

На правах рукописи



КАЗАКОВА ТАТЬЯНА ИВАНОВНА

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ
И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ ГАЗОПРОВОДА
В МЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ**

2.8.5 – Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ухта – 2024

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

- Научный руководитель: Шишкин Иван Владимирович, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории надежности объектов газотранспортной системы отдела надежности и ресурса Северного коридора ГТС филиала ООО «Газпром ВНИИГАЗ» в г. Ухта.
- Официальные оппоненты: Шаммазов Ильдар Айратович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры транспорта и хранения нефти и газа ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»;
- Бурков Пётр Владимирович, доктор технических наук, с.н.с., профессор кафедры транспорта и хранения нефти и газа ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».
- Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет».

Защита диссертации состоится 11 декабря 2024 г. в 15 часов 40 мин. на заседании диссертационного совета 75.1.011.01 в ООО «Газпром ВНИИГАЗ», по адресу: 142717, Московская область, г.о. Ленинский, пос. Развилка, ул. Газовиков, зд. 15, стр. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ООО Газпром ВНИИГАЗ»: <https://vniigaz.gazprom.ru/professionalization/discouncil/511.001.03>.

Автореферат разослан

2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук

Татьяна Ивановна Лаптева

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Основную сложность при эксплуатации магистральных газопроводов (МГ) в арктической зоне представляет то, что в качестве их основания используются многолетнемерзлые грунты, являющиеся структурно неустойчивыми в талом состоянии. При оттаивании мерзлых грунтов околотрубного пространства формируются предпосылки к нарушению пространственного положения газопровода. Для минимизации теплового воздействия подземных газопроводов, осуществляющих транспортировку газа с положительной температурой, на мерзлоту при их проектировании принимаются различные технические решения, одним из которых является оборудование теплоизоляционным покрытием. На этапе проектирования конструктивные показатели трубной теплоизоляции принимаются на основании долгосрочных прогнозных теплотехнических расчетов по условию исключения оттаивания грунтов в течение всего срока эксплуатации. Общепринятые расчетные подходы ориентированы на предположение, что теплофизические характеристики теплоизоляции со временем не изменяются. Однако механическое взаимодействие газопровода с мерзлыми грунтами, взаимные перемещения грунта и газопровода на практике приводят к развитию дефектов и нарушений теплоизоляционных покрытий, что является причиной значительного снижения их фактической эффективности. Следовательно, при эксплуатации МГ требуется проведение уточняющих прогнозных теплотехнических расчетов, учитывающих факторы изменения фактической эффективности трубной теплоизоляции, и применение полученных данных при принятии управленческих решений.

В действующей нормативной документации по эксплуатации МГ, проложенных в условиях многолетнемерзлых грунтов, не предусмотрены мероприятия по периодическому контролю состояния теплоизоляционного покрытия, отсутствуют возможные схемы и критерии необходимости включения работ по его восстановлению в программу капитального ремонта участка, следовательно, исследования, направленные на устранение существующих нормативно-методических пробелов, являются актуальными.

Степень разработанности темы исследования

Степень разработанности темы исследования достаточно высока. Исследованиями в области оценки тепловых воздействий трубопроводов на околотрубные грунты и методов их снижения занимались такие ученые, как Айнбиндер А.Б., Баясан Р.М., Бородавкин П.П., Васильев Н.П., Дерцакян А.К., Иванцов О.М., Кривошеин Б.Л., Кузьбожев А.С., Мухаметдинов Х.К., Одишария Г.Э., Решетников А.Д., Сафонов В.С., Харионовский В.В., Хренов Н.Н., Шарыгин В.М., Черний В.П. и другие. При этом следует отметить, что в настоящее время в данной области знания имеется ряд актуальных вопросов, таких как, необходимость совершенствования методологической основы системы контроля состояния теплоизоляционного покрытия подземных МГ, а также разработки практических рекомендаций по способам его восстановления.

Цель работы

Повышение эксплуатационной надежности теплоизолированных газопроводов, проложенных в условиях многолетнемерзлых грунтов и осуществляющих транспортировку газа с положительной температурой, за счет разработки метода оценки фактического состояния сборной теплоизоляции и способов ее восстановления, обеспечивающих целостность и высокую эффективность покрытия в течение всего послеремонтного периода эксплуатации.

Задачи исследования:

1. Выполнить анализ отечественного опыта проектирования и эксплуатации подземных теплоизолированных газопроводов в условиях распространения мерзлых грунтов, выявить конструкционные недостатки существующих теплоизоляционных покрытий и механизмы формирования их повреждений.

2. Провести расчетно-экспериментальную оценку изменения интенсивности теплопередачи через теплоизоляционный слой из экструзионного пенополистирола при бездефектном состоянии и наличии имитаторов сквозных дефектов.

3. Исследовать пространственную и временную кинетику температурного поля грунтов околотрубного пространства при различных условиях дефектности сборной теплоизоляции газопровода.

4. Разработать метод оценки фактической эффективности сборной теплоизоляции газопровода в мерзлых грунтах и способы ее восстановления, обеспечивающие высокую теплоизоляционную эффективность покрытия в течение всего послеремонтного периода эксплуатации.

Научная новизна:

1. Разработан метод имитационной экспериментальной оценки функциональных показателей трубной теплоизоляции в бездефектном и дефектном состоянии, учитывающий параметры теплопереноса на границах модели «газопровод – теплоизоляция – мерзлый грунт», и способ его расчетного воспроизведения, механизм обработки полученных результатов. Расчетно-экспериментальным путем установлена зависимость, связывающая интенсивность теплопередачи от источника тепла в мерзлый грунт через плоский образец теплоизоляции из экструзионного пенополистирола и показатель относительной дефектности образца.

2. Предложен новый подход к расчетному прогнозируемому моделированию теплового взаимодействия теплоизолированного газопровода и грунта околотрубного пространства, позволяющий повысить достоверность получаемых результатов за счет определения краевых условий на границах расчетной модели на основании данных периодической термометрии грунта.

3. Расчетным путем обоснованы критерии оценки состояния трубных теплоизоляционных сегментных конструкций из органических вспененных жестких материалов по показателям достаточности при фактических температурных режимах эксплуатации и эффективности по сравнению с бездефектным состоянием.

Теоретическая значимость работы

Разработанные автором положения, посвященные расчетному обоснованию параметров пространственной и временной кинетики температурного поля околотрубных мерзлых грунтов при развитии дефектов теплоизоляционных покрытий, служат основой для совершенствования методов прогнозных теплотехнических расчетов эксплуатации МГ и позволяют повысить их точность.

Практическая значимость работы определяется тем, что:

- разработан метод оценки фактической эффективности сборной теплоизоляции подземного газопровода в мерзлых грунтах, основанный на комбинированной интерпретации результатов расчетных моделирований и трассовых измерений границ оттаивания и промерзания грунта в контрольных сечениях; определены условия его практического применения; сведения, полученные при реализации метода, должны учитываться при проведении уточняющих прогнозных теплотехнических расчетов эксплуатации МГ, установлении причин термоэрозионной деградации мерзлоты и принятии управленческих решений;

- разработаны рекомендации по сохранению существующего теплоизоляционного покрытия и методы его восстановления с применением специальных устройств для комплексной теплоизоляции и баллаستировки (патент на изобретение № 2823680 РФ, F16L 59/00, опубликован 29.07.2024), позволяющие оптимизировать технологию проведения ремонтных работ, обеспечить надежное закрепление теплоизоляции в течение всего срока эксплуатации, минимизировать риски деградации мерзлого грунта околотрубного пространства и, соответственно, повысить эксплуатационную надежность МГ;

- результаты исследования были использованы при составлении СТО Газпром трансгаз Ухта «Методы восстановления устойчивости магистральных газопроводов при образовании эксплуатационных нарушений теплоизоляционных покрытий в многолетнемерзлых грунтах», опыт применения стандарта на практике показывает, что нормативный документ может быть рекомендован для использования в других дочерних обществах ПАО «Газпром», имеющих в зоне ответственности подобные объекты.

Методология и методы исследования

При выполнении диссертационного исследования применялся комплексный подход, включающий научный анализ, планирование и проведение экспериментальных исследований, измерение, статистическую и регрессионную обработку результатов измерений, расчетное моделирование с использованием программной системы анализа методом конечных элементов, сравнение, абстрагирование, индукцию.

Положения, выносимые на защиту:

- расчетно-экспериментальное обоснование зависимости, связывающей интенсивность теплопереноса от источника тепла в мерзлый грунт через плоский образец теплоизоляции и показатель относительной дефектности образца;

- расчетное обоснование параметров пространственной и временной кинетики температурного поля околотрубных грунтов в зависимости от наличия равномерных или локальных нарушений сборной теплоизоляции газопровода;
- расчетное обоснование метода оценки фактической эффективности теплоизоляции подземного газопровода, эксплуатируемого на положительных температурных режимах в мерзлых грунтах;
- теоретическое обоснование методов восстановления теплоизоляционных покрытий с применением специальных устройств для комплексной теплоизоляции и балластировки.

Степень достоверности результатов и выводов

Проведена верификация собственных результатов расчетного моделирования методом конечных элементов с результатами экспериментальных исследований, а также с результатами теоретических, лабораторных, стендовых и промышленных испытаний других авторов. Получена сходимость результатов не менее 95 %.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались:

- на международных конференциях «Рассохинские чтения» (1 – 23 февраля 2024 г., 2 – 3 февраля 2023 г., 6 – 7 февраля 2020 г., 7 – 8 февраля 2019 г.);
- X научно-практической конференции молодых работников ИТЦ ООО «Газпром трансгаз Ухта» (16 ноября 2023 г.);
- заседании молодежного Ученого совета ООО «Газпром ВНИИГАЗ» (10 октября 2023 г.);
- научно-практической конференции молодых работников ООО «Газпром трансгаз Ухта» (5 – 8 декабря 2022 г., 23 – 26 октября 2018 г.);
- молодежной международной конференции «Новые технологии в газовой отрасли: опыт и преемственность» (24 – 26 мая 2022 г., 19 – 21 мая 2021 г.);
- 52-м межрегиональном вебинаре имени проф. И.Н. Андропова «Актуальные вопросы транспорта нефти и газа» (29 января 2021 г.);
- всероссийской научно-технической конференции «Проблемы геологии, разработки и эксплуатации месторождений и транспорта трудноизвлекаемых запасов углеводородов» (5 – 6 ноября 2020 г.);
- международной научно-технической конференции «Газотранспортные системы: настоящее и будущее» (GTS-2019) (23 – 25 октября 2019 г.);
- IV международной научно-технической конференции «Булатовские чтения» (31 марта 2020 г.);
- XXI международной молодежной научной конференции «Севергеозкотех-2020» (18 – 20 марта 2020 г.);
- международной научно-технической конференции имени профессора Н.А. Малюшина «Нефтегазовый терминал» (15 марта 2020 г.);
- семинаре-совещании «Повышение эффективности диагностического обслуживания газотранспортной системы ООО «Газпром трансгаз Ухта» (15 – 19 апреля 2019 г.);

– семинаре-совещании «Повышение уровня надежности эксплуатации линейной части МГ ООО «Газпром трансгаз Ухта» (16 – 20 апреля 2018 г.).

Соответствие паспорту специальности

Представленная диссертационная работа соответствует паспорту специальности 2.8.5 «Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ», а именно областям исследования по п. 1 «Технологические процессы и технические средства для проектирования, сооружения, эксплуатации, теоретические и практические основы взаимодействия объектов трубопроводного транспорта с окружающей средой с целью создания высокоэффективных, энерго- и ресурсосберегающих, надежных, механически и экологически безопасных сухопутных и морских систем трубопроводного транспорта для добычи, сбора, подготовки, транспортировки и хранения углеводородов, распределения, газоснабжения и нефтепродуктообеспечения, а также других газовых, жидкостных и многофазных сред, гидро- и пневмоконтейнерного транспорта» и п. 4 «Методы и средства информационных технологий, моделирования, мониторинга, прогнозирования, интеллектуального инжиниринга и управления, автоматизации и роботизации, стандартизации и цифровизации технологических процессов проектирования, сооружения, эксплуатации, диагностики, ремонта сухопутных и морских систем трубопроводного транспорта для добычи, сбора, подготовки, транспортировки и хранения углеводородов, распределения, газоснабжения и нефтепродуктообеспечения, а также других газовых, жидкостных и многофазных сред, гидро- и пневмоконтейнерного транспорта с целью повышения эффективности, надежности и безопасности использования отраслевого потенциала и ресурса трубопроводных конструкций».

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач научного исследования, анализе отечественных и зарубежных достижений в соответствующей области науки, непосредственной разработке методик проведения расчетных исследований и лабораторных экспериментов, обработке полученных результатов и выявлении математических зависимостей.

Автор принимал участие в апробации результатов исследования при проведении и интерпретации трассовых обследований теплоизолированных участков системы газопроводов Бованенково – Ухта ООО «Газпром трансгаз Ухта».

Сведения о публикациях автора

По теме диссертации опубликована 21 печатная работа, среди которых 7 – в ведущих рецензируемых изданиях, включенных в перечень ВАК при Минобрнауки РФ, в том числе один патент на изобретение.

Структура и объем работы: диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, содержит 159 страниц текста, 62 рисунка, 19 таблиц, список источников из 138 наименований и два приложения.

Содержание работы

Во введении обоснованы актуальность и значимость выбранной темы, степень ее разработанности, охарактеризованы научно-методические пути ее решения.

В первой главе проведен анализ отечественного опыта проектирования и эксплуатации теплоизолированных газопроводов в многолетнемерзлых грунтах.

Установлено, что в соответствии с действующей нормативной документацией при проектировании МГ выбор конструкции трубной теплоизоляции основывается на долгосрочных теплотехнических расчетах, однако существующие расчетные методики базируются на условии стабильности теплофизических характеристик теплоизоляционного покрытия и не учитывают изменения его эффективности из-за развития нарушений в процессе эксплуатации.

На основании анализа существующих решений трубной теплоизоляции предложена классификация (по материалу, параметрам нанесения, усиления и защиты) и определены основные типы применяемых конструкций.

По результатам анализа отечественного опыта эксплуатации теплоизолированных участков подземных МГ в многолетнемерзлых грунтах:

- установлено, что в ходе аэровизуальных и трассовых обследований на участках фиксируются массовые проявления термоэрозионной деградации околотрубных грунтов, выраженные односторонними и двухсторонними просадками и эрозионными размывами обвалования, что может быть обосновано снижением фактической эффективности теплоизоляционного покрытия за счет его физической дефектности;

- определено, что высокие механические эксплуатационные нагрузки приводят к увеличению показателей фактического влагонасыщения полимерных материалов теплоизоляции по сравнению со значениями, полученными по результатам лабораторных испытаний, а также способствуют разрушению сборных теплоизоляционных конструкций;

- выявлено, что установка внешнего гидроизоляционного защитного слоя, как правило, не обеспечивает повышения показателей эксплуатационной эффективности сборной теплоизоляции;

- определены основные схемы развития потенциально возможных повреждений сборного трубного теплоизоляционного покрытия.

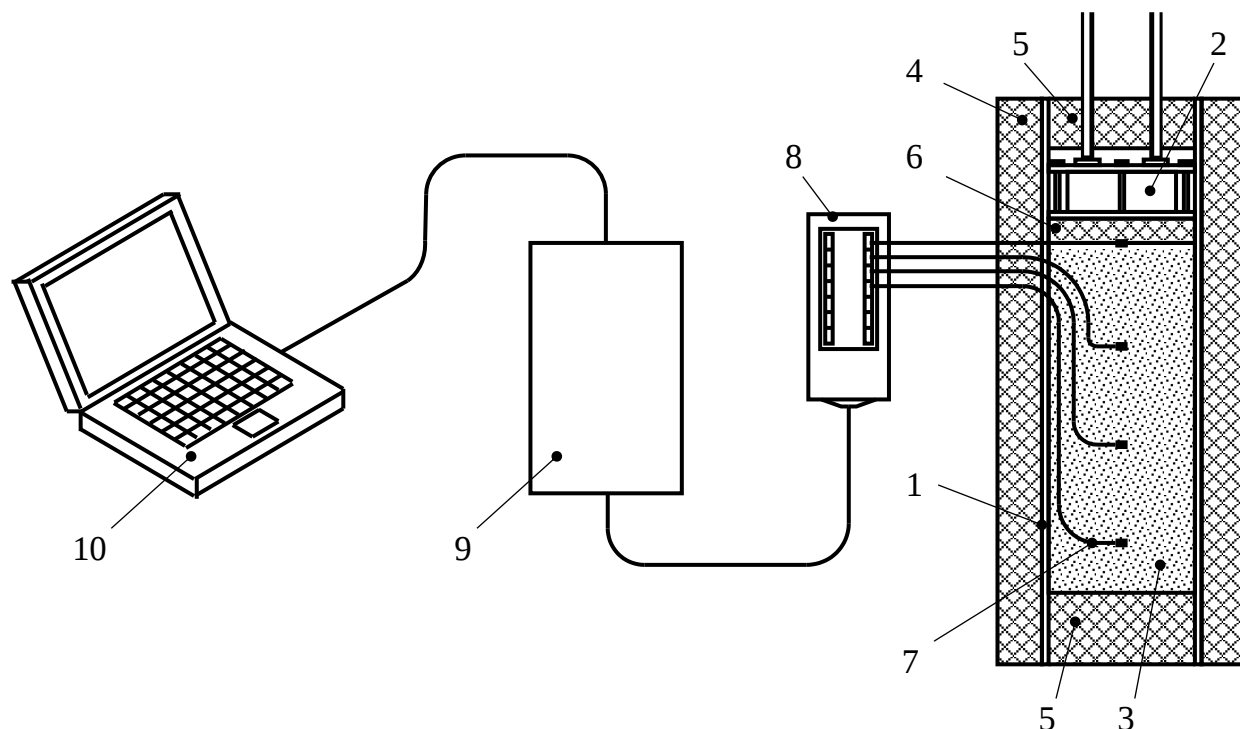
Во второй главе проведена расчетно-экспериментальная оценка изменения интенсивности теплопередачи через теплоизоляционный слой из экструзионного пенополистирола при бездефектном и различных дефектных состояниях.

Разработан метод имитационной лабораторной оценки функциональных показателей образца трубной теплоизоляции в бездефектном и дефектном состоянии, схема экспериментального стенда представлена на рисунке 1.

В результате реализации эксперимента получены значения скорости нагрева грунта при его взаимодействии с поверхностью теплообменника через плоские образцы теплоизоляции, имеющие дефектность 0, 50 и 100 %.

Для установления изменения скорости нагрева грунта от теплообменника через плоский образец теплоизоляции из экструзионного пенополистирола, в зависимости от его дефектности, выполнено комплексное расчетное

моделирование методом конечно-элементного анализа. Достоверность расчетной модели обеспечена верификацией результатов расчетного моделирования и экспериментальных данных с точностью не менее 95 %.



1 – корпус (оболочка); 2 – теплообменник; 3 – грунт; 4 – теплоизоляция корпуса;
5 – теплоизоляционные заглушки корпуса; 6 – плоский образец теплоизоляции;
7 – термоизмерительные датчики; 8 – коммутационный блок;
9 – многоканальный термометр; 10 – персональный компьютер

Рисунок 1 – Схема экспериментального стенда

Алгоритм расчетного моделирования представлен на рисунке 2.

Пример визуальных результатов моделирования приведен на рисунке 3.

В результате выполнения комплекса экспериментального и расчетного моделирований и интервальной оценки их результатов установлена зависимость изменения относительной интенсивности теплопередачи через плоский образец теплоизоляции из экструзионного пенополистирола от степени его дефектности, представленная на рисунке 4. Если исключить краевую точку при дефектности 0 % (бездефектное состояние), то найденная зависимость с достоверностью аппроксимации $R^2 = 0,999$ может быть описана квадратичной функцией:

$$I_{\text{Эп}} = -7,76 \cdot 10^{-5} \cdot \omega_{\text{по}}^2 + 1,65 \cdot 10^{-2} \cdot \omega_{\text{по}} + 0,12, \quad (1)$$

где $I_{\text{Эп}}$ – относительная интенсивность теплопередачи через плоский образец теплоизоляции из экструзионного пенополистирола, доли ед.;

$\omega_{\text{по}}$ – дефектность плоского образца теплоизоляции, %.

Таким образом, установлено, что наличие даже незначительных сквозных повреждений плоского образца теплоизоляционного покрытия будет приводить к существенному увеличению интенсивности теплопередачи между теплообменником и грунтом.

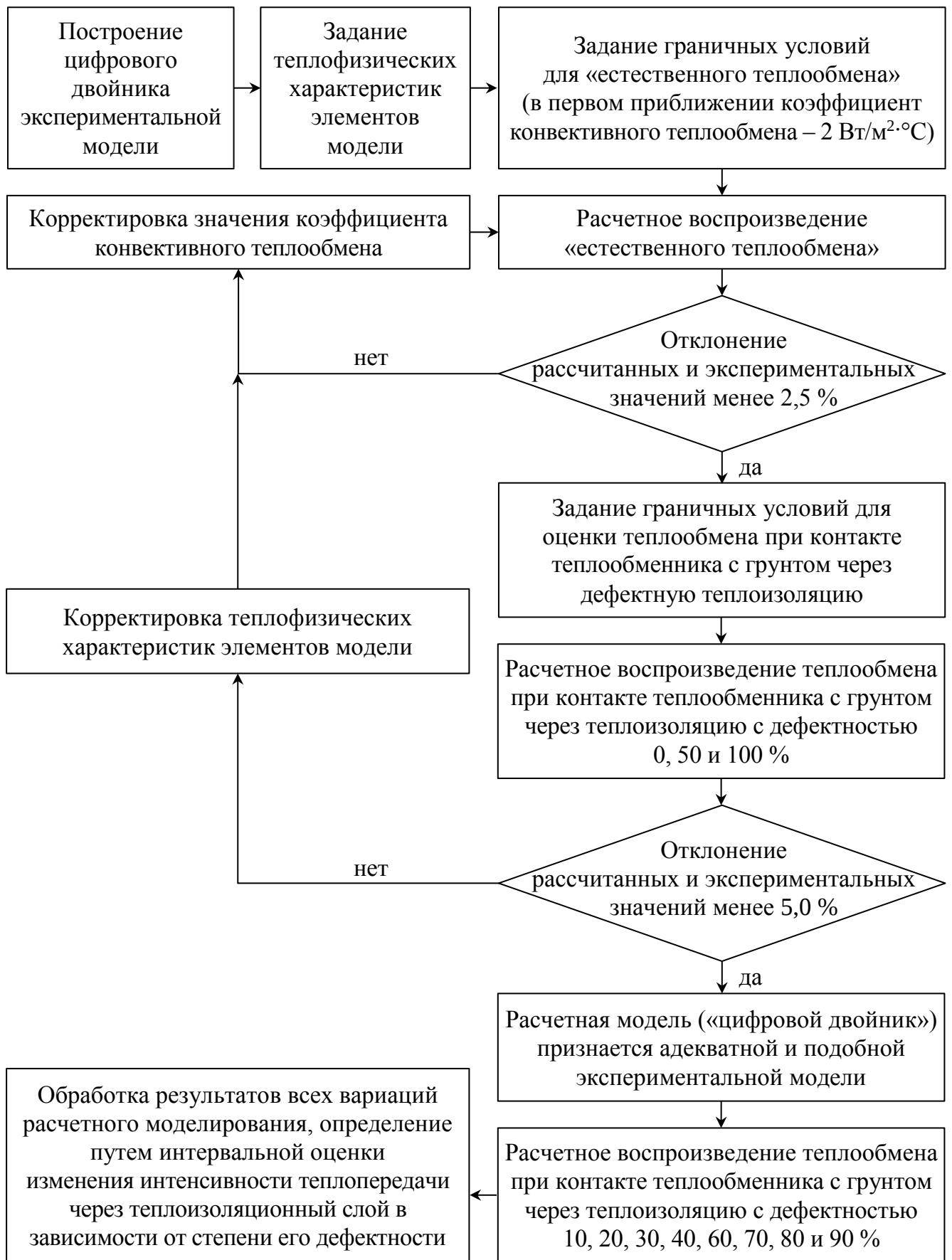


Рисунок 2 – Алгоритм расчетного моделирования оценки скорости нагрева мерзлого грунта при взаимодействии с теплообменником через плоский образец теплоизоляции при бездефектном и различных дефектных состояниях

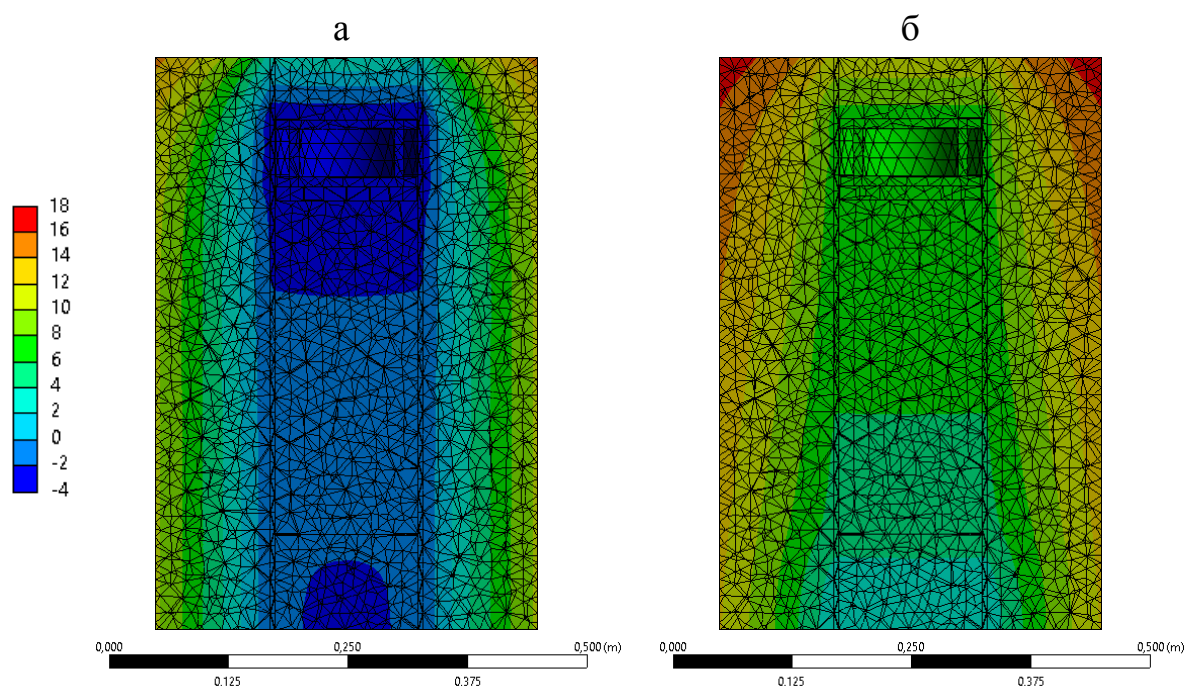


Рисунок 3 – Визуальные результаты моделирования температурных полей в момент времени $\tau = 30000$ с при воспроизведении вариации эксперимента:
 а – № 1 «Естественный теплообмен»; б – № 3 «Контакт теплообменника с грунтом через образец теплоизоляции с дефектностью 50 %»

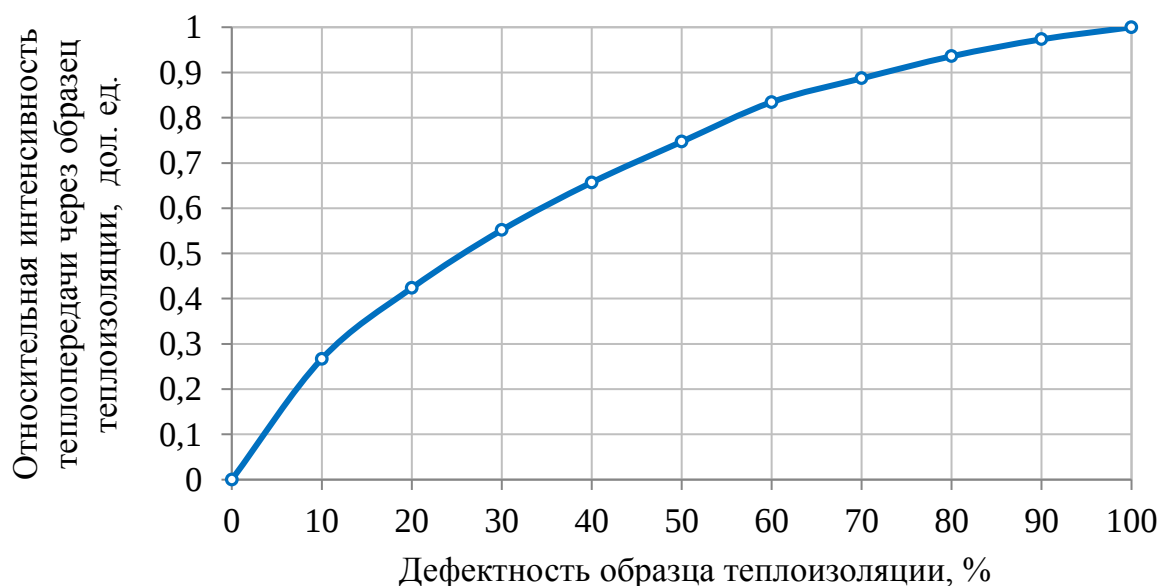


Рисунок 4 – Динамика относительной интенсивности теплопередачи через образец теплоизоляции в зависимости от степени его дефектности

В третьей главе выполнена адаптация стандартной методики прогнозного моделирования температурного режима многолетнемерзлых грунтов под задачу взаимодействия с подземным трубопроводом, оборудованным дефектной теплоизоляцией. Определены оптимальные параметры расчетной модели и перечень исходных данных, разработан алгоритм задания краевых условий на границах модели на основании фактических данных периодической термометрии грунта, проводимой в рамках геотехнического мониторинга (рисунок 5).

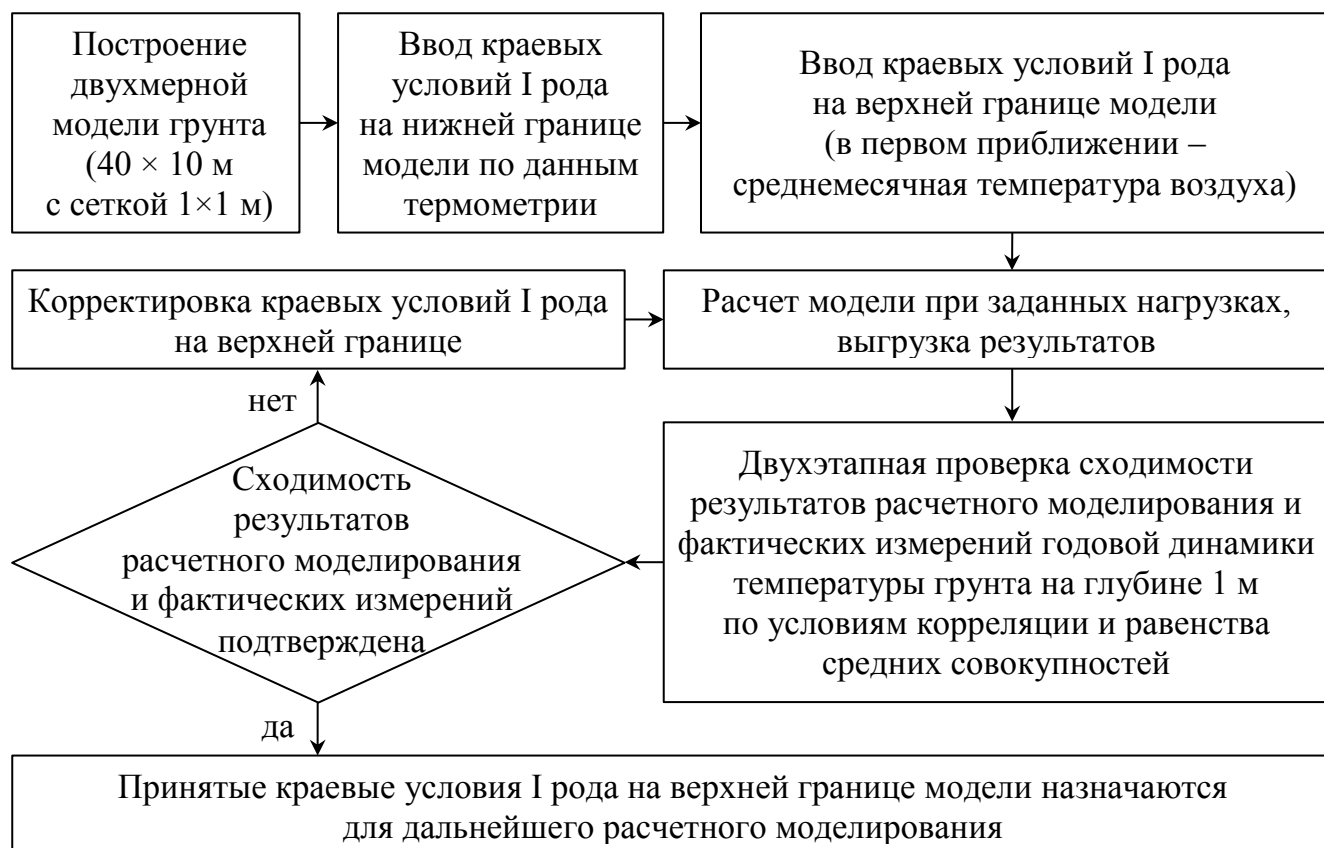


Рисунок 5 – Алгоритм определения краевых условий I рода на верхней границе расчетной модели на основании фактических результатов термометрии многолетнемерзлого грунта

Выполнено расчетное моделирование годовой динамики температурного поля грунта околотрубного пространства характерное для участка КС «Гагарацкая» – КС «Воркутинская» МГ Бованенково – Ухта для трех характерных случаев: естественные условия (газопровод отсутствует), газопровод оборудован теплоизоляционным покрытием с равномерной дефектностью от 0 до 100 % и газопровод оборудован теплоизоляционным покрытием, имеющим единичное сквозное локальное повреждение при вариативных сочетаниях его размеров и ориентационного положения. Пример визуальных результатов моделирования температурного поля грунта околотрубного пространства приведен на рисунке 6.

По результатам расчетного моделирования установлено следующее:

- при идеальном теплоизоляционном покрытии (равномерная дефектность $\omega = 0$ %) годовая динамика температурных полей околотрубного грунта подчиняется естественным процессам теплообмена с окружающей средой, а изменение прямолинейной конфигурации изотерм вблизи трубопровода объясняется экранирующим эффектом, соответственно, принятую проектом теплоизоляцию из экструзионного пенополистирола толщиной 100 мм в условиях ее идеального состояния можно считать достаточной и эффективной;

- при равномерной дефектности теплоизоляции температурное поле грунта околотрубного пространства описывается изотермами, симметричными относительно вертикальной центральной оси модели, при этом при равномерной дефектности $\omega = 5$ % ореол охлажденного грунта наблюдается в нижней зоне

газопровода в течение всего года, при дефектности $\omega = 15\%$ вокруг газопровода формируется ореол охлажденного грунта, а при дефектности $\omega = 25\%$ вокруг газопровода имеется устойчивый ореол талого грунта, что является потенциальной причиной нарушения пространственного положения газопровода;

– при отсутствии теплоизоляции в течение всего года вокруг трубопровода фиксируется устойчивый ореол оттаивания, при этом в период максимального растепления граница мерзлого грунта находится на расстоянии более 4 м от нижней образующей газопровода;

– при наличии локального дефекта теплоизоляции около него в течение всего года фиксируется ограниченный ореол оттаивания грунта, при этом его форма зависит от ориентационного положения дефектной зоны, а размеры – от ее габаритных показателей;

– теплообмен газопровода и околотрубного грунта при равномерной дефектности протекает интенсивнее, чем при аналогичном значении локальной дефектности в любом ее ориентационном положении.

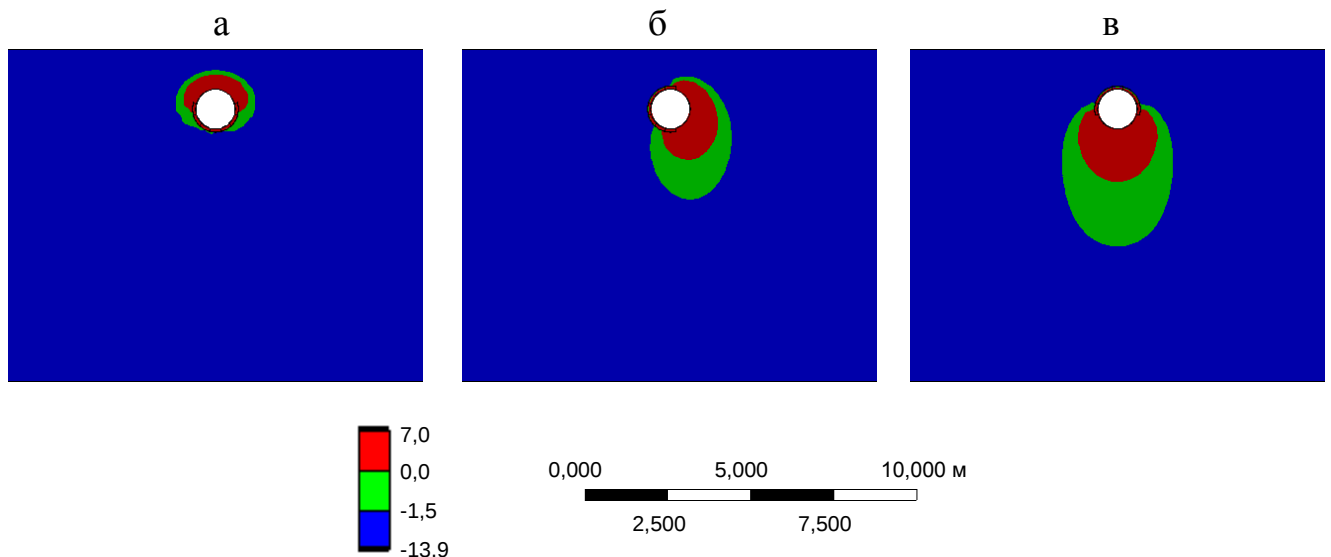


Рисунок 6 – Визуальные результаты моделирования температурного поля грунта околотрубного пространства в апреле (минимальные зоны оттаивания) при отсутствии пяти сегментов теплоизоляции (локальная дефектность $\omega = 41,7\%$) с часовой ориентацией центра дефектной зоны: а – 0 (12) ч; б – 3 ч; в – 6 ч

По результатам расчетного моделирования определена зависимость эффективности трубной теплоизоляции из экструзионного пенополистирола от степени ее равномерной дефектности (рисунок 7).

Выявленная зависимость носит сложный полиномиальный характер и не может быть достоверно описана простой функцией. Максимальное снижение эффективности теплоизоляции наблюдается при увеличении равномерной дефектности от 0 до 30 %, так при дефектности $\omega = 3,0\%$ эффективность теплоизоляции снижается на 20 % по сравнению с идеальным состоянием, при дефектности $\omega = 9,8\%$ эффективность снижается до 50 %, а при дефектности $\omega = 23,0\%$ составляет всего 25 %. Таким образом, если равномерная дефектность составляет более 23,0 %, то теплоизоляцию следует считать неэффективной.

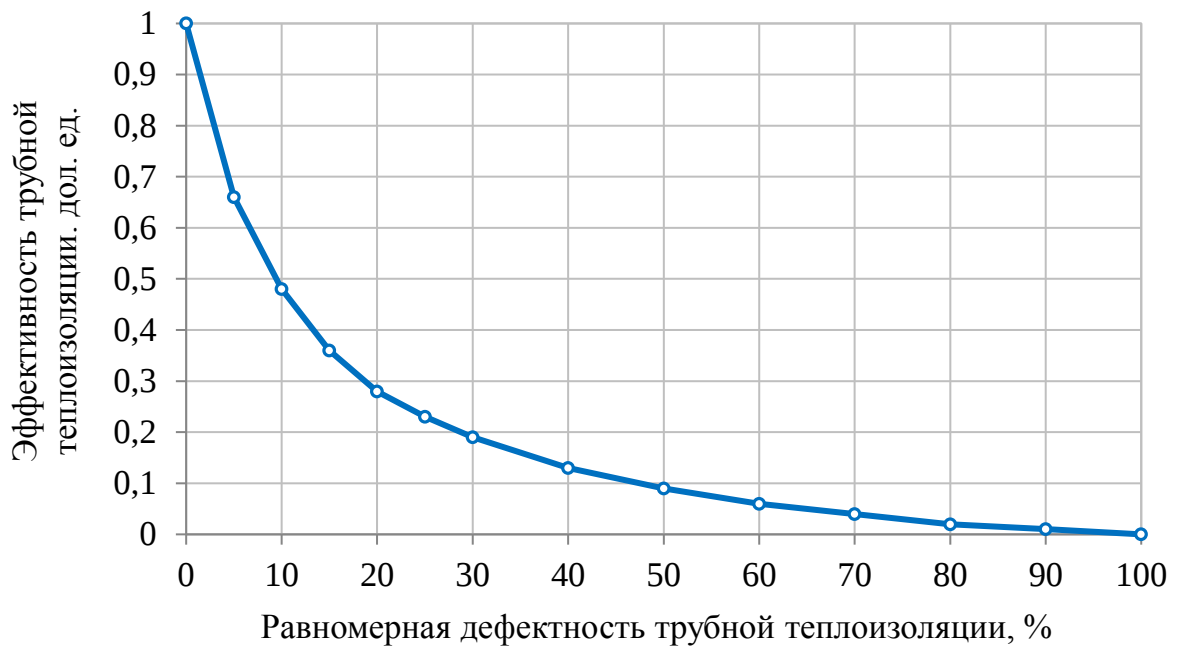


Рисунок 7 – Динамика эффективности трубной теплоизоляции из экструзионного пенополистирола в зависимости от степени ее равномерной дефектности, определенной по показателю суммарной площади талого и охлажденного грунта расчетной модели

При обработке результатов расчетного моделирования теплового взаимодействия околотрубного грунта и газопровода, оборудованного теплоизоляционным покрытием, имеющим локальный дефект, не удалось выявить зависимость, универсально связывающую размеры дефекта и часовой ориентации центра дефектной зоны с показателем суммарной площади талого и охлажденного околотрубного грунта в определенный период времени, что объясняется сложностью пространственно-динамических тепловых нагрузок в изучаемой системе и уникальностью каждой моделируемой ситуации.

Установлено, что динамика рассчитанной суммарной площади талого и охлажденного грунта модели, в зависимости от ориентационного положения центра дефектной зоны, носит гармонический характер. При этом, зная значения суммарной площади для двух расчетных ориентационных положений центра дефектной зоны 0 (12) ч и 6 ч, можно определить аналогичную величину для любого x -ого ориентационного положения:

$$S_{i,x} = S_{i,0} + \frac{S_{i,6} - S_{i,0}}{2} \cdot (\sin(x + \pi) + 1), \quad (2)$$

где $S_{i,0}$ и $S_{i,6}$ – суммарные площади талого и охлажденного грунта модели при наличии локального дефекта теплоизоляции с дефектностью $\omega_d = i$ и ориентационным положением центра дефектной зоны 0 (12) ч и 6 ч соответственно, м^2 ;

x – ориентационное положение центра дефектной зоны, выраженное в градусах.

В четвертой главе разработаны рекомендации по назначению способа восстановления теплоизоляции газопровода в мерзлых грунтах на основании оценки ее фактической эффективности.

Разработан метод оценки фактического состояния теплоизоляции подземного газопровода в мерзлых грунтах, основанного на комбинированной интерпретации результатов расчетных моделирований и трассовых измерений границ оттаивания и промерзания грунта в контрольных сечениях.

Алгоритм реализации метода представлен на рисунке 8, пример диаграммы интерпретации данных трассового обследования, построенной на основании обработки результатов расчетных моделирований, – на рисунке 9, аппарат первичной обработки трассовых замеров приведен в выражениях (3) – (6).

По результатам трассовых замеров для каждого контрольного сечения определяют:

1. Показатель относительной глубины границы оттаивания/промерзания околотрубного грунта ($\eta_{\text{отн}}$, ед.) по формуле

$$\eta_{\text{отн}} = \frac{h_{\text{л.2,5}} + h_{\text{п.2,5}}}{2 \cdot h_{\text{еу}}}, \quad (3)$$

где $h_{\text{л.2,5}}$, $h_{\text{п.2,5}}$ – глубина границы оттаивания/промерзания грунта, измеренная на расстоянии 2,5 м слева и справа от оси газопровода соответственно, м.

$h_{\text{еу}}$ – глубина границы оттаивания/промерзания грунта в естественных условиях (на расстоянии не менее $12d$ от оси газопровода), м.

2. Безразмерный коэффициент (ε , ед.) по формуле

$$\varepsilon = \frac{h_{\text{еу}} - h_{\text{омг}}}{d}, \quad (4)$$

где $h_{\text{омг}}$ – глубина заложения МГ (до оси), м;

d – диаметр газопровода, м.

В целом безразмерный коэффициент ε является условным эквивалентом оптимальности условий проведения обследований на участке. Применение разработанного метода контроля состояния теплоизоляционного покрытия ограничивается условием: $h_{\text{омг}} \leq h_{\text{еу}} \leq (h_{\text{омг}} + d)$, соответственно, $0 \leq \varepsilon \leq 1$.

На основании рассчитанных значений (3) и (4) по диаграмме интерпретации данных для каждого сечения определяются значения эквивалентной дефектности ($\omega_{\text{экр.}}$) и эффективности трубного теплоизоляционного покрытия ($\mathcal{E}$). Затем рассчитываются средние значения показателей в целом по обследуемому участку.

Эквивалентная дефектность теплоизоляционного покрытия газопровода на участке ($\omega_{\text{экр.уч}}$, %) определяется по выражению

$$\omega_{\text{экр.уч}} = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_{\text{экр.}i}}{n}, \quad (5)$$

где $\omega_{\text{экр.}i}$ – эквивалентная дефектность теплоизоляционного покрытия газопровода в i -ом контрольном сечении, %;

n – количество контрольных сечений на обследованном участке.

Эффективность теплоизоляционного покрытия газопровода на участке ($\mathcal{E}_{\text{уч}}$, дол. ед.) определяется по выражению

$$\mathcal{E}_{\text{уч}} = \frac{\sum_{i=1}^n \mathcal{E}_i}{n}, \quad (6)$$

где $\mathcal{E}_i$ – эффективность теплоизоляционного покрытия газопровода в i -ом контрольном сечении, дол. ед.

I. Подготовительный этап		II. Оценка достаточности предусмотренной проектом теплоизоляции при фактических температурных режимах эксплуатации на основании расчетного моделирования	
1	Сбор исходных данных о теплоизолированном участке МГ (анализ проектной, исполнительной и эксплуатационной документации, данных систематической термометрии мерзлых грунтов, проводимой в рамках геотехнического мониторинга)	Проектная теплоизоляция: – недостаточна (при фактических режимах эксплуатации на наружной поверхности бездефектной теплоизоляции газопровода в течение всего года наблюдается температура не меньше 0 °С); – достаточна (при несоблюдении условий недостаточности)	
2	Проведение расчетного моделирования годовой динамики температурного поля грунта в естественных условиях с калибровкой получаемых результатов по данным систематической термометрии мерзлых грунтов (алгоритм представлен на рисунке 5)	III. Трассовое обследование теплоизолированных участков газопровода с признаками термоэрозионной деградации околотрубных мерзлых грунтов	
3	Проведение расчетного моделирования годовой динамики температурного поля грунта околотрубного пространства в условиях оборудования газопровода теплоизоляцией с различной равномерной дефектностью	Разбивка участка на контрольные сечения с шагом не более 20 м вдоль оси МГ. Определение в контрольных сечениях глубины заложения МГ и границ оттаивания/промерзания околотрубного грунта в точках контроля, расположенных на расстояниях 2,5 м справа и слева, а также не менее 12d в любую сторону от оси МГ	
4	Обработка результатов моделирования, определение годовой динамики глубины границы оттаивания/промерзания грунта на расстоянии 2,5 м от оси газопровода и в естественных условиях	IV. Оценка эффективности теплоизоляции подземного газопровода в мерзлых грунтах по результатам трассового обследования	
5	Оценка динамики относительной глубины границы оттаивания/промерзания околотрубного грунта при обустройстве газопровода теплоизоляцией с различной равномерной дефектностью	1	Обработка результатов трассового обследования в соответствии с формулами (3) – (6) и диаграммой интерпретации данных, определение эквивалентной дефектности ($\omega_{\text{экв.уч}}$) и эффективности ($\mathcal{E}_{\text{уч}}$) теплоизоляции на участке МГ
6	Построение диаграммы для интерпретации данных трассового метода оценки фактического состояния трубного теплоизоляционного покрытия подземного газопровода в мерзлых грунтах	2	Оценка фактического состояния теплоизоляции на участке МГ: – эффективная: $\omega_{\text{экв.уч}} \leq 5,0 \%$, $\mathcal{E}_{\text{уч}} > 0,65$; – с пониженной эффективностью: $5 \% < \omega_{\text{экв.уч}} \leq 23 \%$, $0,25 < \mathcal{E}_{\text{уч}} \leq 0,65$; – неэффективная $\omega_{\text{экв.уч}} > 23,0 \%$, $\mathcal{E}_{\text{уч}} \leq 0,25$

Рисунок 8 – Алгоритм реализации метода оценки фактического состояния теплоизоляции подземного газопровода в мерзлых грунтах

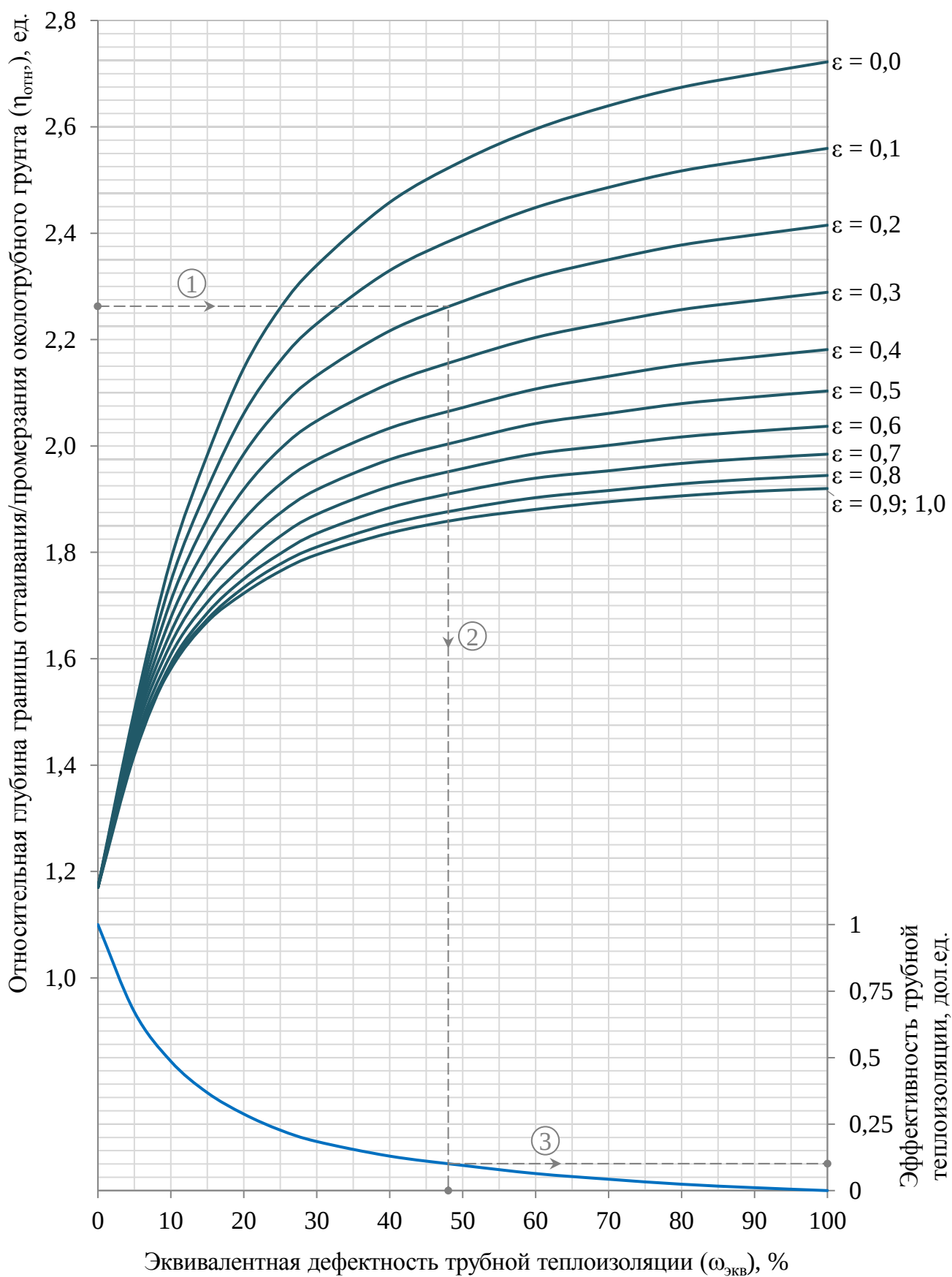


Рисунок 9 – Диаграмма интерпретации данных трассового метода оценки фактического состояния трубной теплоизоляции (грунт – супесь, среднегодовая температура эксплуатации 7 °С, климатические условия эксплуатации участка КС «Гагарацкая» – КС «Воркутинская» МГ Бованенково – Ухта)

Предложена классификация состояния теплоизоляции по показателям достаточности и фактической эффективности:

- если при расчетном моделировании установлено, что при фактических режимах эксплуатации на наружной поверхности бездефектной теплоизоляции газопровода в течение всего года наблюдается температура не меньше $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, то ее следует признать недостаточной, в других случаях – достаточной;

- если в ходе трассового обследования установлено, что эквивалентная дефектность на участке МГ составляет $\omega_{\text{экв.уч}} \leq 5,0\%$, а эффективность $\mathcal{E}_{\text{уч}} > 0,65$, то теплоизоляция является эффективной;

- если эквивалентная дефектность находится в диапазоне $5\% < \omega_{\text{экв.уч}} \leq 23\%$ и эффективность $0,25 < \mathcal{E}_{\text{уч}} \leq 0,65$, то теплоизоляция – с пониженной эффективностью;

- если эквивалентная дефектность $\omega_{\text{экв.уч}} > 23,0\%$ и эффективность $\mathcal{E}_{\text{уч}} \leq 0,25$, то теплоизоляция – неэффективная.

Предложена интеграция разработанного метода определения фактического состояния теплоизоляции в существующую систему организационно-технических мероприятий по диагностированию теплоизолированных участков подземных газопроводов в мерзлых грунтах и принятию управленческих решений.

Предложено включение мероприятий по сохранению и восстановлению теплоизоляционного покрытия в комплекс капитальных ремонтных работ на подземном газопроводе.

В качестве примера на рисунке 10 представлена схема проведения работ по подсадке участка газопровода с балластировочными утяжелителями по условию минимизации необходимых перемещений газопровода.

Разработаны критерии назначения оптимальных схем ремонта трубных теплоизоляционных покрытий (таблица 1), учитывающие фактическое состояние существующей теплоизоляции и условия проведения ремонтных работ участка газопровода, с обоснованием следующих вариантов восстановления:

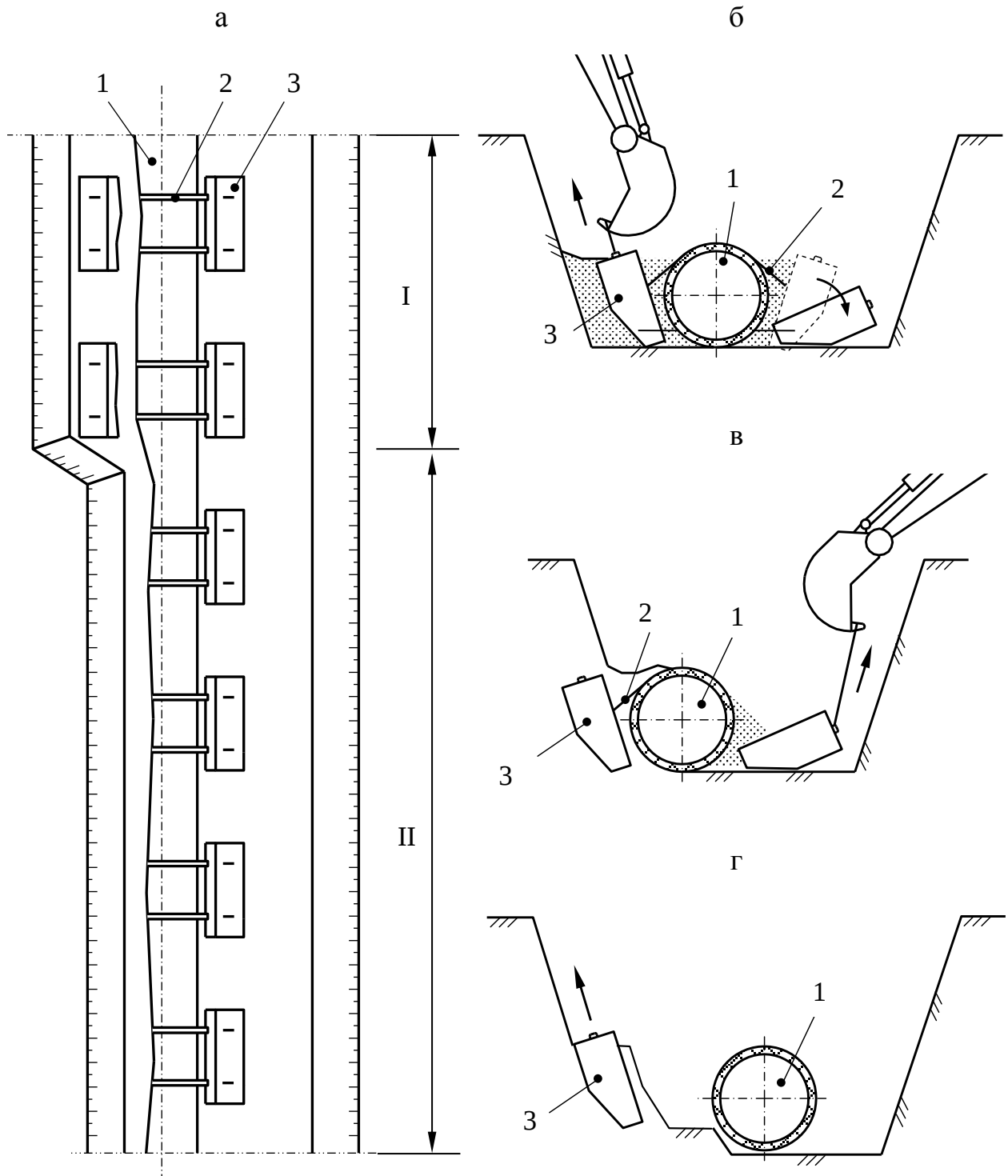
- 1) замена существующей теплоизоляции на новую аналогичную (из новых сегментов или комбинированно из новых и целых бывших в эксплуатации), монтируемую с помощью устройства для комплексной теплоизоляции и балластировки;

- 2) замена существующей теплоизоляции на новую усиленную, монтируемую с помощью устройства для комплексной теплоизоляции и балластировки;

- 3) выборочная замена поврежденных сегментов на новые, установка устройства упрощенной конструкции для комплексной теплоизоляции и балластировки газопровода;

- 4) выборочная замена поврежденных сегментов на новые, монтаж дополнительного сегментного теплоизоляционного покрытия с помощью устройства для комплексной теплоизоляции и балластировки;

- 5) выборочная замена поврежденных сегментов на новые, монтаж дополнительного листового утеплителя с предварительным закреплением стяжными хомутами и последующей установкой устройства упрощенной конструкции для комплексной теплоизоляции и балластировки газопровода.



I – участок одновременного демонтажа железобетонных утяжелителей;
 II – участок последовательного демонтажа железобетонных утяжелителей;
 1 – теплоизолированный участок МГ; 2 – силовой пояс железобетонного балластирующего устройства; 3 – железобетонное балластирующее устройство
 Рисунок 10 – Схема выполнения работ по демонтажу железобетонных балластирующих устройств: а – план траншеи; б – поперечное сечение траншеи на участке одновременного демонтажа балластирующих устройств; в – поперечное сечение траншеи на участке последовательного демонтажа балластирующих устройств; г – формирование траншеи заданного профиля, боковое перемещение участка МГ, извлечение оставшихся утяжелителей

Таблица 1 – Рекомендуемые методы восстановления теплоизоляционного покрытия подземного газопровода

Условие проведения ремонтных работ	Фактическое состояние существующей теплоизоляции	Рекомендуемые методы восстановления теплоизоляции
При ремонте требуется обеспечение доступа к изоляции и стенке трубы	Достаточная	1
	Недостаточная	2
При ремонте не требуется обеспечение доступа к изоляции и стенке трубы (устранение нарушений пространственного положения МГ)	Достаточная эффективная или с пониженной эффективностью	1, 3
	Достаточная неэффективная	1
	Недостаточная эффективная или с пониженной эффективностью	2, 4, 5
	Недостаточная неэффективная	2

Схема устройства для комплексной теплоизоляции и балластировки (патент РФ № 223680, F16L 59/00, опубликован 29.07.2024) представлена на рисунке 11, упрощенная конструкция отличается отсутствием торцевых упоров.

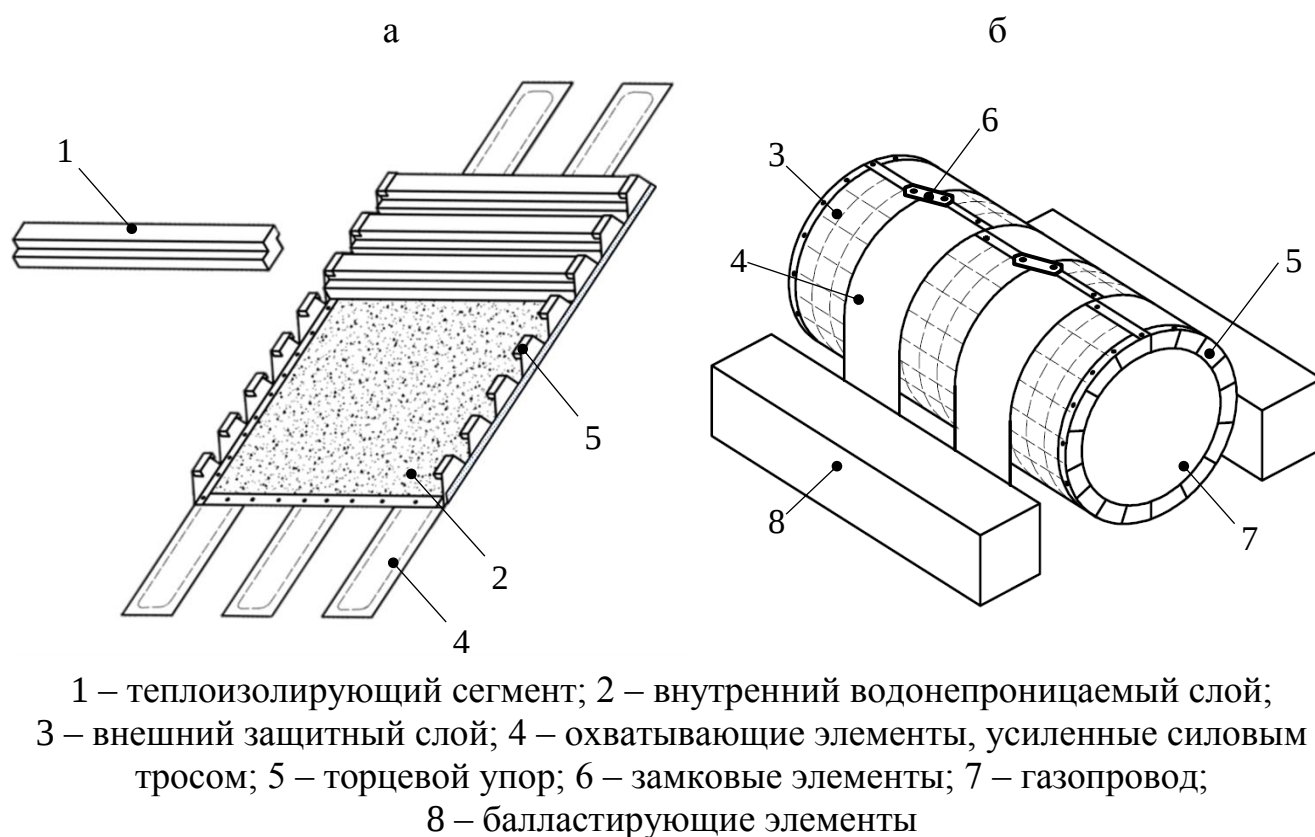


Рисунок 11 – Устройство для комплексной теплоизоляции и балластировки газопровода: а – корпус устройства; б – внешний вид в смонтированном состоянии

Основные выводы

1. Проанализирован опыт эксплуатации отечественных газопроводов, оборудованных сборной теплоизоляцией и эксплуатируемых в условиях многолетнемерзлых грунтов. Установлено, что на теплоизолированных участках часто фиксируются проявления экзогенных геологических процессов, следовательно, фактическая эффективность покрытия ниже ожидаемой, заложенной при проектных моделированиях. Определены конструкционные недостатки теплоизоляции и схемы развития потенциальных повреждений.

2. Разработана и реализована методика расчетно-экспериментальной оценки функциональных показателей образца трубной теплоизоляции в бездефектном и дефектном состоянии, основанная на оценке интенсивности теплопереноса между теплоизолируемыми средами. Установлено, что зависимость, связывающая интенсивность теплопереноса от источника тепла в мерзлый грунт через плоский образец теплоизоляции из экструзионного пенополистирола и показатель его дефектности, может быть описана полиномом второй степени (1).

3. Предложен новый подход к расчетному прогнозируемому моделированию теплового взаимодействия теплоизолированного газопровода и грунта околотрубного пространства, позволяющий повысить достоверность получаемых результатов за счет определения краевых условий на границах расчетной модели на основании фактических данных периодической термометрии грунта, проводимой в рамках геотехнического мониторинга газопровода (см. рисунок 5). По результатам расчетного моделирования определено, что зависимость эффективности трубной теплоизоляции из экструзионного пенополистирола от степени ее равномерной дефектности (см. рисунок 7) носит сложный полиномиальный характер, а динамика рассчитанной суммарной площади талого и охлажденного грунта модели, в зависимости от ориентационного положения центра дефектной зоны локального дефекта, подчиняется гармоническим законам.

4. Разработан метод оценки фактического состояния теплоизоляции подземного газопровода в мерзлых грунтах, основанный на комбинированной интерпретации результатов расчетных моделирований и трассовых измерений границ оттаивания и промерзания грунта в точках контроля. Предложена классификация состояния теплоизоляции по показателям достаточности и фактической эффективности. Предложена интеграция разработанного метода определения фактического состояния теплоизоляции в существующую систему организационно-технических мероприятий по диагностированию подземных газопроводов в мерзлых грунтах и принятию управленческих решений. Разработаны рекомендации по сохранению существующего теплоизоляционного покрытия при выполнении основных видов ремонтных работ и пять методов восстановления теплоизоляционного покрытия подземного газопровода с применением специальных устройств для комплексной теплоизоляции и балластировки (патент № 223680 РФ, F16L 59/00, опубликован 29.07.2024). Выбор методов сохранения и восстановления теплоизоляции осуществляется на основании ее фактического состояния, условий проведения ремонтных работ и оптимальности технико-экономических затрат.

**Основные положения диссертации опубликованы
в следующих работах:**

**– в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК при
Минобрнауки России:**

1. Казакова Т.И. Оценка эффективности трубопроводной теплоизоляции в зависимости от степени ее дефектности. / Т.И. Казакова // Научно-технический сборник Вести газовой науки, 2023. – № 4 (56). – С. 187-192. Журнал категории К1

2. Кузьбожев А.С. Моделирование промерзания и оттаивания мерзлых грунтов на участках арктических газопроводов при снижении функциональных показателей теплоизоляции труб. / А.С. Кузьбожев, Т.И. Работинская (Т.И. Казакова), И.В. Шишкин и др. // Научно-технический сборник Вести газовой науки, 2020. – № 2 (44). – С. 193-198. Журнал категории К1.

3. Кузьбожев А.С. Прогнозирование оттаивания мерзлых грунтов на теплоизолированных участках газопроводов. / А.С. Кузьбожев, Т.И. Работинская (Т.И. Казакова), И.В. Шишкин и др. // Технологии нефти и газа, 2020. – № 5 (130). – С. 60-64. Журнал категории К3.

4. Кузьбожев А.С. Диагностирование устойчивости теплоизолированных газопроводов при эксплуатации на мерзлых грунтах. / А.С. Кузьбожев, Т.И. Работинская (Т.И. Казакова), И.В. Шишкин и др. // Научно-технический сборник Вести газовой науки, 2020. – Спецвыпуск (43). – С. 98-103. Журнал категории К1.

5. Кузьбожев А.С. Совершенствование конструктивных решений по теплоизоляции газопроводов на мерзлых грунтах. / А.С. Кузьбожев, Т.И. Работинская (Т.И. Казакова), И.В. Шишкин и др. // Научно-технический сборник Вести газовой науки, 2020. – Спецвыпуск (43). – С. 67-72. Журнал категории К1.

6. Кузьбожев А.С. Расчетное моделирование параметров температурных полей в грунте, окружающем газопровод с дефектом теплоизоляционного покрытия. / А.С. Кузьбожев, Т.И. Работинская (Т.И. Казакова), И.В. Шишкин и др. // Научно-технический сборник Вести газовой науки, 2020. – Спецвыпуск (43). – С. 61-66. Журнал категории К1.

– патенты:

7. Патент № 2823680 Российская Федерация, F16L 59/00. Устройство для комплексной теплоизоляции и баллаستировки трубопровода/ Т.И. Казакова, И.В. Шишкин, А.С. Кузьбожев и др. – № 2023129197, заявл. 10.11.2023; Опубл. 29.07.2024, Бюл. № 22.

– в научно-технических сборниках и других изданиях:

8. Казакова Т.И. Разработка способа установки сегментной теплоизоляции на тело трубопровода, обеспечивающего его надежную фиксацию в течение всего срока эксплуатации. / Т.И. Казакова, И.В. Шишкин. // Рассохинские чтения: материалы международной конференции / Под редакцией Р.В. Агиней. – Ухта, 2024. – С. 357-359.

9. Казакова Т.И. Оценка влияния ориентационного положения сквозного дефекта трубной теплоизоляции на формирование температурных полей грунта околотрубного пространства. / Т.И. Казакова, И.В. Шишкин. // Рассохинские чтения: материалы международной конференции / Под редакцией Р.В. Агинеи. – Ухта, 2024. – С. 360-365.

10. Казакова Т.И. Оценка техногенного воздействия на многолетнемерзлые грунты при эксплуатации магистральных газопроводов. / Т.И. Казакова, И.В. Шишкин, И.Н. Бирилло и др. // Рассохинские чтения: материалы международной конференции / Под редакцией Р.В. Агинеи. – Ухта, 2023. – С. 256-259.

11. Казакова Т.И. Оценка техногенного влияния на многолетнемерзлые грунты при эксплуатации магистральных газопроводов. / Т.И. Казакова. // Новые технологии в газовой отрасли: опыт и преемственность. Тезисы докладов X Молодежной международной научно-практической конференции. – пос. Развилка, 2022. – С. 115.

12. Казакова Т.И. Экспериментальное моделирование теплового взаимодействия околотрубных грунтов и газопровода с дефектным теплоизоляционным покрытием. / Т.И. Казакова. // Новые технологии в газовой отрасли: опыт и преемственность. Тезисы докладов IX Молодежной международной научно-практической конференции. – пос. Развилка, 2021. – С. 54.

13. Работинская Т.И. (Казакова Т.И.) Классификация возможных нарушений теплоизоляционных покрытий магистральных газопроводов. / Т.И. Работинская (Т.И. Казакова), А.С. Кузьбожев. // Нефтегазовый терминал. Выпуск 18: сборник научных трудов Международной научно-технической конференции имени профессора Н.А. Малюшина / Под редакцией М.А. Александрова. – Тюмень, 2020. – С. 189-194.

14. Работинская Т.И. (Казакова Т.И.) Расчетное моделирование взаимодействия талых грунтов и холодного газопровода с дефектом теплоизоляционного покрытия. / Т.И. Работинская (Т.И. Казакова), А.С. Кузьбожев. // Нефтегазовый терминал. Выпуск 18: сборник научных трудов Международной научно-технической конференции имени профессора Н.А. Малюшина / Под редакцией М.А. Александрова. – Тюмень, 2020. – С. 194-197.

15. Работинская Т.И. (Казакова Т.И.) Стендовое моделирование процессов теплообмена в системе «газопровод – теплоизоляция – грунт». / Т.И. Работинская (Т.И. Казакова), А.С. Кузьбожев. // Нефтегазовый терминал. Выпуск 18: сборник научных трудов Международной научно-технической конференции имени профессора Н.А. Малюшина / Под редакцией М.А. Александрова. – Тюмень, 2020. – С. 198-201.

16. Работинская Т.И. (Казакова Т.И.) Расчетное моделирование сезонного изменения температурных полей в мерзлом грунте, окружающем теплоизолированный газопровод. / Т.И. Работинская (Т.И. Казакова), И.В. Шишкин, А.С. Кузьбожев. // Булатовские чтения: материалы IV Международной научно-практической конференции. В 7 т. Т. 4. / Под редакцией О.В. Савенок. – Краснодар, 2020. – С. 139-142.

17. Кузьбожев П.А. Специфика влияния нарушений теплоизоляции на развитие эрозионных процессов грунта на трассе газопроводов. / П.А. Кузьбожев, Т.И. Работинская (Т.И. Казакова), И.В. Шишкин. // Севергеоэкотех-2020: материалы XXI Международной молодежной научной конференции. Ч. 2. – Ухта, 2020. – С. 103-105.

18. Работинская Т.И. (Казакова Т.И.) Исследование теплообмена в сквозных дефектах теплоизоляционных покрытий газопроводов в мерзлых грунтах. / Т.И. Работинская (Т.И. Казакова), А.С. Кузьбожев, И.В. Шишкин и др. // Рассохинские чтения: материалы международной конференции. В 2 ч. Ч. 1. / Под редакцией Р.В. Агиней. – Ухта, 2020. – С. 83-86.

19. Шишкин И.В. Разработка расчетной модели процессов оттаивания ММГ при нарушениях теплоизоляционного покрытия газопровода. / И.В. Шишкин, Т.И. Работинская (Т.И. Казакова), А.С. Кузьбожев и др. // Газотранспортные системы: настоящее и будущее (GTS-2019). Тезисы докладов по материалам VIII Международной научно-технической конференции. – п. Развилка, 2019. – С. 154.

20. Работинская Т.И. (Казакова Т.И.) Термоэрозия и термоденудация грунта обратной засыпки магистральных газопроводов, проложенных в условиях многолетнемерзлых грунтов. / Т.И. Работинская (Т.И. Казакова), И.Н. Бирилло. // Рассохинские чтения: материалы международной конференции. В 2 ч. Ч. 2. / Под редакцией Н. Д. Цхадая. – Ухта, 2019. – С. 134-137.

21. Шишкин И.В. Моделирование теплового взаимодействия магистрального газопровода с мерзлыми и тальми грунтами на переходах через водные преграды. / И.В. Шишкин, С.А. Шкулов, Т.И. Работинская (Т.И. Казакова) и др. // Рассохинские чтения: материалы международной конференции. В 2 ч. Ч. 2. / Под редакцией Н. Д. Цхадая. – Ухта, 2019. – С. 160-165.