

На правах рукописи

Жолобов Игорь Андреевич

**ВЛИЯНИЕ НЕЛИНЕЙНОСТИ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ НА ДИНАМИКУ ТЕПЛОСИЛОВОГО
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОСНОВАНИЯ С ГОРЯЧИМ ПОДЗЕМНЫМ
ТРУБОПРОВОДОМ**

Специальность 01.04.14 Теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Тюмень - 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Тюменский государственный университет».

Научный руководитель	Доктор технических наук, профессор, Вакулин Александр Анатольевич
Официальные оппоненты	Доктор физико-математических наук, профессор, Михайлов Павел Никонович (Стерлитамакский филиал Башкирского государственного университета, заведующий кафедрой алгебры и геометрии) Кандидат технических наук, доцент, Подорожников Сергей Юрьевич (Тюменский государственный нефтегазовый университет, доцент кафедры транспорта углеводородных ресурсов)
Ведущая организация	ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный архитектурно-строительный университет» (г. Тюмень)

Защита состоится 27 мая 2015 г. в 14-00 часов на заседании диссертационного совета Д212.274.10 при ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный университет» по адресу: 625003, г. Тюмень, ул. Перекопская 15а, ауд. 410.

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-библиотечном центре ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный университет» и на сайте <http://d21227410.utmn.ru/defenses>

Автореферат разослан «17» апреля 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.274.10
д. ф.-м. н.

Удовиченко С.Ю.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Трубопроводный транспорт занимает одно из лидирующих мест в мире по объемам транспортируемого продукта. При сооружении и эксплуатации трубопроводов в сложных геокриологических условиях возникает ряд вопросов в части определения устойчивости грунтов основания при их взаимодействии с горячими подземными трубопроводами. В случае, когда трубопровод с горячим продуктом проходит по многолетнемерзлым грунтам (ММГ), происходит оттаивание и осадка, то есть перемещение этих грунтов. Таким образом, исходные данные для прочностного расчета постоянно меняются, а сам трубопровод постоянно меняет свое положение в результате перемещений грунта. Скорость и степень таких перемещений определяются теплотехническим расчетом, однако их последствия нигде не оцениваются. Необходимо так же учесть, что коэффициент теплопроводности мерзлых грунтов не постоянен и зависит от множества факторов, в частности от температуры. Общепринятые методики позволяют корректно определять коэффициент теплопроводности грунтов не во всем диапазоне температур. Правильное определение теплофизических свойств обеспечивает высокую точность исходных данных и правильность результатов теплотехнических расчетов. Таким образом, актуальность работы не вызывает сомнений.

Цель и задачи работы

Целью работы является совершенствование методики расчета теплосилового взаимодействия горячего подземного трубопровода, находящегося в условиях многолетнемерзлых грунтов, в части учета изменения коэффициента теплопроводности мерзлого грунта в зависимости от температуры, с целью повышения надежности эксплуатации трубопроводов в сложных геокриологических условиях.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Обосновать необходимость измерений теплофизических свойств мерзлых и талых грунтов для уточнения результатов теплотехнических расчетов и оценки напряженно-деформируемого состояния (НДС) подземного горячего трубопровода (теплосиловых расчетов).

2. Создать экспериментальную установку для изучения зависимости коэффициента теплопроводности мерзлых грунтов от температуры.

3. Провести серию теплотехнических расчетов с целью изучения возможности значительного влияния на их результаты возможной зависимости от температуры коэффициента теплопроводности мерзлого грунта.

4. Разработать методику теплосилового расчета горячего подземного трубопровода с учетом зависимости коэффициента теплопроводности мерзлого грунта от температуры.

Научная новизна исследований представлена следующими положениями:

1. Обнаружено существенное влияние зависимости коэффициента теплопроводности мерзлых грунтов на результаты теплотехнических и прочностных расчетов в условиях естественного залегания многолетнемерзлых грунтов.

2. Впервые предложен новый метод решения задачи теплосилового взаимодействия горячего подземного трубопровода с протаивающим мерзлым грунтом. Новизна метода заключается в том, что задача решается в совместной постановке: данные прочностного расчета напряженно-деформируемого состояния трубопровода используются как исходные данные теплотехнического расчета. Решение задачи в такой постановке учитывает существенное влияние именно относительной величины осадок соседних участков трубы.

3. Экспериментально получены значения коэффициентов теплопроводности талых и мерзлых грунтов одного из нефтегазовых месторождений Якутии. Показано существенное влияние на результаты

теплосиловых расчетов трубопровода использование в них экспериментально определенных теплофизических параметров грунтов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Методика измерений и экспериментальная установка для определения коэффициента теплопроводности грунтов в мерзлом и талом состояниях, в практическом интервале температур работы трубопроводов (от минус 30 до плюс 30 °С).

2. Влияние коэффициента теплопроводности мерзлых грунтов на моделирование теплотехнического взаимодействия горячего подземного трубопровода с протаивающими грунтами.

3. Результаты расчетно-параметрического исследования влияния различных теплофизических параметров мерзлых грунтов на напряженно – деформированное состояние (НДС) магистральных трубопроводов.

4. Методика расчета теплосилового взаимодействия горячего подземного трубопровода с протаивающими грунтами.

Практическая значимость работы состоит в следующем:

Полученные результаты дополняют имеющиеся данные по определению коэффициента теплопроводности мерзлых грунтов и строительству трубопроводов в районах Крайнего Севера на структурно-неустойчивых грунтах и дают возможность минимизировать временные и трудовые затраты для расчета вышеописанных явлений и внести уточнения в процесс измерения теплофизических свойств мерзлых грунтов в диапазоне около нулевых температур.

Разработана методика расчета теплосилового взаимодействия подземного трубопровода, заключающаяся в том, что данные прочностного расчета напряженно-деформируемого состояния трубопровода используются как исходные данные теплотехнического расчета. Данная методика может быть использована при модернизации существующих программных комплексов, предназначенных для проектирования трубопроводов на структурно

неустойчивых грунтах, подверженных осадкам и дополнительно учитывает зависимость коэффициента теплопроводности мерзлого грунта от температуры.

Разработана экспериментальная установка, позволяющая определять коэффициент теплопроводности мерзлого грунта в широком диапазоне отрицательных температур, вплоть до границы фазового перехода.

Достоверность полученных результатов и выводов обеспечена использованием в экспериментальных исследованиях современных методов измерений и компьютерной техники; основана на использовании фундаментальных уравнений теплофизики; обусловлена корректной постановкой задач; подтверждается достаточной обоснованностью принятых допущений и обеспечена количественным совпадением полученных численных решений с известными аналитическими зависимостями и экспериментальными данными.

Личный вклад автора состоит в разработке методики определения коэффициента теплопроводности мерзлого грунта в широком диапазоне отрицательных температур, создании экспериментальной установки, реализующей данную методику и проведении экспериментальных исследований по определению теплофизических свойств мерзлых грунтов в зависимости от температуры, обработке полученных результатов, разработке методики решения задачи теплосилового взаимодействия трубопровода с мерзлым грунтом в совместной постановке задачи. В опубликованных совместно с соавторами научных статьях вклад соавторов равнозначен.

Апробация работы

Результаты исследований докладывались и обсуждались на российских и международных межотраслевых научных семинарах и конференциях. Их перечень приведен ниже.

- Семнадцатая Всероссийская научная конференция студентов – физиков и молодых ученых ВНКСФ – 17 (Екатеринбург, 2011 г.);

- Всероссийская научно - практическая конференция молодых ученых и специалистов «Стратегия инновационного развития, строительства и освоения районов Крайнего Севера», посвященная 20-летию ООО НПО «Фундаментстройаркос»- (Тюмень, 2011 г.);
- Научный семинар Научно-исследовательского отдела ОАО «Гипротюменнефтегаз» (Тюмень, 2012);
- Научно – практическая конференция молодых ученых и специалистов «Инновации в проектировании, строительстве и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений», ОАО «Гипротюменнефтегаз» (Тюмень, 2012 г.);
- XVIII Научно – практическая конференция молодых ученых и специалистов «Проблемы развития газовой промышленности Сибири - 2014», ООО «ТюменНИИгипрогаз» (Тюмень, 2014 г.);
- Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Новые технологии – нефтегазовому региону», ТюмГНГУ (Тюмень, 2014 г.);
- Тюменский международный инновационный форум «Нефтьгазтэк», Правительство Тюменской области (Тюмень, 2014);
- Научный семинар кафедры механики многофазных систем ТюмГУ (Тюмень, 2014).

Публикации Основное содержание диссертационной работы опубликовано в 8 работах, в том числе в 5 статьях, входящих в перечень ВАК. Их список приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка цитируемой литературы и приложения. Материал изложен на 151 странице, включает 48 рисунков, 13 таблиц. Список цитируемой литературы составлен из 118 источников.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, формулируются цели и задачи исследования, пути их решения, изложена научная новизна,

практическая значимость работы, приведены основные результаты и положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена обзору основных свойств грунтов, существующих методик и приборов для измерения коэффициента теплопроводности мерзлых грунтов и влияния температуры на его значение, прочностных расчетов НДС подземного трубопровода и температурных полей вокруг него. Большой вклад в исследования грунтов и изучение теплосилового взаимодействия подземных трубопроводов с грунтом внесли А. Б. Айнбиндер, Г.В. Аникин, П. П. Бородавкин, М.Н. Гольдштейн, Я.Б. Горелик, А.И. Горковенко, С.Е. Гречищев, Б.И. Далматов, Ю.С. Даниэлян, Г.К. Клейн, В.С. Колунин, В. П. Мельников, З.А. Нерсесова, Н.В. Орнатский, В.О. Орлов, М.И. Сумгин, В.Д. Таран, Н.А. Цытович, Л.В. Чистотинов и многие другие отечественные и зарубежные ученые.

Обсуждаются приведенные в литературе методики и приборы для определения теплофизических свойств грунтов и расчетные методы оценки теплотехнического и напряженно-деформационного состояния линейной части горячего подземного трубопровода, вызванного осадками грунтового основания.

Проведенный в первой главе диссертации анализ существующих схем теплотехнического и силового взаимодействия подземного трубопровода с просадочными грунтами показал следующее. Для корректного описания теплосилового взаимодействия подземного трубопровода с просадочными грунтами недостаточно, в ряде случаев, учитывать обычно используемые исходные данные, например коэффициент теплопроводности для мерзлого и талого состояний грунта. Для получения объективных данных по напряженно-деформированному состоянию трубопровода необходимо учитывать динамически изменяющиеся свойства мерзлых грунтов в процессе эксплуатации трубопровода и его относительные просадки.

Вторая глава посвящена теоретическим основам методики измерений и технологической схеме экспериментальной установки для измерения

коэффициента теплопроводности мерзлых грунтов ненарушенной структуры. Эти данные являются основополагающими исходными данными для теплотехнического расчета. Здесь же обосновывается необходимость прямого определения характеристик мерзлых и талых грунтов. Показывается проблематика измерения коэффициента теплопроводности вблизи нуля, а именно невозможность измерения на существующих приборах из-за перегрева образца и его плавления.

Исследуются образцы мерзлого и талого грунта ненарушенной структуры. Для измерения коэффициента теплопроводности образцы грунта помещаются в специальные стальные кольца. Каждое кольцо имеет наружный диаметр 60 мм, толщину стенки 2 мм, и высоту 20 мм. За счет применения вышеуказанных колец обеспечивается плоскопараллельность обеих сторон образцов и их геометрическое подобие применяемым эталонным образцам. Измерения производят при температурах от минус 1⁰С до минус 10⁰С в термостатирующей камере с принудительной циркуляцией воздуха для обеспечения равномерности распределения температуры по ее объему.

Экспериментальная установка, разработана автором совместно с Примаковым С.С., основана на методике, описанной в авторском свидетельстве №1684644 (Авторы Ю. С. Даниэлян, В. С. Зайцев, Л. В. Гамаюнова, И. Ю. Воеводин). Предложенная модернизированная методика предназначена для определения коэффициента теплопроводности грунтов в мерзлом и талом состояниях в широком диапазоне температур. Сначала, с помощью нагревателей, в исследуемом и эталонном материалах задаются соответствующие тепловые потоки, пропорциональные коэффициентам теплопроводности. Измеряя тепловые потоки и зная коэффициент теплопроводности эталонного образца определяется коэффициент теплопроводности исследуемого грунта по формуле:

$$\lambda_{и} = \lambda_{эт} \frac{q_{и}}{q_{эт}}, \quad (1)$$

где $\lambda_{и}$, $\lambda_{эт}$ - коэффициенты теплопроводности исследуемого грунта и эталона соответственно, $q_{и}$, $q_{эт}$ - тепловые потоки в грунт и эталон. Формула

(1) справедлива при равенстве температур в зоне контактов нагревателей с исследуемым и эталонным образцами.

Предложенный метод является дифференциальным. Схема измерительной установки для измерения коэффициента теплопроводности грунтов в мерзлом состоянии приведена на рисунке 1.

Разъёмный корпус ячейки 2 выполнен из металла с высоким коэффициентом теплопроводности (алюминия) и служит для стабилизации температуры на боковых и торцевых поверхностях материалов. Основными элементами ячейки являются теплотрический датчик, включающий два коаксиально расположенных нагревателя, и размещенный между ними датчик нулевого перепада температур, который служит для контроля равенства температур нагревателей. В блоке индикации и управления 1 имеется разработанный автором модуль 11, позволяющий задавать максимальный градиент температур на исследуемом образце и проводить испытания мерзлых грунтов вплоть до границы фазового перехода.

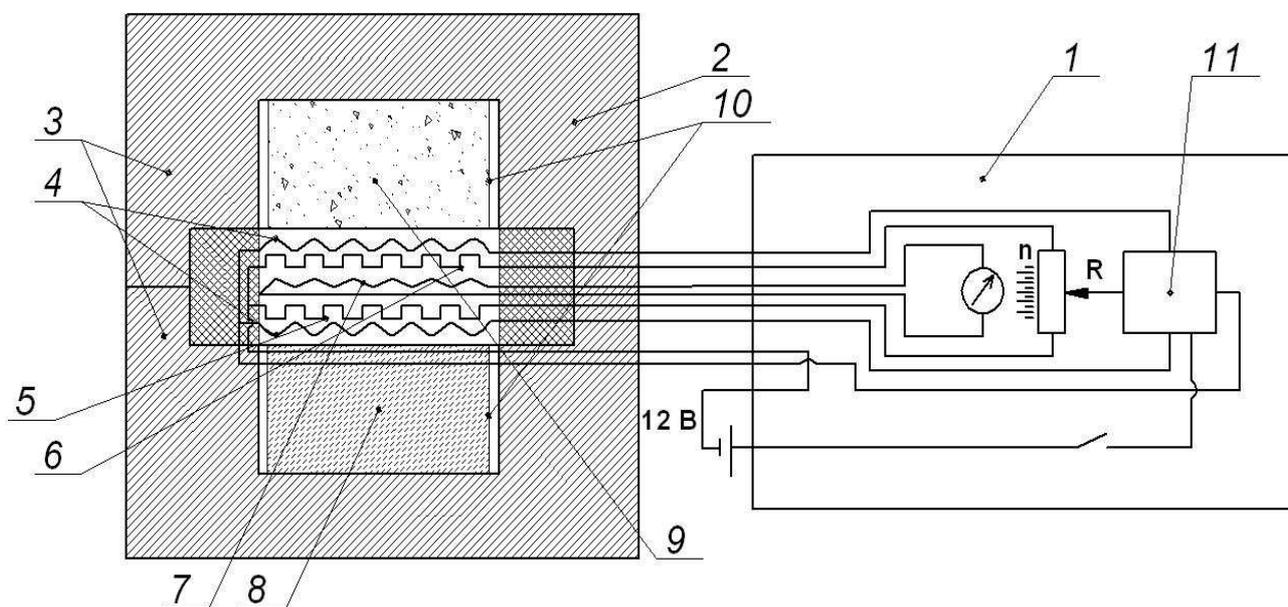


Рисунок 1 – Схема установки по измерению коэффициента теплопроводности твердых материалов. 1 – блок управления и индикации, 2 – измерительная ячейка, 3 – разъёмный корпус ячейки, 4 - датчики температуры, 5 – электрический нагреватель эталона, 6 – электрический нагреватель исследуемого образца, 7 – датчик нулевого перепада температур, 8 – эталон, 9 – исследуемый материал, 10 – режущие кольца из «полевой лаборатории Литвинова», 11 – модуль, регулирующий общую интенсивность нагрева

За счет применения эталонных образцов, коэффициент теплопроводности которых известен с высокой точностью, неопределенность измерений определена на уровне 5%, что соответствует нормам проектирования и строительства. В качестве эталонов используются материалы, коэффициент теплопроводности которых не зависит от внешних условий.

На разработанной автором экспериментальной установке проведено исследование зависимости коэффициента теплопроводности от температуры грунта для образца ненарушенной структуры. В качестве образца был выбран суглинок суммарной влажностью – 0,30 д.е. и плотностью – 1880 кг/м³. Этот выбор был обусловлен широким диапазоном содержания незамерзшей воды в глинистых образцах грунта. Была проведена серия измерений коэффициента теплопроводности данного грунта и произведено сравнение полученных результатов с результатами, полученными на установках других типов – на приборе «Anter» (США) и лабораторной установке для измерения коэффициента теплопроводности разработки ОАО «Гипротюменнефтегаз». Принцип работы прибора «Anter» основан на нестационарном методе определения коэффициента теплопроводности. В качестве чувствительного элемента в нем используется поверхностный плоский зонд, который размещается на ровной подготовленной поверхности образца. Коэффициент теплопроводности определяется по изменению температуры при нагреве и дальнейшем остывании образца.

Принцип действия лабораторной установки для измерения коэффициента теплопроводности разработки ОАО «Гипротюменнефтегаз» приведен в упомянутом ранее авторском свидетельстве №1684644.

Преимуществом разработанной автором экспериментальной установки, основанной на стационарном способе измерения коэффициента теплопроводности, является возможность определения коэффициента теплопроводности грунта во всем актуальном для практики диапазоне температур, например, от минус 20 °С до температуры начала оттаивания грунта. На рисунке 2 изображена зависимость коэффициента теплопроводности

мерзлого грунта от средней температуры образца, полученная на трех описанных выше установках.

Если для данного градиента температур вычислить средневзвешенную теплопроводность, определённую путем вычисления зависимости полученной на авторском приборе, то полученные значения с высокой точностью совпадают со значениями, измеренными лабораторной установкой (Рисунок 2). На рисунке 2 так же представлены 5% планки погрешностей позволяющие оценить разброс полученных значений.

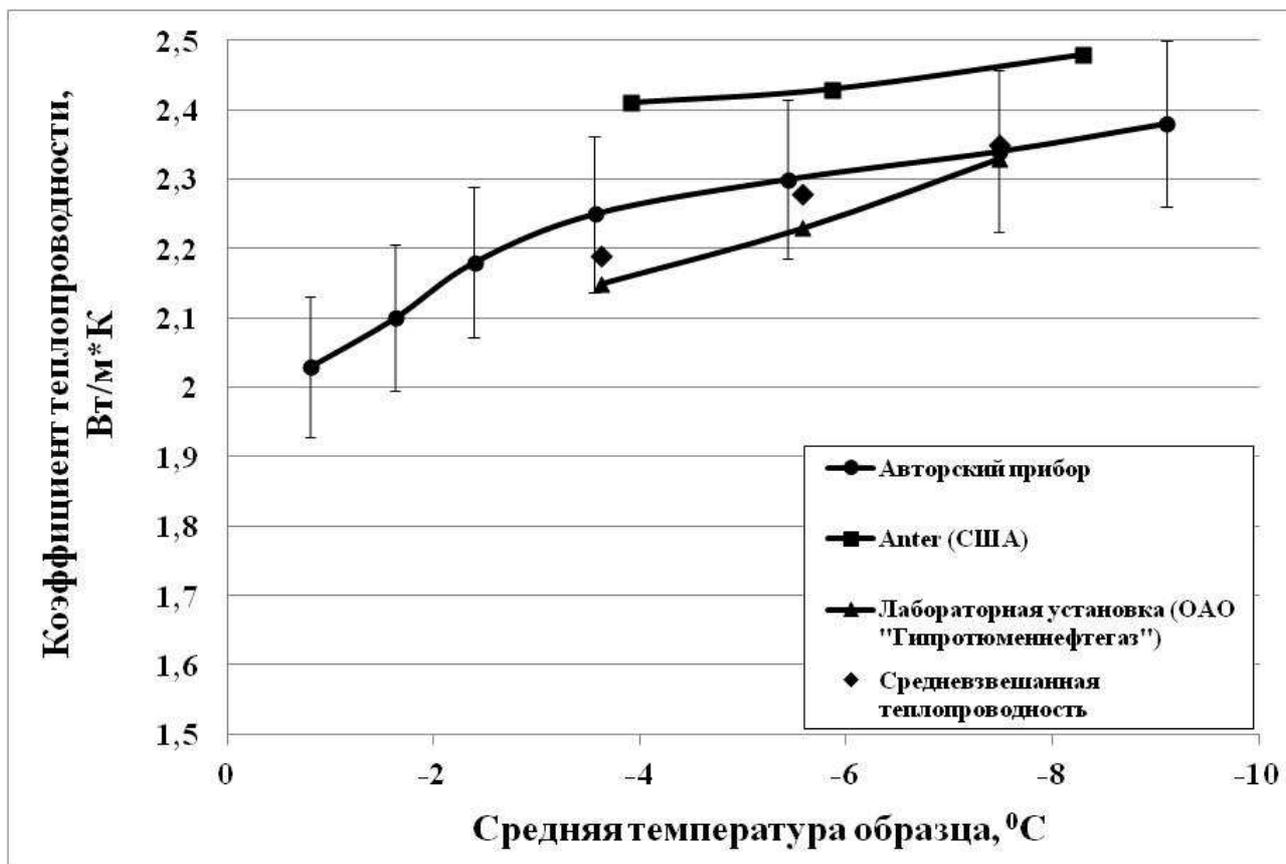


Рисунок 2 - Зависимость коэффициента теплопроводности мерзлого грунта от температуры образца

Прибор, разработанный автором, учитывает недостатки известных измерительных установок, в частности имеет модуль позволяющий ограничивать нагрев измеряемого образца, и позволяет производить измерения коэффициента теплопроводности мерзлого грунта в актуальном температурном диапазоне вплоть до границы фазового перехода при температурах близких к 0 °C и применить результаты в расчетах, научных изысканиях и в решении других вопросов в области геокриологии.

Третья глава посвящена определению степени влияния на результаты теплосиловых расчетов различных способов определения коэффициента теплопроводности грунта и разработке методики расчета теплосилового взаимодействия подземного горячего трубопровода с мерзлыми грунтами основания.

Традиционно для возведения сооружений на многолетнемерзлых грунтах необходимо проводить теплотехнические расчеты, с целью выбора режима работы сооружения и, в случае необходимости, выработки защитных мероприятий. Нормативная документация предписывает в качестве основного способа строительства трубопроводов - подземную прокладку. В случае прокладки горячего трубопровода в мерзлом грунте, вокруг трубопровода будет формироваться ореол оттаивания. На скорость оттаивания будут влиять множество факторов, таких как температура продукта, температура грунта, наличие теплоизоляции и т.д. В результате могут наблюдаться значительные осадки грунта, в зависимости от его свойств. В качестве примера, в диссертации рассмотрен идеализированный участок горячего подземного трубопровода. Схема моделируемого участка трубопровода приведена на рисунке 3.

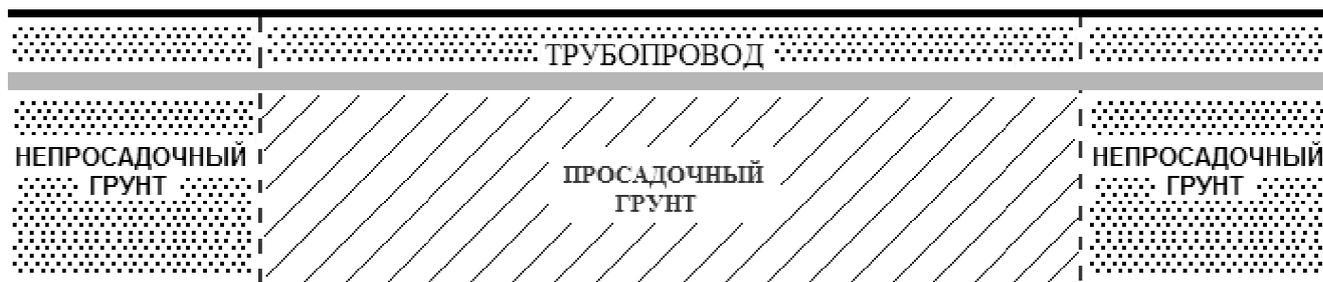


Рисунок 3 – Схема моделируемого участка трубопровода. Пояснения в тексте.

Для расчета были приняты следующие исходные данные: наружный диаметр трубопровода - 530 мм, толщина стенки трубы - 10 мм, температура продукта - 35 °С, глубина заложения от поверхности земли до верхней образующей трубы - 0,8 м. Перекачиваемая среда – нефтепродукты с плотностью 870 кг/м³. На просадочном участке суглинок суммарной

влажностью – 0,30 д.е. и плотностью – 1880 кг/м³. На боковых непосадочных участках – сухой песок.

На первом этапе теплотехнического расчета определяются ореолы оттаивания при различных значениях коэффициента теплопроводности грунта, полученных разными методами. Выполнено четыре варианта теплотехнических расчетов, отличающиеся способом получения коэффициента теплопроводности грунта:

- на лабораторной установке для измерения коэффициента теплопроводности, разработки ОАО «Гипротюменнефтегаз» (граница талого и мерзлого грунта определяется по нулевой изотерме);

- расчетным путем по своду правил (СП) 25.13330.2012 (граница талого и мерзлого грунта определяется по нулевой изотерме);

- на разработанной автором экспериментальной установке (граница талого и мерзлого грунта определяется по нулевой изотерме);

- на разработанной автором экспериментальной установке (граница талого и мерзлого грунта определяется по экспериментально определенной точке замерзания грунта - минус 0,5 °С).

В тепловом расчете численно решалась задача по определению максимальной глубины оттаивания под теплым заглубленным трубопроводом в поперечном сечении в двумерной постановке, поскольку переносом тепла в грунте вдоль оси трубопровода можно пренебречь в силу малого изменения температуры продукта на расчетном участке выбранной характерной длины.

Процесс распространения тепла в грунте в трехмерном пространстве описывается уравнением (формула 2):

$$\frac{\partial H}{\partial \tau} = d\omega(\lambda grad U) + F, \quad (2)$$

где $U(M, \tau)$ - температура грунта в точке $M(x, y, z)$ в момент τ ,

$H(U, M, \tau)$ - энтальпия (теплосодержание), отнесенная к единице объема грунта,

- коэффициент теплопроводности грунта,

- плотность тепловых внутренних источников и стоков в единице объема.

Из целого ряда факторов влияющих на коэффициент теплопроводности грунтов в мерзлом состоянии делается допущение о том, что он зависит только от количества незамерзшей воды, величина которой в свою очередь зависит от температуры. В задаче учитывается фазовый переход, сложные условия теплообмена на поверхности земли с учетом переменной высоты снежного покрова, влияния солнечной радиации, скорости ветра, температуры воздуха, неоднородности грунта по вертикали и горизонтали, а также его теплофизических и физико-механических свойств. Применялась неравномерная прямоугольная расчетная сетка и явная схема.

Результаты теплотехнического расчета подземного трубопровода на 30 лет эксплуатации приведены на рисунке 4. Расчетная область – просадочный участок представленный на рисунке 3.

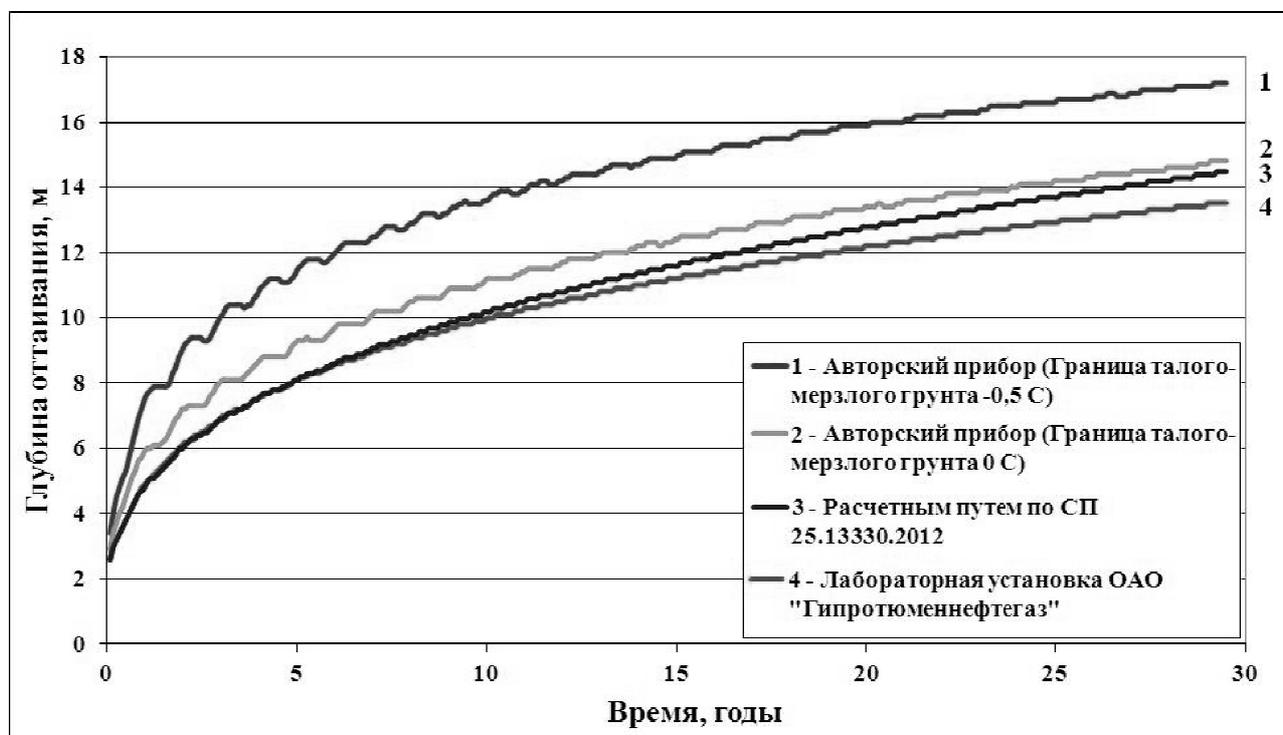


Рисунок 4 – Глубина оттаивания грунтов основания подземного горячего трубопровода в течение периода эксплуатации, в зависимости от выбранного способа получения коэффициента теплопроводности грунта.

Из рисунка 4 видно, что максимальная глубина оттаивания к концу 30 года эксплуатации трубопровода достигает 17,2 м (для варианта расчета в котором учтен коэффициент теплопроводности, полученный автором) и отличается от значения, полученного при расчете с коэффициентом теплопроводности полученным по нормативной документации на 2,7 м (на 16%).

Далее, видно, что теплотехнический расчет учитывает сезонное колебание температуры на поверхности грунта, что иллюстрируется скачкообразным характером изменения глубины оттаивания.

На втором этапе теплотехнического расчета выполняется определение осадок грунта в результате его растепления. Расчет проводится на основе методики, приведенной в СП 25.13330.2012. Результаты расчета осадок грунтов основания трубопровода приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения осадок грунта для различных способов определения коэффициента теплопроводности.

Способ определения коэффициента теплопроводности	Значение осадки грунта основания трубопровода, м
На лабораторной установке для измерения коэффициента теплопроводности разработки ОАО «Гипротюмнефтегаз»	0,30 ±0,01
Расчетным путем по СП 25.13330.2012	0,32±0,01
На разработанной автором экспериментальной установке (граница талого и мерзлого грунта определяется по нулевой изотерме)	0,33±0,01
На разработанной автором экспериментальной установке (граница талого и мерзлого грунта определяется по экспериментально определенной точке замерзания грунта - минус 0,5 °С)	0,40±0,01

Как видно из таблицы 1 значения осадок грунта могут отличаться на значительные величины, в зависимости от способа получения коэффициента теплопроводности, в данном случае до 25%.

Оценка надежности трубопровода может определяться только при совместном решении тепловой и прочностной задач. Прочностная задача решается в квазистационарной постановке и определяет предельные значения неоднородности осадки грунта, не вызывающие критических напряжений в

стенке трубопровода. Тепловая решается численно в нестационарной постановке и определяет глубину оттаивания, осадку грунта и степень её неоднородности по всей длине трубы на всем периоде эксплуатации, с учетом зависимости коэффициента теплопроводности мерзлого грунта от температуры. Результаты решения прочностной задачи определяют параметры решения теплотехнической. В свою очередь, анализируя решение теплотехнической задачи с учетом критерия, полученного при решении прочностной, определяются не только участки, на которых труба будет испытывать предельные деформации, но и моменты времени, когда эти деформации будут возникать. Эти моменты времени необходимо определять в связи с тем обстоятельством, что сильнольдистые просадочные грунты могут залегать на разной глубине и оттаивать в разные моменты времени.

Для иллюстрации вышесказанного был проведен расчет подземного трубопровода. При определенных условиях и небольшой протяженности просадочного участка, труба будет провисать над просевшим грунтом при любой величине осадки грунта, и держаться на боковых непросадочных участках (Рисунок 5).

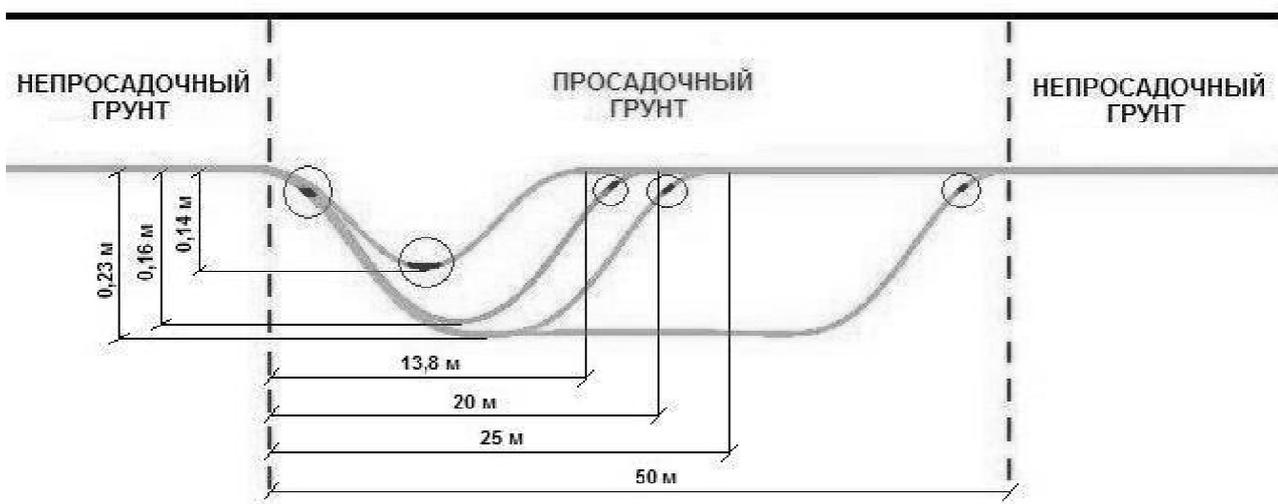


Рисунок 5 - Схематичное изображение модели участка трубопровода при просадках грунтов основания. Места возникновения недопустимых напряжений в трубе выделены окружностями. Масштаб осадки грунта 50:1

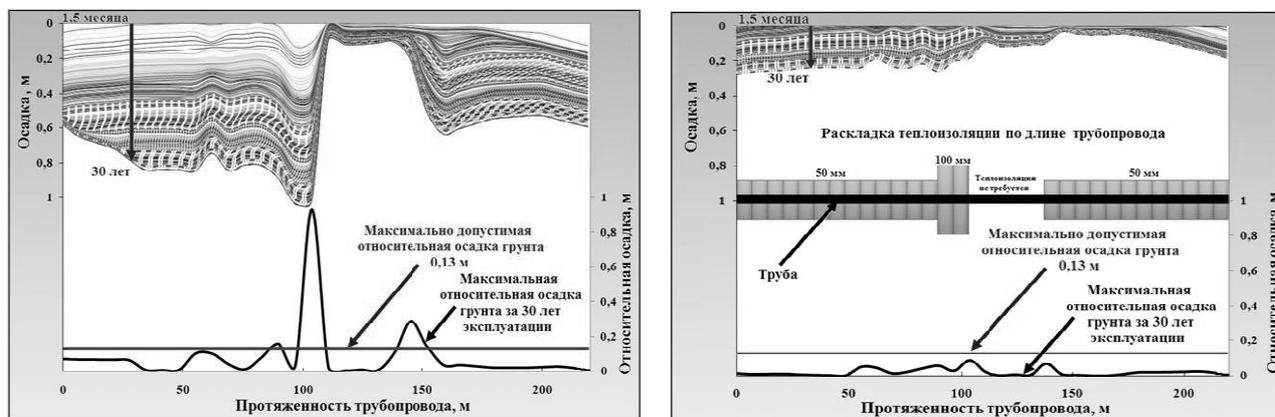
В диссертации выполнено исследование, позволяющее оценить возникающие напряжения в трубопроводе. Прочностные расчеты выполнялись в Старт ООО «НТП Трубопровод» использующей балочную расчетную модель трубопровода, при которой взаимодействие трубопровода с окружающим грунтом моделируется продольными и поперечными упругими опорами (пружинами), расставленными с определенным шагом. Из рисунка 5 видно, что величина допустимой просадки увеличивается с увеличением длины просадочного участка и имеет свой предел для каждой трубы. Так же из прочностных расчетов можно сделать вывод, что просадка трубы менее 0,13 м не опасна для участка любой длины (см. рисунок 5).

Затем были выполнены два теплотехнических расчета. Первый расчет отражает ситуацию, которая сложится через 30 лет вокруг трубопровода при отсутствии каких-либо защитных мероприятий. Полученные в результате расчета зависимости максимальных значений абсолютных и относительных осадок от времени представлены на рисунке 6а.

Верхняя часть приведенного на рисунке 6а графика показывает динамику формирования осадки с шагом по времени - 1,5 месяца, нижняя часть графика показывает степень неоднородности осадки (максимальную относительную осадку грунта на соседних участках трубопровода за весь период эксплуатации), а также уровень её предельно допустимого значения (при котором отсутствуют критические напряжения в трубе). Проведенный расчет позволяет выявить участки, потенциально опасные для надежности трубопровода с точки зрения неоднородности осадок оттаявшего в процессе эксплуатации грунта. Далее, на участке трубы протяженностью порядка 100 м именно относительные осадки достигли значительных величин, несмотря на то, что абсолютные осадки грунта велики почти на всем моделируемом участке. Смотри нижнюю часть рисунка 6а.

Для определения мероприятий по обеспечению надежной работы трубопровода с целью выравнивание скоростей осадки на соседних участках был проведен следующий теплотехнический расчет (см. рисунок 6б). Видно,

что на участках с непросадочными грунтами теплоизоляция не требуется. Напротив, на участке где непросадочные грунты граничат с сильнопросадочными, вследствие чего возникает сильная неравномерная осадка грунта, требуется дополнительная теплоизоляция.



а

б

Рисунок 6 - Зависимость абсолютной и максимального значения относительной осадок от протяженности трубопровода за 30 лет эксплуатации без защитных мероприятий (а) и с применением теплоизоляции (б)

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Обоснована необходимость измерения коэффициента теплопроводности мерзлых грунтов вблизи границы фазового перехода для уточнения результатов теплотехнических расчетов.

2. Экспериментально изучена зависимость коэффициента теплопроводности мерзлых грунтов от температуры. Выявлено, что в отдельных случаях коэффициент теплопроводности мерзлого грунта может изменяться в зависимости от содержания незамерзшей воды на 0,5 Вт/м*К и более.

3. Проведена серия теплотехнических расчетов подземного трубопровода с учетом нелинейной зависимости коэффициентов теплопроводности мерзлых грунтов от температуры. Показано, что максимальная глубина оттаивания к концу 30 года эксплуатации трубопровода, при учете зависимости коэффициента теплопроводности мерзлого грунта от количества незамерзшей воды может отличаться на значительные величины от

15% и более по сравнению с расчетами, где теплопроводность мерзлого грунта принимается постоянной.

4. Разработана методика решения задачи теплосилового взаимодействия горячего подземного трубопровода с протаивающими глинистыми грунтами в мерзлом состоянии, что позволило выделить потенциально опасные просадочные участки трассы на начальном этапе проектирования.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ

1. Жолобов И. А. О необходимости лабораторных измерений теплофизических свойств многолетнемерзлых грунтов/ И. А. Жолобов, С. С. Примаков // Нефтяное хозяйство. – 2013. - №2. – с. 82-84.
2. Жолобов И. А. Теплосиловое взаимодействие горячих подземных трубопроводов с многолетнемерзлыми грунтами/ И. А. Жолобов, С. С. Примаков, В.Е. Вершинин // Нефтяное хозяйство. – 2013. - №11. – с. 128-131.
3. Жолобов И. А. Об определении теплофизических свойств многолетнемерзлых грунтов / И. А. Жолобов, В. С. Зайцев // Нефтяное хозяйство. – 2014. - №2. – с. 17-19.
4. Жолобов И. А. Измерение коэффициента теплопроводности мерзлых грунтов в интервале практически значимых температур/ И. А. Жолобов, С. С. Примаков // Нефтяное хозяйство. – 2014. - №9. – с. 55-57.
5. Жолобов И.А. Технические решения ОАО "Гипротюменнефтегаз" при проектировании объектов нефтегазового комплекса на многолетнемерзлых грунтах/И.А. Щербинин, И.З. Фахретдинов, С.С. Иванов, И.А. Жолобов// Нефтяное хозяйство №1, 2015. - С. 90.

Публикации в других изданиях

6. Жолобов И. А. Анализ прочностных расчетов максимально допустимых осадок магистрального нефтепровода на участках с многолетнемерзлыми

грунтами / И.А. Жолобов // Сборник докладов Научно – практической конференции молодых ученых и специалистов, посвященной 100-летию со дня рождения В. И. Муравленко «Инновации в проектировании, строительстве и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений». – Тюмень: ОАО «Гипротюменнефтегаз», 2012. – С. 117 – 121.

7. Жолобов И. А. Теплосиловое взаимодействие горячих подземных трубопроводов с многолетнемерзлыми грунтами / И.А. Жолобов, С.С. Примаков // Сборник тезисов докладов XVIII Научно - практической конференции молодых ученых и специалистов ТюменНИИгипрогаза «Проблемы развития газовой промышленности Сибири». – Тюмень: ООО «ТюменНИИгипрогаз», 2014. – С. 228 – 231.

8. Жолобов И. А. Теплосиловое взаимодействие горячих подземных трубопроводов с многолетнемерзлыми грунтами / И.А. Жолобов, С.С. Примаков // Материалы Всероссийской с международным участием Научно – практической конференции «Новый технологии – нефтегазовому региону». – Тюмень: ТюмГНГУ, 2014. – С. 93 – 95.