

На правах рукописи

Чжао Фумин



**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ОБНАРУЖЕНИЯ
УТЕЧЕК ГАЗА НА ТРУДНОДОСТУПНЫХ УЧАСТКАХ
РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ
ГАЗОПРОВОДОВ**

*Специальность 2.8.5. Строительство и эксплуатация
нефтегазопроводов, баз и хранилищ*

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

Санкт-Петербург – 2026

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

Научный руководитель:

кандидат технических наук

Палаев Александр Григорьевич

Официальные оппоненты:

Бурков Петр Владимирович

доктор технических наук, старший научный сотрудник, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», отделение нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов, профессор;

Фигаров Эльдар Намикович

кандидат технических наук, Общество с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт трубопроводного транспорта», лаборатория прочностных расчетов отдела оценки технического состояния и прочностных расчетов, заместитель заведующего лабораторией.

Ведущая организация – государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Альметьевский государственный технологический университет «Высшая школа нефти», г. Альметьевск.

Защита диссертации состоится **24 сентября 2026 г. в 15:00** на заседании диссертационного совета ГУ.11 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д. 2, **аудитория № 1163**.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 24 июля 2026 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



НОСОВ
Виктор Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Полиэтиленовые газораспределительные трубопроводы широко используются в городских системах газоснабжения. Основными преимуществами полиэтиленовых газовых труб (ПЭ) являются устойчивость к коррозии, нулевые электрохимические потери, отсутствие протечек в термоплавких соединениях, высокая гибкость и сейсмостойчивость, срок службы более 50 лет, а также значительно более низкие затраты на комплексную эксплуатацию и техническое обслуживание, чем у металлических труб. По мере увеличения протяженности распределительной сети и усложнения условий монтажа проверить состояние трубопровода в некоторых местах, особенно под землей и в труднодоступных местах, становится все труднее. В этих труднодоступных местах утечка природного газа опасна, поскольку может привести к несчастным случаям, взрывам и пожарам, что приведет к потере газа, а также к потерям газа, связанным с выбросами метана в окружающую среду.

Традиционные и общепризнанные методы мониторинга, такие как объезд шоссе, локальное измерение давления, использование мыльного раствора, одного датчика и копание только в выбранных местах, обычно не могут полностью контролировать в условиях плотной городской застройки, связи с другими перекрестками, неглубокой укладки, транспортных средств и оборудования выбрасывают большие количества газа в магистраль, а также в тех случаях, когда трубопровод не может быть открыт. В таком случае становится необходимым распределенный метод непрерывного мониторинга и обеспечения контроля без вскрытия трубопровода, который не нарушает целостность стенки полиэтиленовой трубы в течение суток. Подходящим решением является распределенный волоконно-оптический мониторинг, при котором оптическое волокно, размещенное на трубопроводе, действует как датчик по всей длине

участка вдоль трубопровода, используется в качестве датчика по всей длине участка.

Совместное применение распределенного акустического контроля DAS (Distributed Acoustic Sensing — распределённое акустическое зондирование), DTS (Distributed Temperature Sensing — распределённое температурное зондирование) и проверки по отрицательной волне давления позволяет фиксировать разные признаки одной утечки: виброакустическую подпись струи, изменение давления в виде отрицательной волны и изменение температуры, связанную с эффектом Джоуля–Томсона. Такой контроль по нескольким каналам дает основу для повышения надежности обнаружения и уменьшения числа ложных тревог.

Поэтому улучшение методов поиска утечек газа на участках с трудным доступом распределительных полиэтиленовых газопроводов с учетом объединения расчетных моделей, способов обработки сигналов и распределенного волоконно-оптического контроля является важной задачей для науки и практики, которая важна для повышения промышленной, экологической безопасности и безопасности эксплуатации газораспределительных сетей.

Большое значение эта технология имеет для повышения безопасности эксплуатации газораспределительных сетей. Раннее обнаружение утечки, автоматическая передача сигнала тревоги в диспетчерскую систему и уточнение места дефекта позволяют сократить время выхода газа без контроля, уменьшить риск накопления взрывоопасной смеси газа с воздухом, уменьшить зону аварийных работ и уменьшить риск влияния утечки на население, персонал и окружающую среду.

Степень разработанности темы исследования

В России и за рубежом уже разработано много методов поиска подземных коммуникаций и определения места утечек в трубопроводах. Для поиска линии трассы полиэтиленовых

труб используются георадары, магнитометры, электромагнитные локаторы, акустические и оптические средства, а также инерциальные навигационные системы. Для выявления утечек используются методы отрицательной волны давления, низкочастотной и ультразвуковой акустики, инфракрасного контроля, газоаналитический контроль, дроновые обследования, а также различные варианты волоконно-оптического мониторинга.

Существенный вклад в развитие методов анализа переходных процессов, обнаружения утечек по отрицательной волне давления и обработки согласованных полей внесли X. Wang, M.S. Ghidaoui, S. Meniconi, B. Brunone, A. Keramat, M. Waqar, A. Sharifi и другие исследователи. Ими были предложены подходы к локализации утечек по переходным сигналам давления, метод обработки согласованного поля, а также способы повышения точности расчёта координаты утечки при наличии шумов и погрешностей модели. Полученные результаты подтвердили возможность применения волновых методов для поиска утечек в трубопроводах. Однако для распределительных полиэтиленовых газопроводов, особенно в городской среде, эти методы имеют ограничения, связанные с изменением скорости волны, влиянием внешних помех, неоднородностью грунта и разными условиями прокладки трубопровода.

В последние годы наиболее перспективной областью стала интеграция распределённых волоконно-оптических технологий с расчётными и статистическими методами обработки данных. Однако имеющиеся решения чаще рассчитаны либо на один физический канал измерения, либо на магистральные трубопроводы и не всегда учитывают особенности полиэтиленовых распределительных сетей. Это небольшие диаметры, мелкое заложение, наличие помех от строительства и транспорта, разные свойства грунтов, сложность установки приборов с врезкой в трубу.

Таким образом, несмотря на наличие большого числа исследований, пока недостаточно проработана общая методика для обнаружения и определения места утечек на участках с трудным доступом распределительных полиэтиленовых газопроводов, которая объединяет распределённый многоканальный мониторинг, расчётные модели утечки и устойчивые алгоритмы обработки сигналов от нескольких датчиков.

Объект исследования – распределительные полиэтиленовые газопроводы, эксплуатируемые в системах городского газораспределения.

Предмет исследования – обнаружение и локализация утечек газа на труднодоступных участках распределительных полиэтиленовых газопроводов.

Цель работы – повысить эффективность обнаружения утечек газа на участках с трудным доступом распределительных полиэтиленовых газопроводов, чтобы повысить уровень промышленной и экологической безопасности их эксплуатации.

Идея работы – выявление утечек газа на участках с трудным доступом путем совмещения распределенного акустического и температурного волоконно-оптического мониторинга с расчетной верификацией событий по отрицательной волне давления и последующим анализом данных от нескольких датчиков.

Задачи исследования:

1. Провести анализ опыта в России и за рубежом, литературы и патентов в области обнаружения утечек и локализации подземных полиэтиленовых газопроводов на участках с трудным доступом.

2. Изучить возможности существующих методов поиска подземных коммуникаций и утечек, определить их преимущества и ограничения для городских распределительных сетей.

3. Провести теоретическое изучение переходных процессов, отрицательной волны давления и согласованной обработки полей возникновения утечки, уточнить параметры, влияющие на точность локализации.

4. Обосновать структуру комплексной системы обнаружения утечек на основе распределенного волоконно-оптического контроля DFOS (Distributed Fiber- Optic Sensing — распределенное волоконно-оптическое зондирование) с применением каналов DAS + DTS и применением телеметрии давления и расхода для проверки событий.

5. Разработать математические модели и алгоритмы обработки сигналов для оценки скорости утечки, интерпретации акустических и температурных аномалий, определения координаты дефекта и расчёта показателей эффективности.

Научная новизна работы:

1. Установлены пространственно-временные закономерности формирования акустического отклика и температурной аномалии в зоне утечки газа, характеризующие связь между моментом развития утечки, координатой дефекта и параметрами регистрируемых сигналов.

2. Разработаны алгоритмы обработки и мультисенсорного объединения диагностических сигналов распределённого акустического и температурного зондирования, а также алгоритмы валидации результатов обнаружения утечек по показателям вероятности обнаружения, времени обнаружения и ошибки локализации, обеспечивающие обоснованный выбор конфигурации системы и порогов срабатывания.

Соответствие паспорту специальности

Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 2.8.5. Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ по пункту 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, надёжности и безопасности использования отраслевого потенциала и ресурса трубопроводных конструкций».

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Разработаны модели формирования акустических и температурных диагностических признаков утечки газа на труднодоступных участках распределительных полиэтиленовых газопроводов, позволяющие учитывать влияние параметров трубопровода, грунта и условий эксплуатации.

2. Разработаны алгоритмы обработки и мультисенсорного объединения данных распределённого акустического и температурного волоконно-оптического мониторинга, обеспечивающие обнаружение и локализацию утечек газа.

3. Результаты диссертационного исследования приняты к внедрению на предприятии ЗАО «Балтийская Жемчужина» в виде методических рекомендаций по мониторингу утечек газа на распределительных полиэтиленовых газопроводах, что подтверждено актом о внедрении результатов диссертации от 15.12.2025 г.

4. Разработана программа для расчёта утечек газа в полиэтиленовых газопроводах с помощью распределённого волоконно-оптического мониторинга (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025690988).

Методология и методы исследования

Методологическую основу работы составили анализ научной литературы и патентных источников, методы математического моделирования переходных процессов в трубопроводе, элементы теории распространения волн и согласованной обработки полей, методы цифровой обработки сигналов, численное моделирование процессов истечения и переноса газа, а также экспериментальные исследования на полигоне и опытно-эксплуатационная проверка на распределительных сетях.

В работе использованы методы анализа переходных сигналов, вейвлет-преобразования, частотного и временно-частотного анализа, расчёты характеристик отрицательной волны давления, методы выделения акустических и температурных признаков, статистические критерии качества детектирования, а также алгоритмы мультисенсорной классификации и фьюжн-аналитики. Для оценки эффективности применены показатели POD (Probability of Detection — вероятность обнаружения), FAR (False Alarm Rate — вероятность ложных срабатываний), TTD (Time-to-Detect — время обнаружения), LE (Localization Error — ошибка локализации), а также сопоставление с традиционными способами контроля.

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработан и обоснован комплексный метод распределённого акустического и температурного волоконно-оптического мониторинга, обеспечивающий достоверное обнаружение и локализацию дефектов герметичности на труднодоступных участках распределительных полиэтиленовых газопроводов при воздействии эксплуатационных и техногенных помех, а также совместную обработку данных.

2. Использование разработанного комплексного метода обнаружения и локализации утечек на основе совместного применения распределённого акустического и распределённого температурного волоконно-оптического мониторинга обеспечивает повышение вероятности обнаружения утечки до 98 % и

ограничение ошибки локализации до 1,97 м без увеличения времени обнаружения.

Степень достоверности результатов исследования

1. Достоверность результатов обеспечена использованием современных теоретических подходов к анализу переходных процессов и обработки сигналов, применением согласованных математических моделей, сопоставлением расчётных и экспериментальных данных, а также проверкой полученных решений на полигоне и в условиях реальной эксплуатации.

2. Результаты подтверждены воспроизводимостью экспериментальных серий, сопоставлением данных от нескольких каналов наблюдения, верификацией событий по телеметрии давления и расхода, а также соответствием выводов современным представлениям о механизмах истечения газа, распространении акустических возмущений и формировании температурных аномалий в грунте.

Апробация результатов исследования проведена на 4 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 4 международных; за последние 3 года принято участие в 3 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 3 международных:

1. The XIX International forum-contest of students and young researchers «Topical issues of rational use of natural resources» (22-26 May 2023, Saint Petersburg).

2. Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы транспорта и хранения углеводородных ресурсов при освоении Арктики и Мирового Океана» (7-8 ноября 2023 года, г. Тюмень).

3. The 17th Conference on New Technologies in Nondestructive Testing 2025 (13.07-17.07.2025, Harbin, China).

4. The 5th International Conference on Detection Technology and Intelligence System (DTIS 2025) (12-14 December 2025, Nanchang, China).

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач исследования, анализе отечественных и зарубежных источников по теме диссертации, выборе и обосновании направления совершенствования методов контроля, разработке структуры комплексной системы мониторинга, участии в формировании расчётных и алгоритмических решений, проведении экспериментальных исследований, обработке и интерпретации результатов, а также в подготовке публикаций по теме диссертации.

Публикации

Результаты диссертационного исследования отражены в 4 печатных работах, в том числе в 2 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 2 статьях - в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура работы

Диссертация состоит из оглавления, введения, четырёх глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 150 наименований, и 2 приложений. Диссертация изложена на 112 страницах машинописного текста, содержит 35 рисунков и 12 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, раскрыты объект, предмет, цель, идея, задачи, научная новизна, практическая значимость, методы исследования, положения, выносимые на защиту, достоверность и апробация результатов.

В первой главе выполнен анализ методов обнаружения и локализации утечек газа в полиэтиленовых газопроводах. Рассмотрены георадиолокационные, магнитометрические, электромагнитные, акустические и инерциальные методы поиска подземных коммуникаций, а также методы обнаружения утечек по отрицательной волне давления и обработке согласованных полей. Показано, что традиционные локальные и периодические методы не обеспечивают требуемую непрерывность контроля на труднодоступных участках распределительных сетей.

Во второй главе приведены теоретические исследования выявления утечек с использованием обработки согласованных полей. Рассмотрены неопределённость параметров переходного сигнала, модель напора в частотной области и алгоритм обработки согласованных полей возникновения утечки. Показано, что неопределённость скорости распространения волны, вязкоупругих параметров трубопровода и граничных условий может приводить к смещению оценки координаты дефекта, поэтому локализация должна основываться на согласованной совокупности наблюдений.

В третьей главе выполнены экспериментальные исследования. Обоснован выбор распределённого волоконно-оптического зондирования, разработана архитектура аппаратно-программного решения, включающая каналы DAS и DTS, предварительную обработку сигналов, выделение диагностических признаков, фьюжн-классификацию, локализацию и формирование отчётности. Эксперименты на полиэтиленовом газопроводе ПЭ100 SDR11 DN110 подтвердили формирование акустических признаков утечки в канале DAS и температурной аномалии в канале DTS.

В четвёртой главе представлены практическое применение разработанных методов и их валидация. Выполнены полигонные испытания и опытно-эксплуатационная проверка на действующих участках распределительной сети, рассчитаны

вероятность обнаружения, частота ложных тревог, время обнаружения и ошибка локализации, а также проведена оценка экономических и экологических эффектов внедрения технологии.

В заключении приведены итоговые выводы и рекомендации по результатам исследования.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Разработан и обоснован комплексный метод распределённого акустического и температурного волоконно-оптического мониторинга, обеспечивающий достоверное обнаружение и локализацию дефектов герметичности на труднодоступных участках распределительных полиэтиленовых газопроводов при воздействии эксплуатационных и техногенных помех, а также совместную обработку данных.

Для раннего обнаружения и локализации утечек разработан комплексный метод, основанный на совместном использовании DAS и DTS с дополнительной верификацией событий по отрицательной волне давления. Утечка рассматривается не по одному диагностическому признаку, а по совокупности взаимно дополняющих физических проявлений аварийного процесса.

В канале DAS регистрируются акустические признаки струйного истечения газа, возникающие при нарушении герметичности трубопровода. В канале DTS фиксируется локальная температурная аномалия, обусловленная эффектом Джоуля-Томсона и последующим теплообменом в системе «газопровод – грунт – волокно».

Метод предусматривает размещение одномодового волоконно-оптического кабеля вдоль трассы полиэтиленового газопровода, синхронную регистрацию данных в каналах DAS и DTS, предварительную фильтрацию и нормализацию сигналов, выделение диагностических признаков, верификацию события

по фронту отрицательной волны давления и определение координаты предполагаемой утечки.

Примеры экспериментальной регистрации слабых и сильных утечек в акустическом канале приведены на рисунках 1–4. Полученные данные показывают устойчивое увеличение амплитудно-энергетических характеристик сигнала и формирование локализованного частотного отклика после открытия дефекта.

В температурном канале в соответствии с рисунками 5 и 6 формируется локальная отрицательная температурная аномалия в зоне дефекта с последующим восстановлением температуры после прекращения истечения. Это подтверждает возможность использования DTS как подтверждающего второго канала и источника дополнительной информации для уточнения координаты утечки.

2. Использование разработанного комплексного метода обнаружения и локализации утечек на основе совместного применения распределённого акустического и распределённого температурного волоконно-оптического мониторинга обеспечивает повышение вероятности обнаружения утечки до 98 % и ограничение ошибки локализации до 1,97 м без увеличения времени обнаружения.

Для объективной оценки эффективности разработанной системы предложена методика валидации, основанная на расчете ключевых показателей качества обнаружения и локализации утечек: вероятности обнаружения, частоты ложных тревог, времени обнаружения и ошибки локализации. Методика позволяет перейти от качественного описания работы системы к количественному сравнению различных конфигураций мониторинга и выбору рациональных рабочих порогов.

Испытания выполнялись при различных значениях давления, диаметра дефекта, геометрии утечки, типах грунта и

уровнях внешних помех. Для каждого режима регистрировались сигналы каналов DAS и DTS, после чего рассчитывались показатели качества. Сравнивались три конфигурации: только DAS, только DTS и совместная схема DAS + DTS.

Результаты сравнения приведены в таблице 1. Совместная обработка данных DAS + DTS обеспечивает лучшие значения вероятности обнаружения, времени реакции и ошибки локализации по сравнению с одноканальными вариантами, а также снижает вероятность ложных срабатываний.

Таблица 1 – Показатели качества системы обнаружения и локализации утечек для различных конфигураций мониторинга

Конфигурация системы	POD	TTD, мин	LE, м	FAR
DAS	0,95 (95 %)	0,8	$\pm 3,98$	повышенный
DTS	0,91 (91 %)	2,68	$\pm 2,98$	умеренный
DAS + DTS	0,98 (98 %)	1,49	$\pm 1,97$	минимальный

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача, связанная с совершенствованием методов обнаружения утечек газа на труднодоступных участках распределительных полиэтиленовых газопроводов. Актуальность исследования определяется необходимостью повышения безопасности, надёжности и экологической эффективности эксплуатации газораспределительных сетей в условиях ограниченного доступа к трассе, плотной городской застройки, мелкого заложения трубопроводов и высокого уровня техногенных помех.

1. Выполнен анализ отечественного и зарубежного опыта в области поиска подземных полиэтиленовых трубопроводов и обнаружения утечек газа. Установлено, что традицион-

ные локальные и периодические методы контроля не обеспечивают требуемого сочетания непрерывности наблюдения, скорости реакции и точности локализации на труднодоступных участках распределительных сетей.

2. Обоснована структура комплексной системы обнаружения утечек на основе распределённого волоконно-оптического мониторинга, включающей совместное применение каналов DAS и DTS, одномодовый волоконно-оптический кабель, интеррогаторы, программную фьюжн-аналитику, геопривязку событий и верификацию по данным давления и расхода.

3. Разработаны модели формирования акустических и температурных диагностических признаков утечки газа, а также алгоритмы предварительной обработки, выделения информативных признаков и мультисенсорной классификации. Алгоритмы основаны на совместном анализе акустической подписи струйного истечения, фронта отрицательной волны давления и температурной аномалии, обусловленной эффектом Джоуля–Томсона.

4. Разработана методика валидации результатов обнаружения и локализации утечек по показателям вероятности обнаружения, частоты ложных тревог, времени обнаружения и ошибки локализации. Использование указанных критериев обеспечило объективное сравнение различных конфигураций системы и позволило обосновать выбор рациональных рабочих порогов срабатывания.

5. Экспериментально установлено, что при давлениях 0,3–0,6 МПа в канале DAS устойчиво проявляются диагностические признаки в полосе 100–800 Гц, а в канале DTS регистрируются отрицательные температурные аномалии, параметры которых зависят от диаметра дефекта, давления и свойств грунта.

6. Полученные результаты эксперимента показывают, что совместная обработка данных DAS + DTS обеспечивает вероятность обнаружения 0,98, среднее время реакции 1,49 мин и ошибку локализации около $\pm 1,97$ м. Эти значения подтверждают преимущество комплексной схемы мониторинга по сравнению с одноканальными вариантами и традиционными способами контроля.

7. Применение разработанной технологии на труднодоступных участках распределительных полиэтиленовых газопроводов было оценено с экономической точки зрения. Расчёты выполнены для условного участка газопровода протяжённостью 10 км. Показано, что по сравнению с традиционными схемами обхода трассы, приборного контроля и выборочных земляных работ, использование распределённого волоконно-оптического мониторинга может снизить расчётные годовые затраты примерно на 31 %. Годовые эксплуатационные расходы при этом могут быть уменьшены примерно на 2 млн руб. без учёта амортизации капитальных вложений.

Кроме экономического эффекта, важным результатом является повышение промышленной безопасности. Более раннее обнаружение утечки сокращает время неконтролируемого выхода газа, снижает вероятность образования взрывоопасной газовоздушной смеси и позволяет аварийным службам быстрее принять необходимые меры. Предложенная технология может использоваться для повышения безопасности эксплуатации, так как она ускоряет обнаружение утечки, уточняет координату дефекта и сокращает время аварийно-восстановительных работ. Дальнейшее развитие работы связано с проверкой метода на газопроводах разного диаметра и давления. Также необходимо уточнить алгоритмы обработки сигналов DAS и DTS с учётом сезонных изменений грунта и внешних помех. Отдельным направлением является подключение системы к цифровым диспетчерским платформам и применение методов машинного

обучения для классификации сигналов и снижения числа ложных срабатываний.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Палаев, А.Г. Применение технологии обнаружения утечек с помощью отрицательного давления в газопроводах / А.Г. Палаев, **Фумин Чжао**, Ифань Тянь // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. - 2024. - № 3–4. - С. 32–36..

2. Палаев, А.Г. Сравнительное исследование методов локализации подземных полиэтиленовых трубопроводов / А.Г. Палаев, **Фумин Чжао**, Ифань Тянь, Бинь Ван, Минян Шао // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. - 2023. - № 3–4. - С. 23–27.

Публикации в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus:

3. Palaev, A.G. A Leak Detection Method for Underground Polyethylene Gas Pipelines Using Simulation Software Ansys Fluent / A.G. Palaev, **Z. Fuming**// International Journal of Engineering, Transactions B: Applications. - 2024. - Vol. 37, Issue 8. - P. 1615–1621.

4. Palaev, A.G. Method for Assessing Damage to Gas Distribution Network Pipelines based on Nonlinear Guided Wave / A.G. Palaev, **Z. Fuming**, T. Yifan // International Journal of Engineering, Transactions B: Applications. - 2024. - Vol. 37, Issue 5. - P. 852–859.

Патенты/свидетельства на объекты интеллектуальной собственности:

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025690988 Российская Федерация. Программа для расчета утечек газа в полиэтиленовых газопроводах

с помощью распределенного волоконно-оптического мониторинга. Заявка № 2025689632 : заявл. 29.10.2025; опубл. 12.11.2025/ А.Г. Палаев, **Чжао Фумин**; заявитель/правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». – 254 КБ.

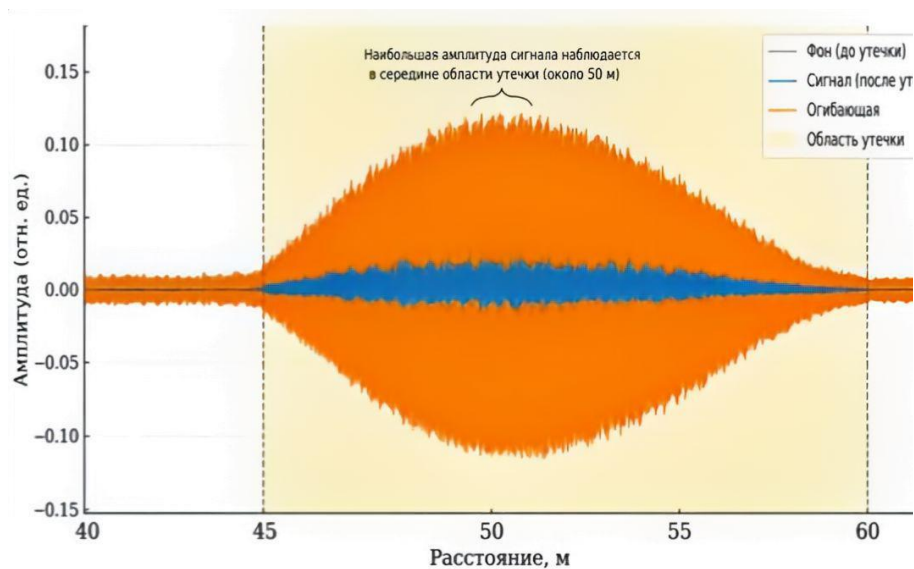


Рисунок 1 – Временная регистрация акустического сигнала слабой утечки в канале DAS

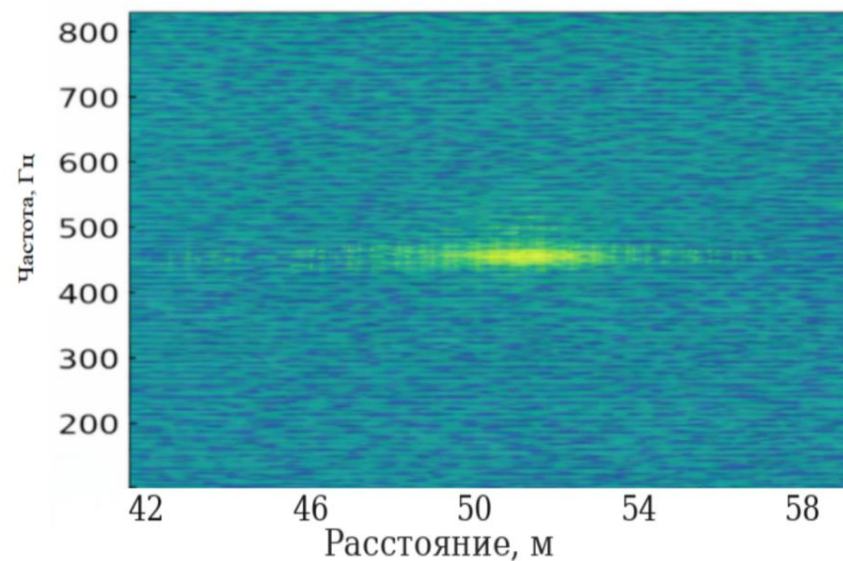


Рисунок 2 – Спектрограмма сигнала слабой утечки в канале DAS

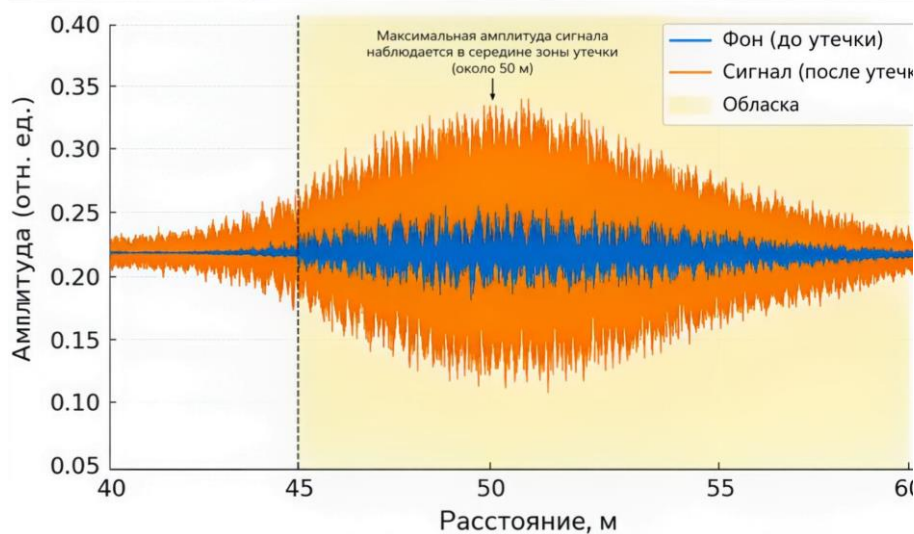


Рисунок 3 – Временная регистрация акустического сигнала сильной утечки в канале DAS

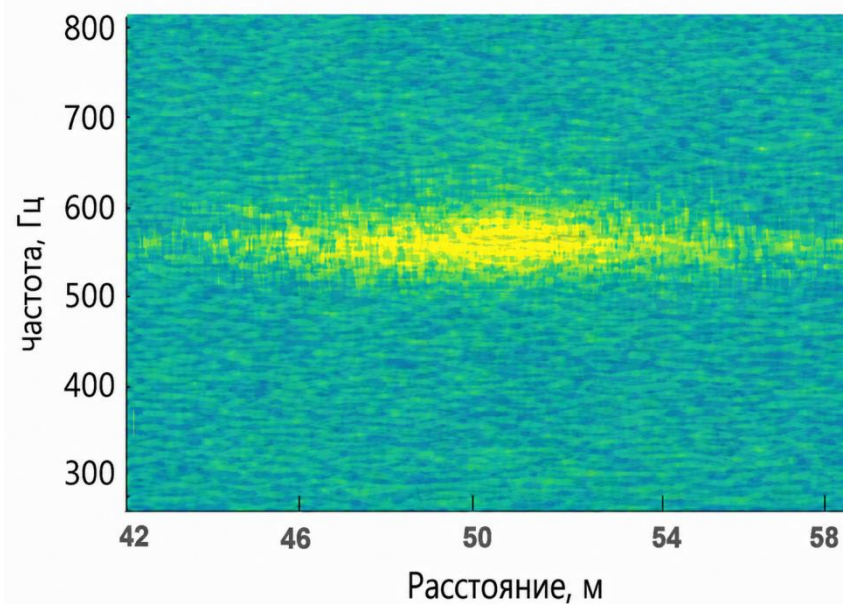


Рисунок 4 – Спектрограмма сигнала сильной утечки в канале DAS

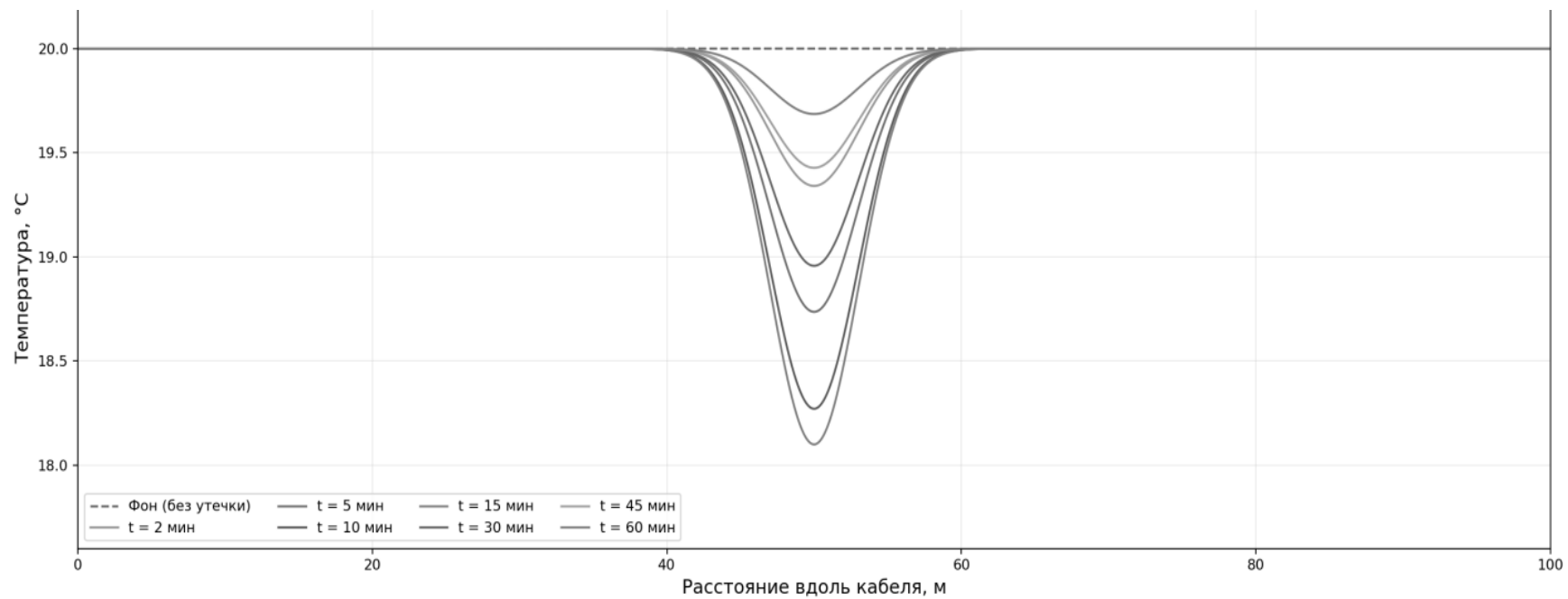


Рисунок 5 – Формирование и восстановление температурной аномалии по данным DTS

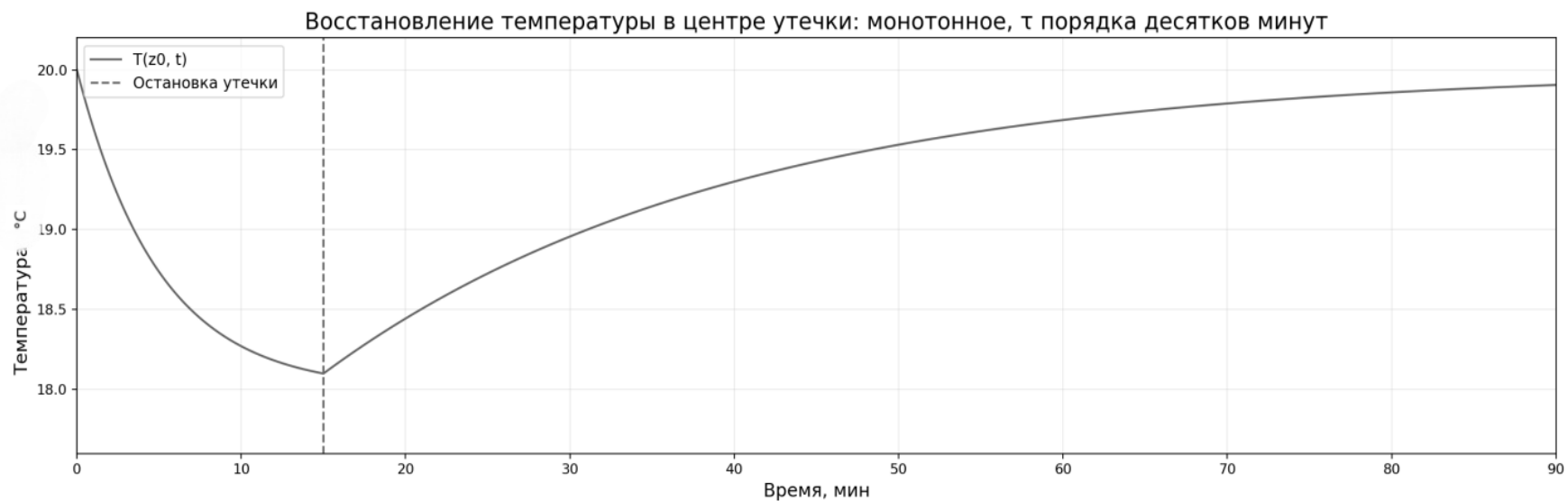


Рисунок 6 – Восстановление температуры в центре утечки по данным DTS