

На правах рукописи

Паздерин Дмитрий Сергеевич

**ДИНАМИКА ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ
МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ В ОСНОВАНИИ
ЗАГЛУБЛЕННОГО ТРУБОПРОВОДА С ПРИМЕНЕНИЕМ
ОХЛАЖДАЮЩИХ УСТРОЙСТВ (ТЕРМОСТАБИЛИЗАТОРОВ)**

Специальность: 25.00.08 инженерная геология,
мерзлотоведение и грунтоведение

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тюмень – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте криосферы Земли Сибирского отделения РАН

Научный руководитель

Горелик Яков Борисович, доктор геолого-минералогических наук, Зав. лабораторией Тепломассообменных явлений, ФГБУН "Институт криосферы Земли СО РАН"

Официальные оппоненты

Земенков Юрий Дмитриевич, Доктор технических наук, профессор, Зав. кафедрой Транспорта Углеводородных Ресурсов, ФГБОУ ВО "Тюменский индустриальный университет".

Михайлов Павел Юрьевич, кандидат физико-математических наук, Зав. кафедрой Механики многофазных систем, ФГАОУ ВО "Тюменский государственный университет".

Ведущая организация

ООО НПО «Фундаментстройаркос»

Защита диссертации состоится: 24 мая 2017 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 003.042.02 при ФГБУН "Институте криосферы Земли СО РАН" по адресу: 625026, г. Тюмень, ул. Малыгина 86, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБУН "Института криосферы Земли СО РАН" по адресу: г. Тюмень, ул. Таймырская 74 и на сайте ФГБУН "Института криосферы Земли СО РАН" <http://www.ikz.ru>

Отзывы на автореферат, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 625000, Тюмень, а/я 1230, факс 8 (3452) 688-787; e-mail: Yakimov_Artem@mail.ru

Автореферат разослан: _____ 2017 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 003.042.02,
кандидат географических наук

Якимов А.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Сегодня в большинстве северных регионов строительство сооружений осуществляется по I принципу. Однако при строительстве трубопроводов обеспечить его выполнение по всей трассе оказывается слишком затратным. Чаще всего это строительство осуществляется с допущением частичного оттаивания грунтов основания, лимитируемого конструктивными мероприятиями (теплоизоляцией, охлаждающими устройствами и т.д.) исходя из требований обеспечения величины действующих в трубопроводе напряжений ниже предельно-допустимых значений. Для этого при их проектировании необходимо выполнять расчеты как несущей способности фундаментов, так и по деформациям. Эти расчеты базируются на определении механических и деформационных характеристиках мерзлых грунтов. Свойства мерзлых грунтов существенно зависят от их отрицательной температуры. Так понижение температуры мерзлого грунта на 2-3 °С увеличивает несущую способность фундаментов в 2-3 раза.

Одним из путей предотвращения нежелательных последствий оттаивания является применение охлаждающих устройств различной конструкции. Для температурной стабилизации грунтов оснований широко используются охлаждающие устройства, в частности, термостабилизаторы грунта производства НПО «Фундаментстройаркос» и других отечественных производителей. Термостабилизатор – двухфазное естественно-конвективное устройство для переноса зимнего холода атмосферы к основанию фундамента. Устройство не требует затрат электроэнергии, его действие основано на использовании силы тяжести и разницы температур грунта и воздуха в зимнее время года.

Прогнозирование совместного теплового влияния на грунт со стороны инженерного сооружения и термостабилизаторов является сложной комплексной задачей, которая лежит в основе расчета несущей способности и деформаций. Надежность эксплуатации сооружений и возможные неблагоприятные последствия ее нарушения в значительной мере зависят от корректности прогноза тепловых полей и ореолов оттаивания. Как показал анализ, разработка этих методов прогнозирования в настоящее время недостаточна.

В работах по определению температурного поля грунтов вокруг термостабилизатора принимается постоянный тепловой поток от испарителя в грунт, не учитывающий конкретные условия атмосферы и свойства грунта. Кроме того, в существующих постановках задач отсутствует анализ корректности задания положения границ расчетной области, а также адекватности граничных условий реальным условиям теплообмена. В расчетах недостаточно подробно анализируется роль сезонных колебаний температуры на поверхности массива грунта и вклад этого фактора в формирование температурного поля в основании сооружения в различное время года. В принимаемых расчетных моделях не учитываются технологические факторы изготовления конденсатора устройства и особенности его конструкции, которые могут заметно повлиять на эффективность его работы.

Необходимость решения обозначенных вопросов с целью качественного улучшения методов геокриологического прогноза состояния грунтов основания трубопровода при подземном способе прокладки определяет актуальность темы диссертационной работы.

Объект исследований

Многолетнемерзлые грунты в зоне влияния горячего трубопровода с учетом действия термостабилизаторов на застраиваемой территории криолитозоны.

Предмет исследований

Тепловое состояние и процессы теплопереноса в массиве грунта с учетом фазовых превращений грунтовой влаги.

Цели и задачи работы

Целью диссертационной работы является создание расчетной модели теплового воздействия подземного трубопровода и вертикальных естественно-конвективных охлаждающих устройств (термостабилизаторов) на многолетнемерзлые грунты его основания. Модель должна учитывать тепловое взаимодействие термостабилизаторов, тепловыделения трубопровода с учетом вариации его конструктивных параметров, сезонные процессы на дневной поверхности, фазовые переходы в грунте.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие задачи:

1. Разработать модель переноса тепла от внешней поверхности оребренного конденсатора термостабилизатора к атмосферному воздуху, учитывающую характеристики ребер и трубы в основании ребер, а также контактное термическое сопротивление в случае биметаллического исполнения конденсатора.

2. Разработать достаточно простой и надежный способ выбора граничного условия на контакте поверхности массива грунта с атмосферным воздухом, а также выбора положения нижней границы расчетной области, обеспечивающих корректность постановки задач.

3. Провести анализ взаимного теплового влияния двух термостабилизаторов в трехмерной расчетной области.

4. Выполнить исследование теплового влияния термостабилизаторов на температурное поле многолетнемерзлых грунтов основания заглубленного трубопровода с учетом сезонных изменений параметров теплообмена на поверхности грунта.

5. Разработать физико-математическую модель совокупного теплового воздействия от заглубленного трубопровода, одиночного и групповых вертикальных термостабилизаторов, а также природных факторов с поверхности массива на многолетнемерзлые грунты основания трубопровода, позволяющую дать долгосрочный прогноз динамики их теплового состояния.

6. Разработать алгоритм и создать рабочую программу для проведения прогнозного теплотехнического расчета в системе «мерзлый грунт – заглубленный трубопровод – система термостабилизаторов – окружающий воздух».

7. Обосновать корректность разработанной модели и метода расчета на основе сопоставления численных расчетов с известными решениями для некоторых частных конструктивных исполнений прокладки трубопровода.

Научная новизна заключается в следующем:

1. Предложен алгоритм проектирования конденсатора одиночного вертикального термостабилизатора с привязкой к конкретным ветровым условиям. Введено понятие «высокоскоростного» и «низкоскоростного» оребрения, т.е. конструкций более эффективных при высоких и низких скоростях ветра.

2. Выполнено обоснование граничных условий на верхней поверхности

массива грунта и на контакте испарителя термостабилизатора с грунтовым массивом, обеспечивающих корректность постановки задачи прогноза состояния грунтов в основании сооружений и существенно повышающих точность прогноза.

3. Разработана новая методика прогнозирования теплового состояния грунтов в системе “мерзлый грунт – заглубленный трубопровод – система термостабилизаторов – окружающий воздух”, включающая: а) учет технологических факторов изготовления конденсатора охлаждающего устройства и особенности его конструкции; б) обоснование корректности выбора параметров сезонного теплообмена поверхности массива грунта с атмосферой и положения нижней границы расчетной области; в) теоретически обоснованное условие теплообмена на границе контакта испарителя термостабилизатора с вмещающим грунтом; г) учет совокупного действия всех источников тепла (трубопровода, системы термостабилизаторов, поверхностных факторов); д) учет строения геологической среды (что увеличивает точность прогноза); е) разработанную на основе предлагаемой методики рабочую (вычислительную) программу для прогноза состояния грунтов основания заглубленного трубопровода на весь срок его эксплуатации.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Комплексная теоретическая модель теплопереноса и теплового взаимодействия конденсатора вертикального термостабилизатора с окружающим воздухом в широком диапазоне скоростей ветра, при различных формах и материалах ребер и способа их крепления к корпусу термостабилизатора.

2. Алгоритм выбора параметров теплообмена верхней границы массива грунта с атмосферой и глубины расположения нижней границы расчетной области на основе критерия стабильности теплового состояния массива грунта в отсутствие сооружения в течение срока его эксплуатации для обеспечения корректности постановки и решения задачи теплотехнического прогноза теплового состояния мерзлых грунтов в основании сооружений.

3. Физико-математическая модель и численный метод расчета процессов переноса тепла в основании горячего заглубленного трубопровода, включающие: а) учет технологических факторов изготовления конденсатора охлаждающего устройства и особенности его конструкции; б) обоснование корректности выбора параметров сезонного теплообмена поверхности массива грунта с атмосферой и положения нижней границы расчетной области; в) теоретически обоснованное условие теплообмена на границе контакта испарителя термостабилизатора с вмещающим грунтом; г) учет совокупного действия всех источников тепла (трубопровода, системы термостабилизаторов, поверхностных факторов); д) учет строения геологической среды (что увеличивает точность прогноза); е) разработанную на основе предлагаемой методики рабочую (вычислительную) программу для прогноза состояния грунтов основания заглубленного трубопровода на весь срок его эксплуатации.

Практическая значимость результатов работы

Способ описания переноса тепла через конденсатор термостабилизатора позволяет учитывать не только геометрические и теплофизические характеристики ребрения, но и технологические особенности его изготовления, в частности – способ его крепления к корпусу термостабилизатора.

Разработанные вычислительные методы повышают надежность и точность

прогнозных тепловых расчетов заглубленного трубопровода в криолитозоне при проектировании термостабилизации грунтов и конструктивных схем укладки трубопровода.

Разработанные инструменты позволяют прогнозировать температурное поле многолетнемерзлых грунтов на весь срок эксплуатации трубопровода, что позволяет заблаговременно выделить проблемные участки и наметить проектные работы по созданию сети мониторинга вдоль трассы трубопровода.

Достоверность результатов обусловлена корректностью постановки задач и обеспечена достаточной обоснованностью принятых допущений с применением фундаментальных уравнений теплофизики. Результаты, полученные численными методами, подтверждаются их достаточным соответствием с известными для частных случаев аналитическими и иными известными зависимостями.

Личный вклад автора состоит в разработке метода прогнозного расчета, проведении и обобщении численных расчетов. Промысловые данные получены под руководством автора. В опубликованных совместно с соавторами научных статьях вклад соавторов равноценен.

Апробация работы Результаты исследований докладывались и обсуждались на российских и международных межотраслевых научных семинарах и конференциях: Международная конференция «Криогенные ресурсы полярных и горных регионов. Состояние и перспективы инженерного мерзлотоведения», Тюмень, 2008 г.; Всероссийский научно-технический семинар «Некрасовские чтения», г. Тюмень 2010, 2011 г.; Научно-методический семинар ОАО «Гипротюменнефтегаз», Тюмень 2012-2014 г.; Тюменский международный инновационный форум «НефтьГазТЭК-2013», Тюмень 2013г.; Международная научно-практическая конференция по инженерному мерзлотоведению, посвященная 20-летию ООО НПО «Фундаментстройаркос», Тюмень 2011; Научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов посвященная 20-летию ООО НПО «ФСА», Тюмень 2011; Девятый семинар-совещание при ОАО НПП «Эталон», Омск 2011; XVIII научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов «Проблемы развития газовой промышленности Сибири-2014», Тюмень 2014; XVI конференции молодых специалистов, работающих в организациях, осуществляющих деятельность, связанную с использованием участков недр на территории Ханты-Мансийского автономного округа – Югры. Ханты-Мансийск 2016.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 14 работ, в том числе 5 работ в изданиях, входящих в перечень ВАК, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка цитируемой литературы и приложения. Объем диссертации составляет 204 страницы машинописного текста, включая 129 рисунков и 9 таблиц. Список цитируемой литературы составлен из 148 источников.

Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю, д.г.-м.н. Я.Б. Горелику за поддержку и ценные советы при написании работы, а также ООО «Газпромнефть-Ямал» за предоставленные промысловые данные.

Специальность, которой соответствует диссертация

Согласно сформулированной цели научной работы, ее научной новизне,

установленной практической значимости, диссертация соответствует паспорту специальности 25.00.08 – Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение, пункту 7 «Техническая мелиорация грунтов, создание геотехнических массивов пород (грунтовых толщ) с заданными прочностными, деформационными, фильтрационными, теплофизическими и другими свойствами»; пункту 12 «Физическое, математическое, аналоговое и другое моделирование геологических, геокриологических и инженерно-геологических процессов, прогноз их развития во времени-пространстве, оценка и управление геологическими опасностями и геологическими рисками»; пункту 15 «Оценка и прогноз изменений инженерно-геологических и геокриологических условий месторождений полезных ископаемых, урбанизированных и сельских территорий, объектов промышленного, гражданского, энергетического и других видов строительства».

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность темы исследования, сформулирована цель и задачи диссертации.

В первой главе дается обзор работ, посвященных существующим методам понижения температуры многолетнемерзлых грунтов оснований с целью повышения их несущей способности, в том числе с использованием вертикальных естественно-конвективных парожидкостных охлаждающих устройств (термостабилизаторов). Существенный вклад в изучение процессов промерзания-оттаивания многолетнемерзлых грунтов оснований сооружений у нас в стране внесли Б.Г. Аксенов, Ю.А. Александров, Б.М. Блиер, Э.А. Бондарев, Н.А. Бучко, Ю.Я. Велли, С.С. Вялов, С.И. Гапеев, А.С. Герасимов, М.Н. Гольдштейн, М.Д. Головкин, Ю.М. Гончаров, Я.Б. Горелик, С.Е. Гречищев, И.Е. Гурьянов, Ю.С. Даниэлян, В.В. Докучаев, Г.М. Долгих, М.М. Дубина, Э.Д. Ершов, В.Ф. Жуков, Ю.К. Зарецкий, А.А. Кислицын, В.С. Колунин, И.А. Комаров, В.Г. Кондратьев, А.А. Коновалов, В.А., Я.А. Кролик, В.А. Кудрявцев, Н.Б. Кутвицкая, В.И. Макаров, В.П. Мельников, Ю.С. Миренбург, М.А. Минкин, С.Н. Окунев, А.В., В.О. Орлов, А.В. Павлов, Г.В. Порхаев, Г.П. Пустовойт, Д.В. Редозубов, Л.Т. Роман, Р.В. Чжан, Н.Ф. Федоров, Ю.Г. Федосеев, В.Н. Феклистов, Г.М. Фельдман, Х.Р. Хакимов, Л.Н. Хрусталева, Н.А. Цытович, Д.М. Шестернев, А.Л. Ястребов и др.

Исследованиями в области температурной стабилизации мерзлых грунтов занимались в институтах Гипротюменнефтегаз, ТюменНИИГипрогаз, Институт Криосферы Земли СО РАН, Гипротрубопровод, МИСИ, ЛенЗНИИЭП, Институт мерзлотоведения СО РАН. Значительный опыт строительства сооружений на многолетнемерзлых грунтах приобрело Северное Отделение НИИОСП, ООО НПО «Фундаментстройаркос», АО «Фундаментпроект», ООО «ВНИИГАЗ».

Проведенный анализ позволил определить цели и задачи диссертационной работы

Во второй главе в первом параграфе формулируется задача теплообмена внешней поверхности конденсатора термостабилизатора с атмосферой. Практически все современные производители изготавливают термостабилизаторы с конденсатором, представляющим собой оребренную трубу.

Во втором параграфе описывается разработанная методика расчета коэффициента теплоотдачи монометаллической оребренной трубы. Установлен коэффициент для определения скорости ветра в сжатом сечении (между ребер) в

зависимости от геометрических размеров конденсатора. Его значение можно определить по формуле:

$$K = 1 + 2 \cdot \frac{\delta \cdot h}{t \cdot d}, \quad (1)$$

где h , δ – высота и толщина основания ребра ($h=D-d$), м; t – шаг ребра (расстояние между вершинами ребер), м; d – диаметр трубы, м; D – диаметр ребра, м. Так при расчетах в качестве характерной скорости принимается скорость потока воздуха в сжатом сечении, которая определяется как произведение скорости набегающего потока на K .

В тепловых расчетах конденсаторов широко применяется коэффициент эффективности ребра E . E представляет собой отношение действительного теплового потока поверхности ребра к теоретически возможному тепловому потоку, если бы вся поверхность ребра имела температуру его основания.

Конвективный коэффициент теплоотдачи конденсатора с учетом эффективности оребрения E и поправки на неравномерность теплоотдачи по длине ребра называется приведенным коэффициентом теплоотдачи α и определяется по формуле:

$$\alpha = \left(\frac{F_p}{F} E \mu \psi + \frac{F_{mp}}{F} \right) \alpha_k, \quad (2)$$

где F_p – площадь поверхности всех ребер на трубе, м²; F_{mp} – площадь поверхности трубы не занятой ребрами, м²; F – полная площадь оребренной поверхности, м²; μ – поправочный коэффициент на изменение толщины поперечного сечения ребра; ψ – коэффициент неравномерности теплоотдачи, α_k – конвективный коэффициент теплоотдачи всего конденсатора, Вт/(м²*К).

В третьем параграфе описывается алгоритм расчета биметаллической оребренной трубы конденсатора термостабилизатора. Рассматривается уменьшение среднего температурного напора конденсатора за счет появления температурного градиента на поверхности соприкосновения различных металлов. Новизной метода является возможность учитывать наличие зазора между соприкасающимися поверхностями. Обычно эти зазоры заполнены неподвижным воздухом коэффициент теплопроводности которого на несколько порядков ниже, чем окружающего металла.

Добавочное термическое сопротивление является особенностью теплопередачи биметаллических труб конденсаторов. Определение коэффициента теплопередачи через биметаллический конденсатор в атмосферу при наличии воздушного зазора между корпусом оребрения и корпусом конденсатора вычисляется по формуле:

$$K_{kon} = \frac{2\pi L}{\frac{1}{\alpha_1 r_1} + \frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{r_3}{r_2} + \frac{1}{\lambda_3} \ln \frac{r_4}{r_3} + \frac{1}{\alpha \cdot r_{or}}}, \quad (3)$$

где α_1 – коэффициент теплопередачи от жидкого хладагента к внутренней стенке конденсатора, Вт/(м²*К); L – длина конденсатора, м; λ_1 – теплопроводность корпуса термостабилизатора, Вт/(м*К); λ_2 – теплопроводность воздуха, Вт/(м*К); λ_3 – теплопроводность оребрения, Вт/(м*К); r_1 – внутренний радиус термостабилизатора, м; r_2 – внешний радиус термостабилизатора, м; r_3 – внешний радиус воздушного зазора, м; r_4 – внешний радиус корпуса оребрения, м; r_{or} – радиус оребрения, м. Коэффициент теплопередачи K_{kon} имеет размерность Вт/К.

Общий коэффициент теплопередачи от биметаллического конденсатора к атмосферному воздуху при наличии воздушного зазора толщиной δ_{kon} определяется по формуле:

$$K_{общ} = \frac{\alpha F(1-\beta) + K_{kon}\beta}{F}, \quad (4)$$

где β – доля площади воздушного зазора от площади всего контакта.

В четвертом параграфе представлены результаты расчетов по разработанной модели. Расчет эффективности оребрения выполнен для различных скоростей ветра. Результаты расчетов представлены в табл. 1.

Таблица 1. Зависимость эффективности оребрения от скорости ветра при заданных параметрах конденсатора.

	Скорость ветра, м/с									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Е (а)	0,99	0,98	0,98	0,97	0,97	0,96	0,96	0,95	0,95	0,94
Е (б)	0,83	0,76	0,70	0,65	0,62	0,58	0,56	0,53	0,52	0,50

Результаты расчета приведенного коэффициента теплоотдачи конденсатора в зависимости от скорости ветра, при длине оребренной конденсаторной части 1 м, для вариантов оребрения а) и б) представлены в табл. 2.

Таблица 2. Зависимость приведенного коэффициента теплоотдачи от скорости ветра при заданных параметрах конденсатора.

	Скорость ветра, м/с									
	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0
α (а), Вт/(м ² ·К)	10,92	18,64	25,44	31,68	37,53	43,45	48,80	53,93	58,87	63,66
α (б), Вт/(м ² ·К)	10,24	15,67	20,48	24,65	28,40	32,08	35,32	38,38	41,28	44,06

Далее представлены результаты расчета приведенного коэффициента теплоотдачи конденсатора для различных скоростей ветра в зависимости от толщины (рис. 1а) и высоты (рис. 1б) ребра.

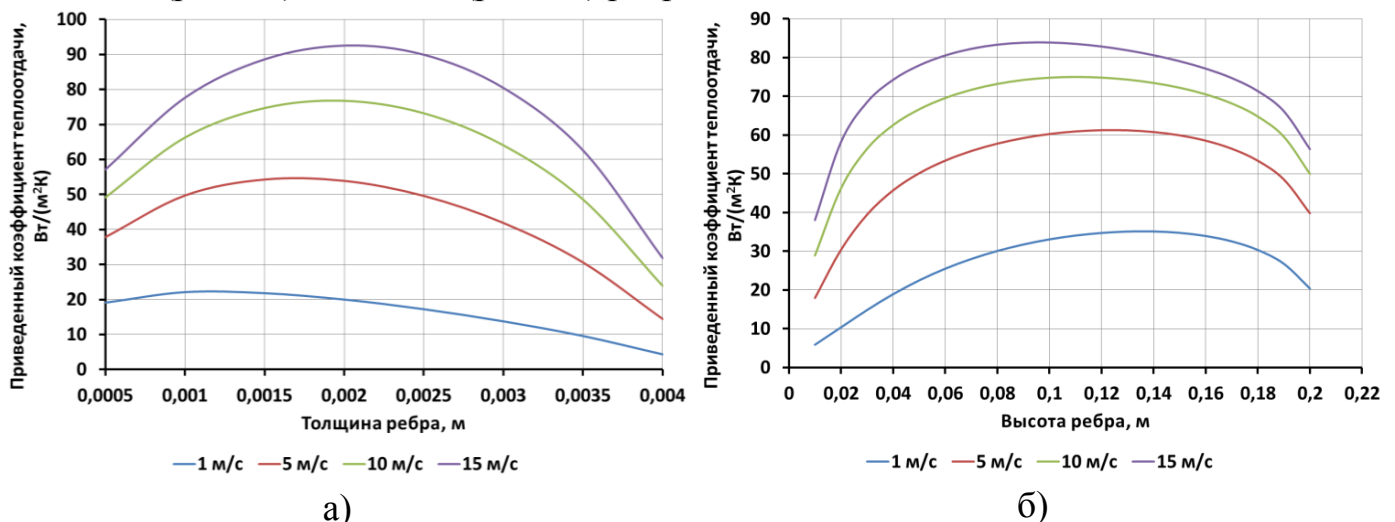


Рис. 1. График изменения приведенного коэффициента теплоотдачи в зависимости от толщины (а) и высоты (б) ребра при заданной скорости ветра

По полученным результатам можно определить оптимальную толщину и высоту ребра для термостабилизатора, проектируемого для конкретного объекта, с учетом среднемесячных (или средне зимних) скоростей ветра, характерных для данной местности.

Результаты вычислений коэффициента теплопередачи через биметаллический конденсатор в атмосферу при наличии воздушного зазора представлены на рисунке 2.

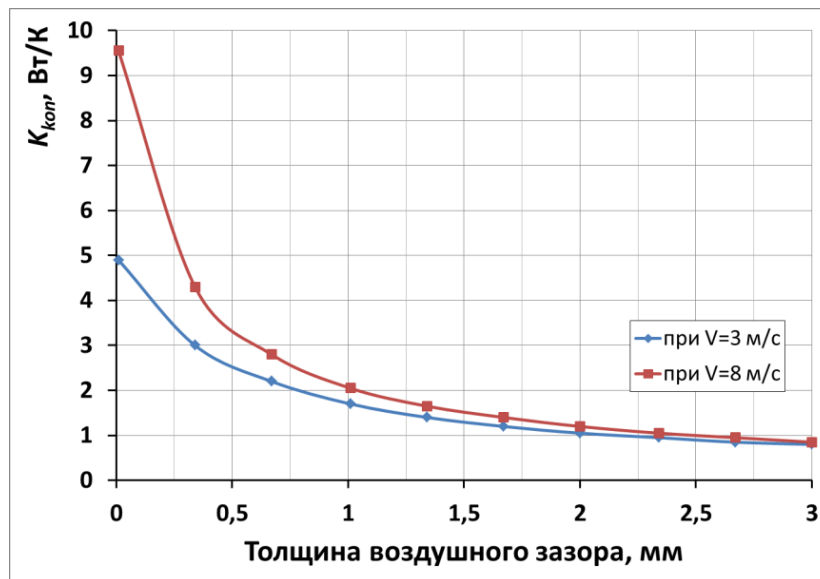


Рис. 2. График изменения коэффициента теплопередачи конденсатора при изменении толщины воздушного зазора

Результаты, представленные на рисунке 2, свидетельствуют об уменьшении величины коэффициента теплопередачи через биметаллический конденсатор в атмосферу при росте величины воздушного зазора. Этот факт свидетельствует о том, что определяющее влияние на интенсивность теплопередачи биметаллических конденсаторов оказывает контактное сопротивление.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что разработанная модель позволяет подобрать наиболее эффективную (с точки зрения теплопередачи) конструкцию конденсатора для конкретных ветровых условий проектируемого объекта.

В третьей и четвертой главах последовательно рассматриваются отдельные элементы создаваемой расчетной модели, которые на завершающем этапе синтезируются в общую модель.

В третьей главе приводится подробная методика численного решения двухмерной нестационарной задачи теплового взаимодействия одиночного термостабилизатора с окружающим грунтом в цилиндрической системе координат. Полученная модель учитывает неоднородность геологического строения окружающей породы, сезонное изменение условий на поверхности грунта во времени, зависимость теплоемкости и теплопроводности от температуры, фазовые переходы грунтовой влаги.

Температурное поле грунта при нестационарных условиях теплообмена в предположении, что процессы таяния и кристаллизации влаги происходят равномерно в заданном интервале температур от T_{ϕ} до 0°C ($T_{\phi} < 0^{\circ}\text{C}$) описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} c(T) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right), \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_s} = K_s(v) (T - T_v(\tau)), \end{cases} \quad (6)$$

где r, z - координаты цилиндрической системы координат, τ - время, T - температура грунта (функция r, z и τ). $\lambda(T)$ - коэффициент теплопроводности, $c(T)$ - эффективная объемная теплоемкость пород, $c(T) = c_{gr}(T) + h\rho \frac{dw}{dT}$, $c_{gr}(T)$ - объемная теплоемкость породы, зависящая от температуры, h - удельная теплота фазового перехода воды, ρ - плотность пород, w - влажность мерзлых пород. $K_s(v)$ - коэффициент теплопередачи испарителя, r_s - радиус испарителя термостабилизатора, $T_v(\tau)$ - температура воздуха.

Тепловое взаимодействие на стыке одиночного вертикального термостабилизатора с грунтом описывается граничным условием третьего рода в виде (6) применяется в зимний расчетный период. В летний период, когда температура воздуха выше температуры грунта на контакте с термостабилизатором, граничное условие (6) записывается в виде:

$$\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r}_{r=r_s} = 0. \quad (7)$$

Особенность метода состоит в новой формулировке граничного условия на контакте термостабилизатора и грунта. Коэффициент теплопередачи в грунт определяется как произведение коэффициента теплоотдачи надземной конденсаторной части α (определенный по методике изложенной во второй главе) и отношения площади конденсаторной части F_k термостабилизатора к площади его испарителя $F_{и}$:

$$K_s(v) = \alpha \frac{F_k}{F_{и}}, \quad (8)$$

где α рассчитывается по (2) или (4) в зависимости от конструктивного исполнения конденсатора.

Начальное распределение температур грунта, плотности, влажности, объемной теплоемкости талого и мерзлого грунта, теплопроводности талого и мерзлого грунта задается во всей расчетной области.

На верхней границе расчетной области принято граничное условие третьего рода:

$$\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z}_{z=0} = K_v (T - T_v(\tau)), \quad (9)$$

где K_v - коэффициент теплопередачи от поверхности грунта в атмосферу. При этом годовой ход температуры воздуха $T_v(\tau)$ считается заданным, а коэффициент теплоотдачи от воздуха к грунту эффективным образом может быть включена вся совокупность факторов, которые могут действовать с поверхности. Число этих факторов весьма значительно и в отсутствии сооружения их влияние на температурный режим основания является определяющим (при этом в зависимости от конкретных физико-географических условий ведущая роль может принадлежать различным из них). Кроме того, невозможно "отключить" основную массу факторов, оставив для исследования действие только одного из них. Следовательно, при отсутствии оценки роли отдельных факторов и оценки изменения их величины по территории, оценить общее влияние поверхности на температурный режим основания (даже с учетом данных метеостанции) оказывается невозможным. В технических задачах верхнее граничное условие предлагается подбирать на основе некоторых иных соображений и при этом оно должно быть подогнано к некоторому набору фактических данных тестовыми расчетами.

Для задач инженерной геокриологии учет совокупного действия поверхностных факторов в верхнем граничном условии должен быть заменен достаточно простой и надежной процедурой. В качестве обоснования такой процедуры предлагается следующее рассуждение. Если отвлечься от длиннопериодных колебаний температуры на поверхности массива (связанных с климатическими изменениями), то формирование фактически наблюдаемого температурного режима массива грунта в естественных условиях произошло под действием периодических сезонных колебаний температуры воздуха и всей совокупности относительно стабильно действующих поверхностных факторов. Важной константой, характеризующей сформировавшееся тепловое состояние грунтового массива, является температура на глубине нулевых амплитуд. Если в условии (9) подобрать с помощью итерационной процедуры такое значение коэффициента теплообмена K_v , что при заданном законе сезонного изменения температуры воздуха $T_v(\tau)$ расчетная температура в массиве грунта (в отсутствие сооружения) будет оставаться постоянной с необходимой точностью, то условие (9) с таким способом подобранным K_v может быть принято в качестве граничного условия, в том числе и в присутствии сооружения (вне области его контакта с поверхностью массива). Таким путем гарантируется отсутствие дополнительного влияния поверхности на грунты основания. Отметим, что именно изменение расчетной температуры грунтов на глубине нулевых амплитуд в отсутствие сооружения при достаточно произвольно выбранном коэффициенте K_v говорит об ошибочности выбранного значения этого параметра и неадекватного применения верхнего граничного условия в расчетной процедуре.

Для получения значения коэффициента K_v используется следующая процедура (алгоритм): принимая за основу некоторые предварительные оценки сезонных значений коэффициента K_v (обозначаемые далее как K_{vs} – летний и K_{vw} – зимний), зафиксировав эти значения. Далее выполняется оценка радиуса теплового влияния $L(\tau) = \sqrt{6 \cdot \kappa \cdot \tau}$, где κ , τ – температуропроводность грунта и проектное время эксплуатации сооружения. Это значение принимается в качестве ориентира для положения нижней границы расчетной области. В первой итерации значения сезонных констант в коэффициенте K_v принимаются максимальными, а в последующих итерациях монотонно снижаются ступенчатыми шагами. Контрольными параметрами в каждом варианте расчета являются: температура на глубине нулевых амплитуд и максимальная глубина сезонного оттаивания. Оба параметра коэффициента K_v считаются подобранными в процедуре, если температура на глубине нулевых амплитуд меняется не более чем на $0,1^{\circ}\text{C}$ в течение расчетного срока, а максимальная глубина оттаивания совпадает с условно принятым значением.

График поведения температуры в зависимости от глубины для промежуточных значений коэффициентов K_{vs} и K_{vw} (не обеспечивающих выполнение сформулированных выше требований) для нулевого потока тепла на нижней границе расчетной области приведен на рисунке 3. То же для параметров, обеспечивающих выполнение этих требований, показано на рисунке 4.

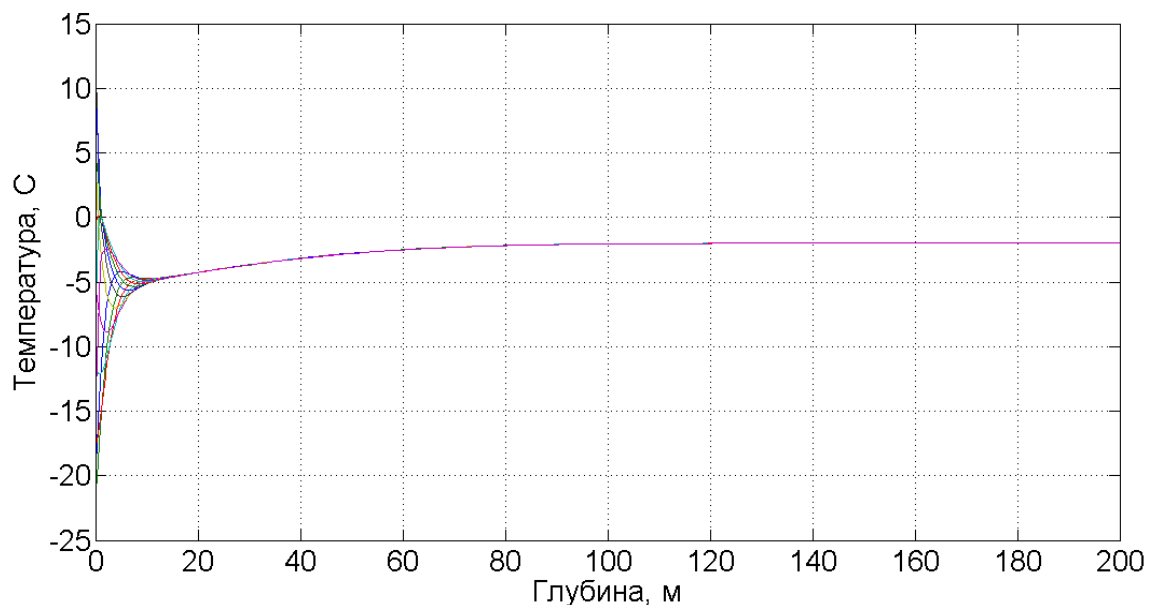


Рис. 3. Распределение температуры в массиве грунта в отсутствии сооружения при:
 $K_{vs} = 23,2 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}$; $K_{vw} = 2,9 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}$; $Z=200 \text{ м}$.

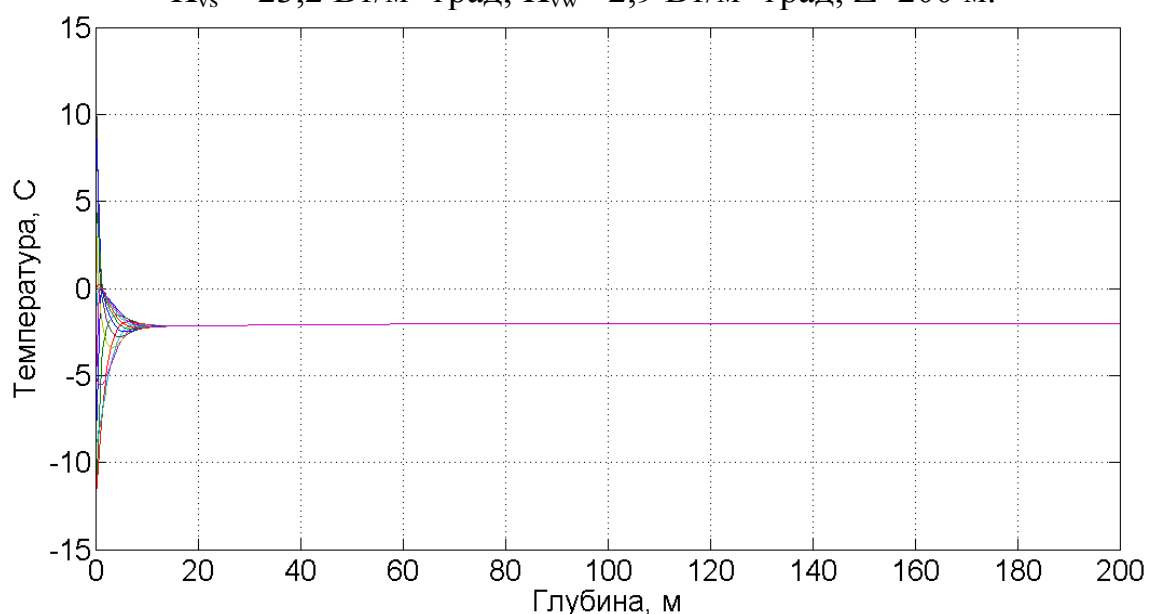


Рис. 4. Распределение температуры в массиве грунта в отсутствии сооружения при:
 $K_{vs} = 23,2 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}$; $K_{vw} = 1,16 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}$; $Z=200 \text{ м}$.

Разлет кривых вблизи нулевой отметки показывает поведение температуры в каждый из 12 месяцев завершающего (30-го) расчетного года, а точка их слияния (на глубине примерно 15 метров) показывает глубину проникновения сезонных колебаний температуры. При задании на нижней границе условия постоянства температуры $T_b = T_0$ для двух рассматриваемых здесь вариантов расчета приводят к практически идентичным распределениям температуры для соответствующих коэффициентов теплообмена (результаты, изображенные на рисунках 3 и 4, не зависят от вида нижнего граничного условия). Важно отметить, что при граничных параметрах, соответствующих рисунку 3, температура на глубине нулевых амплитуд значительно ниже естественного значения $-2 \text{ }^\circ\text{C}$ (достигая значения $-5 \text{ }^\circ\text{C}$). Параметры теплообмена (рис. 4) оставляют естественное значение температуры массива невозмущенным.

Приводятся результаты тестирования разработанного алгоритма на примере прогнозирования температурного поля грунтов в основании заглубленного

трубопровода. Результаты расчетов для двух вариантов значений параметров коэффициента теплообмена верхнего граничного условия представлены на рисунке 5.

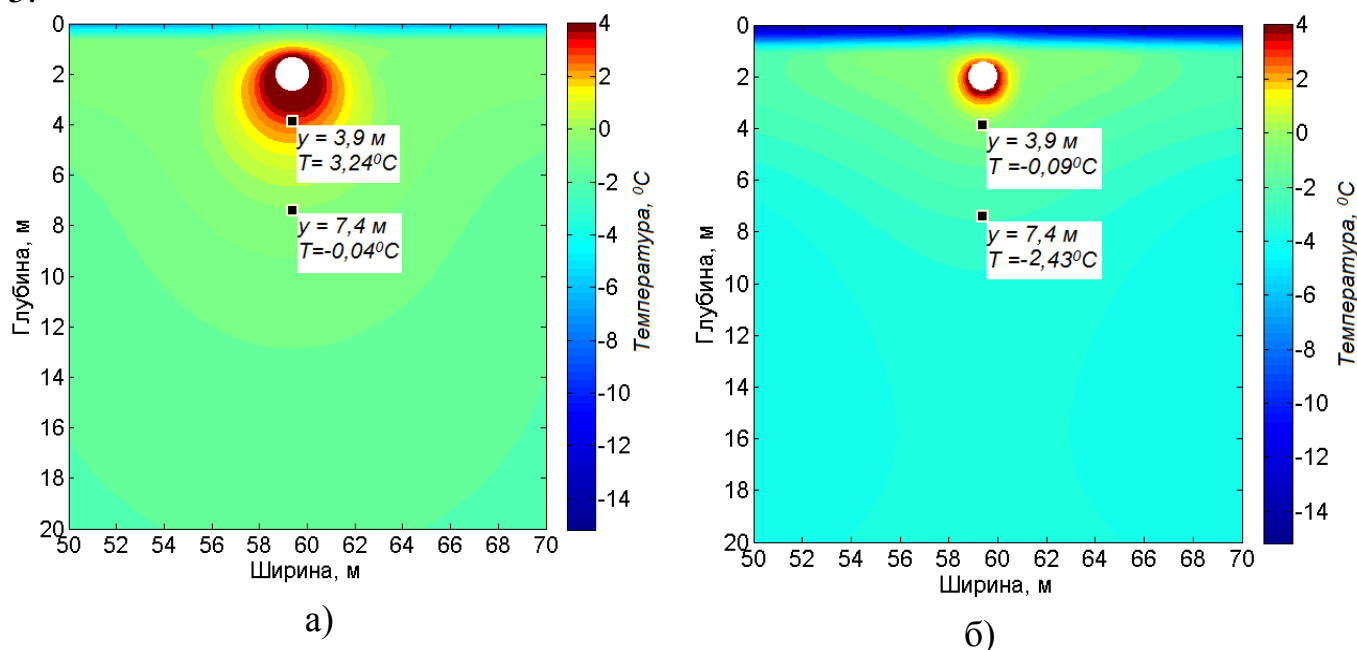


Рис. 5. Температурное поле грунта в основании трубопровода на конец 30-летнего периода при: а) $K_{vs} = 23,2 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}$; $K_{vw} = 1,16 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}$ б) $K_{vs} = 23,2 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}$; $K_{vw} = 2,9 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}$.

Их сравнение показывает, что некорректно выбранный коэффициент (Рис. 5,б) существенно занижает расчетные температуры грунтов. В численном выражении это показано значениями температур в двух точках грунта. Почти двукратное занижение расчетного значения глубины протаивания под сооружением может привести к применению неадекватных технических решений при его проектировании и чревато серьезными осложнениями при эксплуатации.

Тестирование разработанного метода расчета проведено путем сопоставления его результатов с результатами расчета стационарного положения границы протаивания вокруг трубопровода. Для этого численное решение на 100-летний срок сравнивалось с решением Форхгеймера (рис. 6).

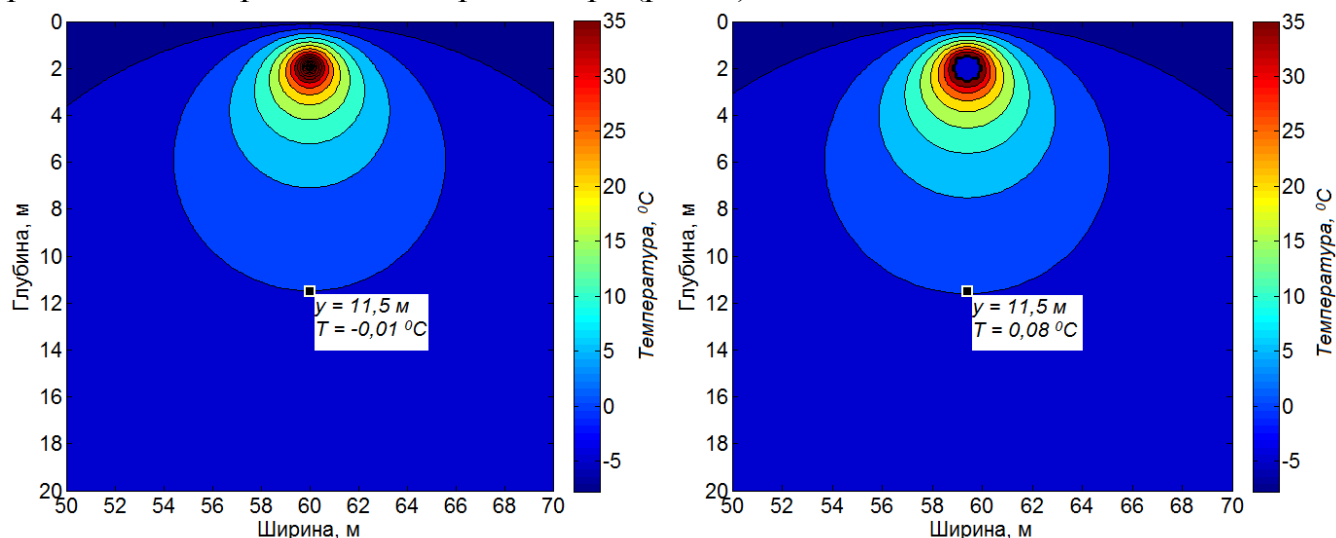


Рис. 6. Результаты расчета температурного поля вблизи заглубленного трубопровода: а) стационарное решение (по Форхгеймеру); б) результаты численного расчета на срок эксплуатации $\tau=100$ лет.

При этом расхождение результатов расчета глубины оттаивания под трубопроводом составило менее 2 %.

При выборе положения нижней границы расчетной области предлагается способ, заключающийся в итерационном подборе такого положения нижней границы, когда оно уже не оказывает влияния на результаты расчета за время эксплуатации сооружения. Вопрос об определении нижней границы расчетной области целесообразно рассматривать совместно с определением параметров верхнего граничного условия, поскольку их влияние на результаты расчетов могут быть одного порядка.

На определенной таким образом нижней границе расчетной области задается нулевое значение плотности теплового потока:

$$\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z_{z=Z}} = 0, \quad (10)$$

где Z – граница расчетной области по глубине

Для определения положения внешней (боковой) границы расчетной области используется та же методика, что и при определении положения нижней границы с той лишь разницей, что задача решается в цилиндрической системе координат. На ней задается нулевое значение плотности теплового потока:

$$\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r_{r=R}} = 0, \quad (11)$$

где R – размер области по радиусу.

Для внутренней цилиндрической границы расчетной области запишем два граничных условия.

Первое – для участка границы от дневной поверхности до глубины заложения испарителя (условие теплообмена термостабилизатора с грунтом):

Тепловое взаимодействие на стыке одиночного вертикального термостабилизатора с грунтом описывается граничным условием третьего рода в виде (6) или (7), в зависимости от сезонности.

Второе – для границы от глубины заложения испарителя до нижней границы расчетной области задается нулевое значение плотности теплового потока:

$$\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r_{r=r_s}} = 0. \quad (12)$$

Для решения задачи численно строится разностная схема, в которой область определения искомой функции покрывается расчетной сеткой. Приближенным решением задачи будет называться сеточная функция.

Дискретный аналог дифференциального уравнения (5) после его интегрирования по пространственным переменным r и z , а также по времени в общем виде после сокращения на π и приняв $T^{n+1}=T$, $T^n=T^0$ выглядит:

$$\begin{aligned} & \frac{V(C(T_{(i,j)}) \cdot T_{(i,j)} - C(T_{i,j}^0) \cdot T_{i,j}^0 + k\chi T_{\phi n})}{\Delta t} = \\ & = (T_{(i,j)} - T_{(i+1,j)})La1 + (T_{(i,j)} - T_{(i-1,j)})La2 + \\ & + (T_{(i,j)} - T_{(i,j+1)})La3 + (T_{(i,j)} - T_{(i,j-1)})La4 \end{aligned} \quad (13)$$

Здесь нижние индексы i, j – принадлежат к пространственным осям r и z . Верхний индекс n – определяет временной шаг. $La1, La2, La3, La4$ - соответствующие средние гармонические теплопроводности.

Далее записывается система нелинейных уравнений для всей расчетной области. Решение полученной системы уравнений позволяет вычислить температуру грунта во всей расчетной области. Результаты расчета поля температуры грунта вблизи термостабилизатора для условий п. Новый Порт приведены на рисунках 7 и 8.

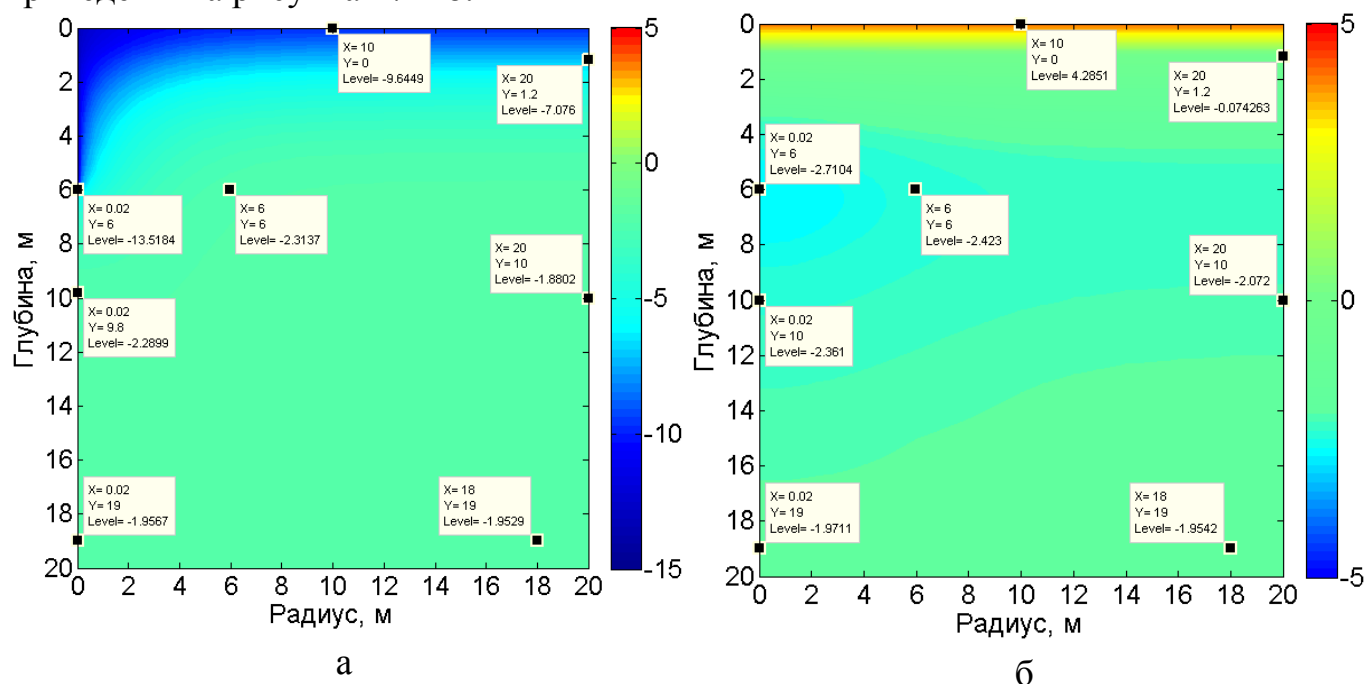


Рис. 7. Распределение температуры грунта вблизи термостабилизатора на конец зимнего (а) и летнего (б) периодов 1 расчетного года

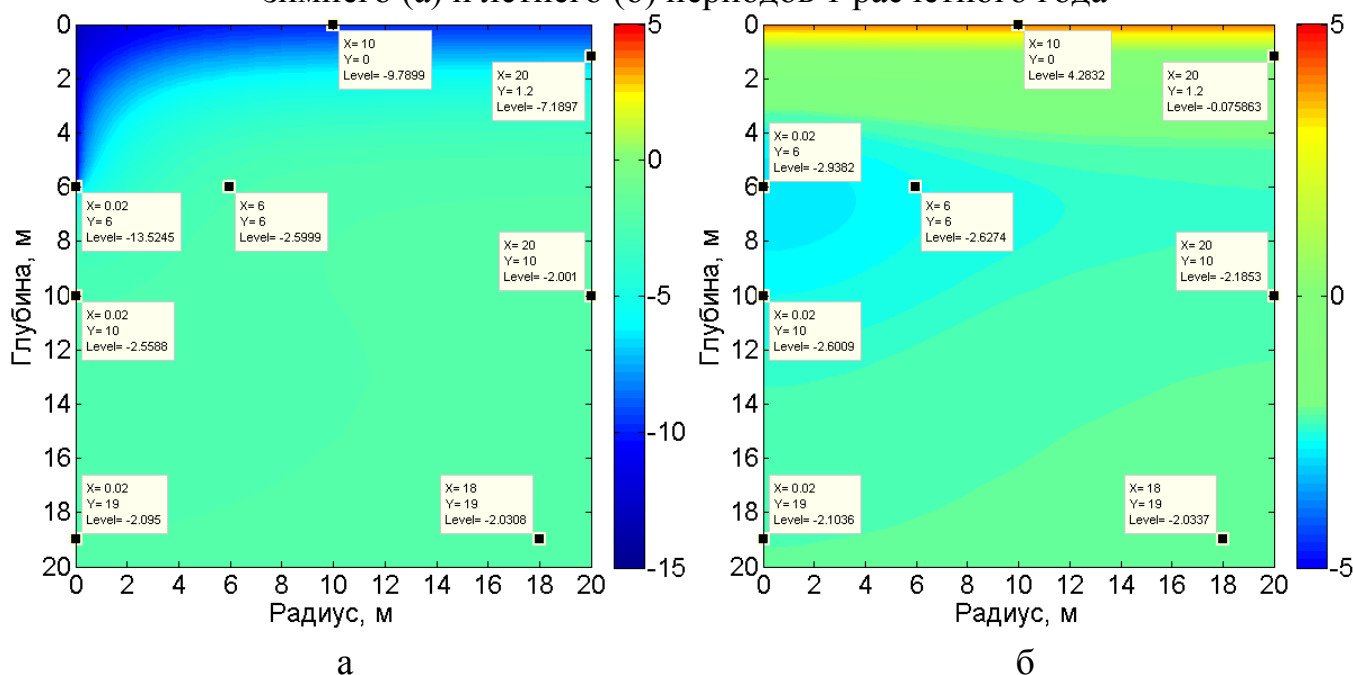


Рис. 8. Распределение температуры грунта вблизи термостабилизатора на конец зимнего (а) и летнего (б) периодов 5 расчетного года

Полученные результаты позволяют отследить динамику значений температуры ММГ вокруг термостабилизатора и оценить остаточный охлаждающий эффект работы термостабилизатора на конец расчетного года. Результаты, полученные путем численного моделирования, сравнивались с результатами натурных наблюдений (табл. 3) показали совпадение порядка остаточного охлаждения в зоне действия термостабилизаторов.

Таблица 3. Результаты мониторинга в термометрической скважине на расстоянии 2 м от термостабилизаторов на Новопортовского НГКМ.

Глубина, м	Дата измерения														
	23.08.2015	21.09.2015	29.10.2015	19.11.2015	16.12.2015	28.01.2016	21.02.2016	01.04.2016	21.04.2016	26.05.2016	01.07.2016	19.07.2016	16.08.2016	11.09.2016	31.10.2016
	Температура в термометрической скважине, С														
1	9,3	4,4	-0,7	-9,6	-11,2	-14,5	-12,4	-11,8	-10,3	-2,1	4,7	16,0	9,3	8,1	-0,1
2	6,2	1,9	0,0	-0,2	-3,2	-12,8	-11,9	-12,1	-10,6	-5,0	-1,2	2,5	1,8	2,8	0,0
3	1,1	0,2	0,0	0,0	-0,5	-11,7	-11,7	-12,0	-10,7	-6,7	-3,0	-1,4	-1,0	-0,5	-0,4
4	0,2	0,0	-0,2	-0,1	-2,8	-11,0	-11,3	-11,7	-10,7	-7,7	-4,4	-2,9	-2,2	-1,5	-1,2
5	-1,3	-0,9	-1,1	-1,0	-4,1	-10,3	-10,8	-11,2	-10,5	-8,1	-5,6	-4,3	-3,4	-2,6	-1,9
6	-2,5	-1,8	-2,0	-1,9	-4,9	-9,7	-10,2	-10,8	-10,2	-8,3	-6,4	-5,2	-4,2	-3,5	-2,6
7	-3,2	-2,5	-2,6	-2,5	-5,1	-8,7	-9,3	-10,0	-9,6	-8,3	-6,6	-5,8	-4,9	-4,1	-3,2
8	-3,9	-3,3	-3,1	-3,1	-4,8	-7,3	-7,8	-8,6	-8,6	-7,8	-6,9	-6,2	-5,4	-4,8	-3,9
9	-4,2	-3,7	-3,4	-3,3	-4,3	-5,8	-6,4	-7,3	-7,4	-7,2	-6,6	-6,1	-5,6	-5,0	-4,2
10	-4,3	-4,0	-3,6	-3,5	-4,0	-4,8	-5,4	-6,2	-6,4	-6,5	-6,3	-6,0	-5,5	-5,2	-4,5

Таким образом, можно утверждать, что разработана корректная физико-математическая модель теплообмена одиночного термостабилизатора с многолетнемерзлыми грунтами с применением численных методов расчета.

В четвертой главе представлены решения некоторых прикладных задач с применением разработанной методики.

Первая часть главы содержит исследования теплового взаимодействия двух вертикальных термостабилизаторов в трехмерном пространстве. Решение задачи в трехмерном пространстве обусловлено необходимостью учесть то, что в случае двух рядом стоящих термостабилизаторов, температурные поля взаимодействуют между собой. Аналогично происходит и с большим количеством термостабилизаторов.

Для нахождения температурного поля по всей расчетной области решается нестационарное трехмерное уравнение теплопроводности:

$$C(T) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right). \quad (14)$$

Задача рассматривается в параллелепипеде. На границах задаются граничные условия, аналогичные, описанным выше.

На основании полученного алгоритма реализована численная физико-математическая модель для расчета теплообмена двух вертикальных термостабилизаторов с многолетнемерзлыми грунтами.

Дискретный аналог уравнения теплопроводности для трех пространственных измерений для полностью не явной схемы численного расчета имеет вид:

$$\begin{aligned} & \frac{V(C(T_{i,j,k}) \cdot T_{i,j,k} - C(T_{i,j,k}^0) \cdot T_{i,j,k}^0 + k\chi T_{\text{фп}})}{\Delta t} = \\ & = \frac{(T_{i,j,k} - T_{i-1,j,k})La_1\Delta y\Delta z}{\partial x_1} + \frac{(T_{i,j,k} - T_{i+1,j,k})La_2\Delta y\Delta z}{\partial x_2} + \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{(T_{i,j,k} - T_{i,j-1,k})La_3\Delta x\Delta z}{\partial y_1} + \frac{(T_{i,j,k} - T_{i,j+1,k})La_4\Delta x\Delta z}{\partial y_2} + \\
& + \frac{(T_{i,j,k} - T_{i,j,k-1})La_5\Delta x\Delta y}{\partial z_1} + \frac{(T_{i,j,k} - T_{i,j,k+1})La_6\Delta x\Delta y}{\partial z_2}
\end{aligned}$$

где V – объем контрольного объема; Δt – шаг по времени; $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ – размеры контрольного объема по направлению осей $0x, 0y, 0z$; $\partial x_1; \partial x_2; \partial y_1; \partial y_2; \partial z_1; \partial z_2$ – расстояние между центрами контрольных объемов. Здесь i, j, k – индексы по осям.

Результаты расчетов на 30 апреля и 30 сентября приведены на рисунке 9.

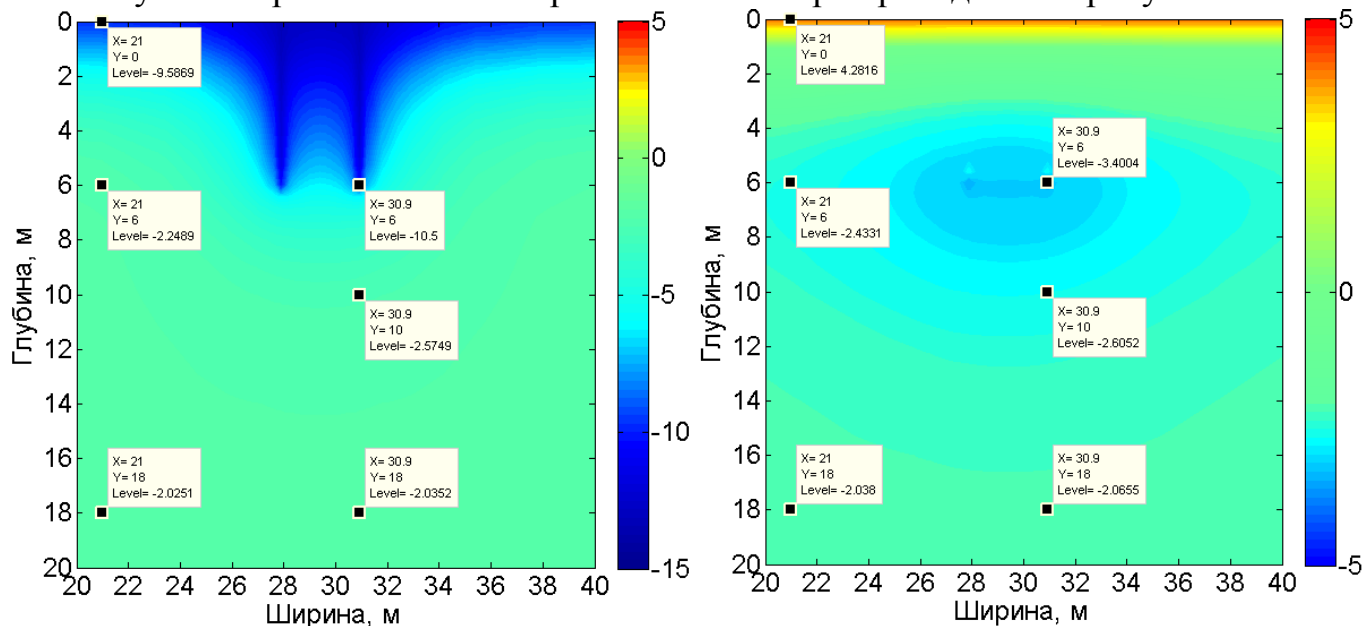


Рис. 9. Распределение температуры грунта на конец зимнего (слева) и летнего (справа) периодов 1 года работы термостабилизаторов.

Таким образом, показано взаимное влияние рядом расположенных термостабилизаторов на тепловое поле грунта. Если не учитывать в расчетах взаимное влияние термостабилизаторов, то зона охлаждения будет гораздо меньше (примерно на 20-30 %), и количество термостабилизаторов придется устанавливать (примерно в 1,5 раза) больше. Поэтому расчет с учетом взаимного влияния физически оправдан и экономически выгоден.

Заключительная вторая часть главы посвящена решению общей задачи - расчету динамики температурного поля в многолетнемерзлых грунтах основания заглубленного трубопровода, проложенного с использованием термостабилизаторов, на весь срок его эксплуатации. Заглубленный трубопровод с положительной температурой транспортируемого продукта является источником тепла. Термостабилизаторы установлены симметрично вдоль оси трубопровода на расстоянии 1,5 м по обе ее стороны. Расстояние между парами термостабилизаторов вдоль трассы составляет 2 и 10 м. На рисунках 10 и 11 приведены результаты расчетов на 30 расчетный год.

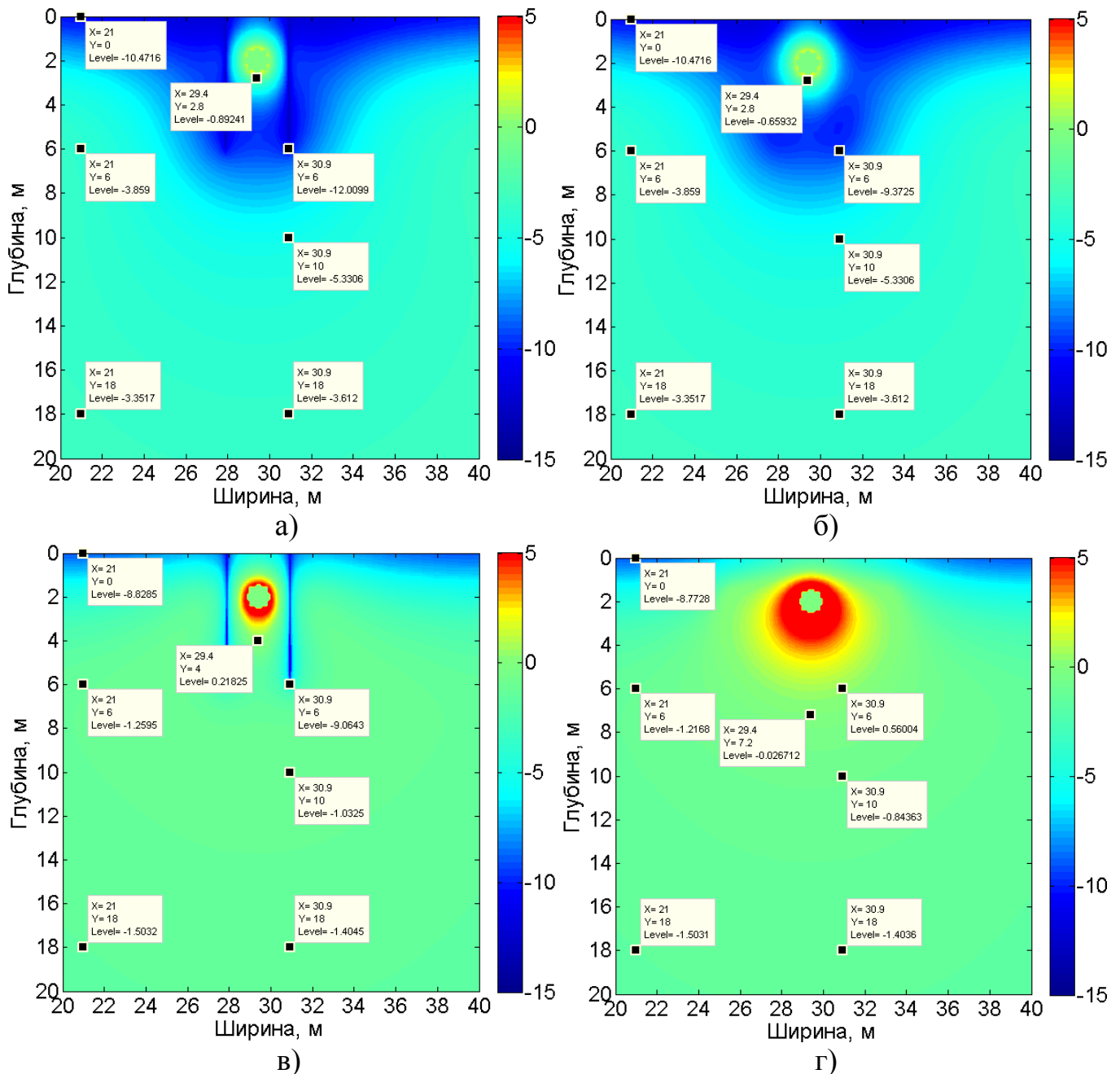


Рис. 10. Распределение температуры грунта на конец апреля на оси (а, в) и между парами (б, г) термостабилизаторов при шаге между парами 2 м (а, б) и 10 м (в, г).

Сопоставление результатов расчетов температурных полей на 30-летний период вблизи заглубленного трубопровода без термостабилизации охлаждающими устройствами (рисунок 5а) с результатами расчетов с установленными попарно термостабилизаторами (рисунки 10а,б, 11а,б) показало, что охлаждающее действие СОУ вблизи заглубленного горячего трубопровода имеет ограничения. При расстоянии 1,5 м от оси трубопровода и 10,0 м между парами (рисунки 10в,г, 11в,г) видно, что посередине между парами термостабилизаторов глубина протаивания практически совпадает с глубиной протаивания под трубопроводом без термостабилизации, но вблизи оси пары термостабилизаторов глубина протаивания сокращается на 2,4 м. При сокращении расстояния между термостабилизаторами до 2,0 м, напротив, происходит постепенное понижение температуры грунта вокруг заглубленного трубопровода и уменьшение зоны протаивания по сравнению с трубопроводом без установленных вблизи охлаждающих устройств. Из сравнения результатов расчетов (рисунки 10, 11) следует, что глубину протаивания под

трубопроводом возможно регулировать при помощи изменения расстояния между парами термостабилизаторов вдоль оси трубопровода.

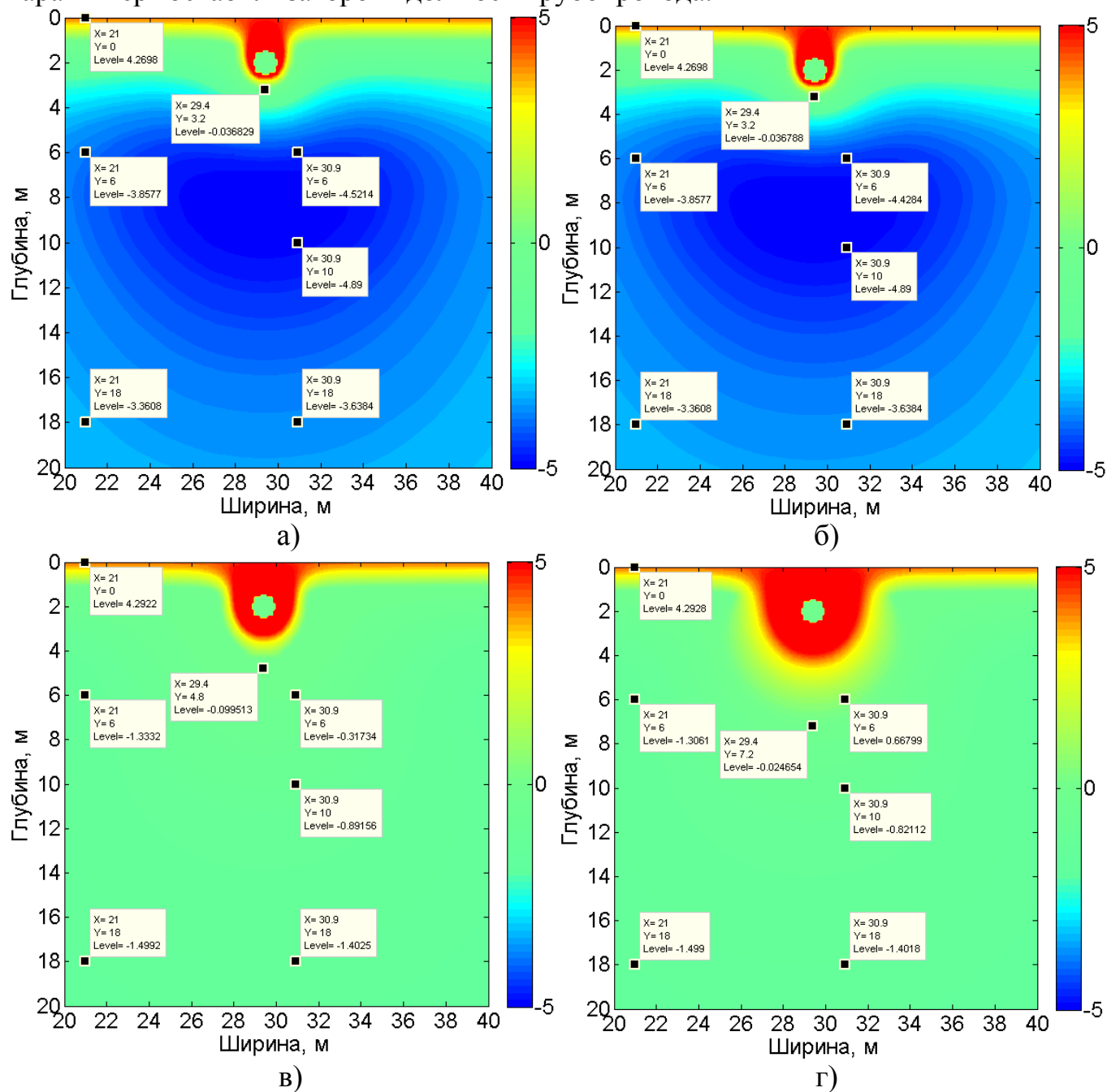


Рис. 11. Распределение температуры грунта на конец сентября на оси (а, в) и между парами (б, г) термостабилизаторов при шаге между парами 2 м (а, б) и 10 м (в, г).

Таким образом, разработан и реализован численный алгоритм моделирования поля температуры грунта вокруг заглубленного горячего трубопровода и установленных вблизи него термостабилизаторов.

Основные результаты и выводы

1. Разработана комплексная теоретическая модель теплопереноса и теплового взаимодействия конденсатора вертикального термостабилизатора с окружающим воздухом в широком диапазоне скоростей ветра, при различных формах и материалах ребер и способа их крепления к корпусу термостабилизатора. На основании данной модели разработан программный комплекс, позволяющий определить оптимальную конструкцию и параметры конденсатора термостабилизатора проектируемого для конкретного объекта, с учетом

среднемесячных (или средне зимних) скоростей ветра, характерных для данной местности.

2. Разработан алгоритм выбора параметров теплообмена верхней границы массива грунта с атмосферой и глубины расположения нижней границы расчетной области на основе критерия стабильности теплового состояния массива грунта в отсутствие сооружения в течение срока его эксплуатации для обеспечения корректности постановки и решения задачи теплотехнического прогноза теплового состояния мерзлых грунтов в основании сооружений.

3. Установлено, что неверно подобранный коэффициент теплопередачи от грунта в воздух может оказать существенное влияние на глубину протаивания под сооружением, что может привести к выбору неверного технического решения при проектировании.

4. Разработана физико-математическая модель и численный метод прогнозного расчета теплового взаимодействия многолетнемерзлых грунтов с вертикальными термостабилизаторами и заглубленным трубопроводом, включающие: а) учет технологических факторов изготовления конденсатора охлаждающего устройства и особенности его конструкции; б) обоснование корректности выбора параметров сезонного теплообмена поверхности массива грунта с атмосферой и положения нижней границы расчетной области; в) теоретически обоснованное условие теплообмена на границе контакта испарителя термостабилизатора с вмещающим грунтом; г) учет совокупного действия всех источников тепла (трубопровода, системы термостабилизаторов, поверхностных факторов); д) учет строения геологической среды (что увеличивает точность прогноза); е) разработанную на основе предлагаемой методики рабочую (вычислительную) программу для прогноза состояния грунтов основания заглубленного трубопровода на весь срок его эксплуатации и позволяющие прогнозировать распределение температуры в массиве пород на весь срок эксплуатации трубопровода. Модель реализована в среде Matlab.

5. Сопоставление некоторых промысловых данных мониторинга за температурой многолетнемерзлых грунтов вблизи вертикальных термостабилизаторов в районе строительства сооружений вблизи поселка Новый Порт с результатами прогнозного расчета показало хорошую сходимость величины остаточного охлаждения грунта к концу летнего периода, что свидетельствует о достоверности результатов, получаемых при помощи разработанной модели.

6. Исследование показало необходимость учета теплового влияния двух рядом стоящих термостабилизаторов при проведении прогнозных расчетов.

7. Сопоставление численной модели расчета теплового взаимодействия заглубленного горячего трубопровода с многолетнемерзлыми грунтами и точного решения Форхгеймера показало высокую сходимость, что свидетельствует об адекватности применяемого численного метода.

Публикации по теме диссертации в изданиях ВАК

1. Амосова Е.В., Кропачев Д.Ю., Паздерин Д.С. Система мониторинга температур протяженных объектов в многолетнемерзлых грунтах // Газовая промышленность. 2011. – №06(660) – с. 42-45.

2. Примаков С.С., Паздерин Д.С. О расчете теплообмена при проектировании конденсаторной части сезонно действующего охлаждающего устройства // Нефтяное хозяйство. 2013. – № 4 – с. 124-125.

3. Паздерин Д.С. Расчет ореола промерзания грунта вблизи двух сезоннодействующих охлаждающих устройств // Нефтяное хозяйство. 2014. – № 2 – с. 20-21.

4. Паздерин Д.С. Тепловое взаимодействие горячего подземного трубопровода с грунтом и сезонно-действующими охлаждающими устройствами // Нефтяное хозяйство. 2014. – № 5 – с. 102-104.

5. Паздерин Д.С. Влияние глобального потепления на термостабилизацию грунтов основания заглубленного трубопровода в условиях многолетнемерзлых грунтов // Нефтяное хозяйство. 2016. - № 7 с. 106-108.

в других изданиях

6. Феклистов В.Н., Долгих Д.Г., Окунев С.Н., Паздерин Д.С. Исследование охлаждающей системы типа ГЕТ для термостабилизации грунтовых оснований // Материалы международной конференция "Криогенные ресурсы полярных и горных регионов. Состояние и перспективы инженерного мерзлотоведения". 2008 г., с. 165-168.

7. Паздерин Д.С. Натурные исследования глубинных СОУ в условиях опытно-промышленного полигона // В сборнике материалов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых и специалистов, посвященной XX-летию создания ООО НПО «ФСА» «Стратегия инновационного развития, строительства и освоения районов Крайнего Севера», 2011, с. 47-51.

8. Паздерин Д.С. Сравнительные экспериментальные исследования термостабилизаторов различной конструкции в климатической камере // Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых и специалистов, посвященной XX-летию создания ООО НПО «ФСА» «Стратегия инновационного развития, строительства и освоения районов Крайнего Севера», 2011, с. 173-180.

9. Паздерин Д.С., Гилев Н.Г. Экспериментальные исследования системы ГЕТ-460 на опытно-промышленном полигоне // Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых и специалистов, посвященной XX-летию создания ООО НПО «ФСА» «Стратегия инновационного развития, строительства и освоения районов Крайнего Севера», 2011, с. 255-264.

10. Долгих Г.М., Окунев С.Н., Стрижков С.Н., Паздерин Д.С., Гилев Н.Г. Исследования систем температурной стабилизации грунтов на опытно-промышленном полигоне // Материалы международной научно-практической конференции по инженерному мерзлотоведению, посвященной XX-летию ООО НПО «ФСА», 7-10 ноября 2011, г. Тюмень, с.36-42.

11. Долгих Г.М., Окунев С.Н., Паздерин Д.С., Гилев Н.Г. Исследование ТК с использованием климатических камер и в условиях опытно-промышленного полигона // Материалы международной научно-практической конференции по инженерному мерзлотоведению, посвященной XX-летию ООО НПО «ФСА», 7-10 ноября 2011, г. Тюмень, с.88-94.

12. Паздерин Д.С. Расчет промерзания грунта вблизи двух сезоннодействующих охлаждающих устройств // Материалы XVIII научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Проблемы развития газовой промышленности Сибири-2014», Тюмень, 20-22 мая 2014.

13. Паздерин Д.С. Расчет теплообмена при проектировании конденсаторной части одиночного сезонно-действующего охлаждающего устройства // В сб. тезисов

Тюменского международного инновационного форума «НефтьГазТЭК-2013», Тюмень, 2013.

14. Долгих Г.М., Вельчев С.П., Окунев С.Н., Паздерин Д.С. Опыт строительства свайных оснований с термостабилизаторами при обустройстве Бованенковского месторождения // Системы температурной стабилизации грунтов оснований в криолитозоне: Актуальные вопросы исследований, расчетов, проектирования, производства, строительства, авторского надзора и мониторинга/науч. ред. Г.М. Долгих; НПО «ФСА». – Новосибирск: Академическое издательство «Гео», 2014. – с. 181-185.