоленности мерзлых грунтов на несущую способность фундаментов зданий и сооружений;
- изучение существующих методик расчета напряженно-деформированного состояния в условиях распространения многолетнемерзлых пород, с учетом засоленности;
- изучение вопросов развития геокриологических процессов, а также их негативного влияния на фундаменты зданий и сооружений, в т.ч. подземные газопроводы;

- разработка моделей прогноза теплового и механического взаимодействия подземных газопроводов с засоленными многолетнемерзлыми грунтами;
- анализ результатов прогнозного моделирования;
- анализ опыта по применению технологии и технических средств термостабилизации для обеспечения устойчивости литотехнических систем на основе прогнозного моделирования.

**Научная новизна.** В диссертационной работе впервые разработано:

1. Методический подход, основывающийся на прогножном моделировании теплового и механического взаимодействия подземных газопроводов с засоленными многолетнемерзлыми грунтами с целью принятия решений по обеспечению устойчивости подземных газопроводов.
2. Исследован вопрос влияния засоленности мерзлых грунтов на несущую способность и выявлены особенности формирования температурных полей в литотехнической системе «подземный газопровод – грунт основания».
3. Впервые применена комплексная количественная оценка состояния в литотехнической системе, основанная на анализе развития геокриологических процессов, а также их влияния на подземные газопроводы, с учетом особенностей засоленных грунтов полуострова Ямал.
4. На основе прогнозного моделирования разработаны рекомендации по применению технологии и технических средств обеспечения устойчивости литотехнических систем.

**Основные защищаемые положения:**

- прогноз теплового и механического взаимодействий подземных газопроводов с засоленными многолетнемерзлыми грунтами целесообразно осуществлять на основе комплексного количественного анализа с учетом эмерджентных свойств литотехнической системы;
- наличие засоленности грунтов морского типа засоления увеличивает содержание незамерзшей воды, что приводит к смещению температуры фазовых переходов, нарушению естественного температурного поля грунтов и интенсификации геокриологических процессов, что в свою очередь ведет к потере несущей способности грунтов;
- использование технологий и технических средств термостабилизации грунтов, выбираемых на основании численного моделирования процессов взаимодействий в литотехнической системе, позволяет обеспечить её надежное функционирование.

**Практическая значимость.** Проведенное исследование вопроса влияния засоленности мерзлых грунтов на несущую способность, выявление особенностей формирования температурных полей в литотехнических системах, а также разработанные методы прогноза теплового и механического взаимодействия подземных газопроводов с засоленными многолетнемерзлыми грунтами использованы при разработке проектной документации для выбора оптимальных проектных решений при проектировании объектов обустройства Бованенковского НГКМ, а также при разработке проектно-технических решений на этапе строительства и эксплуатации в случае нарушения

устойчивости данных литотехнических систем. Разработанный методический подход к оценке устойчивости литотехнической системы, учитывающий специфику засоленных грунтов полуострова Ямал, может применяться в аналогичных районах распространения засоленных многолетнемерзлых грунтов при проектировании, строительстве и эксплуатации объектов Единой системы газоснабжения (ЕСГ). Использование прогнозного моделирования теплового и механического взаимодействия в литотехнических системах позволяет осуществлять оптимальный выбор технологии и технических средств обеспечения устойчивости, в т.ч. термостабилизации засоленных многолетнемерзлых грунтов оснований зданий и сооружений.

**Апробация работы.** Материалы диссертации доложены, обсуждены и получили положительную оценку на научно-технических конференциях и семинарах:

- Научно-практическая конференция молодых специалистов «Инженерные изыскания в строительстве», ОАО «ПНИИИС», Москва, 2006 г.;
- Научно-практическая конференция молодых специалистов «Инженерные изыскания в строительстве», ОАО «ПНИИИС», Москва, 2009 г.
- Международная конференция – 7-й Минский международный семинар «Тепловые трубы, тепловые насосы, холодильники, источники энергии», Минск, Беларусь, 2008 г.
- III Международная научно-техническая конференция Газотранспортные системы: настоящее и будущее (GTS-2009), ОАО «Газпром», ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Москва, 2009г.
- Международная IV конференция геокриологов России, МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, 2011г.
- Международный симпозиум «Проблемы инженерного мерзлотоведения» 3-7 сентября 2011г., Институт мерзлотоведения СО РАН, г. Мирный, 2011г.
- Международная конференция – 8-й Минский международный семинар «Тепловые трубы, тепловые насосы, холодильники, источники энергии», Минск, Беларусь, 2011 г.

**Публикации.** Содержание диссертационной работы достаточно полно отражено в 15-ти научных работах, в т.ч. 4 в ведущих рецензируемых научных журналах, определенных Минобрнауки РФ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка использованных источников, изложенных на 112 страницах машинописного текста, содержит 12 таблиц, 45 рисунков. Список использованных источников включает 64 наименования.

Автор выражает свою благодарность научному руководителю д.г.-м.н. проф. В.В.Пендину и научному консультанту к.т.н. Р.М. Баясану, сотрудникам ООО «Газпром ВНИИГАЗ» д.т.н. В.Я. Великодневу и В.С. Каленскому, а также кафедре геокриологии геологического факультета МГУ им.М.В. Ломоносова.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформированы цели и задачи исследований, сформулирована научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены основные защищаемые положения работы, отражена апробация на практике, научных конференциях и семинарах, в научных публикациях, а также дана общая характеристика работы.

**В первой главе** рассматривается обзор литературы по проблеме устойчивости подземных газопроводов на засоленных многолетнемерзлых грунтах.

На сегодняшний день существует определенная нормативная база регулирующая проектирование, строительство и эксплуатацию зданий и сооружений, в т.ч. магистральных трубопроводов на многолетнемерзлых грунтах: СНиП 2.02.04-88 «Основания и фундаменты на вечноммерзлых грунтах»; СНиП 2.05.06-85 «Магистральные трубопроводы»; СП 11-105-97 «Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть IV Правила производства работ в районах распространения многолетнемерзлых грунтов»; ВСН 013-88 «Строительство магистральных и промысловых трубопроводов в условиях вечной мерзлоты»; СТО Газпром 2-3.1-071-2006 «Регламент организации работ по геотехническому мониторингу объектов газового комплекса в криолитозоне»; СТО Газпром 2-3.1-072-2006 «Регламент на проведение геотехнического мониторинга объектов газового комплекса в криолитозоне» и др.

В справочных пособиях и руководствах (ПНИИИС, НИИОСП им.Н.М. Герсевича и др.) отражены элементы и примеры прогнозных расчетов техногенного воздействия сооружений на ММГ и наоборот. В работах таких авторов, как В.В. Харионовский, А.Б. Айбиндер, Р.М. Баясан, Л.Н. Хрусталева, С.Ю. Пармузин и др. отражены примеры тепловых расчетов трубопроводов или расчеты напряженно-деформированного состояния трубопроводов под внешними воздействиями, однако вопросы комплексного взаимодействия в литотехнической системе «подземный газопровод – грунт основания», особенно в районах распространения засоленных многолетнемерзлых грунтов, до сих пор не отражены в полной мере в научных трудах и нормативной литературе. Основные методики расчета акцентированы на оценку напряженно-деформированного состояния трубы при известных нагрузках от природных воздействий. Выявленные закономерности носят исключительно эмпирический характер. При этом специфика таких воздействий, их возможные количественные показатели, а также факторы их активизации в литотехнических системах не рассматривались в научно-технической литературе. Таким образом, в силу указанных выше причин, а также в связи с интенсивным освоением месторождений полуострова Ямал и других северных регионов возникает необходимость детального изучения вопросов

устойчивости подземных газопроводов на засоленных многолетнемерзлых грунтах.

**Во второй главе** описаны природные условия полуострова Ямал, на примере Бованенковского НГКМ. Рассмотрены орогидрография, растительность и климат района, его общее геологическое строение и гидрогеологические условия. Подробно рассмотрены геокриологические условия: распространение и мощность, температура, криогенное строение и свойства многолетнемерзлых пород, геокриологические процессы.

Бованенковское газоконденсатнонефтяное (НГКМ) месторождение расположено в западной части полуострова Ямал, на территории Ямальского района Ямало-Ненецкого автономного округа Тюменской области.

Для климата характерны суровая продолжительная зима с длительным залеганием снежного покрова, короткие переходные сезоны - весна и осень, короткое холодное лето, поздние весенние и ранние осенние заморозки, полное отсутствие в отдельные годы безморозного периода. Средняя годовая температура повсеместно имеет отрицательные значения  $-7...-10^{\circ}\text{C}$ . Годовые суммы осадков – 300...-500 мм.

Основной особенностью геокриологических условий полуострова Ямал, во многом определяющей весь комплекс инженерно-геологических условий, является сплошное распространение многолетнемерзлых пород, которые встречаются на всей территории, начиная от северной оконечности Ямала до южных его границ. Их температура, криогенное строение, мощность толщ, мощность слоя сезонного протаивания и промерзания существенно неодинаковы в разных частях территории.

Главный фактор, определяющий особую сложность для промышленного освоения территории полуострова Ямал – активность проявления комплекса экзогенных геологических процессов. Их развитие контролируется двумя группами взаимосвязанных факторов: внутренними (неотектоника, глубинные теплотокки) и внешними (климатические ритмы, условия теплообмена на поверхности, морфология рельефа, физико-механические свойства пород и др.), которые определяют как пространственные закономерности геокриологических процессов, так и цикличность их проявления.

**Третья глава** посвящена анализу инженерно-геологических условий грунтов полуострова Ямал, на примере Бованенковского НГКМ, их особенностей, влияющих на устойчивость и эксплуатационную надежность зданий и сооружений, в т.ч. подземные газопроводы.

Интенсивное освоение нефтегазовых месторождений северных территорий обусловило актуальность полевых и лабораторных исследований мерзлых грунтов, обладающих специфическими свойствами, осложняющими проектирование, строительство и эксплуатацию магистральных трубопроводов и объектов их инфраструктуры.

Главной инженерно-геологической особенностью Бованенковского НГКМ является наличие средне- и сильнозасоленных грунтов морского типа засоления. Присутствие легкорастворимых солей значительно влияет на

температуру замерзания грунтов, их состояние, фазовый состав влаги и механические свойства. Исследование общих закономерностей формирования засоленных грунтов и региональных особенностей их распространения продиктовано повышенными требованиями к надежности и безопасности объектов нефтегазового комплекса, проектируемых на данных грунтах.

Существуют три основных типа засоления: морской (хлоридно-натриевое засоление); континентальный (комплексное хлоридно-сульфатно-карбонатное засоление) и техногенный. Согласно ГОСТ 25100-95 «Грунты. Классификация» по степени засоленности  $D_{sa1}$  выделяются критические значения засоления для континентального типа и морского типа засоления. Приведенные в вышеуказанном ГОСТ столь низкие критические значения засоленности для морского типа (0,05 %) по сравнению с континентальным типом засоления (3 %) связаны с высокой химической активностью хлоридно-натриевых солей.

Для мерзлых засоленных грунтов морского типа засоления установлено значительное занижение расчетных прочностных характеристик по сравнению с данными приложения СНиП 2.02.04-88 «Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах». Это подтверждается, в том числе, и натурными испытаниями свай, вмороженных в засоленные грунты (Брушков А.В., 1998г.).

Засоленные грунты характеризуются смещением температуры фазовых переходов в сторону отрицательных значений. Температура начала замерзания – оттаивания грунта смещается от  $0^{\circ}\text{C}$  к диапазону  $-1,0 \dots -2,0^{\circ}\text{C}$  и более, в зависимости от литологического состава грунта. Данный фактор негативно влияет на несущую способность в сторону ее уменьшения.

Вышеописанные геокриологические условия являются крайне сложными и отличаются широкой изменчивостью. На территории полуострова Ямал широко развиты различные геокриологические процессы. В связи со строительством и эксплуатацией газопроводов, и как следствие, изменением естественных геокриологических условий происходит интенсификация одних и активизация других негативных геокриологических процессов, таких как: пучение грунтов, термокарст, морозобойное растрескивание, солифлюкция, формирование повторно-жильных льдов и термокарст по ПЖЛ.

Все описанные процессы могут крайне негативно сказаться на устойчивости и эксплуатационной надежности подземных газопроводов и зачастую приводят к следующим последствиям:

- выпучивание трубопровода (изменение проектного положения и формирование нежелательного НДС трубы);
- всплытие трубопровода (изменение проектного положения и формирование нежелательного НДС трубы);
- «оголение» трубопровода;
- формирование негативного НДС трубы.

Как правило, каждый процесс характеризуется сочетанием тех или иных факторов. Например, процесс пучения активизируется при промерзании увлажненных пылеватых песков, глинистых и суглинистых грунтов. Процесс термокарста возникает при оттаивании высокольдистых грунтов. Основной



«движущей силой» активизации вышеописанных процессов является изменение естественных условий. Основными факторами развития тех или иных процессов являются наличие и сочетание следующих параметров: изменение естественного температурного поля; наличие особых характеристик грунта (например, глинистый грунт); изменение характеристик грунта (состав и свойства); увлажнение грунта.

**В четвертой главе** рассматриваются задачи прогноза взаимодействия подземных газопроводов в условиях засоленных многолетнемерзлых грунтов полуострова Ямал. При изучении вопроса, для оценки физических основ процесса, был проведен анализ физического моделирования термомеханического взаимодействия трубопровода с мерзлыми породами по результатам франко-канадского полунатурного эксперимента в г.Канн.

Проект включал в себя, наряду с исследованием напряжений, развитых в экспериментальном трубопроводе, находящемся в грунте, по которому пропускался воздух, также изучение физики процессов промерзания-оттаивания и пучения грунтов различного состава, структурных преобразований в грунте происходящих под действием этих процессов в литотехнической системе «подземный трубопровод – грунт основания». В процессе эксплуатации замерялись: водные уровни и давления, вертикальные колебания телескопических маркеров, показания магнитных датчиков вертикальных колебаний, температурный и влажностный режим грунта, ореолы промерзания-оттаивания, отклонения и искривления трубы, а также возникающие механические напряжения.

Деформация трубы началась в течение начальных недель первого периода замораживания, когда начали происходить вертикальные перемещения между глиной и песком. Труба перемещалась вверх в обоих грунтах с деформацией трубы, встречающейся в зоне перехода между этими двумя грунтами. С помощью тензодатчиков были получены реальные кривые развития напряжений в трубопроводе во времени для двух типов грунтов. Затем полученные данные обрабатывали с учетом отбраковки. Итогом обработки являлся вывод зависимости развития напряжений от свойств самого трубопровода и от величин его вертикального перемещения.

Анализ результатов физического моделирования показал необходимость детального изучения механизмов теплового взаимодействия подземных газопроводов с засоленными многолетнемерзлыми грунтами, а также механического взаимодействия в описанной литотехнической системе. Прогноз взаимодействия в таких литотехнических системах возможен с помощью методов математического моделирования.

Для решения этих вопросов была использована программа «Тепло» (HEAT), разработанная на кафедре геокриологии МГУ под руководством проф. Л.Н.Хрусталева, она предназначена для решения задачи Стефана (задачи о распространении тепла в среде с фазовым переходом влаги) методом конечных разностей.

Кондуктивный перенос тепла описывается эмпирическим законом Фурье, который устанавливает пропорциональную зависимость между плотностью теплового потока  $q$  и градиентом температуры  $T$ :

$$q = -\lambda \text{grad } T \quad (1)$$

Из закона Фурье и закона сохранения энергии получается основное уравнение, описывающее процесс теплопроводности:

$$C \, dT/dt = \text{div} (\lambda \text{grad } T) + G \quad (2)$$

Где  $C$  – объемная теплоемкость,  $G$  – мощность распределенных теплоисточников в расчете на единицу объема,  $t$  – время.

Начальные условия описывают температурное поле в некоторый момент, который принимается за начало отсчета времени. В зависимости от температурного режима на границе расчетной области различают три рода граничных условий.

Граничное условие I рода задает температуру на границе расчетной области как известную функцию времени и пространственных координат точек границы:

$$T(x, y, z, t)|_{\Gamma} = f(M, t) \quad (3)$$

где  $M(x, y, z)$  обозначает произвольную точку границы. Условие I рода описывает идеальный тепловой контакт грунта с внешней средой, когда сопротивлением теплообмену можно пренебречь (например, неизолированный трубопровод с известной температурой).

Условием II рода задается значение не самой температуры, а ее производной:

$$-\lambda \partial T(x, y, z, t) / \partial n|_{\Gamma} = q(M, t) \quad (4)$$

Здесь символом  $\partial/\partial n$  обозначена производная по нормали, а физический смысл данного условия – плотность теплового потока через границу. Условие II рода можно применять там, где этот тепловой поток не зависит от температуры окружающего грунта и может быть измерен или вычислен.

Граничное условие III рода является более общим и содержит как саму температуру, так и ее производную:

$$-\lambda \partial T(x, y, z, t) / \partial n|_{\Gamma} = \alpha(M, t) [T(x, y, z, t)|_{\Gamma} - f(M, t)] \quad (5)$$

где  $\alpha(M, t)$  – коэффициент теплообмена и  $f(M, t)$  – температура внешней среды вдоль границы, рассматриваемые как известные функции координат и времени. Граничное условие III рода содержит не одну, а две величины, которые задаются как известные функции времени и координат границы. Условие III рода ставится для подземного газопровода, а также на дневной поверхности и соответствует наиболее распространенной ситуации, когда между трубой, где температура известна, и грунтом есть преграда (теплоизоляция, снег и т.п.), оказывающая сопротивление теплообмену – термическое сопротивление. Термическое сопротивление каждого слоя вычисляется как частное от деления его толщины на коэффициент теплопроводности.

При расчете задавались следующие граничные условия (ГУ) и начальные условия (НУ): 1) ГУ II рода на нижней и боковых поверхностях – нулевой теплоток; 2) ГУ III рода - сезонный ход температуры воздуха и термическое сопротивление снежного покрова по данным метеостанций Тамбей и Сеяха; 3) НУ – начальное распределение температурного поля, получаемое из решения одномерной задачи в массиве, сложенном суглинком различных вариантов; среднемесячный ход температуры транспортируемого газа. Физико-механические и теплофизические характеристики грунта основания использовались из материалов инженерных изысканий; при проведении моделирования влажность, плотность, льдистость грунта и др. характеристики учтены через теплопроводность и теплоемкость в талом и мерзлом состояниях, а также через теплоту и температуру фазовых переходов.

Математическое моделирование теплового взаимодействия проведено для следующих вариантов расчетных схем:

- взаимодействие подземного газопровода с незасоленным мерзлым грунтом (вариант 1);
- взаимодействие подземного газопровода с незасоленным мерзлым грунтом с учетом незамерзшей воды (вариант 2);
- взаимодействие подземного газопровода с засоленным мерзлым грунтом (вариант 3);
- взаимодействие подземного газопровода с засоленным мерзлым грунтом с учетом незамерзшей воды (вариант 4);
- формирование ореола оттаивания за летний период (вариант 5).

Проанализировав полученные результаты, были сделаны следующие основные выводы:

1. Подземный газопровод оказывает значительное влияние на температурное поле мерзлых грунтов. Изменение естественного температурного поля может привести к активизации негативных геокриологических процессов, влияющих на устойчивость самого газопровода.

2. При тепловом взаимодействии подземного газопровода с многолетнемерзлыми грунтами на конец летнего периода происходит формирование ореола оттаивания вокруг трубопровода. При этом происходит миграция вод под нижнюю образующую трубы, что приводит к развитию процесса термокарста и всплытию газопровода. При последующем промерзании замкнутого талого ореола под нижней образующей происходит сегрегационное льдовыделение, развитие процесса пучения и выпучивание трубопровода (рисунок 3).

3. Наличие засоленности в мерзлых грунтах *смещает температуру фазовых переходов на абсолютную величину  $1^{\circ}\text{C}$  в сторону отрицательных температур*. Смещение температуры фазовых переходов обуславливает существование талых грунтов, а также «вялой» мерзлоты даже при отрицательных температурах грунтов, что негативно сказывается на несущей способности, а также требует специальных технологий и технических средств термостабилизации грунтов оснований сооружений.

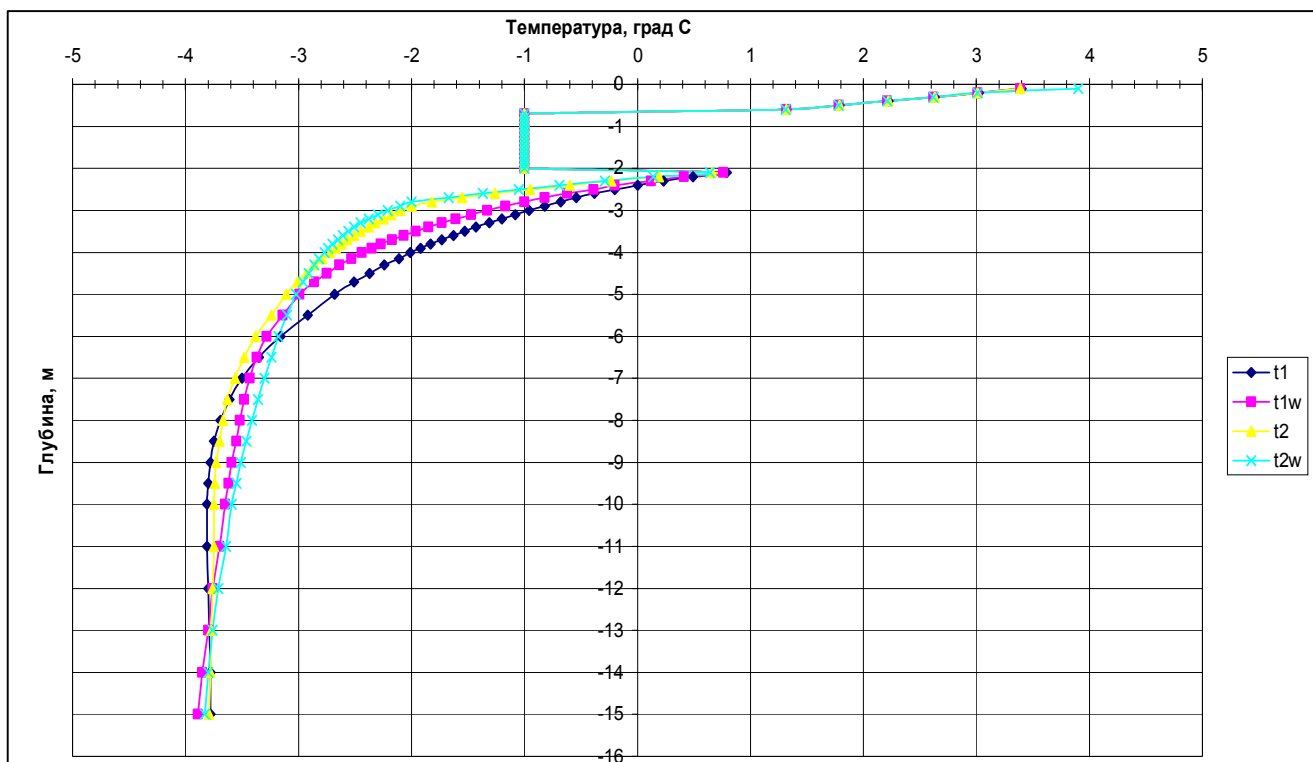


Рисунок 1 –Тепловое взаимодействие подземного газопровода с ММГ на 5-ый год эксплуатации (t1 – вариант 1; t1w – вариант 2; t2 – вариант 3; t2w – вариант 4): по вертикали глубина (м), по горизонтали температура ( $^{\circ}\text{C}$ )

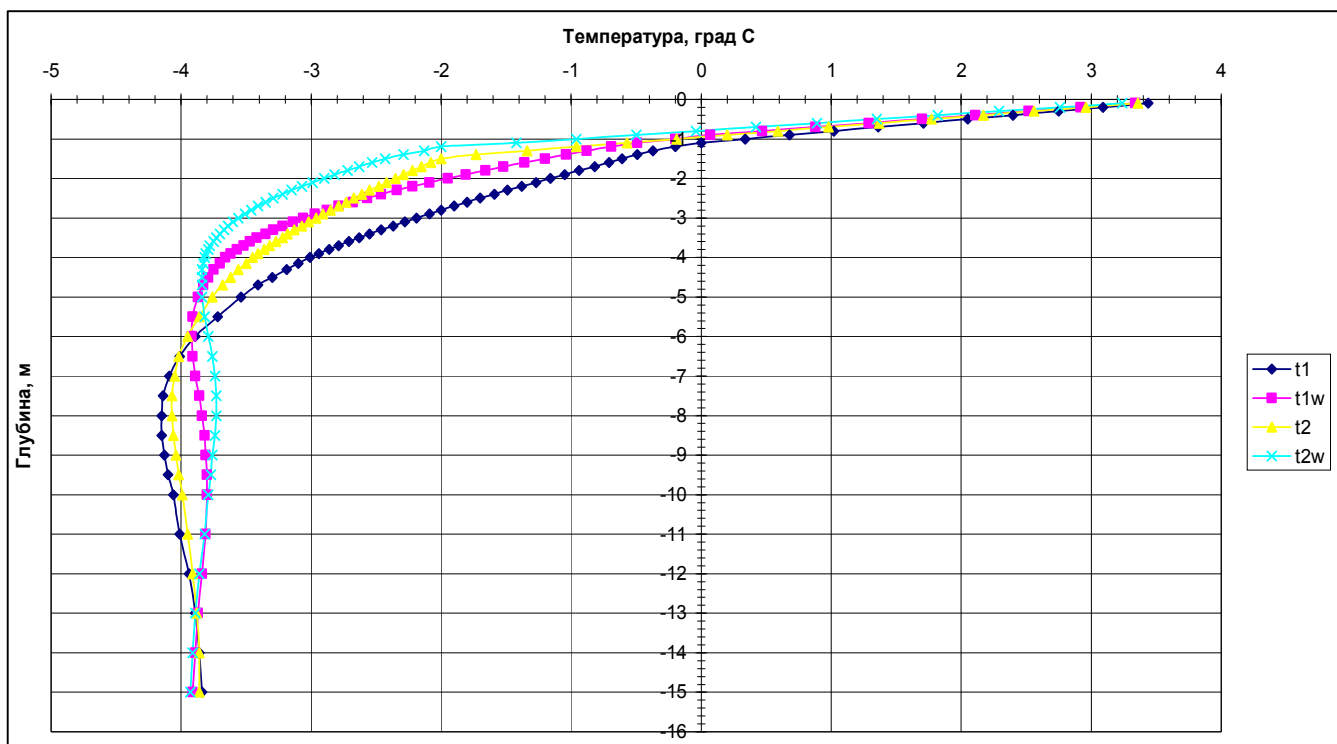


Рисунок 2 – Температурные профили грунтового массива в естественных условиях (t1 – вариант 1; t1w – вариант 2; t2 – вариант 3; t2w – вариант 4) : по вертикали глубина (м), по горизонтали температура ( $^{\circ}\text{C}$ )

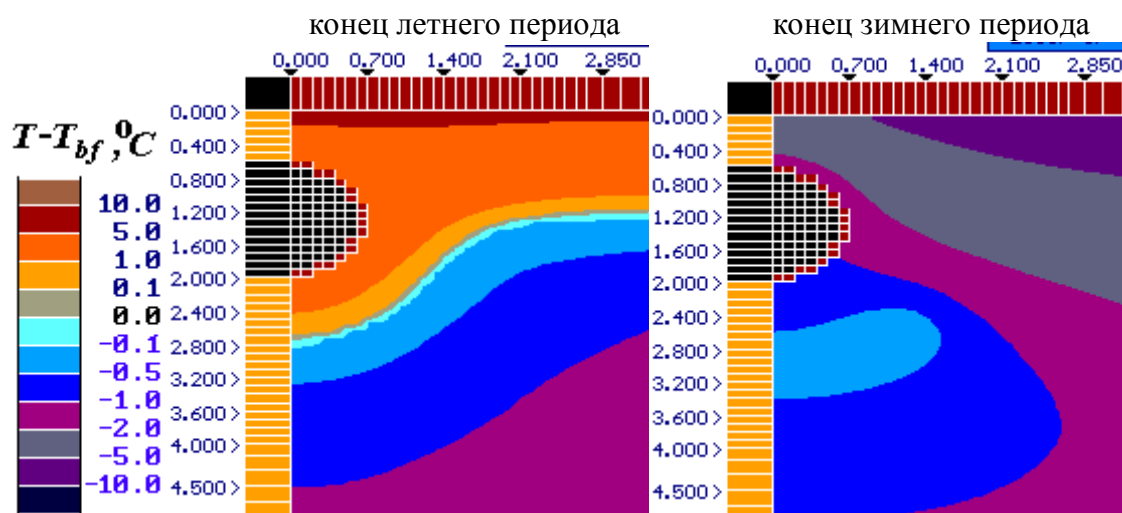


Рисунок 3 – Тепловое взаимодействие подземного газопровода с засоленным грунтом по результатам математического моделирования

В таблице 1 представлены радиусы ореолов оттаивания под нижней образующей трубы на 5-ый год эксплуатации для вышеописанных вариантов расчетов.

Анализ таблицы 1 показывает, что наличие засоления и смещение температуры фазовых переходов при прочих равных условиях, в т.ч. одинаковых грунтах, увеличивает радиус ореола оттаивания вокруг трубопровода на 0,4 м.

4. Не учитывая незамерзшую воду при проведении расчетов, погрешность конечных результатов может достигать порядка  $1^{\circ}\text{C}$ .

Таблица 1 – Глубина оттаивания под нижней образующей трубы на 5-ый год эксплуатации (варианты расчета 1-4)

Вариант расчета	1	2	3	4
Глубина оттаивания, м	1,4	1,3	1,8	1,7

В силу особой динамичности и многофакторности теплового взаимодействия в литотехнической системе «подземный газопровод - ММГ», особенно ярко проявляющейся в засоленных грунтах, при проведении математического моделирования необходимо учитывать весь комплекс параметров, формирующий конечное температурное поле в системе, которое в свою очередь влияет на техническое состояние инженерного сооружения.

Изменение естественного температурного поля многолетнемерзлых грунтов и активизация негативных процессов непосредственно влияет на устойчивость подземных газопроводов.

При решении комплексной задачи взаимодействия в вышеуказанных литотехнических системах особо актуальной является задача прогноза

механического взаимодействия при действии основных негативных процессов – пучении и *выпучивании газопровода* и развитии термокарста с последующим *всплытием газопровода*. Необходима оценка формируемого напряженно-деформированного состояния трубы. Определение НДС проводилось путем численного моделирования расчетных случаев методом конечных элементов (МКЭ). Труба моделировалась балочными конечными элементами. Все воздействия на нее задавались в виде действия на узлы элементов сосредоточенных усилий.

При моделировании механического взаимодействия от расчетных нагрузок трубопровод не ограничен в вертикальных перемещениях и НДС трубы достигало своих возможных максимальных значений, тогда как при моделировании реальных условий (по данным изысканий) перемещения трубопровода ограничивались выходом на дневную поверхность.

*Определение НДС трубопровода от расчетной архимедовой силы*

Трубопровод моделировался в суглинистых грунтах. К расчетным балочным моделям прикладывалась нагрузка от архимедовой силы (плотность окружающей среды  $1200\text{кг/м}^3$ ), действующей на всей длине трубы, а так же учитывался вес трубы. На краях трубопровода моделировалась жесткое защемление (труба вмерзла в грунт). Нагрузка равномерно распределялась по всем узлам модели (рисунок 4-5).

Как видно из решения, жесткости самого трубопровода не достаточно, что бы оставаться на дне окружающей разжиженной среды (талый сильнообводненный грунт), вследствие чего наблюдается всплытие трубопровода.

*Определение НДС трубопровода по данным деформации трубы от всплытия трубопровода, полученным в результате изысканий*

Задача решена в балочной постановке по результатам изысканий. В соответствующих узлах модели было задано перемещение трубопровода. Определялось НДС деформированного трубопровода.

*Определение НДС трубопровода от действия расчетных значений пучения грунта*

Задача решена в балочной постановке. На трубу действует распределенная нагрузка по длине 20 метров. Задача рассматривается как симметричная относительно центра, так же учитывается вес грунта сверху со следующими характеристиками: плотность грунта  $1800\text{кг/м}^3$ ; высота 0,6м; ширина 3,4м.

*Определение НДС трубопровода по данным деформации трубы от выпучивания трубопровода, полученным в результате изысканий*

Задача решена в балочной постановке. По результатам изысканий в соответствующих узлах модели было задано перемещение трубопровода. Определялось НДС деформированного трубопровода.

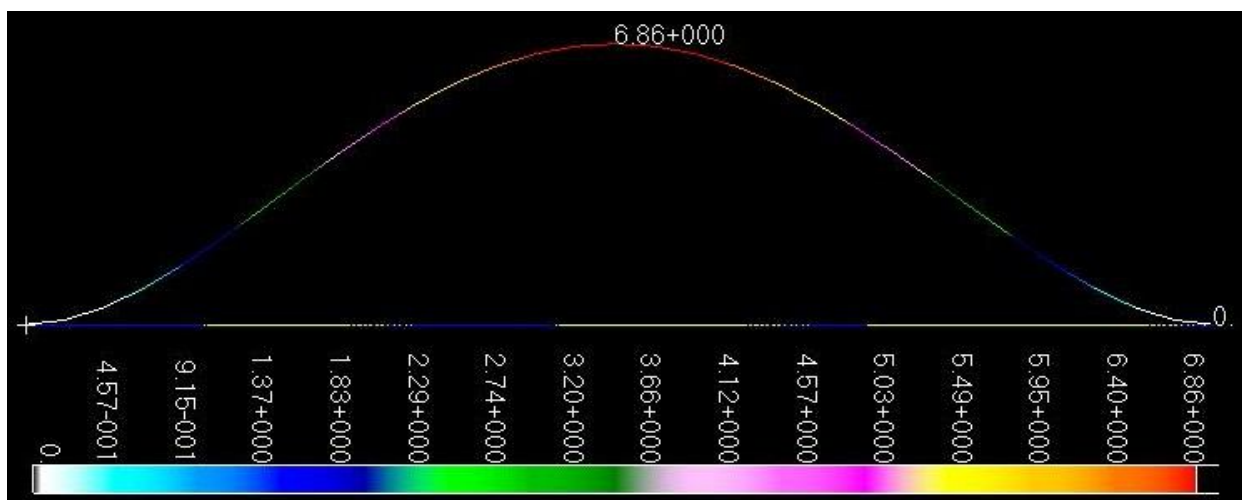


Рисунок 4 – Перемещения трубопровода по результатам моделирования при действии расчетной архимедовой силы (м)

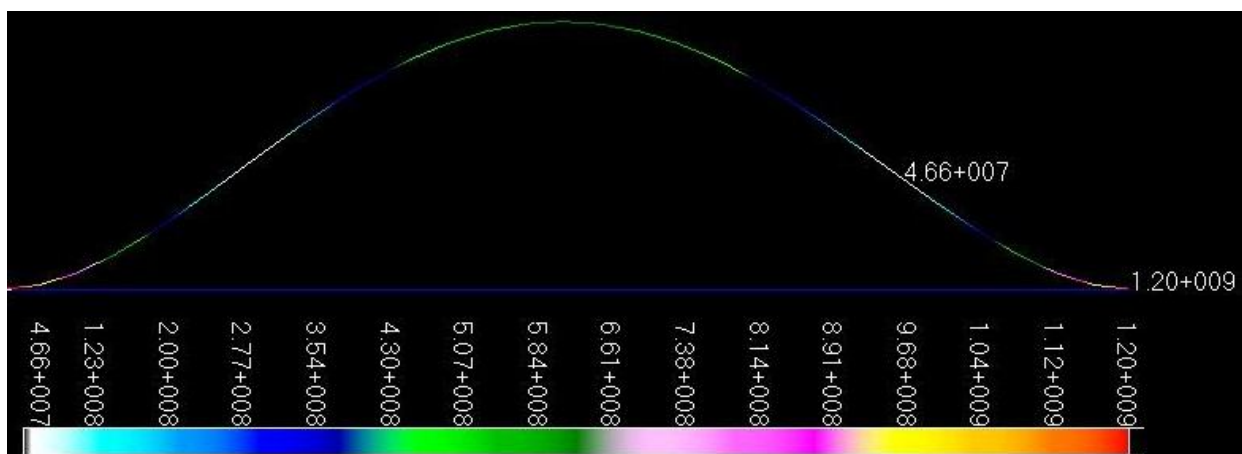


Рисунок 5 – Напряжения в трубопроводе по результатам моделирования при действии расчетной архимедовой силы (Па)

Анализ результатов моделирования показал, что жесткости трубопроводов не хватает для сопротивления таким нагрузкам как всплытие и выпучивание, действующим в результате активизации негативных геокриологических процессов. Данные процессы, в свою очередь, развиваются в результате термомеханического воздействия подземного газопровода на мерзлые грунты основания.

Наиболее негативно и интенсивно на подземный трубопровод оказывает влияние процесс криогенного пучения грунтов (таблица 2). С целью более детального рассмотрения негативного влияния процесса пучения проведено моделирование НДС сегмента трубы при действии нагрузки от пучения (рисунок 6).

Рассматривается сегмент трубопровода длиной 0,2 метра, подвергающийся нагрузкам от морозного пучения, в двух случаях нагружения: 1) нормальная нагрузка в вертикальной плоскости действует равномерно по нижней полуокружности сечения по всей длине сегмента трубы; 2) эквивалентная случаю 1 вертикальная нагрузка действует на нижней третьей

части полуокружности сечения по всей длине сегмента трубы (локальное интенсивное пучение).

Таблица 2 – Сводные результаты определения НДС трубы от действия природных нагрузок развития процессов термокарста и пучения грунтов

	НДС трубы от расчетной архимедовой силы	НДС трубы при всплытии	НДС трубы от действия расчетных значений пучения грунта	НДС трубы от действия пучения грунта
Максимальные перемещения, м	6.86	0.63	5.18	1.04
Максимальные напряжения, МПа	1200	65	1260	343

Определение НДС проводилось путем численного моделирования методом конечных элементов. Труба моделировалась оболочечными конечными элементами. Все воздействия на трубу задавались в виде действия на узлы элементов сосредоточенных усилий. Граничные условия – на торцах сегмента накладывались условия продолжения трубы.

Анализ результатов численного моделирования показал, что жесткости трубопроводов не хватает для сопротивления таким нагрузкам как всплытие и выпучивание, действующим в результате активизации негативных геокриологических процессов. Наиболее негативным процессом является пучение грунтов и выпучивание трубопровода. При расчетных вариантах всплытия и пучения, когда перемещения трубопровода не лимитированы выходом на дневную поверхность максимальные напряжения составляют 1200 МПа, что практически в 2 раза больше предела текучести материала. Расчетные напряжения превышают в 1,5 раза предел прочности материала, из которого изготовлены трубы трубопровода. Наличие таких нагрузок приведет к деформациям трубопровода. Фактические напряжения трубы при природных нагрузках от пучения в 5 раз превышают аналогичные напряжения от всплытия трубопровода. Перемещения трубопровода ограничены выходом на дневную поверхность и оголением.

**В пятой главе** описаны технологии и технические средства обеспечения устойчивости в литотехнической системе «подземный газопровод – грунт основания», основанные на применении активных методов регулирования температурных полей грунтового массива технологиями и техническими средствами термостабилизации грунтов оснований зданий и сооружений.

Исходя из анализа глав 2-4, можно сделать вывод о том, что основным фактором, влияющим на потерю устойчивости и эксплуатационную надежность зданий и сооружений, в т.ч. подземных трубопроводов является изменение естественных температурных полей с активизацией негативных геокриологических процессов.



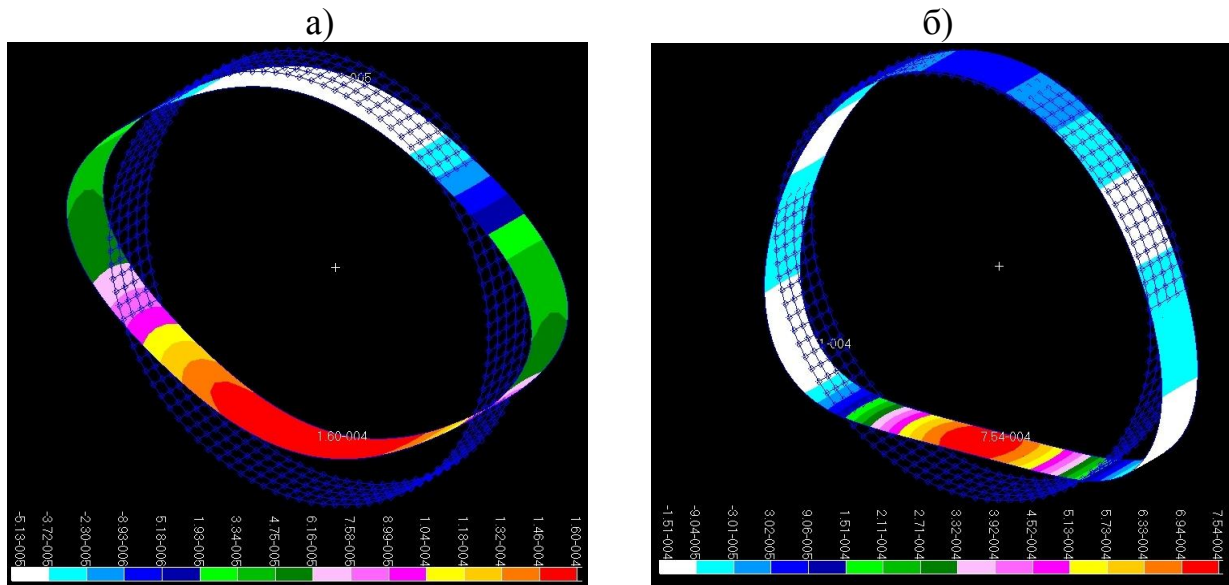


Рисунок 6 – Перемещения сегмента трубы по результатам моделирования при воздействии нагрузок от пучения:

а – 1ый случай нагружения; б – 2ой случай нагружения

На сегодняшний день существуют различные методы воздействия на температурное поле грунтов с целью обеспечения устойчивости. Основные методы делятся на активные и пассивные. К пассивным методам относятся изменение альbedo поверхности (покраска, навесы), каменная наброска и др. К активным методам относятся методы, непосредственно влияющие на температуру в грунтовом массиве, такие как технологии и технические средства термостабилизации грунтов оснований сооружений.

Технология термостабилизации грунтов в криолитозоне с применением двухфазных термосифонов рекомендуется:

- при сооружении и эксплуатации грунтовых и свайных оснований и фундаментов зданий промышленного и гражданского назначения, трубопроводов, вдольтрассовых ЛЭП, опор мостов, резервуаров и др. на слабонесущих вечномерзлых грунтах;
- при сооружении и эксплуатации ж/д- и авто- дорог, для создания «мерзлотных стенок» и противодиффузионных завес, дамб, ледовых островов, дорог и переправ;
- для локализации процесса термокарста, термоэрозии, солифлюкции, пучения и других негативных процессов в многолетнемерзлых грунтах.

Выбор технологии и технических средств термостабилизации грунтов оснований зданий и сооружений производится на основании прогнозных теплотехнических расчетов. Пример таких расчетов изображен на рисунке 7.

Применение термостабилизации на засоленных многолетнемерзлых грунтах позволяет увеличивать несущую способность в 1,5 – 2 раза. При выборе технологии, технических и конструктивных решений по обеспечению устойчивости инженерных сооружений в криолитозоне с применением методов термостабилизации используются: база данных по техносферной и геосферной подсистемам; методы математического моделирования теплового

взаимодействия в литотехнической системе «грунты оснований – инженерные сооружения – окружающая среда»; краткосрочный и долгосрочный прогнозы; набор технических решений и конструктивных средств для реализации выбранной технологии; база нормативной документации; технико-экономическая оценка предлагаемых технических решений и мероприятий.

На сегодняшний день, данный активный метод регулирования температурного поля массива грунтов применяется на многих объектах ОАО «Газпром», ОАО «АК» Транснефть», ОАО «РЖД» и др. для увеличения несущей способности и борьбы с негативным геокриологическими процессам, что обеспечивает устойчивость и эксплуатационную надежность объектов их инфраструктуры.

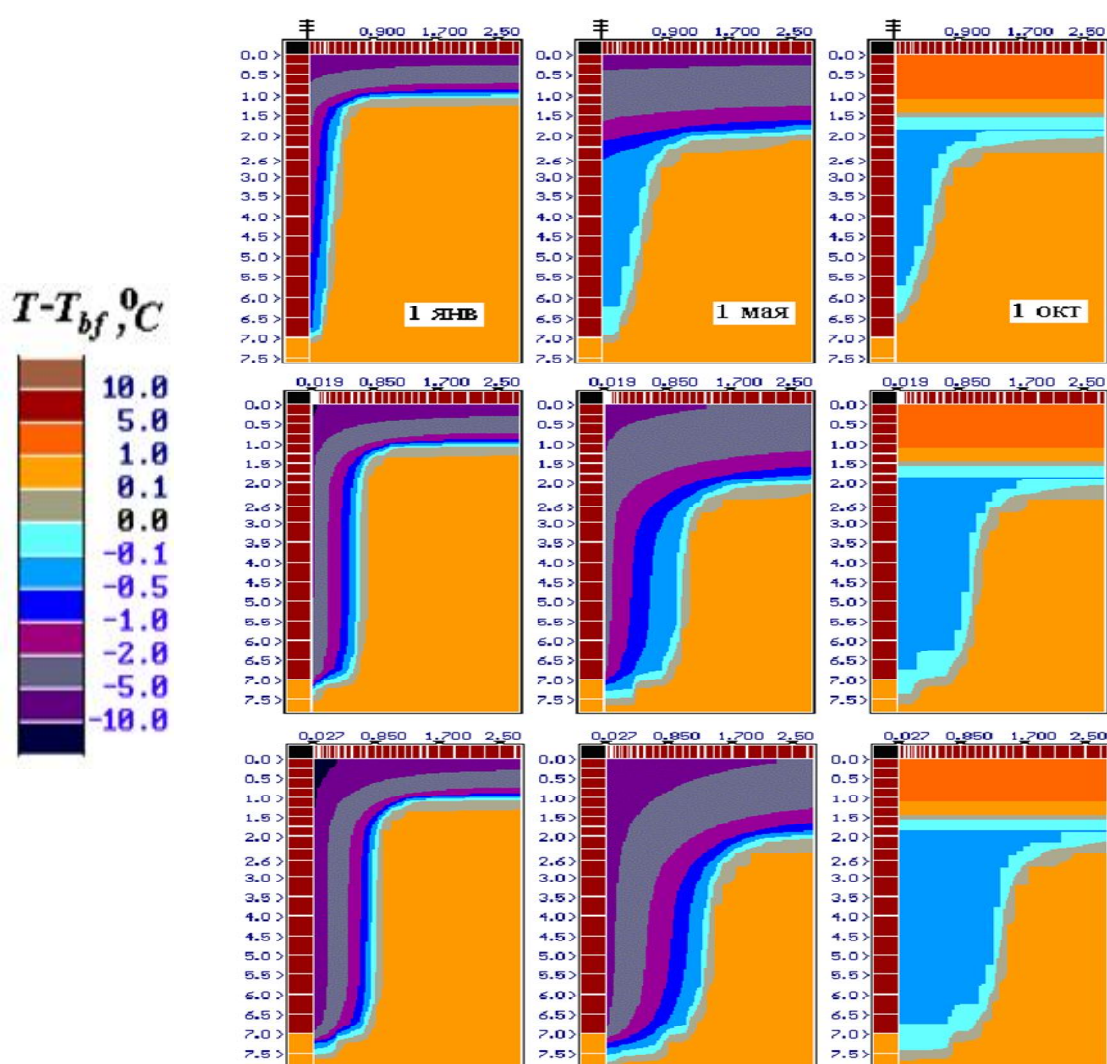


Рисунок 7 – Динамика температурных полей вокруг одиночно стоящих СОУ различных типов при промораживании талого грунта по результатам математического моделирования

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

Цель проведенных исследований состояла в развитии методов прогноза теплового и механического взаимодействия подземных газопроводов с засоленными многолетнемерзлыми грунтами для принятия решений по обеспечению устойчивости подземных газопроводов.

1. Сбор, изучение и анализ опубликованной, фондовой и нормативной литературы по вопросу инженерно-геокриологических особенностей засоленных многолетнемерзлых грунтов Бованенковского НГКМ показал, что для мерзлых засоленных грунтов полуострова Ямал морского типа засоления установлено значительное занижение расчетных прочностных характеристик. Засоленные грунты характеризуются смещением температуры фазовых переходов в сторону отрицательных значений от  $0^{\circ}\text{C}$  к диапазону  $-1,0 \dots -2,0^{\circ}\text{C}$  и более. Данный фактор негативно влияет на несущую способность грунтов в сторону ее уменьшения. Изменение естественных температурных полей многолетнемерзлых грунтов при техногенном воздействии при наличии засоления обуславливает активизацию геокриологических процессов, влияющих на устойчивость литотехнических систем.

2. В процессе эксплуатации газопровода реализуются неравномерные деформации, которые невозможно напрямую учесть при проектировании. К развитию таких деформаций приводят многочисленные геокриологические процессы, что подтверждается различными натурными экспериментами (эксперимент в г. Канн). Учет таких дополнительных деформаций, а также прогноз их развития и воздействия на трубу является главной задачей мониторинга литотехнических систем. Такой учет и прогноз возможен только при оценке параметров основных факторов, вызывающих эти деформации.

3. В настоящей работе разработаны численные модели и проведено моделирование теплового взаимодействия в литотехнической системе «подземный газопровод – грунт основания» с учетом инженерно-геологических особенностей засоленных мерзлых грунтов, а также с учетом технологических особенностей эксплуатации подземных трубопроводных систем, заключающихся в т.ч. в переменной температуре транспортируемого продукта. Анализ результатов численного моделирования показал, что наличие засоления и смещение температуры фазовых переходов при прочих равных условиях, в т.ч. одинаковых грунтах, увеличивает радиус ореола оттаивания вокруг газопровода. Если не учитывать незамерзшую воду при проведении расчетов, то погрешность конечных результатов может достигать порядка  $1^{\circ}\text{C}$ . В процессе эксплуатации газопроводов при положительной постоянной температуре транспортируемого продукта происходит многолетнее оттаивание вмещающих мерзлых грунтов вокруг газопроводов. Для стабилизации ММГ и возвращения газопроводов в проектное положение зачастую газ в трубопроводе пускается с отрицательной температурой. В результате ореолы оттаивания начинают промерзать вокруг трубы, при этом под трубой формируется замкнутый объем талого водонасыщенного грунта, промерзание которого

может вызвать инъекционное льдовыделение и привести к потере устойчивости и эксплуатационной надежности трубопровода, в т.ч. к аварии.

4. При тепловом взаимодействии в литотехнических системах происходит интенсификация геокриологических процессов, что приводит к потере устойчивости и формированию нежелательного напряженно-деформируемого состояния (НДС) в трубе. Для количественной оценки механического взаимодействия в литотехнических системах проведено определение НДС путем численного моделирования расчетных случаев методом конечных элементов (МКЭ). Моделирование проведено для наиболее распространенных геокриологических процессов – пучения и выпучивания трубопровода, термокарста и всплытия трубопровода.

5. Численное моделирование механического взаимодействия показало, что жесткости трубопроводов не хватает для сопротивления таким нагрузкам как всплытие и выпучивание, действующим в результате активизации негативных геокриологических процессов. Наиболее негативным процессом является пучение грунтов и выпучивание трубопровода. При расчетных вариантах всплытия и пучения, когда перемещения трубопровода не ограничены выходом на дневную поверхность («идеальный» вариант) максимальные напряжения составляют 1200 МПа, что практически в 2 раза больше предела текучести материала. Расчетные напряжения превышают в 1,5 раза предел прочности материала, из которого изготовлены трубы трубопровода. Наличие таких нагрузок приведет к поломке трубопровода.

6. Обоснован выбор технологии и технических средств термостабилизации грунтов оснований зданий и сооружений на основании прогнозных теплотехнических расчетов. При решении оптимизационной задачи по конструктивным и технологическим критериям в обосновании использованы термостабилизаторы нового поколения типа ТМД-5(5М). Применение термостабилизаторов данного типа на засоленных многолетнемерзлых грунтах позволяет увеличивать несущую способность в 1,5 – 2 раза.

7. Методы прогноза термомеханического взаимодействия подземных газопроводов, с засоленными многолетнемерзлыми грунтами могут быть использованы для выбора оптимальных проектных решений при проектировании, строительстве и эксплуатации в случае нарушения устойчивости данных литотехнических систем. Использование моделирования позволяет осуществлять оптимальный выбор технологии и технических средств обеспечения устойчивости, в т.ч. термостабилизации засоленных многолетнемерзлых грунтов оснований зданий и сооружений. Методический подход, основывающийся на моделировании с целью принятия решений по обеспечению устойчивости подземных газопроводов отражен в данной диссертационной работе и представлен в виде блок-схемы на рисунке 8.

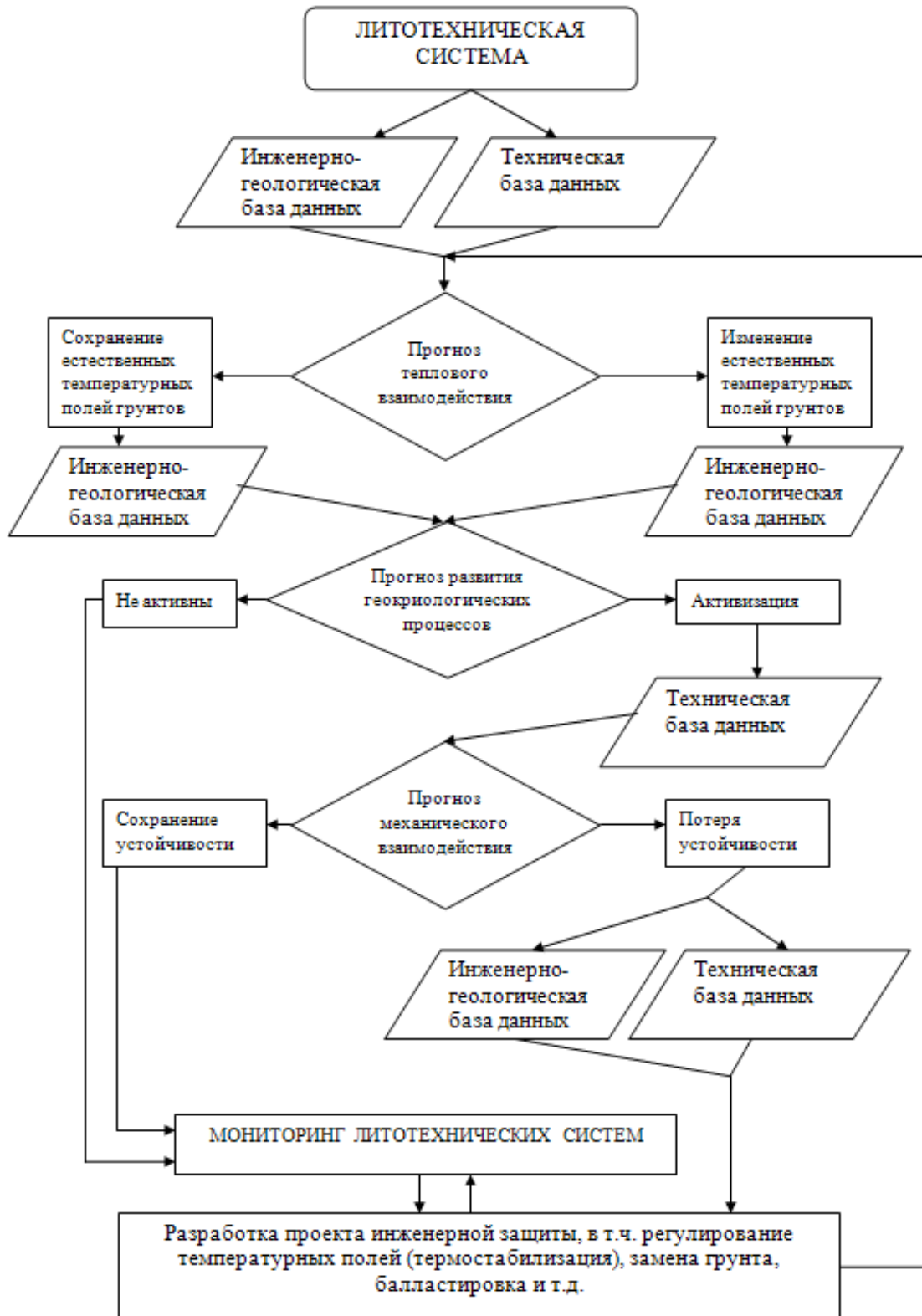


Рисунок 8 – Методический подход, основывающийся на прогнозном моделировании теплового и механического взаимодействия подземных газопроводов с засоленными многолетнемерзлыми грунтами с целью принятия решений по обеспечению устойчивости подземных газопроводов

### Основные публикации по теме диссертации:

*Статьи в ведущих рецензируемых научных журналах, определенных Минобрнауки РФ:*

1. Голубин С.И., Машуров С.С. Геотехническая система «газопровод – грунты основания» по данным из космоса. Всероссийский научно-аналитический журнал «Инженерные изыскания». М.: ПНИИИС, август 2008, № 4.
2. Голубин С.И. Математическое моделирование теплового взаимодействия подземного газопровода с многолетнемерзлыми грунтами полуострова Ямал. Журнал «Инженерная геология». М.: ПНИИИС, декабрь 2009, №4.
3. Голубин С.И., Баясан Р.М., Иванов А.А. Возведение фундаментов типа «полы по грунту» на засоленных грунтах Бованенковского НГКМ. Журнал «Инженерная геология». М.:ПНИИИС, март 2010, №1.
4. Голубин С.И., Великоднев В.Я., Каленский В.С. Тепловое и механическое взаимодействие подземного газопровода с многолетнемерзлыми грунтами и методы геотехнического мониторинга. Всероссийский научно-аналитический журнал «Инженерные изыскания». М.: ПНИИИС, сентябрь 2011, № 9.

*Статьи в прочих научных журналах, сборниках научных трудов и материалах конференций:*

1. Голубин С.И. Оценка взаимного влияния опасных геокриологических процессов и магистральных газопроводов на примере системы газопроводов Ямбург – Ныда. Инженерные изыскания в строительстве: материалы научно-практической конференции молодых специалистов. М.: ПНИИИС, 2006. 190 стр.
2. Голубин С.И. Мерзлотные процессы и деформации газопроводов. Энергия : ЭТЭ - 2007. - №8. - С. 60-62
3. Баясан Р.М., Голубин С.И. Влияние геокриологических условий на развитие негативных геокриологических процессов при эксплуатации системы магистральных газопроводов на участке Ямбург-Ныда. Перспективы поисков месторождений нефти и газа в малоизученных районах и комплексах: сборник научных трудов. М.: ВНИИГАЗ, 2007. 165 стр.
4. Голубин С.И. Комплексная диагностика геотехнической системы «газопровод – грунты основания» по материалам аэрокосмического мониторинга. Инженерные изыскания в строительстве: материалы научно-практической конференции молодых специалистов. М.: ПНИИИС, 2009. 119 стр.
5. А.Б. Скрепнюк, В.Я. Великоднев, В.В. Небабин, С.И. Голубин ООО «Газпром ВНИИГАЗ», А.П. Попов ОАО «ВНИПИгаздобыча». Основные принципы оценки воздействий многолетнемерзлых грунтов на магистральный

газопровод в рамках проведения геотехнического мониторинга. III Международная научно-техническая конференция Газотранспортные системы: настоящее и будущее (GTS-2009). Материалы конференции. М.: ОАО «Газпром», ООО «Газпром ВНИИГАЗ», 2009.

6. Голубин С.И. Обоснование выбора технологии и технических средств термостабилизации засоленных грунтов оснований зданий и сооружений п-ва Ямал. Сборник научных статей аспирантов и соискателей ООО «Газпром ВНИИГАЗ». М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2010.

7. Баясан Р.М., Баясан Т.В., Голубин С.И., Лялин А.В., Пустовойт Г.П. Применение инновационных технологий и технических средств термостабилизации на засоленных грунтах Бованенковского НГКМ полуострова Ямал. Материалы IV конференции геокриологов России. МГУ имени М.В. Ломоносова. Том 3. Часть 10. М.: Университетская книга, 2011.

8. Голубин С.И., Баясан Р.М., Баясан Т.В., Пустовойт Г.П., А.Н. Цеева Инновационные технические решения по термостабилизации многолетнемерзлых пород при строительстве в криолитозоне. Материалы IX Международного симпозиума 3-7 сентября 2011г. г. Мирный (Россия) «Проблемы инженерного мерзлотоведения». Изд-во Института мерзлотоведения СО РАН, Якутск, 2011.

9. Голубин С.И., Великоднев В.Я., Николаев М.Л. Геотехнический мониторинг состояния трубопроводов с помощью волоконно-оптических кабельных систем. Международный журнал «Геотехника». М.: ПНИИИС, №5, 2011.

10. Bayasan R.M., Golubin S.I., Pustovoit G.P., Proshina T.V., Korotchenko A.G. «Optimization of engineering solutions for thermal stabilization of saline permafrost soils at bases of structures by means of two-phase heat pipes». VII Minsk International Seminar «Heat pipes, Heat Pumps, Refrigerators, Power Sources», Minsk, Belarus, 2008.

11. S.I. Golubin, R.M. Bayasan, A.D. Lobanov, T.V. Bayasan, M.A. Lobanov, G.P. Pustovoit. Development and using of long-length composite two-phase heat pipes. VI I I Minsk International Seminar “Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators, Power Sources”, Minsk, Belarus, 12-15 September, 2011

Подписано к печати " 22 "декабря 2011 г.

Заказ № 3700

Тираж 100 экз.

2 уч.-изд.л. ф-т 60x84/16

Отпечатано в ООО "Газпром ВНИИГАЗ"

по адресу 142717, Московская область,

Ленинский р-н, п. Развилка, ООО "Газпром ВНИИГАЗ"