

*На правах рукописи*



ГЛУХОВА ЗЕМФИРА РУСЛАНОВНА

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛОВОЙ УСТОЙЧИВОСТИ МАГИСТРАЛЬНЫХ  
ТРУБОПРОВОДОВ, ПРОЛОЖЕННЫХ «САМОПОГРУЖЕНИЕМ» С  
ПОВЕРХНОСТИ ВЕЧНОМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ**

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

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Уфа - 2025

Работа выполнена на кафедре «Гидрогазодинамика трубопроводных систем и гидромашины» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Гаррис Нина Александровна**

Официальные оппоненты: **Житомирский Борис Леонидович**  
доктор технических наук, профессор  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина» / кафедра «Термодинамика и тепловые двигатели», профессор (г. Москва)

**Шишкин Иван Владимирович**  
кандидат технических наук  
Филиал общества с ограниченной ответственностью "Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий - Газпром ВНИИГАЗ" в г. Ухта / отдел надежности и ресурса Северного коридора газотранспортной системы, ведущий научный сотрудник (г. Ухта)

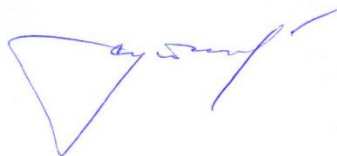
Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский индустриальный университет» (г. Тюмень)

Защита диссертации состоится «27» марта 2025 года в 11-00 на заседании диссертационного совета 24.2.428.03, созданного при ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» по адресу: 450064, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» и на сайте [www.rusoil.net](http://www.rusoil.net).

Автореферат диссертации разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Султанов Шамиль Ханифович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

В настоящее время существуют основополагающие рекомендации и методики расчета для проектирования трубопроводов на мерзлых грунтах (СП 36.13330.2012, СП 86.13330.2022, СП 25.13330.2020, СП 47.13330.2016, СП 22.13330.2011, СП 24.13330.2011, СП 21.13330.2012), в которых описано тепловое и механическое взаимодействие трубопровода с окружающим мерзлым массивом при его последующей эксплуатации. На сегодняшний день в методиках отсутствуют тепловые расчеты, позволяющие на этапе проектирования прогнозировать и ограничивать «климатические» изменения параметров теплообмена подземного, наземного и надземного трубопроводов, определяющих развитие ореолов протаивания, бугров пучения. Трубопровод, как источник тепла, нарушает равновесные теплообменные процессы в грунте, что приводит к прогрессирующему протаиванию, промерзанию основания трубопровода. Одним из основных факторов, снижающих эксплуатационную надежность, является тепловое влияние трубопроводов на многолетнемерзлые грунты.

Для сохранения естественного мерзлотного состояния грунтов основания необходимо обеспечить работу трубопровода таким образом, чтобы его тепловой режим сочетался с тепловым режимом грунтов. То есть тепловой поток от стенки трубы не должен достигать поверхности грунта. Для этого необходимо принятие к разработке такого способа прокладки трубопровода, при котором имеется возможность обеспечить квазиустойчивое состояние даже при случайном возникновении криогенных процессов путем технологического регулирования режимов теплообмена. Необходимым условием при этом является исключение прогрессирующего таяния грунта под трубопроводом. Достаточным условием является недопустимость смерзания трубопровода с грунтом. Оба этих условия отвечают требованиям экологической безопасности окружающей среды.

Для осуществления способа регулирования теплообмена трубопровода с мерзлым грунтом рассмотрен наземный способ прокладки трубопровода на ненарушенном мерзлом основании, который отвечает принципу минимального вторжения в грунт. При строительстве магистральных трубопроводов в условиях мерзлых грунтов наземный способ прокладки в насыпи допускается и предусматривается нормами технологического проектирования, но не регламентируется по причине недостаточной изученности.

Регулирование ореола протаивания позволяет минимизировать влияние оттаивания и промерзания грунта вокруг трубопровода в процессе эксплуатации, избежать неконтролируемую просадку и пучение, минимизировать их величину, исключить карстовые процессы, обеспечить восстановление многолетней мерзлоты в зимний период.

Актуальность проблемы обеспечения тепловой устойчивости трубопроводов, проложенных в мерзлых грунтах, также определена Стратегией развития арктической зоны и обеспечения национальной безопасности до 2035 года, согласно Указу Президента Российской Федерации, в которой одной из

основных опасностей для развития выделено интенсивное потепление климата в Арктике, происходящее в 2-2,5 раза быстрее, чем в целом по планете.

### **Степень разработанности темы исследования**

В настоящее время проведен большой объем теоретических и экспериментальных исследований в области проектирования, сооружения и эксплуатации трубопроводов на мерзлых грунтах. Способам прокладки магистральных и промысловых трубопроводов на многолетнемерзлых грунтах посвящены работы О.Б.Андерсленда, Д.М.Андерсона, В.В.Анисимова, Р.Н.Бахтизина, А.М.Большакова, П.П.Бородавкина, В.А.Бронникова, Л.И.Быкова, Ю.К.Васильчука, Н.А.Гаррис, Р.Ф.Гильмутдинова, А.К.Дерцакяна, Л.А.Димова, Ю.Д.Земенкова, В.П.Зырянова, С.С.Караваева, Н.А.Колоколовой, Г.Е.Коробкова, С.Е.Кутукова, Ю.В.Лисина, Ф.М.Мустафина, Г.Э.Одишария, А.Н.Сапсая, С.М.Соколова, С.М.Султанмагомедова, С.К.Рафикова, П.А.Ревель-Муроза, В.В.Харионовского, Н.Н.Хренова, А.М.Шаммазова, М.М.Шаца и др. Решению вопросов теплообмена трубопровода с мерзлым грунтом посвящены работы Г.В.Аникина, И.Н.Бирилло, Ю.А.Велли, Н.А.Гаррис, С.Е.Гречищева, Б.И.Далматова, В.И.Докучаева, Г.М.Долгих, В.А.Иванова, Н.Н.Карнаухова, Б.Л.Кривошеина, В.Г.Крылова, А.С.Кузьбожева, С.Я.Кушнина, В.С.Ласточкина, Г.В.Порхаева, Т.И.Работинской, И.И.Рожина, П.И.Тугунова, Р.Э.Фримана, Л.Н.Хрусталева, А.Б.Шабарова, И.В.Шишкина, В.А.Юфина, В.П.Яблонского, А.Л.Ястребова, и др.

В виду сложности учета теплового взаимодействия с техногенными грунтами, остаются нерешенными вопросы обеспечения тепловой устойчивости трубопроводов, проложенных в пучинистых и слабонесущих мерзлых грунтах.

### **Соответствие паспорту заявленной специальности**

Тема и содержание диссертационной работы соответствуют пункту 2 паспорта научной специальности 2.8.5. Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ: научные основы системного комплексного (мультидисциплинарного) проектирования конструкций, прочностных, гидромеханических, газодинамических и теплофизических расчетов сухопутных и морских систем трубопроводного транспорта для добычи, сбора, подготовки, транспортировки и хранения углеводородов, распределения, газоснабжения и нефтепродуктообеспечения, подземных и наземных газонефтехранилищ, терминалов, инженерной защиты и защиты от коррозии, организационно-технологических процессов их сооружения, эксплуатации, диагностики, обеспечения системной надежности, механической и экологической безопасности.

### **Цели и задачи работы**

Цель диссертации заключается в разработке и обосновании способа регулирования (ограничения) теплообмена магистрального наземного трубопровода в насыпи с окружающим мерзлым грунтом в заданном диапазоне ореола протаивания при укладке трубопровода на ненарушенную мохово-торфяную поверхность с постепенным самопогружением до проектной отметки при его эксплуатации.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Анализ исследований, в которых описаны причины возникновения и развития опасных геокриологических процессов в мерзлых грунтах в основании подземных, наземных, надземных трубопроводов с целью выявления способа прокладки, обеспечивающего сохранность окружающей среды при минимальном тепловом влиянии на грунт.

2. Постановка и решение трехмерной задачи (по сечению и по длине трубопровода) регулируемого теплообмена наземного трубопровода в насыпи с наличием ореола протаивания в мерзлоте при сложных граничных условиях и составление алгоритма расчета температурного режима трубопровода с учетом сдвига по фазе процессов теплопередачи во вмещающем грунте.

3. Постановка и решение сопряженной задачи взаимодействия трубопровода с грунтом при регулировании теплообмена трубопровода и при вертикальном перемещении трубопровода в оттаивающем грунте при прокладке самопогружением, разработка методики расчета.

4. Экспериментальное подтверждение остановки прогрессирующего протаивания грунта в основании трубопровода при регулировании теплообмена наземного трубопровода в насыпи, уложенного самопогружением с дневной поверхности на мохово-торфяном мерзлом основании.

### **Научная новизна**

1. Разработана математическая модель сбалансированного внешнего теплообмена изотермического наземного нефтепровода в насыпи с мерзлым грунтом, которая обеспечивает теплообмен в заданных границах за счет сдвига по фазе процессов теплопередачи в грунте, что подтверждается уменьшением ореола протаивания вокруг трубопровода в 8 раз при регулировании теплообмена трубопровода с температурой наружной поверхности стенки  $0...1$  °С, колебании производительности в течение года в пределах 0,4 %.

2. Разработана новая методика расчета оптимального изотермического режима перекачки по наземному нефтепроводу в насыпи, уложенному самопогружением с дневной поверхности на мохово-торфяном основании, основанная на уравнении сбалансированного теплообмена трубопровода с окружающей средой и учитывающая изменение положения трубопровода при оседании насыпи и грунтов основания во времени на неоднородных мерзлых грунтах.

3. Экспериментально, с использованием комплекса критериальных уравнений для моделирования процессов теплопередачи на лабораторной установке, подтверждена остановка прогрессирующего протаивания грунта в основании наземного трубопровода в насыпи к 3 году эксплуатации при условии ограничения ореола протаивания и прокладки способом «самопогружения» с мохово-торфяной поверхности.

### **Теоретическая значимость работы**

Теоретическая значимость исследований заключается в выявлении физического эффекта аккумуляции холода во вмещающем грунте за зимний период, защищающего от прогрессирующего таяния грунт под наземным

трубопроводом в летний период и возникающего при технологическом регулировании теплообмена.

Разработана методика, построен алгоритм и разработана программа для расчета температурного режима трубопровода с ограничением радиуса протаивания в мерзлоте для наземного трубопровода в насыпи, проложенного по дневной поверхности самопогружением на мохово-торфяном основании.

### **Практическая значимость работы**

Результаты научной работы внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО УГНТУ в виде учебно-методического пособия к выполнению курсового проектирования по дисциплинам «Ресурсосбережение при эксплуатации нефтеперекачивающих станций магистральных нефтепроводов», «Эксплуатация трубопроводов в условиях мерзлоты и повышенной коррозионной активности». Разработанная методика расчета позволяет на стадии проектирования и в процессе эксплуатации трубопровода рассчитывать температурный режим наземного трубопровода в насыпи с учетом сезонных изменений теплофизических характеристик окружающей среды, осадки и пучения грунтов основания, что обеспечивает безопасный стабильный режим перекачки с минимальными колебаниями температуры в течение года при условии сохранности окружающей среды.

Наземный способ прокладки трубопроводов в насыпи на ненарушенном мерзлом мохово-торфяном основании с учетом «самопогружения» трубопровода при сбалансированном теплообмене с окружающей средой позволяет уменьшить глубину протаивания грунта в основании трубопровода во много раз (в 8 раз при температуре наружной поверхности стенки трубопровода  $0...1\text{ }^{\circ}\text{C}$  и колебании производительности в течение года в пределах 0,4 %) и предотвратить дальнейшее прогрессирование процесса оттаивания.

Результаты исследований рассмотрены ООО «Экспертсервиспроект» и учитываются в проверочных (приближенных) расчетах при проектировании сооружений, расположенных на мерзлых грунтах.

Методика расчета температурного режима трубопровода с ограничением радиуса протаивания в мерзлоте, предложенная в диссертационной работе, использована ООО «РН-БашНИПИнефть» для прогнозирования теплогидравлических режимов работы конденсатопровода. Результаты расчетов позволили снизить температуру перекачиваемого продукта в 2 раза при сохранении производительности трубопровода.

### **Методология и методы исследования**

Поставленные задачи в работе решались аналитически и экспериментально.

При проведении теоретических исследований использованы метод смены стационарных состояний, классические положения теории теплопередачи и механики грунтов, прикладные исследования по проектированию, строительству, эксплуатации магистральных трубопроводов.

Экспериментальные исследования проводились на лабораторной установке с использованием методов физического и математического моделирования.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Математическая модель сбалансированного внешнего теплообмена наземного нефтепровода в насыпи с мерзлым грунтом, позволяющего уменьшить ореол протаивания вокруг трубопровода в 8 раз при идентичных условиях теплообмена и одинаковой температуре наружной поверхности стенки трубопровода 0...1 °С.

2. Методика расчета оптимального температурного режима наземного нефтепровода в насыпи, уложенного самопогружением с дневной поверхности на мохово-торфяном мерзлом основании, позволяющего предотвратить прогрессирующее протаивание основания трубопровода.

3. Результаты экспериментальных исследований теплового взаимодействия наземного нефтепровода в насыпи, уложенного самопогружением с дневной поверхности на мохово-торфяном основании, с мерзлым грунтом при сбалансированном теплообмене, подтверждающие, что процесс протаивания основания трубопровода останавливается к 3 году эксплуатации трубопровода за счет аккумуляции холода во вмещающем грунте за зимний период.

### **Степень достоверности**

В диссертационной работе были корректно использованы соответствующие математические методы и формулы, вычислительные программные комплексы, оборудование, средства измерений и методики. Достоверность научных положений и полученных результатов аналитических и экспериментальных исследований подтверждаются малой величиной расхождений между ними при сопоставлении результатов, которые коррелируются и не противоречат результатам аналогичных и близких к тематике научных работ, опубликованных в отечественной литературе.

### **Апробация результатов**

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на: VIII – ой Международной научно-технической конференции «Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта» (г. Новополюк, 25-28 ноября 2014 г.); X, XI, XII, XIV, XVIII – ых Международных учебно-научно-практических конференциях «Трубопроводный транспорт – 2015, 2016, 2017, 2019, 2023» (г. Уфа, 2015-2023 гг.); Материалы Международной конференции «Рассохинские чтения» (г. Ухта, 06-07 февраля 2020 г.), заочном этапе XVII – го Всероссийского конкурса молодежных авторских проектов и проектов в сфере образования, направленных на социально-экономическое развитие российских территорий «Моя страна - моя Россия» (г. Москва, 2020 г.); Международной научно-технической конференции «Транспорт и хранение углеводородного сырья» (г. Тюмень, 28-29 мая 2020 г.); Международной мультидисциплинарной конференции по промышленному инжинирингу и современным технологиям FarEastCon-2020 (г. Владивосток, 06-09 октября 2020 г.).

### **Публикации**

По материалам диссертационной работы опубликованы 17 печатных работ, в том числе 7 статей в ведущих рецензируемых журналах, входящих в список

ВАК при Министерстве науки и высшего образования в РФ, 7 из них по специальности 2.8.5, 1 статья в журнале, входящем в международную реферативную базу данных и систему цитирования Web of Science и Scopus.

### **Структура и объем работы**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, основных выводов по главам, заключения, списка литературы, изложена на 193 страницах машинописного текста и содержит 16 таблиц, 54 рисунка, список литературы из 197 наименований, 8 приложений.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** обоснованы актуальность и значимость выбранной темы, степень ее разработанности, охарактеризованы научно-методические пути ее решения, сформулирована цель и определены задачи исследования, показаны научная новизна и практическая ценность проведенных исследований.

В **первой главе** диссертации проведен обзор преимуществ и недостатков существующих способов прокладки трубопроводов на мерзлых грунтах. Накопленные данные по эксплуатации магистральных надземных и подземных трубопроводов на ММГ указывают на необходимость усовершенствования проектных решений прокладки трубопровода без нарушения целостности поверхностного слоя грунта и сведения к минимуму необратимых последствий техногенного воздействия на мерзлый грунт в процессе строительства и эксплуатации трубопровода. Выявлено, что при использовании наземной прокладки вероятность возникновения отказов в разы меньше, чем при подземной и надземной прокладках трубопровода, о чем свидетельствует анализ работы газопровода Соленинское – Месояха – Норильск (за 23 года эксплуатации которого вероятность отказов на 1 км трубопровода для подземного участка составила 3, для надземного участка 0,42, для наземного участка 0,13).

Изучен опыт и ранее проведенные исследования эксплуатации наземных трубопроводов на мерзлоте, проведен анализ патентных разработок по наземной прокладке трубопровода. Описаны преимущества реализации III принципа строительства на мерзлых грунтах (принцип невторжения в грунт). Большим преимуществом принципа невторжения в грунт является тот факт, что при наземной прокладке свойства грунта, практически, не меняются, т.к. он остается в естественном состоянии, теплофизические характеристики грунта сохраняются, что повышает точность теплогидравлических расчетов, упрощает проектирование и делает более надежной последующую эксплуатацию трубопроводов.

В работе рассматривались торфяные грунты в качестве несущего основания, так как большая часть трасс магистральных трубопроводов проходит по мерзлым торфяным грунтам. Исследования д.т.н. Соколова С.М. доказывают возможность прокладки трубопровода на мерзлоте наземно в насыпи самопогружением с опорой на мохово-торфяное основание толщиной не менее двух диаметров трубопровода. Механические показатели торфяного грунта для использования в качестве несущего основания соответствуют следующим значениям: модуль

общей деформации  $E_0$  не менее  $0,08 \text{ кГс/см}^2$ , предельное сопротивление  $\tau$  не менее  $0,04 \text{ кГс/см}^2$ .

Предложенным способом на нефтепроводах диаметром от 168 до 720 мм построено и находится в эксплуатации более 200 переходов протяженностью 30-130 м каждый, нефтесборный коллектор диаметром 426 мм на Самотлорском месторождении протяженностью 25 км, из которых 2,6 км сооружены на поплавковых опорах, экспериментальный участок нефтепровода «Полоцк-Вентспилс».

В ходе анализа работ Соколова С.М. и нормативной документации было выявлено, что в настоящее время наименее изучено тепловое взаимодействие с внешней средой трубопроводов, проложенных в сложных геокриологических условиях. Не существует тепловых схем, регламентирующих взаимодействие наземного трубопровода в насыпи с мерзлым грунтом, не учитываются условия эксплуатации, гарантирующие тепловую устойчивость трубопровода и сохранение его проектного положения.

Во второй главе описан способ регулирования теплообмена трубопровода на мерзлых грунтах с целью обеспечения и сохранения ограниченных размеров ореолов протаивания вокруг наземного трубопровода, предохраняющего его от заземления на всем протяжении трассы в любой период эксплуатации, а также от неконтролируемого опускания вследствие растепления мерзлых грунтов. Для решения задачи регулирования теплообмена наземного трубопровода на мерзлом основании рассмотрена схема наземной прокладки в насыпи (Рисунок 1).

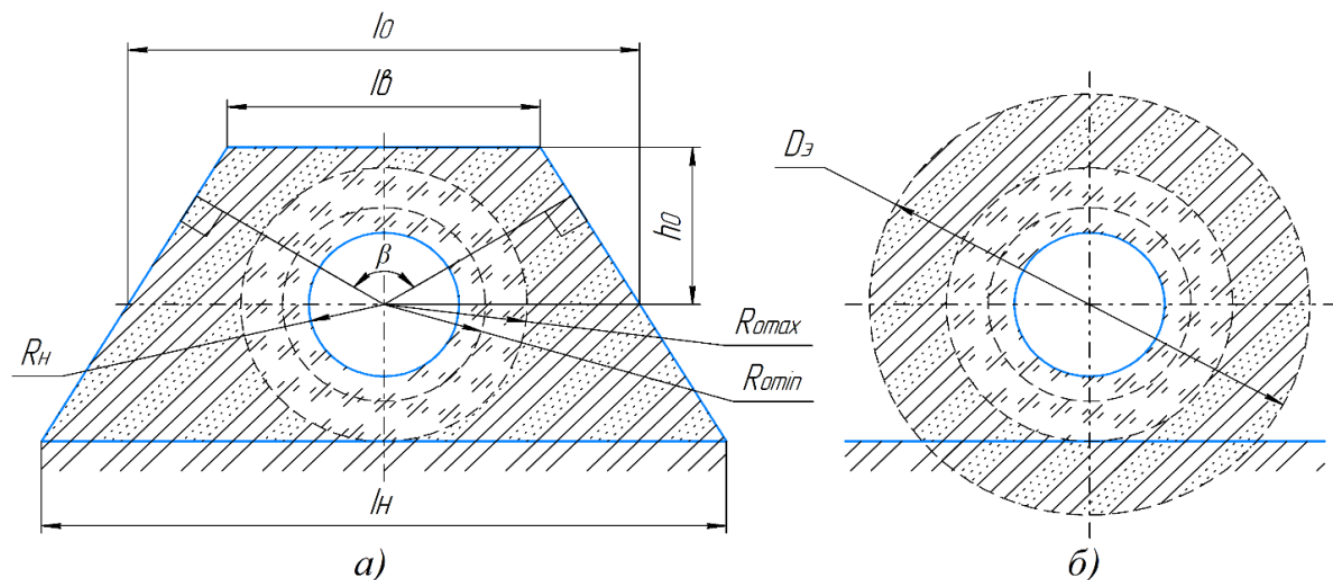


Рисунок 1 – а) Схема наземной прокладки в насыпи; б) эквивалентная расчетная схема

На Рисунке 1  $R_{0 \min}$  – минимальный радиус талой зоны вокруг трубопровода,  $R_{0 \max}$  – максимальный радиус талой зоны вокруг трубопровода,  $R_0$  – радиус талой зоны вокруг трубопровода,  $R_H$  – наружный радиус

трубопровода,  $D_э$  - эквивалентный диаметр насыпи или диаметр изоляции, с толщиной эквивалентной по термическому сопротивлению насыпи,  $l_0$  - ширина насыпи в сечении на уровне оси трубы,  $l_в$  - ширина верхней части насыпи,  $l_н$  - ширина основания насыпи,  $h_0$  - глубина заложения оси трубопровода,  $\beta$  - конструктивный параметр, которым учитывается влияние формы насыпи на теплообмен.

Целью регулирования теплообмена трубопровода с окружающей средой является поддержание постоянного нулевого теплооборота на поверхности массива. Т.е. тепловой поток от стенки трубы в грунт  $q$  не должен достигать поверхности грунта. Это реализуемо при изотермическом режиме перекачки нефтепровода, когда тепло трения  $q_{тр}$ , выделяющееся по мере транспортирования нефти по трубопроводу, будет затрачиваться на фазовые превращения  $q_{фп}$  в окружающем грунте. Такой способ перекачки обеспечивает постоянство основных параметров трубопровода: температуры по длине, ореола протаивания, температурных напряжений, а также осадки при условии изменения радиуса протаивания в заданном безопасном диапазоне.

Условие баланса тепла на границе протаивания - промерзания для квазистационарного малоинтенсивного теплообмена нефтепровода с окружающей средой, применяя метод смены стационарных состояний, можно записать как

$$q_T = q_m + q_{фп}, \quad (1)$$

где  $q_T$  - тепловой поток, поступающий из талой зоны;

$q_m$  - тепловой поток, воспринимаемый мерзлым грунтом.

$q_{фп}$  - теплота фазовых превращений.

С учетом геометрической формы насыпи, тепловых потоков на границе протаивания со стороны талого и мерзлого грунтов, теплового потока, идущего от трубы в грунт уравнение баланса тепла на границе протаивания в зимний период принимает вид (температурный напор направлен вверх, конструктивный параметр  $\beta$  при расчете теплообмена в зимние месяцы изменяется в пределе  $0^\circ < \beta < 180^\circ$ ):

$$\lambda_T \frac{(t - t'_0)}{R_0 \ln \frac{R_0}{R}} - \frac{\lambda_m(t'_0 - t_в)}{R_0 \ln \frac{D_э}{2R_0}} \frac{\beta}{360} - \frac{\lambda_m(t'_0 - t_e)}{R_0 \ln \frac{4H_э}{2R_0}} \frac{360 - \beta}{360} = \sigma \rho_0 \frac{W_c - W_n}{W_c + 1} \frac{dR_0}{d\tau} \quad (2)$$

где  $\sigma$  - удельная теплота плавления льда;

$\rho_0$  - объемная плотность мерзлого грунта;

$W_c, W_n$  - содержание незамерзшей воды и суммарная влажность грунта.

$\lambda_m, \lambda_T$  - соответственно коэффициенты теплопроводности мерзлого и талого грунтов;

$dt_m/dr, dt_T/dr$  - градиенты температур в мерзлом и талом грунтах;

$H_э$  - эквивалентная глубина заложения трубопровода до оси;

$R_0$  - радиус талой зоны вокруг трубопровода;

$R$  - радиус трубопровода;

$D_э$  - эквивалентный диаметр кольца насыпи (определяется по геометрическим параметрам насыпи и глубины заложения трубопровода);

$t_b$  – температура воздуха;

$t_e$  – температура грунта на глубине заложения оси трубопровода;

$t$  – температура нефти;

$t'_0$  – температура фазовых превращений.

В летний период тепло от трубопровода и от солнечной радиации направляется вниз, при положительных температурах воздуха грунт в верхнем секторе  $\beta$  будет талым. Расчет теплообмена производится как для подземного трубопровода  $\beta = 0$ , с учетом этого баланс тепла на границе протаивания-промерзания в летний период принимает вид

$$\lambda_t \frac{(t - t'_0)}{R_0 \ln \frac{R_0}{R}} - \frac{\lambda_m(t'_0 - t_e)}{R_0 \ln \frac{4H_э}{2R_0}} = \sigma \rho_0 \frac{W_c - W_n}{W_c + 1} \frac{dR_0}{d\tau} \quad (3)$$

Регулирование теплогидравлического режима достигается за счет сдвига по фазе колебаний радиуса  $R_0$  ореола протаивания по отношению к температуре грунта  $t_e$ , температуре воздуха  $t_b$ . Вынужденные колебания температур в грунте в течение года по периоду и характеру теплового воздействия на массив сопоставимы и гармонично увязываются с естественными колебаниями температур, происходящими в деятельном слое (формулы 4, 5)

$$R_0 = R'_0 + R''_0 \cdot \cos(\omega\tau - \alpha), \quad (4)$$

$$\frac{dR_0}{d\tau} = -R''_0 \cdot \omega \cdot \sin(\omega\tau - \alpha), \quad (5)$$

где  $\omega = \text{const}$ , зависит только от периода времени;

$\tau$  – время;

$\alpha$  – сдвиг по фазе на начало отсчета.

Обозначив через  $t_{max}$  и  $t_{min}$  максимальное и минимальное значения температуры нефти в процессе годового периода эксплуатации трубопровода, в качестве целевой функции рассмотрим  $\Delta t$ , стремящееся к нулю.

$$\Delta t = t_{max} - t_{min} = f(\alpha, R'_0, R''_0), \quad (6)$$

В зимний период за счет смещения по фазе  $\alpha$  в формуле (4) ореол протаивания вокруг трубопровода уменьшается в радиусе, и основание трубопровода получает запас холода. В летний период за счет смещения по фазе  $\alpha$  в формуле (4) можно минимизировать температуру нефти, благодаря запасу холода мерзлые грунты в основании трубопровода будут сокращать размеры ореола протаивания.

При подборе и обосновании радиусов  $R'_0$ ,  $R''_0$  для выполнения расчета необходимо учитывать условие не смерзания трубопровода с грунтом, при котором труба будет окружена кольцом талого грунта, а также учитывать условие не смыкания с поверхностью насыпи.

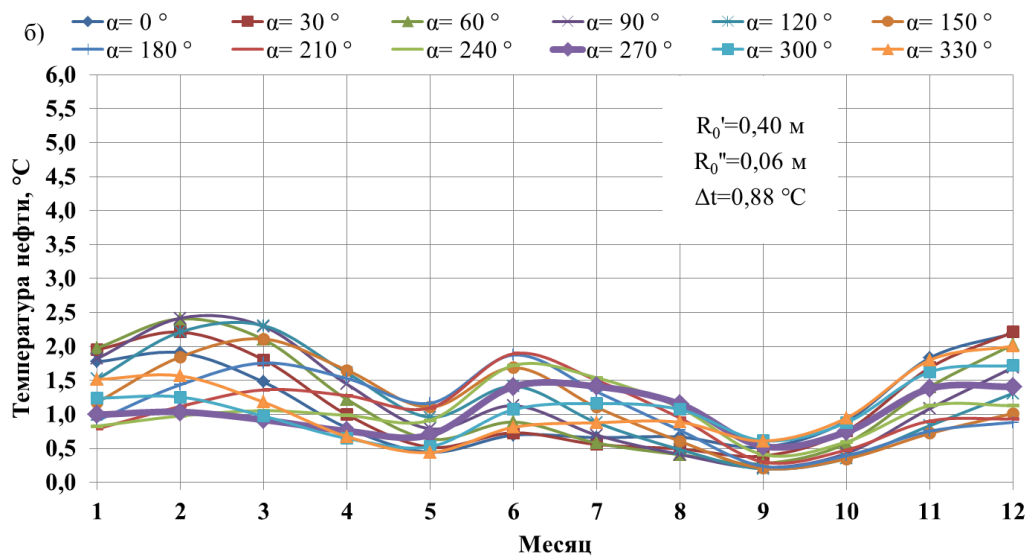
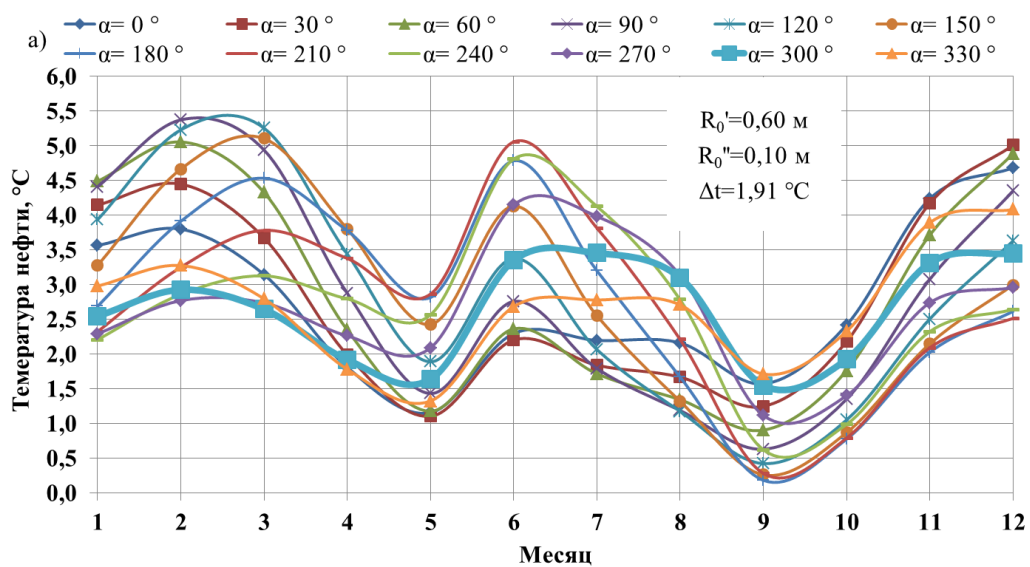
В результате многовариантного расчета эксплуатационных температур  $t_{max}$ ,  $t_{min}$ ,  $\Delta t$  при вариации параметров регулирования в пределах:  $\alpha = 0^\circ \dots 360^\circ$ , с шагом  $30^\circ$ ,  $R'_0 = 0,60 \dots 0,30$  м с шагом  $0,10$  м,  $R''_0 = 0,10 \dots 0,00$  м с шагом  $0,02$  м, получены графические зависимости, которые представлены на Рисунке 2.

Как видно, изменение температур в течение года для рассмотренного примера может достигать нескольких градусов (Рисунок 2, а, б), однако

регулирование позволяет получить вполне технологичные варианты эксплуатационных режимов:

- стабильного температурного режима, когда температура перекачки в течение года практически постоянна:  $\Delta t = 0,25 \text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$  (Рисунок 2, в);
- с остановленным ореолом протаивания при значении  $R'_0 = 0,3 \text{ м}$  (Рисунок 2, г).

Особенностью теплообмена наземного трубопровода с окружающей средой в отличие от подземного трубопровода является наличие 2-х максимумов температуры перекачки (Рисунок 2): февраль-март и июнь-июль. Первый максимум создается в зимний период, при самой низкой температуре грунта, при этом выполняется условие несмерзания ореола протаивания вокруг трубопровода. Второй максимум появляется в летний период эксплуатации под действием потока тепла от окружающего воздуха в грунт, а также из-за солнечной радиации.



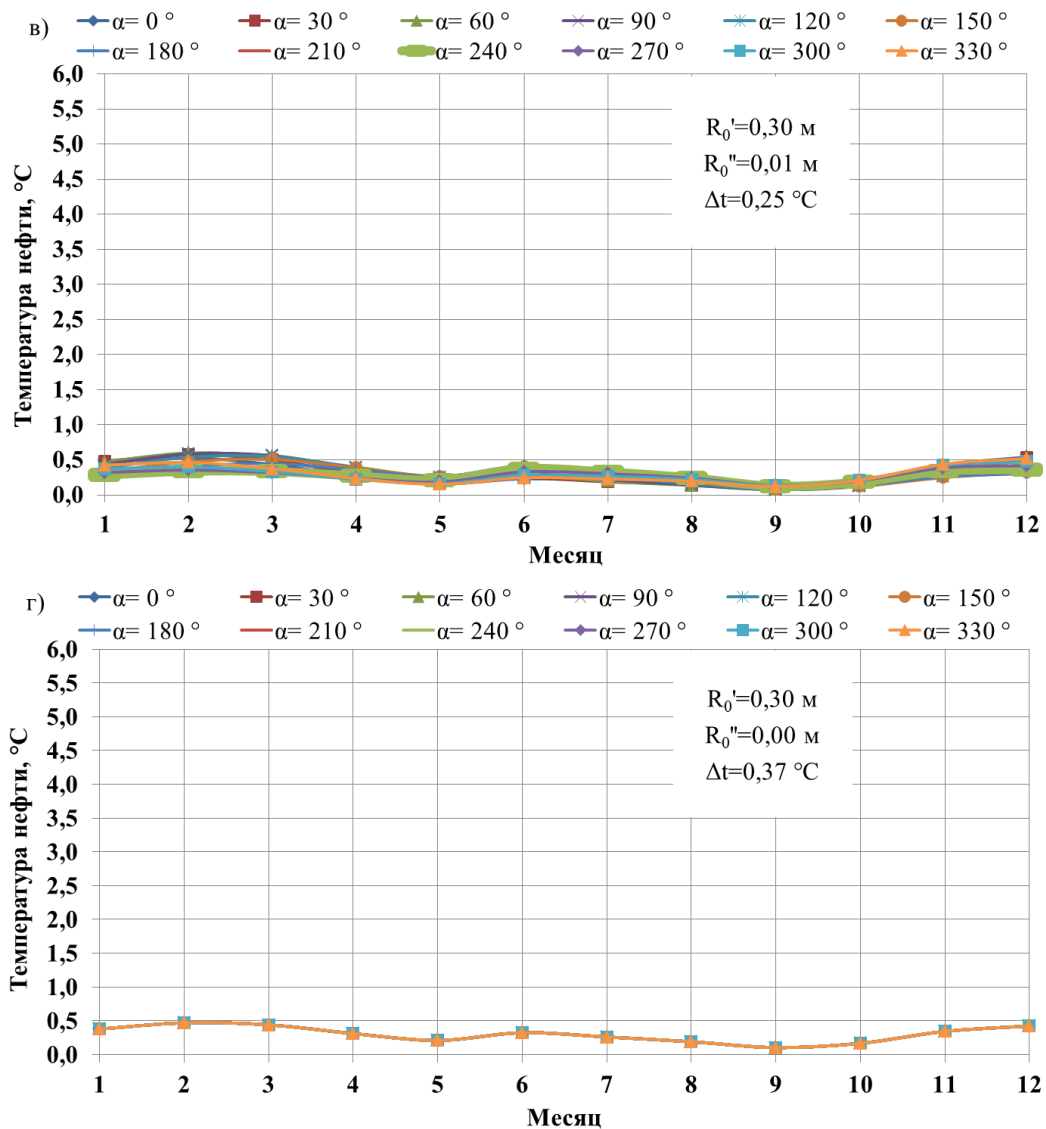


Рисунок 2 - Подбор параметров  $\alpha$ ,  $R_0'$ ,  $R_0''$  для минимизации колебаний температуры нефти в трубопроводе в течение годового периода эксплуатации (в, г – оптимальные варианты)

Пример показывает, что годовой тепловой режим перекачки может быть стабильным. Баланс тепловых потоков обеспечивается за счет тепловыделения и поглощения тепла при фазовых переходах на границе протаивания-промерзания при уменьшении и увеличении ореола протаивания. Тепловая инерция грунта обеспечивает возможность сдвига по фазе этих колебательных процессов. Оптимизируя целевую функцию  $\Delta t$  по параметрам  $\alpha$ ,  $R_0'$ ,  $R_0''$ , можно найти их оптимальное соотношение, при которых  $\Delta t$  минимальна.

В теплогидравлических расчетах принято допущение математической модели, температура перекачиваемого продукта  $t_{\text{бал}}$  равна температуре наружной поверхности трубопровода  $t$ .

В Таблице 1 приведены результаты расчета, показывающие эффективность регулирования, позволяющего уменьшить толщину талика под трубопроводом.

Таблица 1 – Расчет толщины талика под трубопроводом с регулированием теплообмена и без регулирования теплообмена трубопровода

|                                                                                                 | январь | февраль | март | апрель | май  | июнь | июль | август | сентябрь | октябрь | ноябрь | декабрь |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|---------|------|--------|------|------|------|--------|----------|---------|--------|---------|
| Температура нефти $t$ , °С                                                                      | 1      | 1       | 1    | 0      | 0    | 0    | 0    | 0      | 0        | 0       | 1      | 1       |
| Температура грунта $t_e$ , °С                                                                   | -2     | -5      | -5   | -5     | -4   | -4   | -3   | -2     | -2       | -2      | -3     | -4      |
| Толщина талика под трубой (по С.Ю. Велли) $\xi_1$ , м                                           | 0,35   | 0,16    | 0,13 | 0,09   | 0,07 | 0,08 | 0,08 | 0,09   | 0,10     | 0,14    | 0,21   | 0,23    |
| Толщина талика под трубой при регулировании теплообмена $\xi_2$ , м                             | 0,04   | 0,04    | 0,04 | 0,03   | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03   | 0,04     | 0,04    | 0,04   | 0,05    |
| Толщина талика под трубой уменьшается в $\frac{\xi_1}{\xi_2}$ раз при регулировании теплообмена | 8      | 4       | 4    | 3      | 2    | 3    | 3    | 3      | 3        | 3       | 5      | 5       |
| Кинематическая вязкость $\nu \cdot 10^{-6}, \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$                        | 26     | 26      | 26   | 26     | 26   | 26   | 26   | 26     | 26       | 26      | 26     | 26      |
| Производительность $Q, \frac{\text{м}^3}{\text{ч}}$                                             | 1100   | 1100    | 1099 | 1097   | 1096 | 1097 | 1096 | 1096   | 1096     | 1097    | 1099   | 1100    |
| Колебания производительности в течение года $\delta$ , %                                        | 0,4    |         |      |        |      |      |      |        |          |         |        |         |
| Годовая производительность $Q_{\text{год}}, \frac{\text{млн.м}^3}{\text{год}}$                  | 9,2    |         |      |        |      |      |      |        |          |         |        |         |

В **третьей главе** рассмотрена реализация III принципа строительства на мерзлых грунтах – прокладка трубопровода в насыпи «самопогружением» с дневной поверхности (Рисунок 3), представлен комплексный подход к решению задач регулирования теплообмена трубопровода с мерзлыми грунтами на этапе проектирования, для автоматизации процесса расчета предложен алгоритм анализа и подбора оптимальных параметров перекачки при условии ограничения ореола протаивания под наземным нефтепроводом в насыпи на ММГ.

Комплексный подход предусматривает следующие расчеты:

- расчет регламента теплообмена трубопровода с мерзлым массивом грунта ограничивающего ореол протаивания в допустимых пределах;
- расчет осадки грунта в процессе теплового и механического взаимодействия и проседания трубопровода под действием собственного веса в режиме самопогружения в пределах ореола протаивания;
- теплогидравлический расчет трубопровода с учетом сезонных колебаний определяющих температурных напоров.

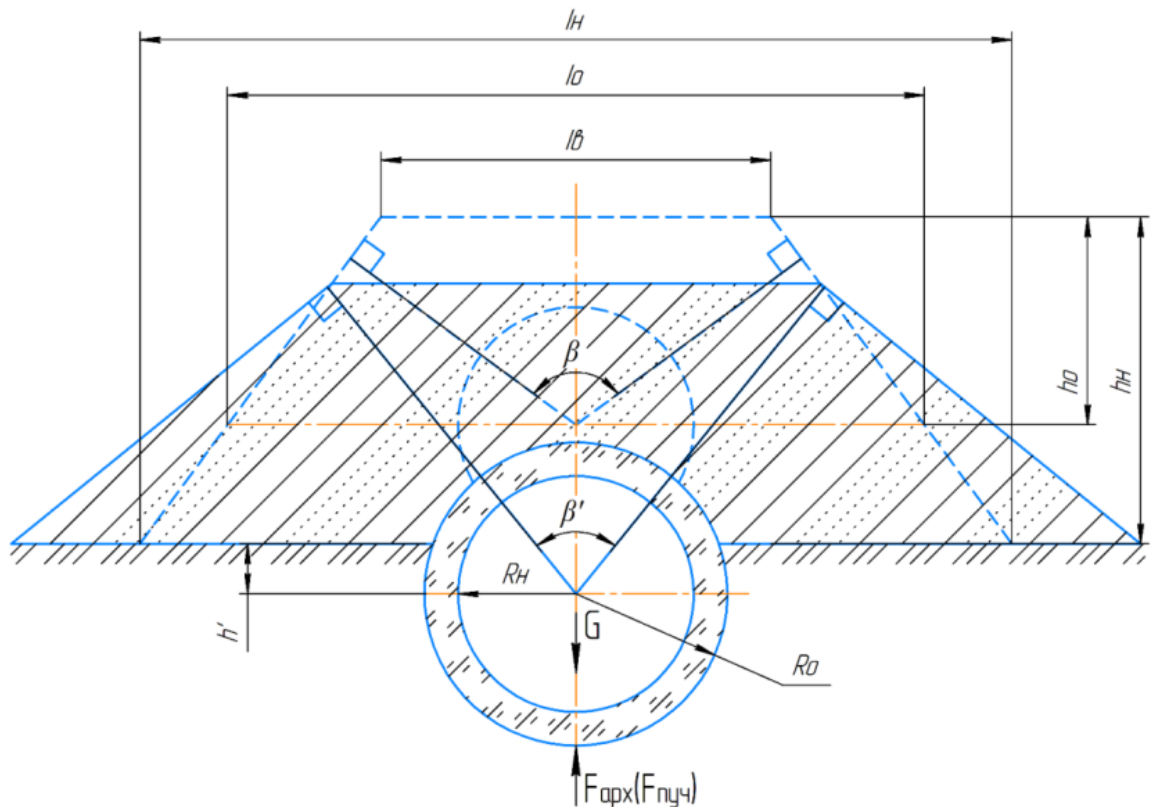


Рисунок 3 - Изменение положения оси трубопровода

Под действием собственного веса трубопровода и продукта, грунта засыпки происходит самопогружение трубопровода. С момента заполнения трубопровода нефтью происходит растепление грунта: под действием температуры появляется и развивается ореол протаивания. От величины ореола протаивания напрямую зависят тепловая осадка грунта под трубопроводом и общее проседание трубопровода. Самопогружение трубопровода, заполненного нефтью, происходит

до тех пор, пока не уравновесят друг друга две силы: сила тяжести  $G$  и выталкивающая сила  $F_{арх}$ , либо сила тяжести  $G$  и силы пучения  $F_{пуч}$  (Рисунок 4)

$$G = F_{арх} + F_{пуч}. \quad (7)$$

Это состояние равновесия будет квазиустойчивым, если основание под трубопроводом не будет бесконтрольно проседать.

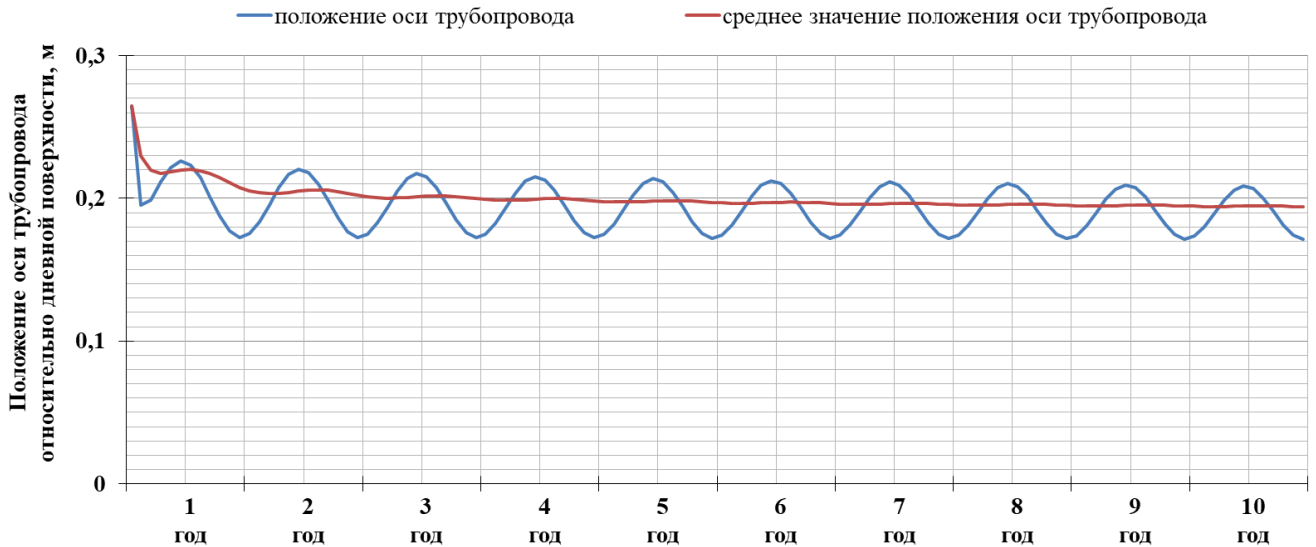


Рисунок 4 - Изменение высотного положения оси наземного трубопровода  $D_N$  500 относительно дневной поверхности при самопогружении и параметрами теплообмена  $\alpha=270^\circ$ ,  $R'_0=0,8$  м,  $R''_0=0,2$  м

При эксплуатации магистрального трубопровода в насыпи на мерзлом грунте самопогружение трубопровода происходит при изменяющемся тепловом потоке. Особенностью такого способа прокладки является смещение большей части теплового потока от трубопровода вверх при отрицательной температуре воздуха, что уменьшает ореол протаивания под трубопроводом и провоцирует начало смерзания талого грунта. При втором цикле оттаивания, грунт в пределах глубины первого цикла оттаивания, можно считать уплотнившимся до состояния, в котором он находился до промораживания, и осадку грунта в пределах глубины первого цикла оттаивания можно считать незначительной. Данный эффект способствует ранней стабилизации положения оси трубопровода.

Тепловая устойчивость и стабильность положения оси наземного трубопровода в насыпи, проложенного на мохово-торфяном основании, при остановленной границе протаивания достигаются к 3 году эксплуатации.

Разработанный алгоритм расчета, представленный на Рисунке 5, позволяет выполнить параметрический анализ и подобрать оптимальные параметры перекачки при условии ограничения ореола протаивания для различных вариантов прокладки трубопровода.

В зависимости от поставленной цели минимизации подлежат функции:

$$\Delta t = t_{max} - t_{min} = f(\alpha, R'_0, R''_0); \quad (8)$$

$$\Delta Q = Q_{max} - Q_{min} = f(\alpha, R'_0, R''_0); \quad (9)$$

$$\Delta h' = h'_{max} - h'_{min} = f(\alpha, R'_0, R''_0), \quad (10)$$

где  $Q_{max}$  и  $Q_{min}$  максимальное и минимальное значения производительности в процессе годового периода эксплуатации трубопровода;

$h'_{max}$  и  $h'_{min}$  положение оси трубопровода на начало и конец годового периода эксплуатации трубопровода.

С целью прогнозирования состояния трубопровода расчет выполняется на несколько лет, до момента достижения трубопроводом величины стабильной проектной отметки  $h' = const$ .

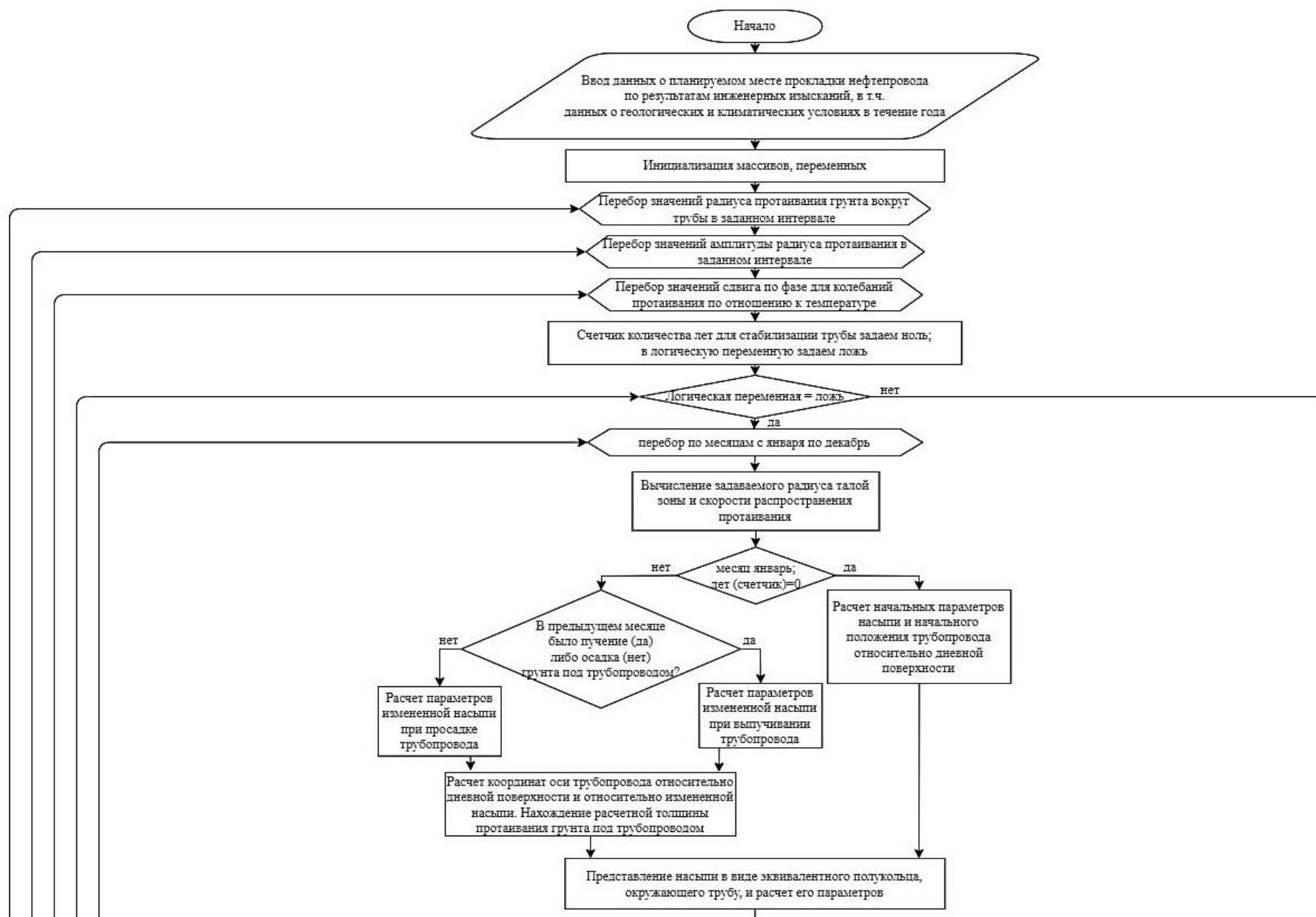
При расчете погружения трубопровода учитываются не только изменение глубины заложения оси трубопровода  $h_0$ , но и оседание насыпи, т.е. изменение линейных параметров насыпи:  $\beta$ ,  $l_b$ ,  $l_n$ ,  $l_0$ ,  $h_n$ , а следовательно и конструктивных параметров  $D_k$ ,  $D_3$ ,  $H_3$ , которые непосредственно влияют на теплообмен трубопровода с окружающей средой.

Завершающим этапом является теплогидравлический расчет нефтепровода, с определением оптимальных величин температуры продукта  $t$  и производительности  $Q$ .

В четвертой главе диссертации экспериментально обоснована возможность ограничения ореола протаивания в основании и регулирования теплообмена наземного трубопровода в насыпи с окружающей средой, а также возможность стабилизации осадки грунта в основании при самопогружении наземного трубопровода на мохово-торфяном основании.

Пять экспериментов, подтверждающих возможность регулирования теплообмена наземного трубопровода, проведены с различными грунтовыми основаниями и в различных геокриологических условиях. Регулирование теплообмена экспериментального трубопровода происходило изменением мощности ТЭНа (температуры трубы) и холодильника (температуры воздуха). Эксперименты проводились на лабораторной установке для проведения исследований на мерзлоте на базе формирующегося центра мерзлотоведения УГНТУ.

Для экспериментального изучения процессов теплообмена и для создания адекватной физической модели на опытной установке обеспечены равенство чисел Фурье  $Fo = Fo'$  и Кирпичева  $Ki = Ki'$  для натуре и модели, соблюдены условия геометрического подобия. Продолжительность одного года по условиям эксперимента  $\tau'$  на основании равенства критерия Фурье для модельного и натурального трубопроводов равна 12 часам, что соответствует 12 месяцам.



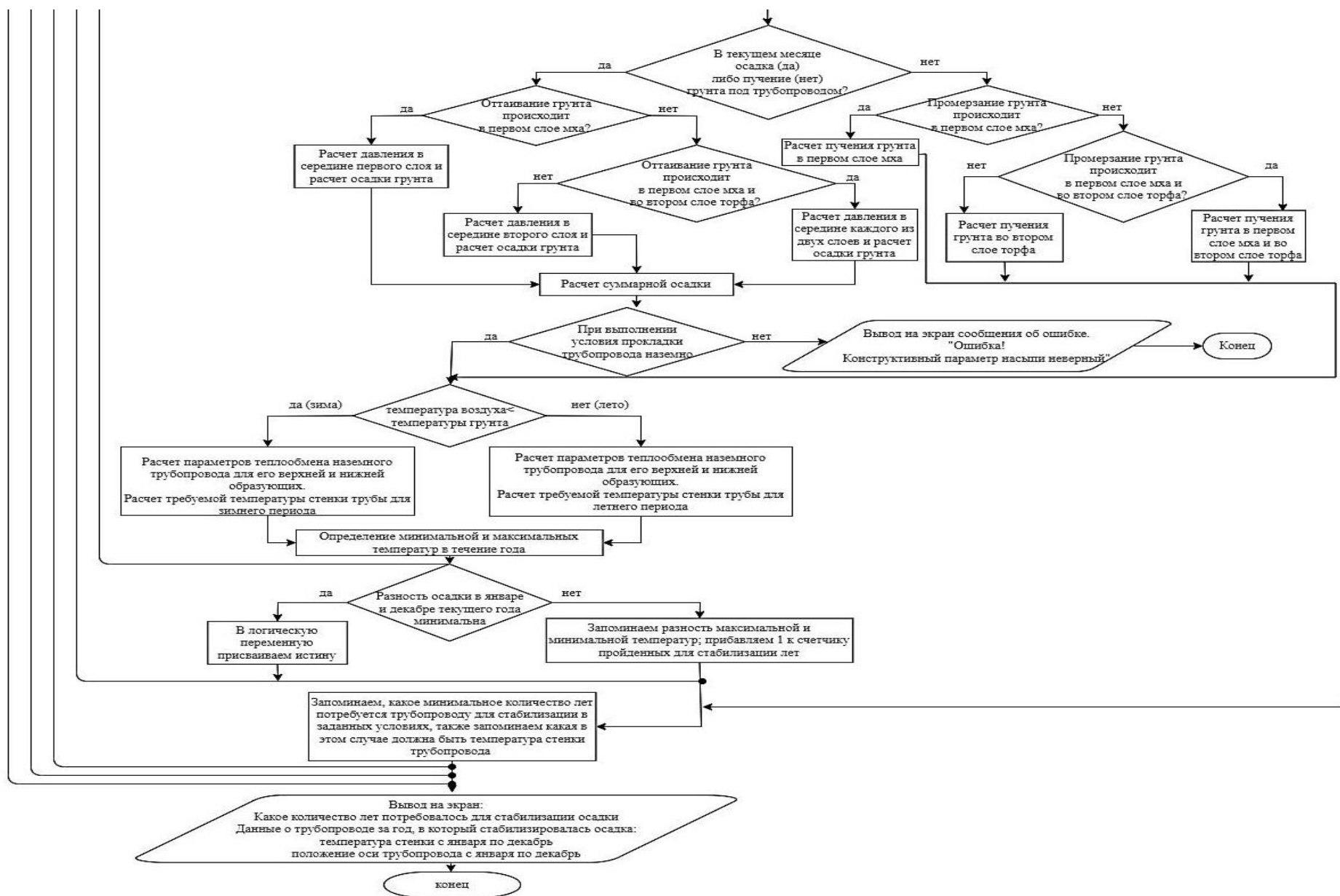


Рисунок 5 – Алгоритм расчета самопогружения трубопровода до стабильной отметки при регулируемом теплообмене в упрощенном виде

На Рисунке 6 представлен характерный фрагмент длительного, соответствующего 2,5 годам "в натуре" процесса регулирования ореола протаивания под трубой.

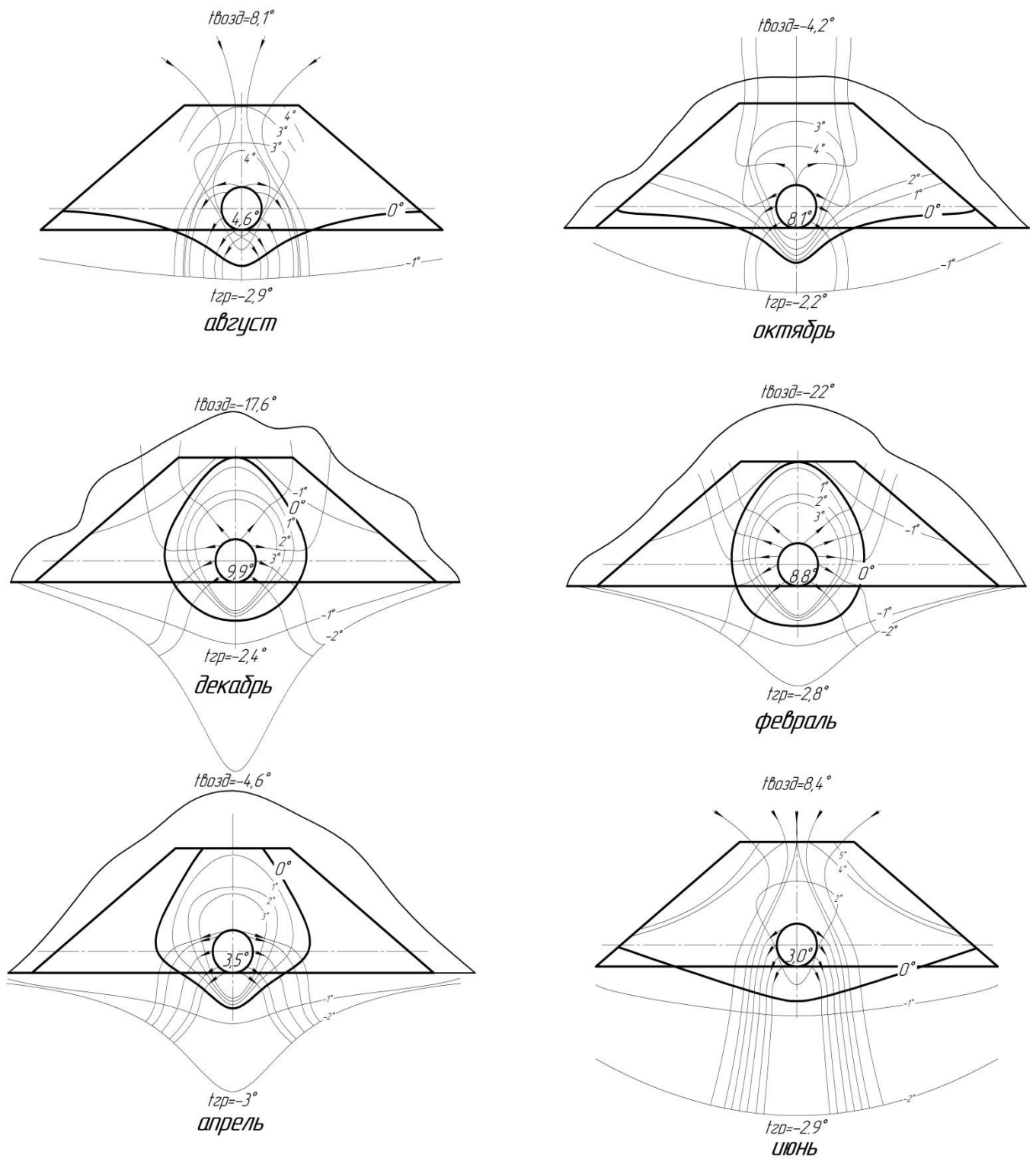


Рисунок 6 – Изменение направления тепловых потоков от трубопровода в грунт в течение 3-го года

Из графиков видно, что температурное поле перестраивается на режим, диктуемый управляющими факторами. Это обеспечивает стабильность осадки и максимально способствует сохранению положения оси трубопровода. Происходит саморегуляция, позволяющая неравновесным процессам протекать от одного стационарного состояния к другому. Это типичный квазистационарный режим, аналогичный тем, что встречаются в природе. Опыт наглядно подтверждает справедливость применения метода смены стационарных состояний для подобных процессов.

Результаты экспериментальных исследований наглядно иллюстрируют трансформацию температурных полей в течение годового цикла эксплуатации. Линии тока показывают направление и интенсивность теплообменных процессов в зависимости от сезона. «Нулевая» изотерма разграничивает талую и мерзлую зоны в грунте, окружающем трубопровод.

Из Таблицы 2 следует, что экспериментальные значения температуры стенки трубопровода отличаются от расчетных значений не более чем на 0,2 °С.

Таблица 2 - Результаты эксперимента 5 для второго года эксплуатации

| Месяц | Параметры расчетные              |                                 |                                   |                             | Параметры экспериментальные       |                             | Абсолютная погрешность определения температуры трубопровода $\Delta t$ , °С | Абсолютная погрешность определения ореола протаивания $R_0$ , м |
|-------|----------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
|       | Температура воздуха $t_{в}$ , °С | Температура грунта $t_{г}$ , °С | Температура трубопровода $t$ , °С | Ореол протаивания $R_0$ , м | Температура трубопровода $t$ , °С | Ореол протаивания $R_0$ , м |                                                                             |                                                                 |
| 1     | -17,4                            | -2,9                            | 6,7                               | 0,028                       | 6,6                               | 0,027                       | 0,1                                                                         | 0,001                                                           |
| 2     | -22,0                            | -2,8                            | 8,6                               | 0,028                       | 8,8                               | 0,029                       | 0,2                                                                         | 0,001                                                           |
| 3     | -17,6                            | -3,0                            | 6,8                               | 0,027                       | 6,7                               | 0,026                       | 0,1                                                                         | 0,001                                                           |
| 4     | -4,6                             | -3,0                            | 3,5                               | 0,026                       | 3,5                               | 0,026                       | 0,0                                                                         | 0,000                                                           |
| 5     | 1,1                              | -3,0                            | 3,0                               | 0,026                       | 3,0                               | 0,026                       | 0,0                                                                         | 0,000                                                           |
| 6     | 8,4                              | -2,9                            | 2,9                               | 0,026                       | 3,0                               | 0,026                       | 0,1                                                                         | 0,000                                                           |
| 7     | 22,4                             | -2,8                            | 3,0                               | 0,027                       | 3,0                               | 0,027                       | 0,0                                                                         | 0,000                                                           |
| 8     | 5,8                              | -2,5                            | 2,7                               | 0,028                       | 2,5                               | 0,027                       | 0,2                                                                         | 0,001                                                           |
| 9     | -2,5                             | -2,3                            | 3,1                               | 0,028                       | 3,3                               | 0,029                       | 0,2                                                                         | 0,001                                                           |
| 10    | -17,8                            | -2,8                            | 8,2                               | 0,029                       | 8,3                               | 0,027                       | 0,1                                                                         | 0,002                                                           |
| 11    | -14,7                            | -2,4                            | 7,2                               | 0,029                       | 7,0                               | 0,028                       | 0,2                                                                         | 0,001                                                           |
| 12    | -20,1                            | -2,7                            | 9,0                               | 0,029                       | 8,8                               | 0,029                       | 0,2                                                                         | 0,000                                                           |

Эксперименты также показали, что в течение годового периода эксплуатации посредством регулирования обеспечивается стабильная глубина протаивания под трубой, не превышающая диаметра трубопровода. Квазистабильзация положения оси трубопровода наступает относительно быстро: практически на 2-3 год эксплуатации.

Таким образом, результаты аналитических исследований по регулированию ореолов протаивания вокруг трубопровода подтверждаются экспериментально. Исключение прогрессирующего таяния грунта обеспечивает стабильность его

осадки и максимально способствует сохранению положения оси трубопровода, что соответствует требованию сохранности экологической обстановки вдоль трассы и работоспособности самого трубопровода.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ публикаций с исследованием причин возникновения и развития опасных геокриологических процессов в мерзлых грунтах в основании подземных, наземных, надземных трубопроводов показал необходимость в разработке новых проектных решений по сооружению трубопроводов в зонах распространения сплошной мерзлоты, удовлетворяющих принципам минимального теплового воздействия на мерзлоту и невторжения в грунт.

2. Решена трехмерная задача теплового взаимодействия наземного трубопровода в насыпи с мерзлым основанием при условии ограничения ореола протаивания и перекачки нефти в изотермическом режиме, который обеспечивается технологическим регулированием за счет сдвига по фазе процессов теплопередачи во вмещающем грунте, и составлен многоциклового алгоритм расчета температуры наружной поверхности стенки трубопровода, который позволяет получить технологичные варианты эксплуатационных режимов (для трубопроводов диаметром до 500 мм):

- стабильного температурного режима, когда температура перекачки в течение года практически постоянна,  $t_{\text{бал}} = \text{const}$ , а разность максимальной и минимальной температуры трубопровода в течение года  $\Delta t$  не превышает  $0,25^\circ\text{C}$ .
- с остановленным ореолом протаивания при неизменном значении ореола протаивания в течение года  $R_0 = 0,3 \text{ м} = \text{const}$ .

3. Разработана методика расчета теплообмена наземного трубопровода в насыпи в режиме самопогружения с замерзшей поверхности, позволяющая рассчитать температурный режим эксплуатации трубопровода в случае неблагоприятного геокриологического прогноза, с учетом сезонных процессов осадки, пучения грунта основания, возникающих в процессе эксплуатации наземного трубопровода, что позволяет уменьшить ореол протаивания вокруг трубопровода в 8 раз при идентичных условиях теплообмена и одинаковой температуре наружной поверхности стенки трубопровода  $0...1^\circ\text{C}$  за счет экологического регулирования теплообмена.

4. Экспериментально, в лабораторных условиях, в результате регулирования теплообмена, подтверждена остановка прогрессирующего протаивания грунта в основании наземного трубопровода в насыпи, уложенного самопогружением с дневной поверхности на мохово-торфяном мерзлом основании, к 3 году эксплуатации трубопровода.

**Основные положения диссертации и наиболее значимые результаты исследований отражены в следующих научных статьях, опубликованных в ведущих научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:**

1. Гаррис, Н. А. Учет тепла трения при расчете режима регулируемого теплообмена нефтепровода с мерзлым грунтом / Э. А. Закирова, З. Р. Кутлыева (Глухова) // Научный журнал «Нефтегазовое дело», том 15. - 2017. - №1. - С. 108-113.

2. Гаррис, Н.А. Алгоритм регулирования процесса протаивания – промерзания грунта вокруг наземного трубопровода в условиях вечной мерзлоты / З.Р. Кутлыева (Глухова), Г.Н. Баева // Научный журнал «Нефтегазовое дело», том 16. – 2018. - №6. - С. 46-55.

3. Кутлыева (Глухова), З.Р. Расчет регулируемого теплообмена наземного трубопровода в насыпи в режиме самопогружения с замерзшей поверхности / Н.А. Гаррис, О.А. Глухов // Научный журнал «Нефтегазовое дело», том 17. - 2019. - №5. - С. 62-71.

4. Глухова, З.Р. Экспериментальное обоснование принципа строительства и эксплуатации наземного трубопровода самопогружением на мерзлоте / Н.А. Гаррис // Научный журнал «Нефтегазовое дело», том 18. - 2020. - №2. - С. 94-104.

5. Глухова, З.Р. Экспериментальное обоснование проектирования и эксплуатации наземного трубопровода «на плаву» в районах вечномёрзлых грунтов / Н.А. Гаррис // Научный журнал «Нефтегазовое дело», том 18. – 2020. - №1. - С. 92-101.

6. Глухова, З. Р. Регулирование теплообмена трубопровода с многолетнемерзлым грунтом в зависимости от сезонности и смещения тепловых потоков / З. Р. Глухова, Н. А. Гаррис // Нефтяное хозяйство. – 2022. – № 10. – С. 83-85.

7. Глухова, З. Р. Теплогидравлическая устойчивость магистрального нефтепровода в мерзлоте / З. Р. Глухова, Н. А. Гаррис // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2024. – № 3-4. – С.65-69.

#### **В рецензируемых изданиях, индексируемых в базах SCOPUS, Web of Science:**

8. Garris, N. A. Analysis of Piping Methods in permafrost soils / Z. R. Glukhova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – vol. 666. - № 4. – P. 042046.

#### **В других изданиях:**

9. Гаррис Н.А., Закирова Э.А., Кутлыева (Глухова) З. Р. Особенности тепловых расчетов при эксплуатации резервуаров на вечномёрзлых грунтах (тезисы)// Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта: сборник тезисов VIII международной научно-технической конференции (25-28 ноября 2014 г., г. Новополюцк) / редколлегия : В.К. Липский, и др. - Новополюцк : ПГУ, 2014. – С. 71-73.

10. Закирова Э.А., Кутлыева (Глухова) З. Р. О необходимости унифицирования теплотехнических расчетов объектов магистрального транспорта, возводимых на вечномёрзлых грунтах (тезисы)/ Мат-лы X Междунар.

учеб.-науч.-практ. конф. «Трубопроводный транспорт - 2015». Уфа, 2015. – С. 431-433.

11. Гаррис Н. А., Закирова Э. А., Кутлыева (Глухова) З. Р. Третий принцип проектирования трубопроводов на мерзлых грунтах (тезисы)// Мат-лы XI Междунар. учеб.-науч.-практ. конф. «Трубопроводный транспорт - 2016». Уфа, 2016. – С. 400-401.

12. Галин Д.Ф., Кутлыева (Глухова) З. Р. Минимизация теплового воздействия на мерзлые грунты при наземной прокладке нефтепровода (тезисы)// Мат-лы XII Междунар. учеб.-науч.-практ. конф. «Трубопроводный транспорт - 2017». Уфа, 2017. – С. 408-409.

13. Кутлыева (Глухова) З.Р. Учет самопогружения наземного нефтепровода в насыпи при расчете теплообмена с протаивающим грунтом (тезисы)// Мат-лы XIV Междунар. науч.-практ. конф. «Трубопроводный транспорт - 2019». Уфа, 2019. – С. 397-399.

14. Глухова З.Р. Аналитическое и экспериментальное обоснование принципа строительства и эксплуатации наземного трубопровода самопогружением на мерзлых грунтах (тезисы)// Мат-лы Междунар. конф. «Рассохинские чтения» (06-07 февраля 2020 г.). Ухта, 2020. – С. 142-145.

15. Гаррис Н.А., Глухова З.Р., Талхин Р.Р., Новичков А.В. Методика расчета температурного режима трубопровода с ограничением радиуса протаивания в мерзлоте// Учебно-методическое пособие для курсового проектирования. Уфа: УГНТУ, 2021.

16. Глухова З.Р., Талхин Р.Р., Гаррис Н.А. Расчет температурного режима трубопровода в мерзлоте с ограничением ореола прогрессирующего таяния (тезисы)// Мат-лы Междунар. науч.-техн. конф. «Транспорт и хранение углеводородного сырья» (28-29 мая 2020 г.). Тюмень, 2021. – С. 118-124.

17. Глухова, З. Р. Моделирование теплового режима трубопровода на мерзлоте согласно сбалансированному теплообмену / З. Р. Глухова // Мат-лы XVIII Междунар. науч.-практ. конф. «Трубопроводный транспорт - 2023». Уфа, 2023. – С. 317-318.