

## ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертацию Паздерина Дмитрия Сергеевича

**«Динамика теплового состояния многолетнемерзлых грунтов в основании заглубленного трубопровода с применением охлаждающих устройств (термостабилизаторов)»**, представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук, по специальности 25.00.08 – инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение.

**1. Актуальность темы диссертации.** Добыча углеводородов в России смещается в Арктические регионы, для которых своевременное решение вопросов надежности, экономичности и экологической безопасности объектов добычи, подготовки и транспорта имеет повышенное значение. Одним из фрагментов этой общей проблемы является решение указанных вопросов для трубопроводных транспортных систем углеводородов, которые по пути к потребителю пересекают протяженные области распространения многолетнемерзлых грунтов (ММГ). К настоящему моменту здесь имеется ряд недостаточно разрешенных теоретических проблем расчетного характера, которые должны обеспечивать качественное проектирование прокладки трубопроводов в этих районах. Так, при подземном способе прокладки горячего трубопровода в районах распространения многолетнемерзлых грунтов в период его эксплуатации происходит нарушение теплового состояния грунтового основания, которое, вследствие естественной неоднородности свойств грунтов вдоль трассы носит, как правило, неравномерный характер. Неравномерное оттаивание и изменение (ослабление) свойств мерзлых грунтов с повышением их температуры приводит к неравномерным деформациям трубопровода и, как следствие – к повышению внутренних напряжений в его стенке. При наличии достаточно полной информации о свойствах грунтов вдоль трассы качественное проектирование конструкции трубопровода (как и обоснование способа его прокладки) может быть осуществлено только на основе теплотехнического прогноза динамики температурного поля в его основании с учетом тепловыделений от самого

трубопровода и действия дополнительных охлаждающих элементов (термостабилизаторов), которые могут быть применены для сокращения глубины оттаивания и уменьшения ее неравномерности вдоль трассы. Однако, даже при наличии достаточно полной исходной информации для решения прогнозной теплотехнической задачи на сегодняшний день остаются нерешенными ряд проблем, связанных с недостаточной разработанностью самих методов решения прогнозной задачи. Так, в известных работах по определению температурного поля грунтов в основании трубопровода с применением термостабилизаторов не учитываются конкретные конструктивные и технологические особенности исполнения конденсатора, влияющие на его теплообмен с атмосферой. Для испарителя устройства отсутствуют обоснованные и понятно сформулированные условия теплообмена с вмещающим грунтом, что не позволяет адекватно отразить влияние охлаждающих устройств на динамику теплового состояния грунтов основания. Недостаточно обоснованы граничные условия теплообмена на поверхности массива грунта и критерии выбора положения нижней границы расчетной области. Отсутствуют достаточно обоснованные модели и методы, учитывающие совместное тепловое влияние трубопровода и системы термостабилизаторов на грунты основания. Кроме того, отсутствуют сколь-нибудь завершенные расчетные модели и вычислительные алгоритмы, достаточно полно учитывающие весь комплекс влияющих факторов рассматриваемой прогнозной задачи на весь срок эксплуатации сооружения (трубопровода).

Данная работа направлена на качественное улучшение методов геокриологического прогноза состояния грунтов основания трубопровода при подземном способе прокладки с применением специальных средств охлаждения (термостабилизаторов) на весь срок его эксплуатации, что, несомненно, является актуальной задачей.

**2. Научная новизна.** Научная новизна выполненной диссертационной работы сформулирована в защищаемых положениях и включает три существенных момента:

- впервые выполнен анализ влияния технологии изготовления конденсатора термостабилизатора из биметаллической заготовки на эффективность работы устройства и показана возможность существенного вклада термического сопротивления воздушного зазора между корпусом устройства и оребрением на его коэффициент теплообмена с атмосферой;

- впервые дано обоснование процедуры корректного выбора граничных условий на верхней поверхности массива грунта и положения нижней границы расчетной области, обеспечивающих привязку метода расчета состояния грунтов в основании сооружений к конкретному району строительства и существенно повышающих точность прогноза;

- впервые разработана комплексная методика и алгоритм прогнозного расчета теплового состояния грунтов основания при совместном воздействии трубопровода (при подземном способе прокладки) и системы охлаждающих устройств (термостабилизаторов), включающая: а) учет технологических факторов изготовления конденсатора охлаждающего устройства и особенности его конструкции; б) обоснованный выбор параметров 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.

### **3. Практическая значимость работы.**

Выполненный анализ влияния технологии изготовления конденсатора на эффективность работы термостабилизатора позволяет наметить способ снижения термического сопротивления теплоотдачи от устройства к атмосфере применением консистентных заполнителей в местах контакта корпуса устройства с элементами оребрения.

Выполненное обоснование корректности применяемых методов повышает надежность и точность прогнозных теплотехнических расчетов при проектировании термостабилизации грунтов и конструктивных схем прокладки трубопровода в районах распространения мнг.

Разработанные вычислительные инструменты позволяют прогнозировать температурное поле многолетнемерзлых грунтов на весь срок эксплуатации трубопровода, что повышает надежность его эксплуатации. Кроме того, это позволяет заблаговременно выделить проблемные участки и оптимизировать проектные работы по созданию сети мониторинга вдоль трассы трубопровода.

Разработанные методы могут быть рекомендованы проектным институтам для проектирования термостабилизации грунтов оснований заглубленного трубопровода проложенного в условиях многолетнемерзлых грунтов, а также производителям термостабилизаторов при их производстве.

**4. Достоверность полученных результатов.** В диссертационной работе оценка достоверности результатов проводилась для каждого нового алгоритма и модели путем сопоставления с известными точными частными решениями и с результатами промысловых наблюдений. Так, при тестировании предложенного метода численного расчета температурного поля вокруг заглубленного трубопровода проведено сопоставление его результатов на период в 100 лет со стационарным положением границы оттаивания (решение Форхгеймера). При этом результаты вычислений совпали с точностью 98%. Сопоставление численных расчетов температурных полей вокруг одиночного термостабилизатора с данными измерений температуры в натуральных условиях также показали хорошую сходимость остаточного охлаждения на конец летнего периода. Таким образом, подтверждается достоверность основных полученных результатов. Основные выводы, приведенные в диссертации обоснованы, использованием классических положений строительной механики, теории упругости, механики грунтов, вариационного исчисления, математического и регрессионного анализа и другими методами современных научных исследований.

**5. Публикации и апробация работы.** По теме диссертации автором опубликовано 14 работ, 5 из которых в журналах рекомендованных ВАК. Материалы диссертационной работы докладывались на отечественных и международных научных конференциях.

**6. Основное содержание диссертации.** Рассматриваемая диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Работа изложена на 204 страницах машинописного текста, включает 129 рисунков и 9 таблиц. Список литературы содержит 148 ссылок.

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, представлены цель и задачи работы, охарактеризованы научная новизна и практическая значимость полученных результатов, сформулированы выносимые на защиту положения, отмечен личный вклад автора и приведены данные об апробации работы.

**В первой главе** работы проведен литературный обзор, посвященный методам и моделям расчета теплообмена в многолетнемерзлом грунте. Проанализированы материалы и статьи, описывающие задачу расчета температурных полей в основании сооружений, возводимых с применением естественно-конвективных охлаждающих устройств. Исследована изученность теплообмена ребренного конденсатора термостабилизатора с атмосферой, внутренние процессы в корпусе трубы термостабилизатора и внешняя задача на контакте его испарителя и грунта.

При анализе существующих подходов отмечен ряд нерешенных вопросов, касающихся в частности: а) критериев эффективности применения конденсатора термостабилизатора с точки зрения повышения холодопроизводительности и экономичности устройства; б) способов оценки степени влияния контактных термических сопротивлений на коэффициент теплопередачи от воздуха к конденсатору, изготовленному из биметаллической заготовки; в) обоснования корректности и способа выбора верхнего граничного условия теплообмена на контакте грунта и атмосферы, а также способа задания положения нижней границы расчетной области, что может привести к серьезным ошибкам при

прогнозных расчетах; г) разработки сколь ни будь завершенных расчетных моделей и вычислительных алгоритмов, достаточно полно учитывающих весь комплекс влияющих факторов в рассматриваемой прогнозной задаче на весь срок эксплуатации сооружения (трубопровода).

**Во второй главе** рассматриваются методы расчета теплообмена конденсатора термостабилизатора с атмосферным воздухом при монометаллическом и биметаллическом вариантах нанесения оребрения. В главе определен коэффициент теплоотдачи с поверхности конденсатора термостабилизатора с учетом геометрических особенностей параметров, а также материала оребрения. Для этого определен коэффициент эффективности (КПД) ребра и учтено изменение скорости набегающего потока воздуха в сечении между ребрами. Особое место во второй главе занимает вопрос теплопередачи через конденсатор выполненных в виде оребренных биметаллических труб. Получена модель расчета оптимальных параметров конструкции конденсатора. Показано значительное влияние термического контактного сопротивления на интенсивность теплопередачи биметаллических конденсаторов и намечен путь повышения коэффициента теплоотдачи от конденсатора к атмосферному воздуху с помощью консистентных смазок, обеспечивающих плотный контакт между корпусом устройства и оребрением.

**В третьей главе** диссертационной работы предложена методика численного моделирования динамики теплового поля грунта вокруг термостабилизатора. Особенность метода заключается в применении теоретически обоснованной формулировке граничного условия на контакте термостабилизатора и грунта. При этом коэффициент теплопередачи от испарителя в грунт определяется как произведение коэффициента теплоотдачи надземной конденсаторной части и отношения площади конденсаторной части термостабилизатора к площади его испарителя. В главе выполнено обоснование алгоритма корректного выбора параметров теплообмена на верхней границе расчетной области. Особенность алгоритма заключается в подгонке коэффициента теплообмена с поверхности в грунт на основе соответствия эмпирически установленным на стадии изысканий

параметрам – глубине сезонного оттаивания и температуре на глубине нулевых колебаний. Конкретными вычислениями показано, что при если выбор граничных условий не отвечает критерию корректности, то глубина оттаивания под трубой может кратно отличаться от реальных значений, что может значительно снизить надежность проектируемых конструктивных решений.

Все представленные результаты сопоставлены с известными точными зависимостями и хорошо согласуются с данными натурных измерений, полученными при участии автора.

**Четвертая глава** диссертации в ее первой части посвящена решению прикладных задач. Исследовано совместное тепловое влияние двух вертикальных термостабилизаторов на температурное поле многолетнемерзлых грунтов. В отличие от третьей главы решение задачи выполнялось в трехмерном пространстве. На основании полученных результатов расчетов автор отмечает, что если не учитывать в расчетах взаимное влияние термостабилизаторов, то зона охлаждения будет гораздо меньше, и количество термостабилизаторов придется устанавливать больше.

Заключительная часть главы содержит решение комплексной задачи – создание методики расчета динамики температурного поля в многолетнемерзлых грунтах основания заглубленного трубопровода, проложенного с использованием термостабилизаторов, на весь срок его эксплуатации.

Таким образом, автором разработана комплексная физико-математическая модель и численный метод расчета, учитывающие широкий спектр влияющих факторов (технологические факторы изготовления конденсатора и особенности его конструкции; обоснование корректности выбора параметров сезонного теплообмена поверхности массива грунта с атмосферой и положения нижней границы расчетной области; теоретически обоснованное условие теплообмена на границе контакта испарителя термостабилизатора с вмещающим грунтом; учет совокупного действия всех источников тепла; учет строения геологической среды; разработанную на основе предлагаемой методики вычислительную программу) и являющиеся достаточно совершенным инструментом для

определения динамики изменения температуры грунта вокруг заглубленного сооружения (трубопровода) с применением вертикальных термостабилизаторов.

### **Замечания к диссертации.**

По диссертации имеются следующие замечания:

1) В обзорной главе 1 проработка существующих подходов выполнена недостаточно глубоко. В России накоплен большой опыт эксплуатации трубопроводов в сложных природно-климатических условиях. Выполнен обзор литературных источников и анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований учёных по прочности, проблемам организации систем мониторинга, диагностирования и устойчивости трубопроводов - Бородавкина П.П., Ясина Э.М., Быкова Л.И., Черникина В.И., Березина В.Л., Васильева Г.Г., Айнбиндера А.Б., Гумерова А.Г., Азметова Х.А., Камерштейна А.Г., Кушнира С.Я., Горковенко А.И., Малюшина Н.А. и др.

2) При выполнении прогнозных расчетов не учитывается возмущающее влияние строительно-монтажных работ по укладке трубопровода на изменение начальной температуры грунтов и возникающий в связи с этим отклик в результатах расчета;

3) Что бы более конкретно оценить важность предлагаемых прогнозов по результатам выполненных в главе 3 расчетов было бы весьма целесообразно дать оценочные величины неравномерности оттаивания на конкретном участке (с заданными свойствами грунтов), диапазон возможного прогиба трубы и возникающие напряжения (в сравнении с предельно допустимыми) в случаях корректного и некорректного выбора рассматриваемых в главе 3 параметров.

4) Диссертация не свободна от орфографических и стилистических ошибок.

Вместе с тем, сделанные замечания не влияют на общую положительную оценку работы.

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».

## **7. Заключение.**

Рассматриваемая работа в целом представляется законченным научным исследованием, выполненном на достаточно высоком научном уровне. Выводы обоснованы и убедительны. Автореферат правильно отражает содержание работы. Таким образом, диссертационная работа **Паздерина Дмитрия Сергеевича** на тему **«Динамика теплового состояния многолетнемерзлых грунтов в основании заглубленного трубопровода с применением охлаждающих устройств (термостабилизаторов)»**, представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 25.00..08 – инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение, является законченной научно-квалификационной работой и соответствует требованиям ВАК, которые предъявляются к кандидатским диссертациям в п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», а Паздерин Дмитрий Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 25.00.08 – инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение.

Отзыв составлен доктором технических наук, профессором Юрием Дмитриевичем Земенковым.

Отзыв обсужден и одобрен на заседании кафедры «Транспорта углеводородных ресурсов» Тюменского индустриального университета, протокол заседания №22 от 13.04.2017 года.

Заведующий кафедрой

«Транспорт углеводородных ресурсов»,

доктор технических наук, профессор

Ю.Д. Земенков

ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет»

625000 Тюменская область, г. Тюмень

ул. Мельникайте, д. 70

Тел. +7 (3452) 28-30-53

e-mail: zemenkovjd@tyuiu.ru



*Сергей Иванович  
Мельник*