

На правах рукописи

Лунтовская Яна Алексеевна



**ПРОГРАММНО-АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ОЦЕНКЕ СОСТОЯНИЯ
ИЗОЛЯЦИОННОГО ПОКРЫТИЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ
ТРУБОПРОВОДОВ**

*Специальность 2.3.1. Системный анализ, управление и
обработка информации, статистика*

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

Санкт-Петербург – 2025

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

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор

Кризский Владимир Николаевич

Официальные оппоненты:

Саратова Татьяна Евгеньевна

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА - Российский технологический университет», кафедра прикладной математики, заведующий кафедрой.

Келлер Алевтина Викторовна

доктор физико-математических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный технический университет», кафедра прикладной математики и механики, профессор.

Ведущая организация – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», г. Челябинск.

Защита диссертации состоится **23 декабря 2025 г. в 13:30** на заседании диссертационного совета ГУ.12 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 3321.**

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

Автореферат разослан 23 октября 2025 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ВАСИЛЬЕВА
Наталья Васильевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

По объемам транспортируемых грузов магистральный трубопровод является одним из основных видов транспорта сырья. Образование коррозии на металле труб является распространенной причиной возникновения аварий или инцидентов на магистральных трубопроводах, которые приводят к значительным затратам материальных и временных ресурсов на восстановление. На практике для защиты магистральных трубопроводов от коррозии применяют электрохимическую защиту в сочетании с нанесением изоляционных покрытий. Однако вследствие длительной работы магистральных трубопроводов, эксплуатационные параметры средств защиты постепенно ухудшаются, что в значительной степени влияет на формирование коррозионных повреждений. Информация о местоположении дефектов изоляционного покрытия и характеристики его состояния позволяет принимать обоснованные решения по эксплуатации трубопровода. Одним из способов получения информации о состоянии изоляции магистральных трубопроводов является исследование измеренных электрических и магнитных полей систем электрохимической защиты трубопровода на основе математического моделирования. Применяемые на практике математические модели учитывают далеко не все факторы, которые оказывают влияние на состояние изоляционных покрытий магистральных трубопроводов, в том числе переходное сопротивление внутреннего изоляционного покрытия. Актуальность работы обусловлена необходимостью совершенствования алгоритма принятия решений по эксплуатации трубопровода с помощью разработки математических моделей, более полно учитывающих параметры, влияющие на состояние изоляции магистральных трубопроводов, программно-алгоритмического обеспечения обработки и анализа измеренных электрических и магнитных

полей для оценки состояния изоляции магистральных трубопроводов.

Степень разработанности темы исследования

Проблемами разработки алгоритмов, программ и моделей для анализа параметров магистральных трубопроводов и принятия решений по эксплуатации трубопроводных систем рассматривались в работах: Ахметгареев Р.О., Бушмелева К.И., Shafeek H., Bolzon G., Khan F., Aulia R., Samimi A., Tesfamariam S., Jabbari M., Idachaba F., Li Y.-T., He X.-N., Shuai J. и др. Разработкой и совершенствованием математических моделей, необходимых для обработки и анализа данных рассматривались в работах: Болотнов А.М., Викторов С.В., Хисаметдинов Ф. З., Гарифуллина С. Р., Александров А.А., Кризский В.Н., Любчик А.Н., Лисин Ю.В., Naseer A., Alhabobi A., Th. Albayati и др. Несмотря на большое количество исследований и разработок в этой области, проблема безопасной эксплуатации магистральных трубопроводов остается открытой. В связи с этим актуальна задача по разработке программно-алгоритмического обеспечения с новыми математическими моделями, учитывающими переходное сопротивление изоляции, влияющим на состояние магистрального трубопровода.

Объект исследования: автоматизированная система принятия решений по эксплуатации магистрального трубопровода, находящегося под действием системы электрохимической катодной защиты.

Предмет исследования: программно-алгоритмическое и математическое обеспечение автоматизированной подсистемы оценки технического состояния изоляции магистральных трубопроводов.

Целью диссертационной работы является обеспечение безаварийной работы и своевременного принятия решений по эксплуатации магистральных трубопроводов с помощью

определения местоположения дефекта изоляционного покрытия и его технического состояния.

Идея работы заключается в формировании программно-алгоритмического и математического обеспечения для автоматизированной обработки данных, полученных в результате измерений электрических и магнитных полей станций электрохимической катодной защиты магистральных трубопроводов, для определения местоположения дефектов изоляционного покрытия, его технического состояния и принятия решений по эксплуатации магистральных трубопроводов.

Поставленная в диссертационной работе цель достигается посредством решения нижеуказанных **задач**:

1) провести анализ проблем эксплуатации и способов оценки технического состояния магистральных трубопроводов;

2) применить методы системного анализа для формирования математических моделей электрических и магнитных полей систем катодной защиты магистрального трубопровода для определения местоположения дефекта и значений переходного сопротивления изоляционных покрытий;

3) разработать программно-алгоритмическое обеспечение для локализации дефектов внутреннего изоляционного покрытия магистрального трубопровода;

4) разработать программно-алгоритмическое обеспечение для определения значений переходного сопротивления и местоположения дефектов внешнего изоляционного покрытия магистрального трубопровода;

5) усовершенствовать алгоритм и разработать программно-алгоритмическое обеспечение подсистемы принятия решений для магистрального трубопровода по проведению ремонтных работ или долгосрочному анализу данных эксплуатации магистрального трубопровода.

Научная новизна работы:

1) разработано программно-алгоритмическое обеспечение с применением математической модели расчета электрического поля внутритрубного зонда в системе катодной защиты магистрального трубопровода, учитывающая внутреннее переходное сопротивление изоляционного покрытия и позволяющая определять местоположение дефектов внутреннего изоляционного покрытия;

2) разработано программно-алгоритмическое обеспечение с применением математической модели обратной задачи определения переходного сопротивления внешнего изоляционного покрытия в системе катодной защиты магистрального трубопровода, отличающаяся от предыдущих видом стабилизирующего функционала, приводящая к большей устойчивости поиска решений;

3) установлена зависимость потенциала в месте дефекта от переходного сопротивления внутреннего слоя изоляции магистрального трубопровода, которая позволяет принимать обоснованные решения по эксплуатации магистрального трубопровода;

4) усовершенствован алгоритм и разработано программно-алгоритмическое обеспечение для подсистемы принятия решений по эксплуатации магистрального трубопровода на основе полученных данных о местоположении дефектов внутреннего и внешнего изоляционных покрытий и значениях переходных сопротивления внешнего изоляционного покрытия магистрального трубопровода.

Соответствие паспорту специальности

Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика по следующим пунктам:

4. Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта.

5. Разработка специального математического и алгоритмического обеспечения систем анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта.

Теоретическая значимость исследования заключается в: разработке программы и алгоритма подсистемы принятия решений с применением новых математических моделей, описывающих распределение электрических и магнитных полей станций катодной защиты, определяющих местоположение и состояние изоляции подземного магистрального трубопровода.

Практическая значимость исследования заключается в применении результатов в практической деятельности предприятий при проведении обследований трасс трубопроводов с целью определения местоположения и технического состояния участков изоляционного покрытия и принятия решений по эксплуатации магистральных трубопроводов. Практическая ценность работы подтверждается актами внедрения. Результаты исследования внедрены в деятельность ООО «Спецгеосервис», акт от 04.03.25 г. Разработка программного обеспечения для диссертационной работы подтверждены свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2023611883 и № 2023662303.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач в работе использованы: анализ технического состояния магистрального трубопровода, методы системного анализа, методы математического моделирования.

Положения, выносимые на защиту:

1) разработанное программно-алгоритмическое и математическое обеспечение позволяет обнаружить местоположение дефекта внутреннего изоляционного покрытия с помощью исследования измеренных компонент вектора напряженности электрического поля в

транспортируемой жидкости и определить переходное сопротивление внешнего изоляционного покрытия дефектного сегмента трубы с помощью анализа измеренных компонент вектора магнитной индукции над трассой магистрального трубопровода;

2) разработанное программно-алгоритмическое обеспечение для принятия решений по эксплуатации магистрального трубопровода на основе определения местоположения дефектных участков и технического состояния изоляционных покрытий трубопровода позволяет снизить вероятность возникновения аварий до 15%.

Степень достоверности результатов исследования обеспечивается анализом предметной области, исходными данными, применяемыми на практике, адекватной постановкой научной задачи, корректным применением методов исследования. Достоверность полученных результатов подтверждается их внедрением в практическую деятельность предприятия по инженерно-геофизическим исследованиям магистральных трубопроводов, апробацией на научных конференциях, а также получением свидетельств государственной регистрации программ для ЭВМ.

Апробация результатов проведена на 5 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 4 международных. За последние 3 года принято участие в 4 научно-практических мероприятии с докладом, в том числе на 4 международных: IV Всероссийской научной конференции «Современные образовательные технологии в подготовке специалистов для минерально-сырьевого комплекса» (г. Санкт-Петербург, март 2021 г.); IV Международной научной конференции «Уфимская осенняя математическая школа» (г. Уфа, март 2022 г.); IV Международной научно-практической конференции «Физика конденсированного состояния» (г. Стерлитамак, сентябрь 2022 г.); XII Международной молодежной научно-практической конференции

«Математическое моделирование процессов и систем» (г. Стерлитамак, 2022 г.), II Международной научно-практической конференции «Прорывные технологии в разведке, разработке и добыче углеводородных ресурсов» (г. Санкт-Петербург, 2023 г.)

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач диссертационного исследования, анализе научной литературы по теме исследования, разработке программно-алгоритмического обеспечения на основе сформированных математических моделей для определения местоположения и степени разрушения дефектных участков изоляционного покрытия магистрального трубопровода.

Публикации. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 9 печатных работах, в том числе в 1 статье – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, в 3 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, четырех глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 87 источников и 3 приложения. Диссертация изложена на 105 страницах машинописного текста, содержит 31 рисунок и 12 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимости исследования и изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены способы защиты магистрального трубопровода (МТ) от коррозии и причины ее образования на металле трубы. Проведен анализ программно-алгоритмического обеспечения для оценки технического состояния МТ.

Во второй главе рассмотрена система катодной защиты МТ с точки зрения системного подхода, предполагающего исследование объекта как единой системы. Выявлены основные элементы для системы катодной защиты МТ.

В третьей главе описаны математические модели (ММ) применяемые для программно-алгоритмического обеспечения оценки состояния изоляции МТ. Определены местоположения повреждения изоляции МТ и значения переходных сопротивлений внешнего изоляционного покрытия.

В четвертой главе усовершенствован алгоритм принятия решений по результатам оценки состояния изоляционного покрытия МТ и предложены рекомендации по эксплуатации МТ. Выполнен расчет технологического эффекта от внедряемой подсистемы состояния изоляции МТ.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Разработанное программно-алгоритмическое и математическое обеспечение позволяет обнаружить местоположение дефекта внутреннего изоляционного покрытия с помощью исследования измеренных компонент вектора напряженности электрического поля в транспортируемой жидкости и определить переходное сопротивление внешнего изоляционного покрытия дефектного сегмента трубы с помощью анализа измеренных компонент вектора магнитной индукции над трассой магистрального трубопровода.

Применение внутритрубного зонда в транспортируемой жидкости делает возможным исследование состояния внутренней изоляции МТ. В работе была сформирована ММ

поля постоянного электрического тока системы катодной защиты МТ, особенностью которой является учет переходного сопротивления внутреннего изоляционного покрытия. Данная ММ описывает распределение потенциала поля внутритрубного зонда в произвольной точке $P(x_P, y_P, z_P)$, проводящего ток пространства, содержащего МТ:

$$\Delta U_g(P) = -\frac{I_a}{\sigma_g} \delta(P - A); \Delta U_m(P) = 0; \quad (1)$$

$$\Delta U_l(P) = -I_{pr}(\delta(P - A_{pr}) - \delta(P - B_{pr})); \quad (2)$$

$$\left. \frac{\partial U_g(P)}{\partial z} \right|_{z=0} = 0; \quad U_g(P) \rightarrow 0, P \rightarrow \infty; \quad (3)$$

$$\left. \frac{\partial U_m}{\partial x} \right|_{x=0; L_t} = 0; \quad \left. \frac{\partial U_l}{\partial x} \right|_{x=0; L_t} = 0; \quad (4)$$

$$U_g(P) - C_{gm}(P) \sigma_g(P) \left. \frac{\partial U_g(P)}{\partial n} \right|_{S_{gm}} = U_m(P); \quad (5)$$

$$U_l(P) + C_{ml}(P) \sigma_l(P) \left. \frac{\partial U_l(P)}{\partial n} \right|_{S_{ml}} = U_m(P); \quad (6)$$

$$\left[\frac{\partial U_m(P)}{\partial x} \right] \Big|_{B_t} = \frac{I_a}{\sigma_m S_m}. \quad (7)$$

Уравнения ММ (1)-(7) описывают следующие процессы:

(1) – распределение потенциала электрического тока в грунте $U_g(P)$, (В) и потенциала электрического тока в металле трубы $U_m(P)$, (В), I_a , (А) – постоянный защитный ток станции катодной электрохимической защиты; σ_g , (Ом·м)⁻¹ – удельная электрическая проводимость грунта; δ – функция Дирака; $A(x_A, y_A, z_A)$ – точка проводящего ток пространства, в которой расположен точечный анодный заземлитель; (2) – распределение потенциала в жидкости $U_l(P)$, (В), I_{pr} , (А) – сила постоянного тока зонда; A_{pr} и B_{pr} – текущие положения электродов диагностического зонда в трубе, отнесенные к средним точкам сегментов в транспортируемой жидкости; (3) – непротекание тока через границу «грунт/воздух» и условие регулярности решения на бесконечности; (4) – непротекание тока на торцевых границах для металла трубы и транспортируемой жидкости (L_t , (м) – длина исследуемого

участка МТ); (5) – перетекание тока через границу «грунт/металл», где $C_{gm}(P)$, (Ом·м²) – переходное сопротивление, отражающее состояние внешнего изоляционного покрытия трубы в точке P , S_{gm} – площадь внешней поверхности трубы (м²), n – нормаль к поверхности трубы; (6) – протекание тока через границу «металл/жидкость», где $C_{ml}(P)$, (Ом·м²) – переходное сопротивление, отражающее состояние внутреннего изоляционного покрытия в точке P , σ_l (Ом·м)⁻¹ – удельная электрическая проводимость жидкости S_{ml} – площадь внутренней поверхности трубы (м²); (7) – дренаж тока катодной станции от трубопровода, где S_m – площадь поперечного сечения металла (м²), σ_m – удельное электрическое сопротивление металла трубы (Ом·м).

На основе представленной ММ было разработано программно-алгоритмическое обеспечение расчета потенциала электрического поля, в котором исходная дифференциальная ММ (1)-(7) путем дискретизации и применения метода фиктивных источников сведена к системе линейных алгебраических уравнений. По результатам вычислительных экспериментов и исследования взаимовлияния параметров ММ было установлено, что: одновременное отслеживание положения диагностического зонда и регистрация разницы потенциалов позволяют локализовать место нарушения внутреннего изоляционного покрытия в трубопроводе; вычисленные значения потенциала в месте дефекта изоляции, зависящие от электрической проводимости транспортируемого продукта, позволяют характеризовать состояние внутренней изоляции МТ. Оценка технического состояния внутренней изоляции трубопровода на основе получаемого в ходе эксперимента потенциала в месте дефекта изоляции может быть произведена графически (см. рис. 1). Зависимость значений потенциала в месте дефекта от переходного сопротивления «металл/жидкость» показана для трех видов,

транспортируемой в момент проведения внутритрубной дефектоскопии (ВТД).

Проведение оценки качества внешнего изоляционного слоя при ВТД также затруднительно из-за экранирующих свойств металла трубы. Решением в таких случаях является применение наружных методов обследования трубопровода. Для оценки состояния внешнего изоляционного покрытия была применена ММ электромагнитного поля МТ с N_{cs} станциями катодной защиты:

$$\Delta U_g(P) = -\sum \frac{I_a^k}{\sigma_g} \delta(P - A^k), k = \overline{1, N_{cs}}, \Delta U_m(P) = 0, \quad (8)$$

$$\left. \frac{\partial U_g(P)}{\partial z} \right|_{z=0} = 0; U_g(P) \rightarrow 0, P \rightarrow \infty, \quad (9)$$

$$\left. \frac{\partial U_m(P)}{\partial x} \right|_{x=0; L_t} = 0, \quad (10)$$

$$U_g(P) - C_{gm}(P) \sigma_g \left. \frac{\partial U_g(P)}{\partial n} \right|_{S_{gm}} = U_m(P), \quad (11)$$

$$\left[\frac{\partial U_m(P)}{\partial x} \right]_{B_t^k} = \frac{I_a^k}{\sigma_m s_m}, k = \overline{1, N_{cs}}, \quad (12)$$

$$j(r_p) = -\sigma_g \cdot \nabla U(r_p); P \in \Omega_g, \quad (13)$$

$$B(r_0) = \frac{\mu \mu_0}{4\pi} \int_V \frac{[j(r) dV, r_0 - r]}{|r_0 - r|^3}, \quad (14)$$

$$F^\alpha(c_{gm}(s)) = F_1(c_{gm}(s)) + \alpha \cdot F_2(c_{gm}(s)), \quad (15)$$

$$F_1(c_{gm}(s)) = \| |B(r_0, c_{gm})| - |B^M(r_0, c_{gm})| \|_{L_2(V)}^2 \quad (16)$$

$$F_2(c_{gm}(s)) = \beta \| c_{gm}(s) - c_{gm}^0(s) \|_{L_2(K)}^2 + \\ (1 - \beta) \| c_{gm}(s) - c_{gm}^0(s) \|_{L_1(K)}^2 \quad (17)$$

Принятые в ММ обозначения и величины в уравнениях (8-12) аналогичны описанным в уравнениях (1-7). Уравнения ММ (13-17) описывают следующие процессы:

(13) – определение плотности электрического тока $j(r_p)$, (А/м²) в любой точке $P(r_p)$ проводящего полупространства Ω_g , где $U(r_p)$, (В) – потенциал электрического поля в произвольной точке полупространства;

(14) – определение вектора магнитной индукции $B(r_0)$ по формуле Био-Савара-Лапласа, где $[j(r)dV, r_0 - r]$ – векторное произведение, r_0 – радиус-вектор произвольной точки пространства (в том числе и в воздухе над трассой трубопровода), V – область интегрирования, μ_0 – магнитная постоянная (Гн/м), μ – относительная магнитная проницаемость; (15) – регуляризирующий функционал, α – параметр регуляризации, $F_1(c_{gm}(s))$ – функционал невязки, $F_2(c_{gm}(s))$ – стабилизирующий функционал; (16) – функционал невязки, $|B^M(r_0, c_{gm})|$ – модуль измеренного вектора магнитной индукции; $|B(r_0, c_{gm})|$ – моделируемый модуль вектора магнитной индукции, L_2 – нормированные пространства функций, определенные на поверхности трубопровода V ; (17) – стабилизирующий функционал, β – весовой коэффициент; $c_{gm}^0(s)$ – априори известное переходное сопротивление изоляции вдоль трубы; $c_{gm}(s)$ – искомая функция переходного сопротивления изоляционного, $K = K(V_t(s))$ – множества функций, на котором ищется решение обратной задачи рассматривается компактное множество ограниченных кусочно-постоянных функций.

Разработано программно-алгоритмическое обеспечение, на основе ММ, в котором решение задачи определения переходного сопротивления внешнего изоляционного покрытия МТ достигается методом регуляризации А.Н. Тихонова как экстремальное решение регуляризирующего функционала. На рисунке 2 приведены результаты вычислительных экспериментов по определению переходного сопротивления изоляции на границе «металл/грунт» на различных высотах перемещения датчиков магнитометрической системы. По результатам экспериментов установлено, что переходное сопротивление изоляции на

границе «грунт/металл», отражающее состояние внешнего изоляционного покрытия трубопровода, может быть локализовано и определено.

2. Разработанное программно-алгоритмическое обеспечение для принятия решений по эксплуатации магистрального трубопровода на основе определения местоположения дефектных участков и технического состояния изоляционных покрытий трубопровода позволяет снизить вероятность возникновения аварий до 15%.

В системе принятия решений по проведению ремонтных работ на основе технического состояния МТ выделена подсистема, по которой решения принимаются на основе состояния изоляционных покрытий трубопровода. В разработанном программно-алгоритмическом обеспечении основной характеристикой, позволяющей получить информацию о состоянии изоляции МТ, является переходное сопротивление. На основе полученных для определенного участка МТ данных о местоположении дефектов и значениях переходного сопротивления изоляционного покрытия может быть сформирована комплексная диаграмма состояния изоляции (см. рис. 3). Для существующих нормативных документов по интерпретации данных о состоянии изоляции трубопроводов предложены следующие рекомендации по принятию решений: 1) для коррозионных повреждений изоляции со значениями переходного сопротивления менее $500 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$ необходимо в обязательном порядке проводить дополнительный диагностический контроль с последующим оперативным ремонтом изоляционного покрытия при технологической возможности такового; 2) для участков удовлетворительного состояния изоляции трубопровода, при значении переходного сопротивления от 500 до $2500 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$, рекомендовано учесть степень их разрушения при планировании следующего мониторинга технического

состояния МТ и/или скорректировать режим работы системы катодной электрохимической защиты и рабочее давление МТ; 3) участки с переходным сопротивлением более $2500 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$ могут быть использованы для общего долгосрочного анализа интенсивности утоньшения материала изоляции и других исследований, связанных с эксплуатацией МТ. На рисунке 4 представлен разработанный алгоритм оценки состояния изоляции подземного МТ.

Технологический эффект от применения разработанного программно-алгоритмического обеспечения принятия решений заключается в снижении вероятности возникновения хотя бы одной аварии в течение следующих 10 лет эксплуатации участка МТ, для которого проводится внутритрубная диагностика и определение переходного сопротивления внешнего изоляционного слоя с помощью магнитометрии.

Порядок расчета вероятности возникновения аварии, согласно ГОСТ Р 27.004-2009 «Надежность в технике. Модели отказов», состоит из: 1) определения интенсивности аварий на основе данных статистики; 2) расчета вероятности возникновения аварии до проведения ремонтных работ; 3) определения интенсивности аварий после проведения ремонтных работ экспертным методом и/или с помощью данных статистики; 4) определения снижения вероятности возникновения аварии после проведения ремонтных работ; 5) определение эффекта от применения подсистемы принятия решений на основе оценки технического состояния изоляции МТ путем умножения полученного снижения вероятности возникновения аварии на весовой коэффициент 0,3. Данный весовой коэффициент определяет значимость состояния изоляционного покрытия трубопровода в оценке его общего технического состояния, принят исходя из руководящих документов по эксплуатации МТ.

По результатам оценки технологического эффекта для трех участков МТ длиной от 13 до 15 км, применение

разработанной подсистемы позволяет снизить вероятность возникновения аварии до 15%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации обосновано применение программного-алгоритмического и математического обеспечения для автоматизированной обработки данных о состоянии изоляции подземного магистрального трубопровода. По результатам выполнения диссертации сделаны следующие выводы и рекомендации:

1) Проведен анализ способов и соответствующего программно-алгоритмического обеспечения по оценке технического состояния магистральных трубопроводов; на основе методов системного анализа сформированы математические модели электрических и магнитных полей систем катодной защиты магистральных трубопроводов.

2) Разработано программно-алгоритмическое обеспечение, на основе новой математической модели, для расчета потенциала электрического поля внутритрубного зонда в транспортируемой жидкости, которые позволяют локализовать место нарушения внутритрубной изоляции и определить степень ее коррозионного поражения.

3) Разработано программно-алгоритмическое обеспечение, с применением математической модели, для определения переходного сопротивления на границе «грунт/металл» катодно-поляризуемого магистрального трубопровода по данным магнитометрии над трассой трубопровода.

4) Проведен анализ и разработано программно-алгоритмическое обеспечение, на основе усовершенствованного алгоритма, подсистемы принятия решений относительно ремонтных работ с целью применения разработанных методов оценки состояния изоляционных покрытий магистрального трубопровода.

5) Проведено внедрение разработанного программного-алгоритмического и математического обеспечения в деятельность предприятия по обследованию трасс магистральных трубопроводов.

Перспективным направлением развития темы исследования является учет горизонтально-слоистой структуры вмещающего трубопровод грунта, анизотропии его удельной электрической проводимости.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. **Лунтовская, Я. А.** Формирование математических моделей электромагнитных полей систем управления катодной защитой магистральных трубопроводов/Я. А. Лунтовская, В. Н. Кризский, О. В. Косарев//Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 9. – С. 81-87. DOI 10.24412/2071-6168-2023-9-81-82

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

2. Кризский, В.Н. Математическое моделирование электрического поля катодно-поляризуемого трубопровода с учетом внешнего и внутреннего изоляционного покрытия/ В.Н. Кризский, П.Н. Александров, О.В. Косарев, **Я.А. Лунтовская** //Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия Математическое моделирование и программирование. – №1. – Т.16. – 2023. – С. 23-34. DOI:10.14529/mmp230102

3. Krizsky, V.N. Modeling the Transient Resistance of Trunk Pipeline Insulation Based on Measurements of the Magnetic Induction Vector Modulus/ V.N. Krizsky, S.V. Viktorov, **Y.A. Luntovskaya**/ Math Models Computer Simulation – 2023, – Vol. 15. – №2 – P. 312-322. DOI: 10.1134/S2070048223020102

4. Кризский, В.Н. Математическое моделирование электрического поля внутритрубного диагностического зонда

катодно-поляризуемого трубопровода / В.Н. Кризский, О.В. Косарев, П.Н. Александров, **Я.А. Лунтовская** // Записки Горного института. – 2024. – Т. 265. – С. 156-164.

Публикации в прочих изданиях:

5. **Лунтовская, Я. А.** Математическая модель электрического поля катодно-поляризуемого трубопровода с дефектами внешней и внутренней изоляции//Современные образовательные технологии в подготовке специалистов для минерально-сырьевого комплекса Санкт-Петербург, 04–05 марта 2021 года/Санкт-Петербургский горный университет. Сборник научных трудов IV Всероссийской научной конференции. – 2021. – С. 660-662.

6. Кризский, В. Н. Об определении переходного сопротивления катодно-поляризуемого магистрального трубопровода по данным магнитометрии/В. Н. Кризский, С. В. Викторов, **Я. А. Лунтовская**//Уфимская осенняя математическая школа - 2021: материалы международной научной конференции, Уфа, 06 - 09 октября 2021 года. – Уфа: Общество с ограниченной ответственностью «Аэтерна», 2021. Том 2. – С. 209-211.

7. Кризский В.Н. О БПЛА-мониторинге изоляционного покрытия катодно-поляризуемого магистрального трубопровода по данным магнитометрии/В.Н. Кризский, С.В. Викторов, О.В. Косарев, **Я.А. Лунтовская** // Математическое моделирование процессов и систем: Материалы XII Международной молодежной научно-практической конференции, Стерлитамак, 17–19 ноября 2022 года. Часть 1. – Стерлитамак /Стерлитамакский филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий», 2022. – С. 232-236.

8. Кризский, В. Н. Мониторинг изоляционного покрытия катодно-поляризуемого магистрального трубопровода по данным магнитометрии с учетом слоистости

вмещающей среды/В. Н. Кризский, С. В. Викторов, **Я. А. Лунтовская**//IV Международной научно-практической конференции, Стерлитамак, 22–24 сентября 2022 года. – Стерлитамак/Стерлитамакский филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Башкирский государственный университет»: Физика конденсированного состояния и ее приложения, 2022. – С. 202-206.

9. Косарев О. В. Математическое моделирование электрического поля внутритрубного диагностического зонда катодно-поляризуемого трубопровода/О. В. Косарев, Е. В. Катунцов, **Я. А. Лунтовская**//Бурение и нефть. – 2023. – № S2. – С. 123.

Патенты/свидетельства на объекты интеллектуальной собственности:

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023611883 Российская Федерация. Программа моделирования электрического поля внутритрубного диагностического зонда катодно-поляризуемого трубопровода № 2023610768: заявл. 20.01.2023, опубл. 26.01.2023/ В.Н. Кризский, О.В. Косарев, **Я.А. Лунтовская**; заявитель Санкт-Петербургский горный университет. – 8 с. : ил. – Текст: непосредственный.

11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023662303 Российская Федерация. Программа моделирования магнитного поля внутритрубного диагностического зонда катодно-поляризуемого трубопровода № 2023610768: заявл. 20.01.2023, опубл. 26.01.2023/ В.Н. Кризский, О.В. Косарев, **Я.А. Лунтовская**; заявитель Санкт-Петербургский горный университет. – 8 с.: ил. – Текст: непосредственный.

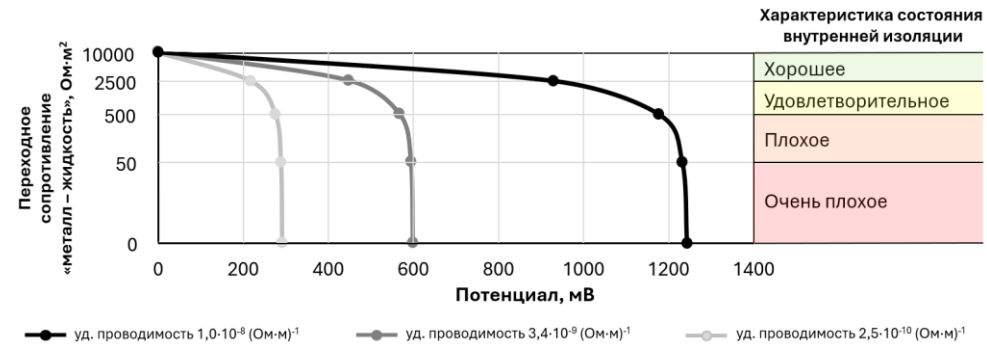
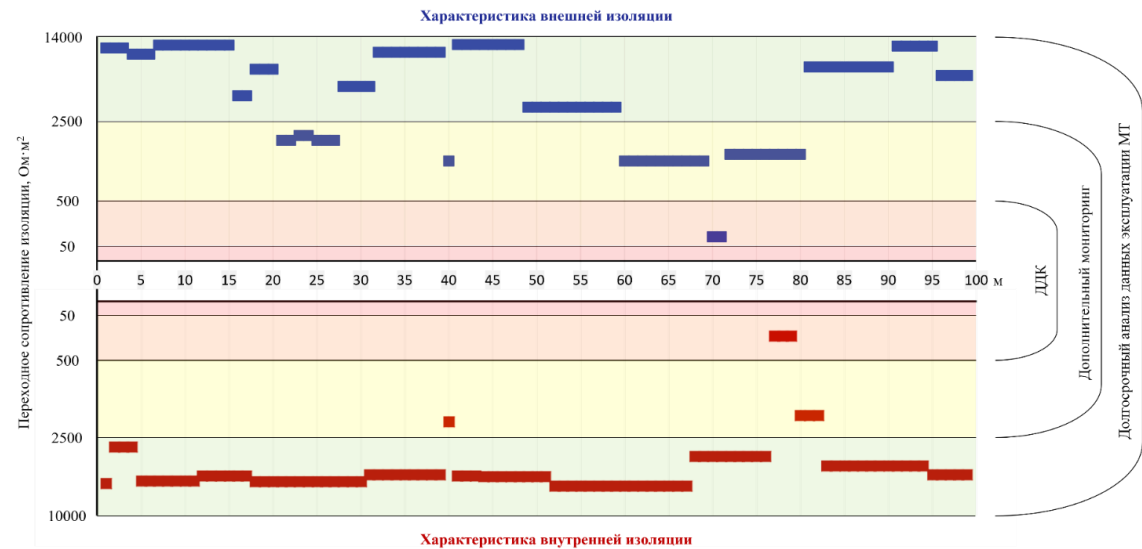


Рисунок 1 – График потенциала в месте дефекта для различных сопротивлений внутренней изоляции МТ



Рисунок 2 – Функции переходного сопротивления грунт-металл для различных высот перемещения аппаратуры над осью МТ:
 а) 25% длины сегмента дискретизации МТ; б) 100% длины сегмента дискретизации МТ; в) 400% длины сегмента дискретизации МТ



- демонстрационные значения переходного сопротивления на границе грунт/труба, полученные в ходе магнитометрических измерений
- демонстрационные значения переходного сопротивления на границе жидкость/труба, полученные в ходе внутритрубной диагностики

Рисунок 3 – Пример комплексной диаграммы состояния изоляции МТ на участке длиной 100 м

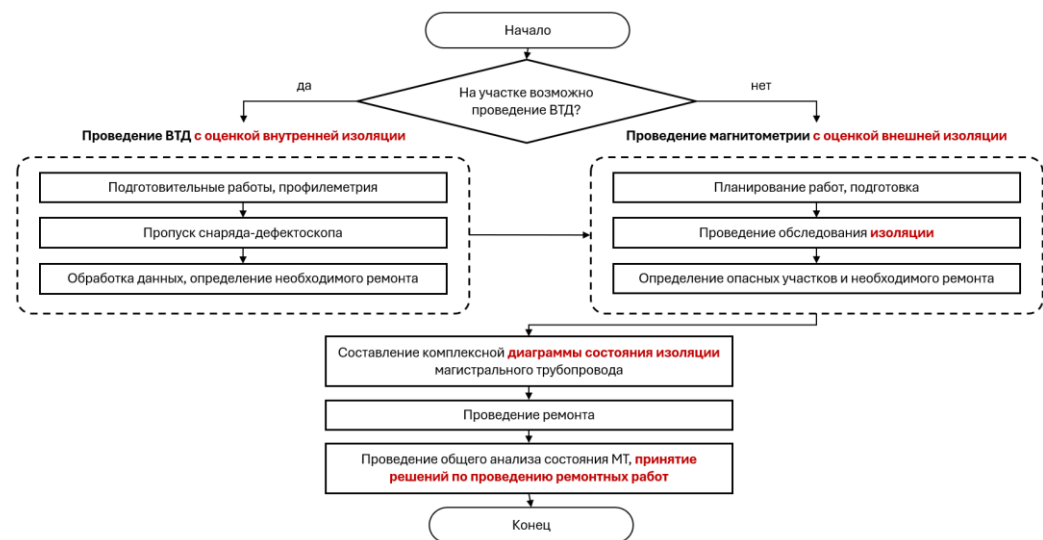


Рисунок 4 – Блок-схема способа оценки состояния изоляции МТ