

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет имени императрицы Екатерины II»

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук, профессор
Кризский В.Н.

Санкт-Петербург – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 ОБЗОР СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМ ЭКСПЛУАТАЦИИ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ	11
1.1 Магистральный трубопроводный транспорт	11
1.1.1 Общие сведения о магистральном трубопроводе.....	11
1.1.2 Способы защиты магистрального трубопровода от коррозии	13
1.1.3 Анализ программно-алгоритмического обеспечения принятия решений по оценке технического состояния магистральных трубопроводов.....	15
1.1.4 Контроль состояния изоляционного покрытия магистральных трубопроводов	23
1.2 Выводы по главе 1.....	24
ГЛАВА 2 СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ КАТОДНОЙ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ ТРУБОПРОВОДОВ.....	25
2.1 Системный подход при формировании математических моделей электромагнитных полей систем катодной защиты магистральных трубопроводов	25
2.1.1 Системный подход при формировании математической модели для магистрального трубопровода	25
2.1.2 Математические модели расчета электромагнитных полей системы катодной электрохимической защиты магистральных трубопроводов	32
2.2 Выводы по главе 2.....	40
ГЛАВА 3 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНО-АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИОННОГО ПОКРЫТИЯ МАГИСТРАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДА, НАХОДЯЩЕГОСЯ В СИСТЕМЕ КАТОДНОЙ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ	41
3.1 Математическое и программно-алгоритмическое обеспечение оценки состояния внутреннего изоляционного покрытия.....	41

3.1.1 Математическое моделирование электрического поля внутритрубного зонда с учетом внутреннего изоляционного покрытия трубопровода.....	41
3.1.2 Программно-алгоритмическое обеспечение определения местоположения дефекта внутреннего изоляционного покрытия	47
3.1.3 Математическое и компьютерное моделирование электромагнитного поля в воздухе над трассой трубопровода.....	51
3.1.4 Программно-алгоритмическое обеспечение определения местоположения дефекта внешнего изоляционного покрытия	55
3.2 Выводы по главе 3	61
ГЛАВА 4 ПРОГРАММНО-АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ МАГИСТРАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДА	62
4.1 Алгоритмическое обеспечение принятия решений по эксплуатации магистрального трубопровода по оценкам состояния внешнего и внутреннего изоляционного покрытия.....	62
4.2 Оценка эффекта от внедрения разработанной системы на эксплуатацию трубопровода	68
4.3. Экономическая часть	73
4.4 Выводы по главе 4.....	78
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	79
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	81
ПРИЛОЖЕНИЕ А Акт о внедрении результатов диссертации	94
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ	95
ПРИЛОЖЕНИЕ В Результаты вычислительных экспериментов	97

ВВЕДЕНИЕ

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 ценность 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. (Приложение А). Разработка программного обеспечения для диссертационной работы подтверждены свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2023611883 и № 2023662303 (Приложение Б).

Методы и методология 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 диссертации 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:

1) IV Всероссийской научной конференции «Современные образовательные технологии в подготовке специалистов для минерально-сырьевого комплекса», (март 2021, г. Санкт-Петербург);

2) Международной научной конференции «Уфимская осенняя математическая школа», (октябрь 2022, г. Уфа);

3) IV Международной научно-практической конференции «Физика конденсированного состояния и ее приложения», (сентябрь 2022, г. Стерлитамак);

4) XII Международной молодежной научно-практической конференции «Математическое моделирование процессов и систем», (ноябрь 2022, г. Стерлитамак);

5) II Международной научно-практической конференции «Прорывные технологии в разведке, разработке и добыче углеводородных ресурсов» (июнь 2023, г. Санкт-Петербург).

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 (пункты списка литературы № 21, 22, 24, 25, 27, 32, 33, 39, 74) 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 международные базы данных и системы цитирования Scopus. Получено 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ (пункты списка литературы № 50, 51).

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

ГЛАВА 1 ОБЗОР СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМ ЭКСПЛУАТАЦИИ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

1.1 Магистральный трубопроводный транспорт

1.1.1 Общие сведения о магистральном трубопроводе

По определению Свода правил (СП 36.13330.2012) магистральный трубопровод представляет собой единый производственно-технологический комплекс, который предназначен для транспортировки подготовленных углеводородов от объектов добычи (приема) до пунктов сдачи потребителям (передачи, транспорта, хранения), состоящий из конструктивно и технологически взаимосвязанных объектов, включая сооружения и здания, используемые для целей обслуживания и управления объектами магистрального трубопровода [52].

Магистральный трубопроводный транспорт является предпочтительным видом транспорта сырья. Возрастает его протяженность, совершенствуются технологии для надежной эксплуатации существующих трубопроводных систем, происходит внедрение более совершенных и современных средств управления трубопроводным транспортом. Также трубопроводы расположены на кратчайших расстояниях между пунктами приема и передачи, благодаря чему транспортировка сырья занимает меньше времени и является экономически выгодной.

Безаварийная эксплуатация магистрального трубопроводного транспорта обеспечивает: минимальный ущерб, наносимый экологии, уменьшение вероятности приостановления работ предприятий, работу в любых климатических условиях, что позволяет транспортировать сырье в полном объеме.

Магистральные трубопроводы монтируют разными способами в зависимости от метода сборки, назначения трубопровода, типа среды, особенностей локации, бюджета на реализацию и стоимости технического обслуживания и ремонта.

По типу монтажа магистральный трубопровод подразделяют на: надземный, наземный, подземный и подводный.

Надземные трубопроводы устанавливают на заранее подготовленные опоры. Наземные прокладываются на поверхности земли в насыпи. Подземные трубопроводы располагают в заранее сформированные траншеи. Такой тип установки характерен для нефтегазопроводов, которые функционируют под высоким давлением.

Подземную прокладку считают предпочтительной, поскольку она позволяет размещать трубы под землей, в изолированном виде и защищенном от внешних воздействий. Грунт сам по себе является изолятором в зимнее время, когда температура воздуха становится ниже нуля градусов. Кроме того, минимизируется доступ к трубам со стороны внешних факторов.

Одной из главных задач транспорта во всех отраслях промышленности является безаварийная транспортировка сырья. Однако по мере увеличения продолжительности работы трубопроводов опасность возникновения аварий и инцидентов на магистральных трубопроводах возрастает.

Основные причины аварий на магистральных трубопроводах [61, 64, 16]:

- 1) механические повреждения;
- 2) заводские дефекты (например, расслоения);
- 3) брак при строительных, монтажных работах (например, вмятины);
- 4) коррозионные повреждения.

По анализу работ [55, 15, 68, 17], посвященных причинам возникновения аварий в период с 2016 по 2023 годы, выявлены причины возникновения аварий в процентном соотношении, представленные на рисунке 1.1 в виде диаграммы.

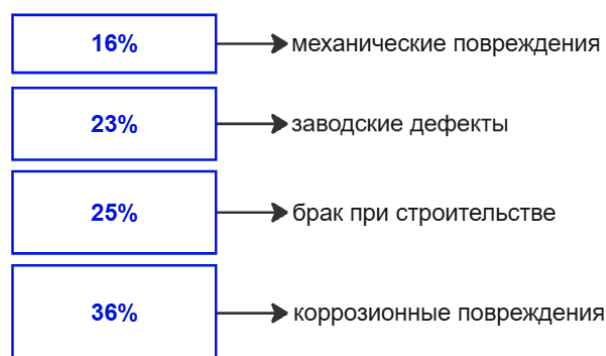


Рисунок 1.1 – Диаграмма причин возникновения аварий (составлено автором на основе данных работ [55], [15], [68], [17])

Как видно, влияние коррозионных повреждений металла труб значимо для безопасной эксплуатации магистральных трубопроводов.

1.1.2 Способы защиты магистрального трубопровода от коррозии

Для защиты магистральных трубопроводов от коррозии на практике применяют сочетание активной защиты и пассивной, то есть используют средства электрохимической защиты (катодная поляризация) трубопроводов в сочетании с изоляционным покрытием [87, 19, 82, 78, 72]. Электрохимическая защита направлена на снижение скорости коррозии металла труб за счет замедления процессов, приводящих к разрушению металла.

По требованию ГОСТ [11] магистральные трубопроводы подлежат обязательной электрохимической защите вне зависимости от условий их прокладки.

Катодную поляризацию трубопровода осуществляют с помощью подвода постоянного тока от станции катодной защиты (источник питания). Одним проводом станция соединена с трубопроводом, а другим – с анодным заземлителем, как представлено на рисунке 1.2.

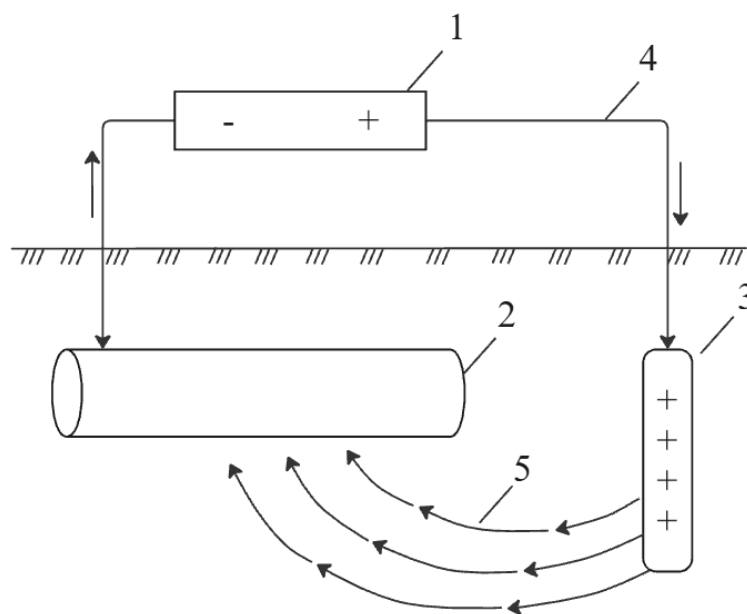


Рисунок 1.2 – Наглядная схема защиты трубопровода от коррозии: 1 – источник постоянного тока (станция катодной защиты); 2 – трубопровод; 3 – заземление (аноды); 4 – соединительные провода; 5 – защитный ток (составлено автором на основе описания в источнике [46])

Для обеспечения защитного потенциала на всем протяжении защищаемого объекта, в данном случае, магистрального трубопровода, требуется определение необходимых напряжения и тока станции катодной защиты.

Общее напряжение источника питания складывается последовательно из падения напряжений на следующих участках цепи: от станции к аноду, на сопротивлении растекания анодной группы (анода), в земле на пути к трубопроводу, в слое изоляции, в трубопроводе, от трубопровода к станции катодной защиты [46]. Все указанные составляющие падения напряжения с той или иной степенью точности могут быть определены. Таким способом можно найти напряжение на выходе станции катодной защиты. Для обеспечения заданного защитного потенциала потребуется определенная сила тока, которую также можно рассчитать. Таким образом, можно определить основные электрические характеристики станции катодной защиты [46].

К электрохимической защите относятся: установки катодной защиты, дренажные и протекторные установки [11].

Основная задача катодной защиты – создание отрицательного потенциала на защищаемом объекте, который препятствует процессу окисления металла трубы и снижает скорость образования коррозии. В данном случае, трубопровод является катодом, процесс коррозии замедляется за счет анода.

По требованиям нормативных документов [11, 13] в качестве основного метода защиты от коррозии для подземных сооружений предусматривают применение защитных покрытий. Различают внешние и внутренние изоляционные покрытия. На практике применяют износоустойчивые покрытия труб, например, на основе полимерных материалов. Внутренние покрытия, кроме свойств защиты, также уменьшают затраты на транспортирование продукта путем снижения трения.

Защитные свойства изоляционного покрытия в процессе эксплуатации трубопровода ухудшаются, что приводит к образованию коррозии металла труб.

Рассмотрим некоторые причины возникновения дефектов изоляционного покрытия [14]:

- некачественные материалы для изоляционного покрытия;
- изменение показателей качества материалов покрытия, происходящее в результате неправильной транспортировки, хранения или монтажа;
- механические воздействия грунта при эксплуатации, приводящие к сдвигающим или растягивающим напряжениям изоляционного покрытия, при этом происходит «растрескивание» и образование складок, задиров, царапин, гофр;
- неправильная эксплуатация трубопровода (резкий перепад температур перекачиваемого продукта, перекачка продукта с температурой выше проектной и т.д.);
- низкое качество осуществляемых мер электрохимической защиты;
- коррозионная агрессивность грунта.

Еще один вид защиты металла трубопроводов от коррозии это ингибиторная защита. Метод основан на применении химических реагентов-ингибиторов коррозии, которые способны образовывать на поверхности металла трубопроводов защитный «слой», тем самым снижая скорость его коррозии.

Таким образом, катодная защита и изоляционные покрытия являются неотъемлемой составляющей при эксплуатации магистральных трубопроводов. Все проводимые мероприятия по защите металла трубопроводов направлены на обеспечение безаварийного и длительного функционирования магистрального трубопровода.

1.1.3 Анализ программно-алгоритмического обеспечения принятия решений по оценке технического состояния магистральных трубопроводов

В статье [71] представлен обзор современных тенденций развития систем управления надежностью трубопроводов с помощью риск-ориентированных подходов. В работе проведен анализ компонентов системы управления рисками (анализ и контроль рисков, частота отказов) и обзор методов, используемых в

таких системах (статистические, вероятностные, байесовские сети, нечеткая логика).

В статье описан ряд актуальных для исследования вопросов: необходимость учета данных внутритрубного контроля, которые впоследствии можно применять для оценки надежности; прогнозирование возникновения дефектов и оптимизация интервалов контролирования состояния магистрального трубопровода и его технического обслуживания; создание «цифровых двойников».

Однако в работе можно выявить проблемы, требующие более детального исследования, такие как: недостаточная изученность взаимовлияния различных причин повреждения трубопровода (например, коррозии и механических деформаций); отсутствие примеров успешного внедрения предлагаемых риск-ориентированных подходов и их экономического или эксплуатационного эффекта на конкретных трубопроводных системах.

Статья [71] посвящена обзору современного состояния риск-ориентированного управления надежностью трубопроводов. Работа предоставляет теоретическую основу для разработки и совершенствования математического и программного обеспечения систем поддержки принятия решений по эксплуатации трубопроводов. Однако, для практической реализации многих продвинутых методов, рассмотренных в статье, необходимо решение ряда задач, связанных со сложностью алгоритмов, требованиями к качеству данных, вычислительным ресурсам и квалификации персонала. Статья подчеркивает важность дальнейших исследований в области взаимодействия рисков и разработки более эффективных методов оптимизации риск-ориентированного управления надежностью, что является актуальным направлением развития современных систем обеспечения работы трубопроводного транспорта.

В статье [75] предложена модель для анализа рисков и принятия решений по определению технического состояния магистральных газопроводов, подверженных внешней коррозии. В основе модели лежит байесовская сеть, построенная путем преобразования дерева отказов, которое включает в себя

причины образования внешней коррозии. Главной особенностью модели является внедрение возможных вариантов технического обслуживания (ремонт/замена покрытия, обслуживание катодной защиты, методы дренажа блуждающих токов, замена участка трубы) в структуру байесовской сети, что позволяет динамически пересчитывать вероятность отказа после применения выбранного варианта технического обслуживания.

Можно выделить следующие ключевые идеи в статье: возможность динамического обновления вероятности отказа трубопровода в зависимости от выбранного варианта технического обслуживания позволяет принимать более обоснованные решения; метод дерева отказов как основа для построения байесовской сети обеспечивает систематическое выявление и структурирование всех значимых факторов риска внешней коррозии, включая состояние системы защиты; модель в виде байесовской сети может быть интегрирована в программные решения для систем поддержки принятия решений по эксплуатации трубопроводов.

При этом в работе имеется ряд недостатков, требующих дальнейшего исследования: модель фокусируется только на внешней коррозии, не рассматривается ее связь с другими причинами отказа (например, внутренняя коррозия, усталость, механические повреждения и др.), в статье отсутствует сравнение разработанной модели с альтернативными вариантами систем анализа рисков.

Однако представленная в статье модель на основе байесовской сети является значимой для систем поддержки принятия решений при управлении техническим состоянием газопроводов, подверженных внешней коррозии. Модель предоставляет практический механизм для экономически обоснованного выбора оптимальных вариантов технического обслуживания.

Работа [70] посвящена разработке методики комплексной оценки рисков аварийных событий (пожар, взрыв, выброс токсичного газа) на магистральном газопроводе Ирана в условиях отсутствия качественных данных. В статье

применен метод, который объединяет инструменты распознавания опасностей с математическим аппаратом нечеткой логики для обработки неопределенностей. Вероятность и тяжесть последствий для каждого риска описываются на основе оценок экспертов.

Благодаря применению нечеткой логики в работе реализован учет субъективности экспертных суждений и отсутствия полной статистики отказов; иерархическая структура методики обеспечивает детализацию сложных сценариев аварий (например, переход утечки газа во взрыв) и выявляет критические элементы; ранжирование перечня рисков позволяет операторам трубопроводов оптимизировать ресурсы для обеспечения лучшей безопасности.

Однако представленная модель предполагает оперативную обработку большого количества данных, что значительно увеличивает требования к мощности применяемого для анализа оборудования и, соответственно, затраты. Кроме того, качество результатов определяется компетентностью привлекаемых специалистов и репрезентативностью анкет экспертной оценки.

В работе [85] предложен метод оценки коррозионной уязвимости магистральных трубопроводов с применением байесовской нейронной сети. Модель состоит из трех модулей: прогнозирование скорости коррозии на основе испытаний в лабораторных условиях, расчёт давления разрушения магистрального трубопровода с учётом коррозионных дефектов, оценка вероятности отказа через предельное состояние, определяемое разницей между давлением разрушения и рабочим давлением.

Среди достоинств предложенной системы можно выделить использование данных лабораторных исследований для расчета граничных эксплуатационных параметров, что позволяет корректировать режим работы магистрального трубопровода с большей точностью. Но при этом модель не учитывает реальные условия эксплуатации трубопровода, состояние почвы и коррозионную активность вод.

Статья [66] посвящена разработке динамической модели для оценки рисков возникновения аварии на подводном трубопроводе, вызванных вмешательством внешних факторов. Авторами статьи предложен подход, объединяющий три инструмента: анализ случаев отказов для выявления базовых событий, динамические байесовские сети для моделирования вероятностных зависимостей, метод конечных элементов для расчета ударных нагрузок на трубопровод от падающих объектов и определения категорий повреждений. Модель является динамической, так как позволяет обновлять оценки риска по мере поступления новых данных и прогнозировать уровень риска на протяжении всего жизненного цикла трубопровода.

Достоинства представленной модели заключаются в минимизации применения субъективных экспертных оценок; прогнозировании уровня риска на основе текущих и исторических данных; способности модели к обучению при поступлении новых данных, что повышает точность последующих оценок.

Однако построение и калибровка модели требуют значительных вычислительных ресурсов, наличия обширных, качественных входных данных. Проверка долгосрочных прогнозов модели, особенно в условиях редких событий (отказов), является сложной задачей и требует длительного периода наблюдений или очень детальных исторических данных.

Несмотря на сложность и высокие требования к данным модель предлагает адаптивный инструмент для принятия обоснованных решений по техническому обслуживанию, инспекциям, планированию ресурсов и продлению срока службы трубопроводов в условиях неопределенности. Модель может стать основой для развития систем принятия решений по эксплуатации подводных трубопроводных сетей.

Статья [69] посвящена технологии мониторинга утечек нефти в наземных трубопроводах с применением различных методов анализа данных. В работе применяется математическое моделирование и алгоритмы машинного обучения для повышения точности и скорости обнаружения утечек.

Среди достоинств предложенного в статье метода можно выделить учет гидродинамических параметров, таких как рельеф местности и свойства нефти. Кроме того, применение искусственного интеллекта для анализа данных сенсоров снижает частоту ложных срабатываний.

Представленная технология на основе анализа данных характеризуется высокой точностью и степенью автоматизации мониторинга утечек, но требует оптимизации использования вычислительных ресурсов и адаптации к различным условиям применения.

Статья [67] посвящена разработке неразрушающего метода диагностики дефектов магистральных трубопроводов, которые эксплуатируются в агрессивных средах. Авторы проводят эксперименты и численное моделирование изменения прочностных характеристик стали труб для разработки системы мониторинга ее состояния.

Цифровая регистрация и алгоритмы обработки данных позволяют значительно ускорить анализ экспериментов. Численная модель позволяет идентифицировать параметры повреждения без трудоемких разрушающих испытаний. Однако метод апробирован лишь на ограниченном классе сталей. Для труб с покрытиями или загрязнениями требуется предварительная подготовка поверхности, что может замедлять диагностику.

Предложенный метод может быть применен в системах мониторинга трубопроводов благодаря портативности, скорости и чувствительности к различным видам дефектов. При внедрении в системы принятия решений метод может снизить риск отказов за счет раннего выявления изменений свойств металла.

В статье [80] предложена система классификации коррозионного состояния трубопроводов с применением методов интеллектуального анализа данных. Система анализирует пять ключевых параметров: свойства сырья (температура, давление, плотность), уровень pH в сепараторе и концентрацию H_2S в циркулирующем газе. На основе эмпирических данных разработаны пороговые

значения для каждого параметра, позволяющие отнести коррозию к одному из трех классов: «оптимальный», «низкий» или «высокий».

К достоинствам системы можно отнести определенные диапазоны параметров, что исключает субъективность оценки состояния трубопровода, а визуализация в форме дерева решений упрощает интеграцию системы в автоматизированные системы управления, позволяя операторам быстро идентифицировать критические состояния

При этом необходимо отметить, что модель опробована только для конкретного типа установок, а ее применимость к другим типам требует дополнительных исследований. Кроме того, в системе не учитываются взаимовлияния параметров и внешних факторов.

В статье [31] представлена комплексная инновационная система мониторинга состояния магистральных нефтепроводов, разработанная для участков со сложными геологическими условиями (оползни, многолетнемерзлые грунты, высокая сейсмичность, подтопления). Система предназначена для обеспечения промышленной и экологической безопасности, надежности эксплуатации трубопроводов и управления природно-техногенными рисками. Система функционирует по принципу непрерывного сбора данных от автоматизированных постов наблюдения (датчиков) и периодического сбора данных (аэровизуальные обследования, дистанционное зондирование). Полученные данные обрабатываются с использованием набора программно-расчетных модулей, реализующих математические модели для оценки напряженно-деформированного состояния трубопровода, прогноза развития опасных геологических процессов и их влияния на трубопровод. Результаты анализа используются для оценки технического состояния трубопровода, прогнозирования его поведения и для формирования и принятия конкретных управленческих решений по обеспечению безопасности.

Описанная в статье система обеспечивает непрерывный мониторинг основных параметров на сложных участках и дополняет его периодическими

обследованиями, что позволяет оценить состояние трубопровода и окружающей среды. Применение автоматизированных датчиков с беспроводной передачей данных позволяет сократить потребность в постоянном присутствии персонала в труднодоступных районах.

Среди недостатков системы можно выделить высокие требования к специализированному оборудованию, для производства которого необходимы дополнительные научные разработки; точность прогнозов и оценок напряженно-деформированных состояний напрямую зависит от адекватности заложенных математических моделей и полноты/точности исходных данных о геологии, свойствах грунтов и самом трубопроводе, ошибки в моделях или данных могут привести к неверным управленческим решениям; интерпретация результатов расчетов моделей, анализ комплексных данных и окончательное принятие решений требуют высококвалифицированных специалистов (инженеров, геологов, математиков).

Представленная система мониторинга и поддержки принятия решений для магистральных нефтепроводов является значимой в обеспечении их безопасной эксплуатации в сложных геологических условиях. Она характеризуется высокой стоимостью внедрения, сложностью и зависимостью от качества моделей и данных. Ее широкое тиражирование и долгосрочная эффективность требуют дальнейшего развертывания, накопления опыта эксплуатации и, возможно, оптимизации затрат.

При рассмотрении данных работ можно сделать вывод о том, что математическое и программное обеспечение, в совокупности, даёт возможность исследования и имитации особенностей функционирования системы в реальных условиях эксплуатации. При этом параметры системы и окружающей среды можно варьировать для создания любых реальных условий. Благодаря этому уменьшается потребность в сложном лабораторном оборудовании и необходимости проведения дорогостоящих натурных экспериментов.

1.1.4 Контроль состояния изоляционного покрытия магистральных трубопроводов

Качество изоляционного покрытия контролируется с момента выпуска с производства. Также способ контроля зависит от вида монтажа магистрального трубопровода.

Одним из базовых и первых является визуальный контроль нанесенного изоляционного покрытия на трубопровод. Оцениваются такие дефекты как трещины, отслоения, коррозия и другие повреждения, которые могут повлиять на функциональность и долговечность трубопровода.

Контролируют адгезию изоляции трубопроводов, она представляет собой проверку прочности сцепления изоляционного слоя с поверхностью трубы. Метод контроля зависит от вида материала покрытия изоляции.

Также осуществляют контроль толщины изоляционного покрытия с применением, как правило, толщиномеров.

Перед укладкой в траншею сплошность защитного покрытия контролируют искровым дефектоскопом.

Изоляционное покрытие при эксплуатации трубопроводов подлежит контролю методом катодной поляризации, на основании данных о силе тока установок катодной защиты и распределения потенциалов вдоль магистрального трубопровода, а также методами внутритрубной дефектоскопии [13].

Один из показателей, на основании которых можно делать вывод о состоянии изоляции, в условиях эксплуатации, является переходное сопротивление изоляции. Предельный срок службы изоляционных покрытий подземных трубопроводов определяется временем, в течение которого величина переходного сопротивления изоляции снизится до $10^3 \text{ (Ом}\cdot\text{м}^2)$ [13].

Важно отметить, что способ проводимого контроля изоляционных покрытий зависит от условий, в которых на данном этапе находится магистральный трубопровод, также от вида монтажа, назначения и прочих условий эксплуатации магистрального трубопровода [26].

1.2 Выводы по главе 1

Магистральный трубопровод является сложной системой, состоящей из множества взаимосвязанных элементов, необходимых для обеспечения безопасной эксплуатации магистрального трубопровода. Применение средств защиты, своевременный контроль технического состояния магистрального трубопровода и грамотная эксплуатация позволят обеспечить безопасную работу магистрального трубопровода.

По проведенному анализу научных работ можно сделать вывод, что применение математических моделей при разработке программного обеспечения для функционирования магистрального трубопровода позволит реализовать работу исследуемого объекта в различных условиях эксплуатации.

Таким образом, обеспечение безаварийной работы магистрального трубопровода представляет собой комплекс задач, который требует системного подхода и принятия обоснованных решений для его корректной эксплуатации.

ГЛАВА 2 СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ КАТОДНОЙ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ ТРУБОПРОВОДОВ

2.1 Системный подход при формировании математических моделей электромагнитных полей систем катодной защиты магистральных трубопроводов

2.1.1 Системный подход при формировании математической модели для магистрального трубопровода

Применение системного подхода при формировании математических моделей электромагнитных полей систем катодной защиты магистральных трубопроводов является важной составляющей в обеспечении безопасной эксплуатации сложных сооружений.

Первый шаг в системном подходе – это идентификация всех параметров системы, которые оказывают существенное влияние на ее работу. На данном этапе необходимо учитывать все значимые факторы, такие как геометрические особенности трубопровода, физико-химические свойства почвы, электропроводимость среды, а также характеристики самого защитного слоя и анодных заземлителей. Каждая из этих переменных оказывает существенное влияние на распределение электромагнитного поля и, следовательно, эффективность катодной защиты.

Второй шаг – формирование математических моделей.

Третий шаг – проведение моделирования с целью поиска параметров системы катодной защиты. Система уравнений и переменных, полученная на предыдущем этапе, позволяет проводить вычислительные эксперименты, варьируя те или иные параметры, чтобы определить степень их влияния.

После формирования моделей наступает этап проверки с использованием реальных данных. Натурные эксперименты, которые позволяют сопоставить результаты моделирования с фактическими наблюдениями, служат основой для корректировки применяемых математических моделей [35, 1].

Рассмотрим систему катодной защиты магистрального трубопровода с точки зрения системного подхода, предполагающего исследование объекта как единой системы, целостного комплекса взаимосвязанных элементов, реализующих общие функции [35]. На основании анализа опишем основные элементы, существенные параметры и свойства, которые следует учесть в математической модели системы катодной защиты подземного магистрального трубопровода.

Под системой катодной защиты магистрального трубопровода будем понимать совокупность элементов ее составляющих. Предполагаемая структура системы катодной защиты на рисунке 2.1, кроме самого объекта защиты, включает в себя:

- вмещающую объект физическую среду;
- генерирующие постоянный электрический ток станции катодной защиты;
- анодные заземлители, через которые ток инжектируется во вмещающую среду;
- проводящие ток кабели, соединяющие катодные станции с трубопроводом и анодными заземлителями.

Параметры всех составляющих системы катодной защиты следует конкретизировать и задать численно. Для магистрального трубопровода таковыми являются: диаметр, толщина стенки, электропроводность металла, длина защищаемого участка трубы, глубина залегания, переходное сопротивление изоляционного(ых) покрытия(й), электропроводность транспортируемой жидкости.

Катодом в системе является само защищаемое сооружение.

Помимо трубопроводов антикоррозионной защите подлежат подземные или подводные, содержащие металл конструкции, например – сваи, плотины, резервуары, нефтяные платформы, днища кораблей.

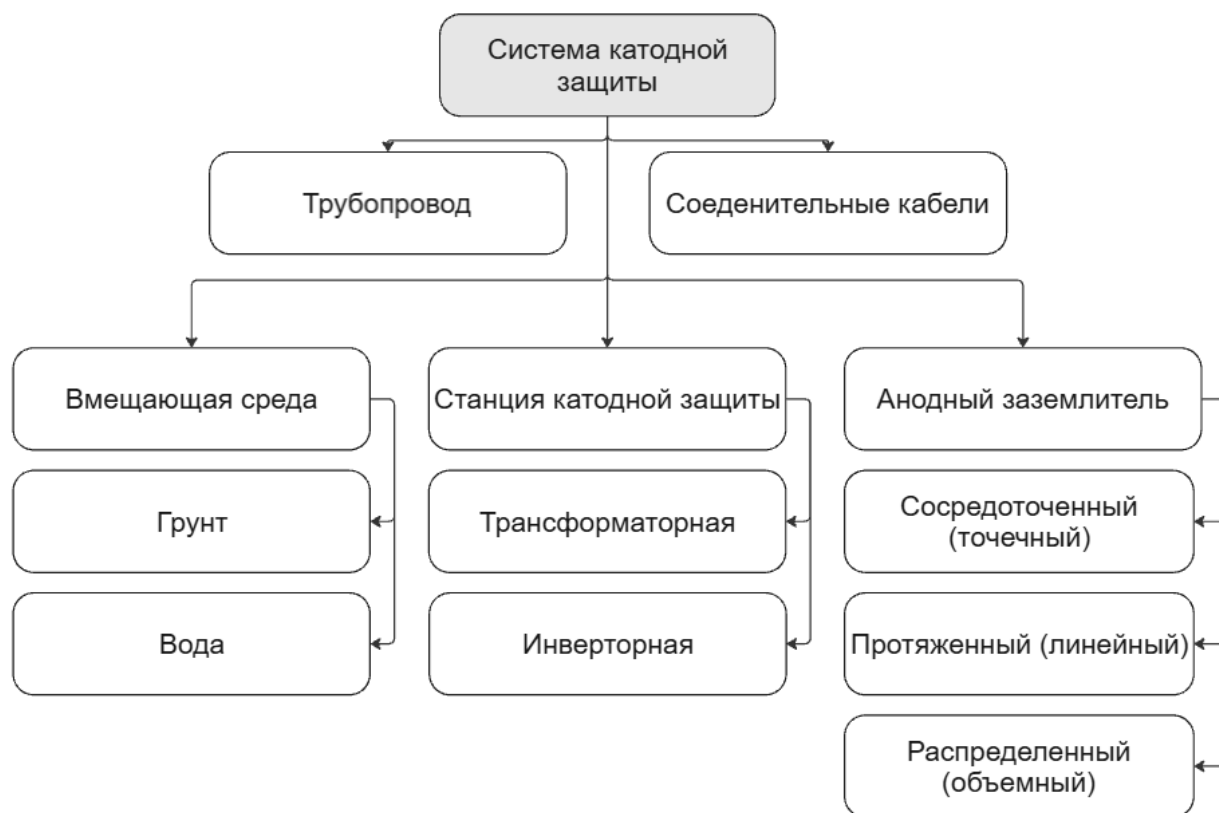


Рисунок 2.1 – Структура элементов системы катодной защиты (составлено автором)

В качестве вмещающей объект среды могут рассматриваться различные геологические среды – вода, грунт. Большинство защищаемых сооружений находятся либо целиком под землей или водой, либо в контакте с ними [7, 20, 86]. Важной характеристикой среды при этом выступают ее электромагнитные свойства, связанные с проводящими электрический ток процессами, рисунок 2.2.

Среда может быть по удельной электропроводности как изотропной, так и анизотропной [63, 2, 18], иметь сложный характер строения, содержать локальные включения, влияющие на распределение защитного потенциала на границе «объект/среда». Изотропная среда – есть частный случай анизотропной.

По типу станции катодной защиты можно разделить на инверторные и трансформаторные.

Количество применяемых станций катодной защиты может различаться, в зависимости от протяженности защищаемого объекта, от условий, в которых находится объект защиты.

Как упоминалось ранее, по требованиям нормативных документов, магистральный трубопровод, должен находится под защитой от коррозии [46, 13]. Выбор защиты является важной составляющей для безопасной эксплуатации магистральных трубопроводов.



Рисунок 2.2 – Электромагнитные свойства среды (составлено автором)

На рисунке 2.3 приведены основные способы защиты объекта от коррозии.

Наиболее распространенным способом защиты является комплексный, то есть применение активного и пассивного способов. В качестве активного способа чаще всего применяют катодную защиту, в качестве пассивного – нанесение изоляционных покрытий. На практике применяют двусторонние (наружные и внутренние) износоустойчивые покрытия труб. Внутренние покрытия, кроме свойств защиты, уменьшают затраты на транспортирование продукта путем снижения трения.



Рисунок 2.3 – Способы защиты от коррозии (составлено автором)

Безопасная эксплуатация магистрального трубопровода также зависит от протекающих в динамике процессов (рисунок 2.4). К таким процессам следует отнести:

- газо-гидро-динамические процессы, возникающие при перекачке транспортируемого продукта;
- процессы развития усталости металла трубы, возникающие вследствие деформаций металлической оболочки от перепадов внутритрубногo давления, и внешних воздействий;
- процессы механики вмещающей среды (оттаивание, замерзание, оползни грунта, течение вод);
- биохимические процессы воздействия на изоляционное покрытие трубопровода микроорганизмов, бактерий и химических веществ;
- процессы рассеивания естественных и искусственно возбуждаемых электромагнитных полей, влияющих на защитные свойства металла.



Рисунок 2.4 – Процессы, влияющие на функционирование магистрального трубопровода (составлено автором)

Каждый из указанных процессов нуждается в формализации и описании посредством математических моделей с целью прогнозирования во времени свойств объекта.

Значительно влияющим на процесс коррозии металла труб, является процесс распределения электрического поля, возбуждаемого системой катодной защиты. Это, в свою очередь, тоже многофакторный процесс, нуждающийся в систематизации. Систематизация позволяет в дальнейшем перейти к автоматизированным программным процедурам, формирования необходимых пользователю математических моделей (и соответствующих алгоритмов вычислительных методов) в зависимости от типа решаемой задачи.

Основные элементы и их свойства (рисунок 2.5), полученные в ходе систематизации системы катодной защиты, учтены при формировании математических моделей, представленных в Главе 3 диссертационной работы.

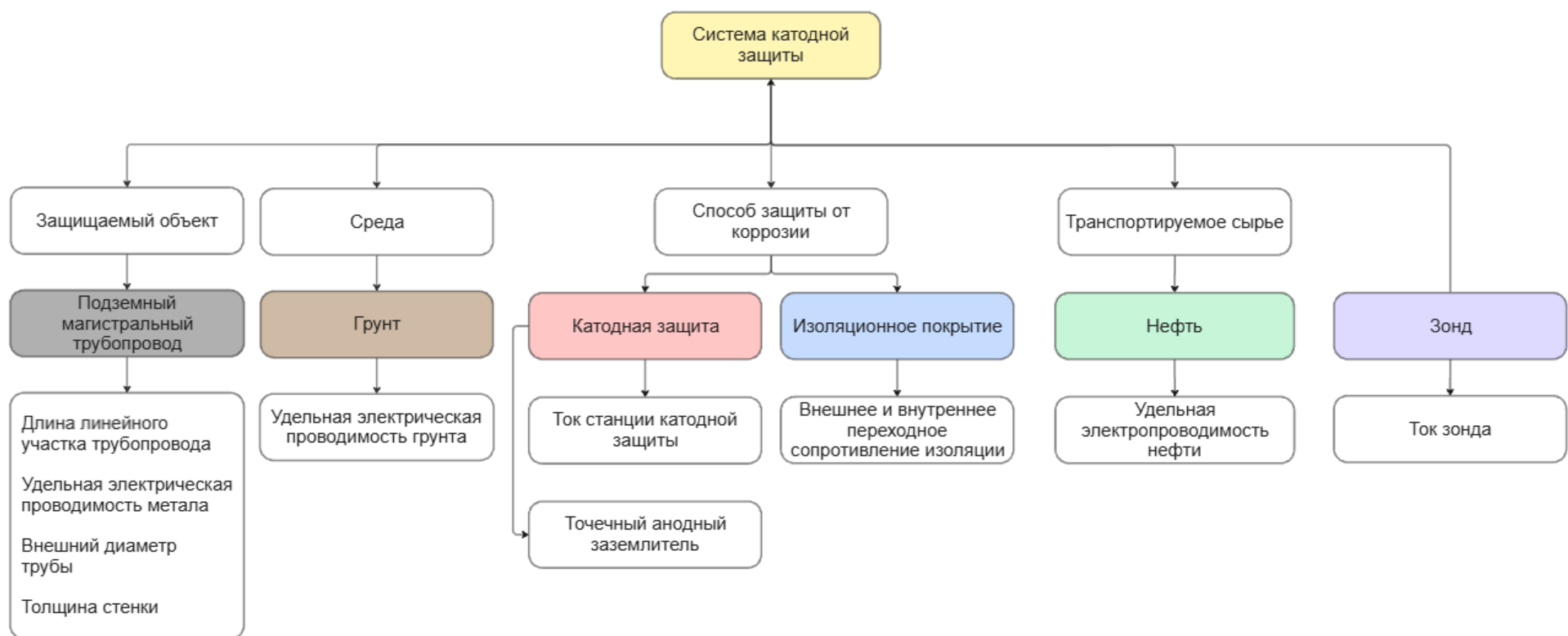


Рисунок 2.5 – Основные элементы и их свойства системы катодной защиты магистрального трубопровода для формирования математической модели (составлено автором)

2.1.2 Математические модели расчета электромагнитных полей системы катодной электрохимической защиты магистральных трубопроводов

Математическая модель должна описывать распределение защитного потенциала на поверхности металла трубы вдоль трубопровода в зависимости от:

- диаметра трубы и толщины ее стенки, марки стали, траектории залегания трассы;
- тока, инжектируемого в систему катодными станциями и (или) внутритручными зондами;
- удельных электропроводностей и границ подобластей вмещающего трубопровод грунта;
- состояния внешнего и внутритружного изоляционных покрытий и т.п.

Модели различаются между собой перечнем учитываемых факторов [28-83]. Факторы влияют на степень детализации задачи, на достоверность результатов обработки данных.

Рассмотрим математическую модель на составляющих элементах системы катодной защиты трубопровода постоянного электрического тока.

Вмещающая трубопровод среда, как правило, является многокомпонентной – состоящий из нескольких подобластей, физические свойства которых различны. Для всех подобластей вмещающей среды (Ω_i) (например, грунт или вода) в математической модели уравнение распределения постоянного электрического тока вида (2.1):

$$\operatorname{div} \left(\sigma_i \cdot \bar{\nabla} U_i(P) \right) = F(P), P \in \Omega_i, \quad (2.1)$$

где div – оператор расходимости (дивергенция) показывает, насколько векторное поле «расходится» из точки в окрестности,

σ_i – удельная электропроводность вещества в подобласти Ω_i , (Ом/м)⁻¹,

$\bar{\nabla}$ – вектор градиента,

$U_i(P)$ – потенциал тока в точке P подобласти Ω_i , В,

P – произвольная точка в пространстве,

$F(P)$ – функция описывает источники или стоки тока, находящиеся в подобласти Ω_i ,

i – индекс для обозначения (например, g – грунт или l – жидкость).

В анизотропной среде изменение ее электрических свойств в различных направлениях происходит неодинаково. Удельная электропроводность вещества (σ_i), в этом случае, описывается постоянным тензором (2.2):

$$\sigma_i = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{13} & \sigma_{23} & \sigma_{33} \end{pmatrix}. \quad (2.2)$$

Чаще всего этот тензор симметричен.

В изотропной среде, где электрические параметры одинаковы по всем направлениям, удельная электропроводность вещества (σ_i) – есть тензор диагональный с одинаковыми постоянными элементами на диагонали (2.3):

$$\sigma_i = \begin{pmatrix} \sigma_i & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_i & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_i \end{pmatrix}. \quad (2.3)$$

Уравнение распределения электрического тока в изотропной среде приобретает вид (2.4):

$$\sigma_i \cdot \Delta U_i(P) = F(P), P \in \Omega_i, \quad (2.4)$$

где Δ – оператор Лапласа.

Сложная геометрия вмещающей трубопровод составной кусочно-постоянной по физическим свойствам среды, в том числе включающая присутствие локальных проводящих включений, влияющих на распределение защитного потенциала сооружений, учитывается введением в математическую модель граничных условий, описывающих непрерывность потенциала (2.5) и плотности тока (2.6) с различными удельными электропроводностями, заданными тензорами (σ_i и σ_j):

$$U_i(P)|_{\gamma_{ij}} = U_j(P)|_{\gamma_{ij}}, \quad (2.5)$$

$$(\sigma_i \bar{\nabla} U_i(P), \bar{n})|_{\gamma_{ij}} = (\sigma_j \bar{\nabla} U_j(P), \bar{n})|_{\gamma_{ij}}. \quad (2.6)$$

где γ_{ij} – границе γ_{ij} контакта двух подобластей Ω_i и Ω_j ,

$\bar{n}$ – вектор нормали,

j – индекс для обозначения.

Контакт на границе вмещающей среды (γ_0) удельной электропроводности (σ_o) с воздухом (o) задается граничным условием второго рода вида (2.7):

$$(\sigma_o \bar{\nabla} U_o(P), \bar{n})|_{\gamma_0} = 0. \quad (2.7)$$

Условия стремления потенциала к нулю на бесконечно удаленных границах вмещающей среды учитываются введением в математическую модель условий вида (2.8):

$$U_o(P) \rightarrow 0, P \rightarrow \infty. \quad (2.8)$$

В металле (m) трубы потенциал тока удовлетворяет уравнению (2.9):

$$\operatorname{div}(\sigma_m \cdot \bar{\nabla} U_m(P)) = 0, \quad (2.9)$$

а стекание тока к катодной станции в точке дренажа трубы (B_t) учитывается включением в модель условия (2.10):

$$\left[\frac{\partial U_m(P)}{\partial x} \right] \Big|_{B_t} = \frac{I}{\sigma_m S_m}, \quad (2.10)$$

где I – дренаж тока катодной станции от трубопровода,

S_m – поперечное сечение металла трубы с осью трубы, расположенной вдоль оси O_x , м.

В математической модели часто задают точку отсчета ($x = 0$) и длину трубы (L_t), полагая, что в этих точках на торцах трубы выполняется условие непротекания тока по металлу (2.11) и по транспортируемому продукту (2.12):

$$\frac{\partial U_m(P)}{\partial x} \Big|_{x=0; L_t} = 0, \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial U_i(P)}{\partial x} \Big|_{x=0; L_t} = 0, \quad (2.12)$$

Такое предположение, что между двумя участками трассы, защищаемыми катодными станциями, такая точка всегда существует.

Анодные заземлители являются рабочими электродами, которые применяют для обеспечения антикоррозионной защиты подземных сооружений. Выбор типа,

конструкции, количества и расположения анодных заземлителей осуществляется на этапе проектирования системы на основании данных предпроектных изысканий.

Для сосредоточенного источника тока (точечного анодного заземлителя) функция $F(P)$ правой части уравнения имеет вид (2.13):

$$F(P) = -I \cdot \delta(P - A_{pa}), \quad (2.13)$$

где I – сила инжектируемого тока, А,

A_{pa} – точка расположения точечного анода (средняя точка протяженного или рассредоточенного анода при аппроксимации их сосредоточенным источником тока),

δ – функция Дирака.

При наличии протяженных анодных заземлителей математическая модель задачи должна включать в себя условие вида (2.14):

$$U_i(P) + c_{ig}(P)(\sigma_i \bar{\nabla} U_i(P), \bar{n})|_{S_{ai}} = U_a(P), \quad (2.14)$$

где $c_{ig}(P)$ – переходное сопротивление обсыпки анода, Ом·м²,

σ_i – удельная электропроводность вмещающей среды, содержащей протяженное анодное заземление, (Ом/м)⁻¹,

$(\sigma_i \bar{\nabla} U_i(P), \bar{n})$ – скалярное произведение векторов,

S_{ai} – граница «протяженный анод/вмещающая среда», м,

$U_a(P)$ – потенциал электрического тока в протяженном аноде, В,

$\bar{n}$ – вектор нормали к границе S_{ai} .

Подключение соединительного кабеля к протяженному анодному заземлению в точке A_a учитывается добавочным условием (2.15):

$$\left[\frac{\partial U_a(P)}{\partial x} \right] \Big|_{A_a} = \frac{I}{\sigma_a S_a}, \quad (2.15)$$

где S_a – поперечное сечение металлического стержня заземлителя, расположенного вдоль оси O_x , м,

σ_a – удельная электропроводность, (Ом/м)⁻¹.

Изоляционное покрытие трубопровода может быть, как внешним, так и внутренним. Параметр, который следует учитывать при формировании математической модели – это переходное сопротивление изоляционного покрытия. В большинстве существующих математических моделей учитывают только внешнее сопротивление изоляции [28, 3, 48], однако для задач внутритрубной диагностики, контроля состояния трубопровода [8] следует также учитывать переходное сопротивление внутреннего слоя изоляции для оценки степени его влияния на образование коррозии металла труб.

Для учета внешнего изоляционного покрытия трубы в математическую модель включается граничное условие третьего рода на границе «металл/вмещающая среда» S_{mi} вида (2.16):

$$U_i(P) - c_{mi}(P)(\sigma_i \bar{\nabla} U_i(P), \bar{n})|_{S_{mi}} = U_m(P), \quad (2.16)$$

где $c_{mi}(P)$ – функция переходного сопротивления, отражающая состояние внешнего изоляционного покрытия трубопровода, Ом·м²,

S_{mi} – граница «труба/вмещающая среда», м.

Учет внутреннего изоляционного покрытия трубы в математической модели отражается добавлением граничного условия третьего рода на границе S_{lt} контакта «транспортируемая жидкость/металл» вида (2.17):

$$U_l(P) + c_{lm}(P)(\sigma_l \bar{\nabla} U_l(P), \bar{n})|_{S_{lm}} = U_m(P), \quad (2.17)$$

где $U_l(P)$ – потенциал тока в жидкости, В,

$c_{lt}(P)$ – есть функция переходного сопротивления на границе S_{lt} , Ом·м²,

$U_m(P)$, – потенциал в металле трубы, В,

σ_l – удельное электрическое сопротивление транспортируемого сырья, (Ом/м)⁻¹.

Если в математической модели следует учесть электрические постоянные токи силы (I_z), возбуждаемые в точках A и B внутритрубным зондом в транспортируемой жидкости с удельной электропроводности (σ_l), то для расчета потенциала ($U_l(P)$) математическую модель следует дополнить уравнением распространения поля в сырье (2.18):

$$\operatorname{div}(\sigma_l \cdot \bar{\nabla} U_l(P)) = -I_z \cdot (\delta(P - A) - \delta(P - B)), P \in \Omega_l. \quad (2.18)$$

В большинстве практических случаев в зонах прокладки магистральных трубопроводов, учитывая малое отличие относительных магнитных проницаемостей слоев вмещающей среды от относительной магнитной проницаемости воздуха (μ), можно допустить, что вмещающее трубопровод пространство однородно по его магнитным свойствам. В этом случае вектор магнитной индукции ($B(r_0)$) в любой точке пространства, задаваемой радиус-вектором (r_0) (в том числе в воздухе) может быть вычислен по формуле Био-Савара-Лапласа [30] по известному распределению в объеме векторного поля плотности тока ($j(r)$) (2.19):

$$B(r_0) = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \int_V \frac{[j(r)dV, r_0 - r]}{|r_0 - r|^3}, \quad (2.19)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ – магнитная постоянная, Гн/м,

$[j(r)dV, r_0 - r]$ – векторное произведение,

V – область интегрирования.

В области интегрирования (V) подобласти с высокими (относительно грунта) по модулю значениями вектора плотности тока, текущего в металлах, следует выделить особо: область трубопровода и области протяженных анодных заземлителей.

Из описанных выше составляющих элементов (2.1) – (2.19), в соответствии с необходимым видом решаемой практической задачи, конструируется конкретная математическая модель прямой задачи – задачи расчета электромагнитного поля при известных значениях всех входящих в модель параметров системы.

Значительно более сложной и ресурсозатратной по решению является обратная задача, в которой по измерениям электрических и/или магнитных полей в некотором дискретном наборе точек (мест расположения датчиков) осуществляется определение каких-либо физических или геометрических

параметров системы, не поддающихся прямым измерениям. К таковым в системах катодной защиты относят траекторию погруженной трассы трубопровода, сопротивление наружного и/или внутреннего изоляционного покрытия, истончение толщины стенки трубы.

Эффективным, часто используемым на практике, методом решения обратных задач является метод А.Н. Тихонова – метод поиска экстремума регуляризирующего функционала. Метод требует многократного решения прямой задачи. Если математическая модель прямой задачи сгенерирована, то для формирования математической модели обратной задачи по определению желаемого параметра (P_{ar}), модель прямой задачи необходимо дополнить регуляризирующим функционалом ($F^\alpha(P_{ar})$) (2.20):

$$F^\alpha(P_{ar}) = F_1(P_{ar}) + \alpha \cdot F_2(P_{ar}), \quad (2.20)$$

где $F_1(P_{ar})$ – функционал невязки,

$F_2(P_{ar})$ – стабилизирующий функционал,

α – параметр регуляризации.

Для автоматизированного формирования математической модели следует иметь множество конкретных видов функционалов невязки и стабилизирующих функционалов для назначения их пользователем в программном блоке формирования математических моделей обратных задач.

Приведем пример сгенерированной по приведенному выше подходу математической модели прямой задачи рассеивания электрических системы катодной защиты прямолинейного магистрального трубопровода, обладающего наружным и внутренним изоляционным покрытием. Вмещающей трубопровод средой выбрано однородное изотропное полупространство. Транспортируемый продукт – жидкость. Катодная станция генерирует электрический ток. Анодное заземление сосредоточенное.

Для задачи распределение потенциалов электрического тока в грунте (2.21), металле трубы и транспортируемой жидкости (2.22) имеет следующий вид:

$$\Delta U_g(P) = -\frac{I}{\sigma_g} \delta(P - A), \quad (2.21)$$

$$\Delta U_m(P) = 0; \Delta U_l(P) = 0. \quad (2.22)$$

Условие стекания тока к катодной станции осуществляется в точке дренажа трубы B_t (2.23):

$$\left[\frac{U_m(P)}{\partial x} \right]_{B_t} = \frac{I}{\sigma_m S_m}. \quad (2.23)$$

Условия протекания тока для металла и жидкости на торцевых границах трубопровода (2.24):

$$\left. \frac{\partial U_m(P)}{\partial x} \right|_{(x=0; L_t)} = 0; \left. \frac{\partial U_l(P)}{\partial x} \right|_{(x=0; L_t)} = 0, \quad (2.24)$$

Условия непротекания тока на границе «воздух/грунт» и условие регулярности решения на бесконечности (2.25):

$$\left. \frac{\partial U_g(P)}{\partial z} \right|_{(z=0)} = 0; U_g(P) \rightarrow 0, \text{ при } P \rightarrow \infty, \quad (2.25)$$

Так как в данной модели мы учитываем внешний и внутренний слой изоляции, которые характеризуются переходным сопротивлением, то сформированы следующие условия протекания тока на границах «грунт/металл» (2.26) и «металл/жидкость» (2.27):

$$U_g(P) - C_{gm}(P) \sigma_g \left. \frac{\partial U_g(P)}{\partial n} \right|_{s_{gm}} = U_m(P); \quad (2.26)$$

$$U_l(P) + C_{ml}(P) \sigma_l \left. \frac{\partial U_l(P)}{\partial n} \right|_{s_{ml}} = U_m(P), \quad (2.27)$$

где $C_{gm}(P)$ – переходное сопротивление внешнего слоя изоляции, Ом·м²,

$C_{ml}(P)$ – переходное сопротивление внутреннего слоя изоляции, Ом·м².

Математическая модель обратной задачи по поиску переходного сопротивления наружного изоляционного покрытия трубопровода по данным измерений магнитного поля в воздухе над трассой приведенного в примере трубопровода дополнена функционалом (2.28):

$$F^\alpha(c_{gt}(s)) = \| |B(r_0, c_{gm})| - |B^M(r_0, c_{gm})| \|_{L_2(V)}^2 + \alpha \cdot (\beta \|c_{gm}(s) - c_{gm}^0(s)\|_{L_2(K)}^2 + (1 - \beta) \|c_{gm}(s) - c_{gm}^0(s)\|_{L_1(K)}^2), \quad (2.28)$$

где $c_{gt}(s)$ – искомая функция переходного сопротивления изоляционного покрытия трубы,

$|B(r_0, c_{gm})|$ – моделируемый модуль вектора магнитной индукции,

$|B^M(r_0, c_{gm})|$ – модуль измеренного вектора магнитной индукции,

L_1, L_2 – нормированные пространства функций, определенные на поверхности трубопровода V ,

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 [33].

На основе, рассмотренных выше, математических моделей проведены вычислительные эксперименты, результаты которых представлены в Главе 3 данной диссертационной работы.

2.2 Выводы по главе 2

Системный подход к формированию математических моделей электромагнитных полей систем катодной защиты магистральных трубопроводов представляет собой комплексный процесс, включающий в себя сбор и анализ данных, формирование математических моделей и валидацию моделей.

С помощью системного подхода были выявлены основные элементы и свойства системы катодной защиты, которые учтены при формировании математических моделей. Такой подход дает возможность проводить оценку состояния магистральных трубопроводов и совершенствовать существующие алгоритмы принятия решений по выбору режима эксплуатации трубопровода или своевременному проведению ремонтных работ.

ГЛАВА 3 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНО-АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИОННОГО ПОКРЫТИЯ МАГИСТРАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДА, НАХОДЯЩЕГОСЯ В СИСТЕМЕ КАТОДНОЙ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ

3.1 Математическое и программно-алгоритмическое обеспечение оценки состояния внутреннего изоляционного покрытия

Оценка качества внутреннего изоляционного покрытия при проведении электрометрических измерений затруднительна, в силу экранирующих свойств металла трубы. Решением в таких случаях является применение внутритрубных приборов, зондов [76]. Применение внутритрубного источника постоянного электрического тока в хорошо проводящих ток транспортируемых средах (соляные растворы, вода, некоторые продукты многотоннажных химических производств) и водонефтяных средах [9, 77] делает возможным исследование взаимовлияния качества внутренней изоляции.

3.1.1 Математическое моделирование электрического поля внутритрубного зонда с учетом внутреннего изоляционного покрытия трубопровода

Рассмотрим однородное пространство (рисунок 3.1), разделенное плоской границей на два полупространства – Ω_0 (воздух) с удельной электрической проводимостью $\sigma_0 = 0$ и Ω_g (грунт) с заданной постоянной удельной электрической проводимостью заполняющего вещества $\sigma_0 = const$. Предположим, что в полупространстве Ω_g расположен прямолинейный трубопровод длины L_t , (м). Внутри трубопровода, по которому протекает жидкость с удельной электрической проводимостью σ_j , находится диагностический зонд $(A_{pr} - B_{pr})$, инжектирующий постоянный ток I_{pr} . Станция катодной защиты обеспечивает постоянный защитный ток I_a , стекающий через точечный анод, находящийся в точке $A(x_a, y_a, z_a)$ полупространства Ω_g . Дренаж защитного тока осуществляется в точке B_t . Координаты точек A и B_t в декартовой системе координат известны. Начало системы координат выбрано на поверхности «воздух/грунт». Ось O_x направлена параллельно оси трубопровода, ось O_z , вниз.

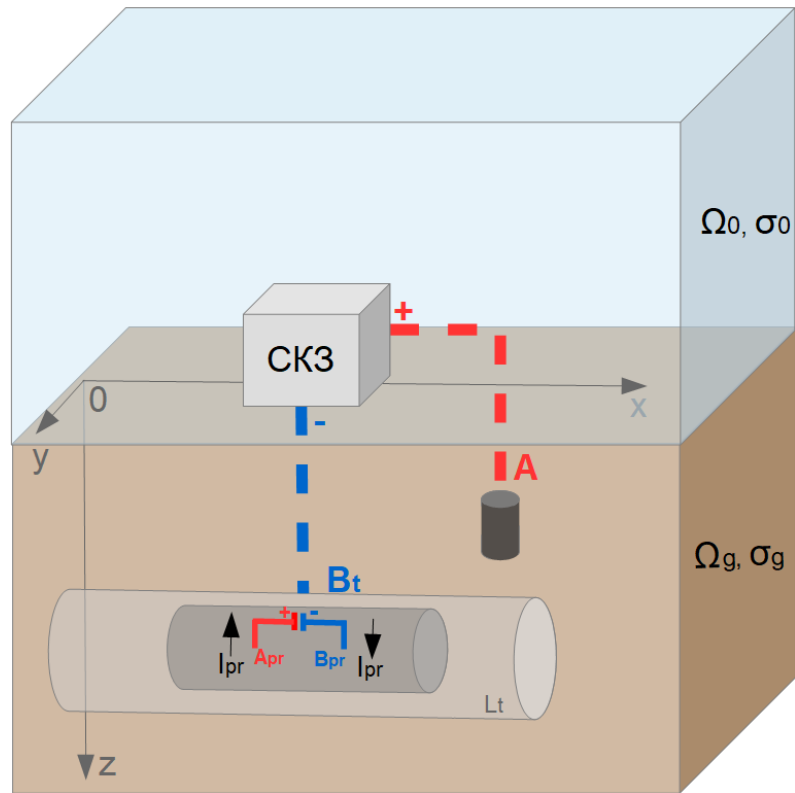


Рисунок 3.1 – Схема катодной защиты магистрального трубопровода с внутритрубно́м зондом (составлено автором)

Математическая модель, описывающая распределение потенциала поля постоянного тока в системе в произвольной точке пространства $P(x_P, y_P, z_P)$ имеет вид (3.1) – (3.7):

$$\Delta U_g(P) = -\frac{I_a}{\sigma_g} \delta(P - A), \quad (3.1)$$

где $U_g(P)$ – потенциал электрического тока в грунте, В,

I_a – постоянный защитный ток станции катодной электрохимической защиты, А,

σ_g – удельная электрическая проводимость грунта, $(\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$,

δ – функция Дирака,

$A(x_A, y_A, z_A)$ – точка проводящего ток пространства, в которой расположен точечный анодный заземлитель станции катодной защиты, м.

$$\Delta U_m(P) = 0; \Delta U_l(P) = -I_{pr}(\delta(P - A_{pr}) - \delta(P - B_{pr})); \quad (3.2)$$

где $U_m(P)$ – потенциал электрического тока в металле, В,

$U_l(P)$ – потенциал электрического тока в жидкости, В,

I_{pr} – ток зонда, А,

A_{pr} и B_{pr} – текущие положения электродов диагностического зонда внутри транспортируемой жидкости в трубе, отнесенные к средним точкам сегментов в транспортируемой жидкости.

$$\left. \frac{\partial U_g(P)}{\partial z} \right|_{z=0} = 0; \quad U_g(P) \rightarrow 0, P \rightarrow \infty, \quad (3.3)$$

$$\left. \frac{\partial U_m}{\partial x} \right|_{x=0;L_t} = 0; \quad \left. \frac{\partial U_l}{\partial x} \right|_{x=0;L_t} = 0, \quad (3.4)$$

$$U_g(P) - C_{gm}(P) \sigma_g(P) \left. \frac{\partial U_g(P)}{\partial n} \right|_{S_{gm}} = U_m(P); \quad (3.5)$$

где $C_{gm}(P)$ – переходное сопротивление, отражающее состояние внешнего изоляционного покрытия трубы в точке (P) , Ом·м²,

S_{gm} – площадь внешней поверхности трубы, м²,

n – нормаль к поверхности трубы.

$$U_l(P) + C_{ml}(P) \sigma_l(P) \left. \frac{\partial U_l(P)}{\partial n} \right|_{S_{ml}} = U_m(P); \quad (3.6)$$

где $C_{ml}(P)$ – переходное сопротивление, отражающее состояние внутреннего изоляционного покрытия в точке P , Ом·м²,

σ_l – удельная электрическая проводимость грунта, (Ом·м)⁻¹,

S_{ml} – площадь внутренней поверхности трубы, м².

$$\left[\left. \frac{\partial U_m(P)}{\partial x} \right] \right|_{B_t} = \frac{I_a}{\sigma_m S_m}. \quad (3.7)$$

где S_m – площадь поперечного сечения металла, м²,

σ_m – удельная электрическое сопротивление металла трубы, (Ом·м).

В модели использованы следующие индексы и обозначения: g – грунт, m – металл трубы, l – транспортируемая жидкость, t – трубопровод, gm – граница «грунт/металл», ml – граница «металл/жидкость», pr – защитный ток зонда.

Уравнения в математической модели (3.1) – (3.7) описывают следующие процессы:

(3.1) – распределение потенциала электрического тока в грунте, и потенциала электрического тока в металле трубы;

(3.2) – распределение потенциала в транспортируемой жидкости;

(3.3) – непротекание тока через границу «грунт/воздух» и условие регулярности решения на бесконечности;

(3.4) – непротекание тока на торцевых границах для металла трубы и транспортируемой жидкости;

(3.5) – перетекание тока через границу «грунт/металл»;

(3.6) – протекание тока через границу «металл/жидкость»;

(3.7) – дренаж тока катодной станции от трубопровода.

Для решения задачи применим метод фиктивных источников [28, 62]. Представим магистральный трубопровод L_t разделенный на M_t равных частей (сегментов), (м). Для каждого такого сегмента будем считать, что рассматриваемые электрические свойства постоянны, и равны некоторому среднему значению. Для каждого сегмента ($i = 1 \dots M_t$) на трубопроводе рассмотрим усредненные значения: $U_g^i(P)$ – потенциал в грунте; $U_m^i(P)$ – потенциал в металле трубы; $U_l^i(P)$ – потенциал в жидкости; I_{gm}^i – сила тока, вытекающего из грунта в металл трубы через боковую поверхность; I_m^i – продольный ток в металле трубы; I_{ml}^i – ток на границе «металл/жидкость»; I_l^i – продольный ток в жидкости.

Зонд является источником постоянного тока I_{pr} между электродами, расположенными в точках A_{pr} и B_{pr} . Цифрами на рисунке 3.2 обозначены: 1 – участок с нарушенной внешней изоляцией; 2 – участок с нарушенной внутренней изоляцией; 3 – участок с точкой дренажа B_t защитного тока I_a .

Каждый сегмент трубы формирует фиктивные точечные источники и (или) стоки тока. Для каждого фиктивного источника и (или) стока тока, вытекающие и (или) втекающие в него токи описываются законами Кирхгофа (3.8) и (3.9) [22]:

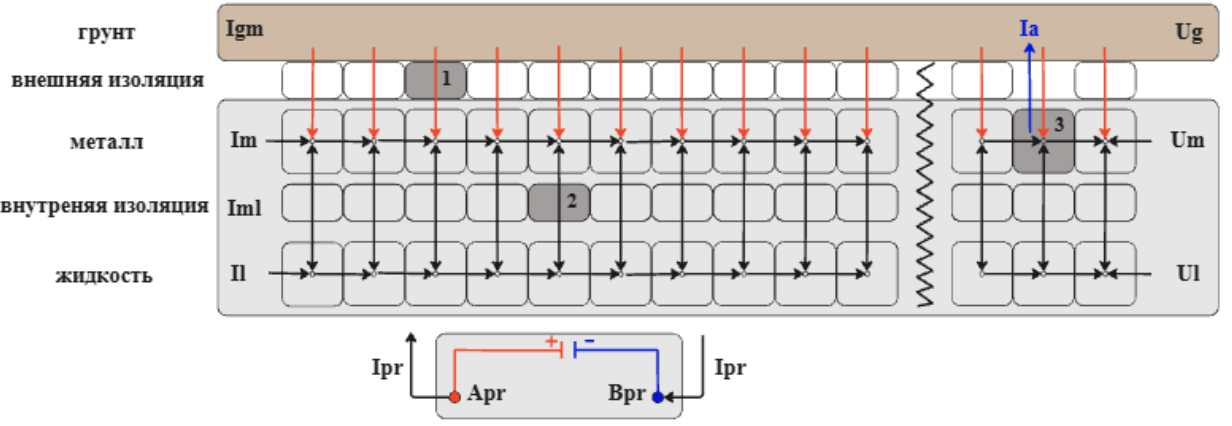


Рисунок 3.2 – Фрагмент дискретной модели трубопровода (составлено автором)

$$I_{gm}^i + I_m^{i-1} - I_m^i - I_{ml}^i - I_a \cdot \delta(B_m^i, B_t) = 0, \quad (3.8)$$

$$i = \overline{1, M_t}, I_m^0 = 0, I_m^{M_t} = 0;$$

где B_m^i – координаты средней точки в металле i -го сегмента.

$$I_{ml}^i + I_l^{i-1} - I_l^i + \delta(B_l^i, A_{pr}) I_{pr} - \delta(B_l^i, B_{pr}) I_{pr} = 0, \quad (3.9)$$

$$i = \overline{1, M_t}, I_l^0 = 0, I_l^{M_t} = 0.$$

где B_l^i – координаты средней точки в жидкости i -го сегмента,

A_{pr} и B_{pr} – текущие положения электродов диагностического зонда внутри транспортируемой жидкости в трубе, отнесенные к средним точкам сегментов в транспортируемой жидкости.

В равенствах (3.8) – (3.9) учтены условия (3.3) – (3.4) непротекания тока на торцевых границах для металла трубы и транспортируемой жидкости.

Дискретные формулы закона Ома для токов между парами соседних сегментов описываются уравнениями (3.10) и (3.11):

$$U_m^{i+1} - U_m^i = -R_m I_m^i, i = \overline{1, M_t - 1}, R_m = \frac{L_t}{M_t \sigma_m S_m} \quad (3.10)$$

где R_m – продольное сопротивление металла труб между соседними фиктивными стоками, Ом.

$$U_l^{i+1} - U_l^i = -R_l I_l^i, i = \overline{1, M_t - 1}, R_l = \frac{L_t}{M_t \sigma_l S_l}. \quad (3.11)$$

где R_l – продольное сопротивление жидкостями между соседними фиктивными стоками, Ом.

S_l – есть площадь поперечного сечения транспортируемой жидкости, м².

Дискретный аналог формул граничных условий третьего рода на границе «грунт/металл» описывается уравнениями (3.12), а на границе «металл/жидкость» равенствами (3.13):

$$U_g^i - \frac{c_{gm}^i I_{gm}^i}{S_{gm}^i} = U_m^i, \quad i = \overline{1, M_t}; \quad (3.12)$$

$$U_l^i + \frac{c_{ml}^i I_{ml}^i}{S_{ml}^i} = U_m^i, \quad i = \overline{1, M_t}. \quad (3.13)$$

Потенциал электрического тока в произвольной точке вмещающего трубопровод однородного полупространства, согласно принципу суперпозиции полей, будет формироваться точечным анодным источником A станции катодной защиты и M_t фиктивными источниками по числу сформированных сегментов трубы. Потенциал описывается равенством (3.14), где $G(P, Q)$ – функция Грина [73] вмещающего однородного полупространства – функция, вычисляющая значение потенциала поля электрического тока в точке $P(x_P, y_P, z_P)$ полупространства, при нахождении точечного источника электрического тока единичной интенсивности в точке $Q(x_Q, y_Q, z_Q)$ (3.14):

$$U_g(P) = I_a G(P, A) - \sum_{i=1}^{M_t} I_{gm}^i G(P, B_m^i). \quad (3.14)$$

Дискретная модель (3.8) – (3.14), при подстановке в (3.14) точек грунта $P = B_g^k$, где $k = \overline{1, M_t}$ расположенных рядом с границей «грунт/металл», представляет собой систему линейных алгебраических уравнений со следующими неизвестными: $U_m, U_g, U_l, I_{gm}, I_m, I_l, I_{ml}$. Здесь каждое искомое неизвестное представляет собой вектор усредненных на сегменте значений тока или напряжения.

Решение системы линейных алгебраических уравнений дает значения искомых параметров тока и напряжения для каждого дискретного сегмента.

Таким образом, исходная дифференциальная математическая модель (3.1) – (3.7), описывающая распределение потенциала поля постоянного электрического тока в системе, методом фиктивных источников сведена к системе линейных алгебраических уравнений (3.8) – (3.14).

3.1.2 Программно-алгоритмическое обеспечение определения местоположения дефекта внутреннего изоляционного покрытия

Вычислительный эксперимент проводился в три этапа.

На первом этапе определялись значения электрического поля зонда в транспортируемой жидкости при ненарушенном внутреннем и внешнем покрытии изоляции, станция катодной защиты включена, зонд включен. Назовем полученное поле «нормальным» полем зонда.

На втором этапе рассчитывалось «рабочее» электрическое поле – поле зонда при нарушении внутреннего и/или внешнего изоляционного покрытия на сегменте трубы при включенной станции катодной защиты, зонд включен.

На этапах 1 и 2 имитировалось перемещение внутритрубного зонда в трубе. Размер внутритрубного зонда задавался равным длине семи сегментов дискретной модели трубопровода, что соответствует размерности используемых внутренних зондов.

На третьем этапе из «рабочего» поля вычиталось «нормальное» поле. Результат этапа – поле электрического тока, возникающее из-за дефектов изоляционных покрытий.

Исходные данные для вычислительного эксперимента приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Исходные данные для вычислительного эксперимента

Параметр	Обозначение	Значение	Ед. изм.
1 Длина магистрального трубопровода	L_t	10000	м
2 Количество сегментов	M_t	10000	шт.
3 Длина одного сегмента	l	1	м
4 Глубина залегания магистрального трубопровода	H_t	2	м
5 Внешний диаметр магистрального трубопровода	D_t	0,530	м
6 Толщина стенки магистрального трубопровода	h_{tm}	0,008	м
7 Координата точечного анода A	(x_A, y_A, z_A)	(5000;350;25)	м
8 Координата точки дренажа B_t	$(x_{B_t}, y_{B_t}, z_{B_t})$	(5000,5;0;2,265)	м

Продолжение таблицы 3.1

Параметр	Обозначение	Значение	Ед. изм.
9 Номер сегмента точки дренажа B_t	-	5001	-
10 Номер сегмента с дефектом внешней изоляции	-	2501	-
11 Номер сегмента с дефектом внутренней изоляции	-	2501	-
12 Постоянный ток станции катодной защиты	I_a	1	А
13 Постоянный ток диагностического зонда	I_{pr}	1	А
14 Удельное электрическое сопротивление металла	σ_m	$2,450 \cdot 10^{-7}$	(Ом·м)
15 Удельная электрическая проводимость грунта	σ_g	0,010	(Ом·м) ⁻¹
16 Удельная электрическая проводимость жидкости	σ_l	$1,000 \cdot 10^{-8}$ $3,400 \cdot 10^{-9}$ $2,500 \cdot 10^{-10}$	(Ом·м) ⁻¹
17 Переходное сопротивление внешней изоляции магистрального трубопровода	C_{gm}	14000	Ом·м ²
18 Переходное сопротивление внутренней изоляции магистрального трубопровода	C_{ml}	10000	Ом·м ²

Вычислительный эксперимент выполнялся в среде Matlab с загрузкой модуля работы с разреженными матрицами. Для решения системы линейных алгебраических уравнений применялись операции левого деления матриц. Визуализация данных также производилась в среде Matlab. Результат проведения вычислительного эксперимента подтвержден свидетельствами о государственной регистрации для программ ЭВМ № 2023611883 [50].

Было проведено несколько серий вычислительных экспериментов [22, 24, 32, 21]. Часть результатов представлена в Приложении В. Основные результаты представлены и описаны ниже.

На рисунках 3.3 – 3.5 представлены фрагменты поля, вычисленные при смещениях внутритрубного зонда, для трех видов жидкости: нефтяной эмульсии «нефть в воде» с удельной электрической проводимостью $1,0 \cdot 10^{-8}$ (Ом·м)⁻¹

(рисунок 3.3), нефтяной эмульсии «вода в нефти» с удельной электрической проводимостью $3,4 \cdot 10^{-9} \text{ (Ом} \cdot \text{м)}^{-1}$ (рисунок 3.4) и нефти с удельной электрической проводимостью $2,5 \cdot 10^{-10} \text{ (Ом} \cdot \text{м)}^{-1}$ (рисунок 3.5).

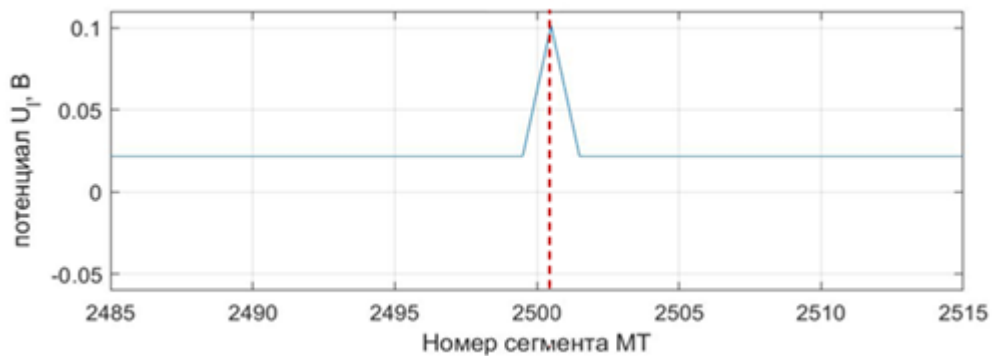


Рисунок 3.3 – График потенциала для нефтяной эмульсии «нефть в воде» с удельной электрической проводимостью $1,0 \cdot 10^{-8} \text{ (Ом} \cdot \text{м)}^{-1}$ (составлено автором)

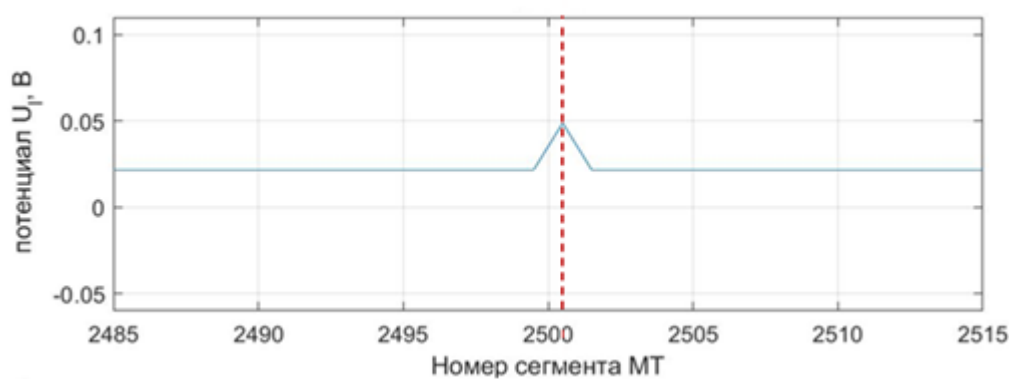


Рисунок 3.4 – График потенциала для нефтяной эмульсии «вода в нефти» с удельной электрической проводимостью $3,4 \cdot 10^{-9} \text{ (Ом} \cdot \text{м)}^{-1}$ (составлено автором)

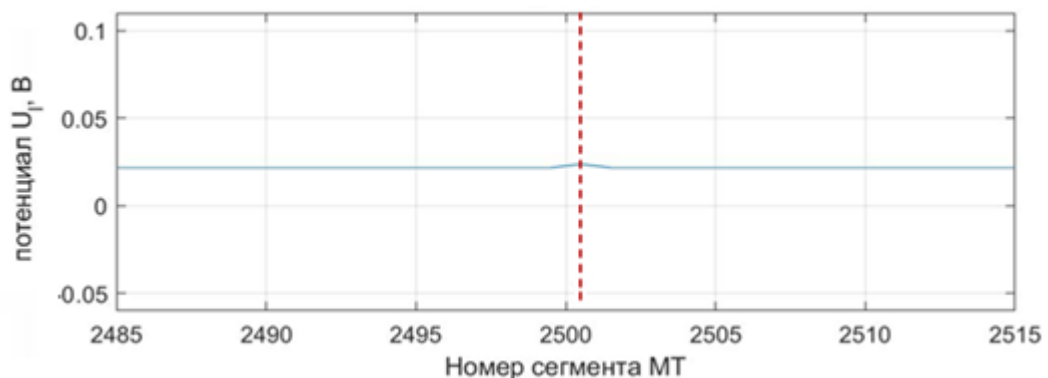


Рисунок 3.5 – График потенциала для нефти с удельной электрической проводимостью $2,5 \cdot 10^{-10} \text{ (Ом} \cdot \text{м)}^{-1}$ (составлено автором)

Диапазон перемещений центрального сегмента зонда – в диапазоне отрезка $[-7; +7]$ сегментов трубы относительно сегмента с нарушенной изоляцией (рисунок 3.6).



Рисунок 3.6 – Схема расположения зонда относительно трубопровода (по сегментам) (составлено автором)

На всех трех графиках наблюдается изменение потенциала на месте дефектного сегмента (№ 2501). Причем, чем больше удельная электрическая проводимость жидкости, тем больше величина рассчитанного потенциала.

Оценка технического состояния внутренней изоляции трубопровода на основе получаемого потенциала может быть произведена графически (рисунок 3.7). Такой способ оценки сформирован на основании методики оценки фактического положения и состояния подземных трубопроводов [6].

По данному графику (рисунок 3.7) можно определить состояние переходного сопротивления внутреннего слоя изоляционного покрытия.

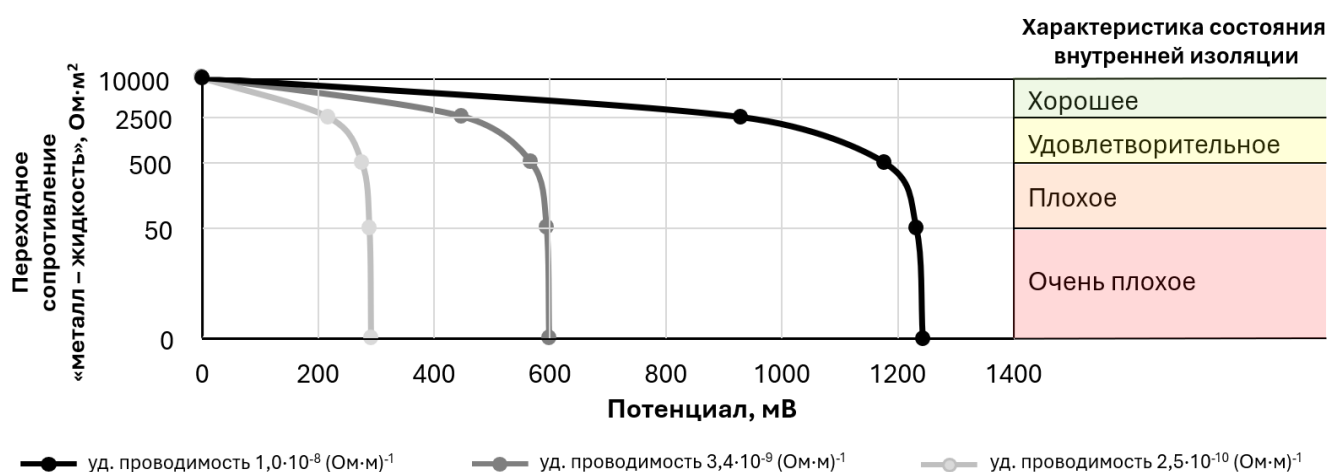


Рисунок 3.7 – График потенциала в месте дефекта для различных сопротивлений внутренней изоляции магистральных трубопроводов (составлено автором на основе источника [6])

В результате проведенных исследований взаимовлияния параметров модели, было установлено, что:

- одновременное отслеживание положения диагностического зонда в магистральном трубопроводе 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 магистрального трубопровода.

Для более полной оценки состояния изоляции следует также провести оценку внешнего слоя изоляционного покрытия.

Проведение оценки качества внешнего изоляционного слоя при внутритрубной диагностике трубопроводов нереализуемо, из-за экранирующих свойств металла трубы. В таких случаях применяют наружные методы обследования трасс трубопровода. В качестве метода рассмотрим – магнитометрический [49, 34]. Магнитометрический метод это бесконтактный метод диагностики трубопроводов, который помогает обследовать подземные и подводные трубопроводы, а также находить внутритрубные дефекты без вскрытия и запуска дефектоскопов [84].

3.1.3 Математическое и компьютерное моделирование электромагнитного поля в воздухе над трассой трубопровода

Рассмотрим случай вмещающей трубопровод среды – пространство, разделенное плоской границей γ_0 на два полупространства – Ω_0 (воздух) с удельной электрической проводимостью воздуха $\sigma_0 = 0$ и Ω_g (грунт) с удельной электрической проводимостью грунта $\sigma_g = const$ (рисунок 3.8). Пусть в области Ω_g расположен трубопровод длиной L_t , N_{cs} станций катодной защиты реализуют электрохимическую защиту трубопровода.

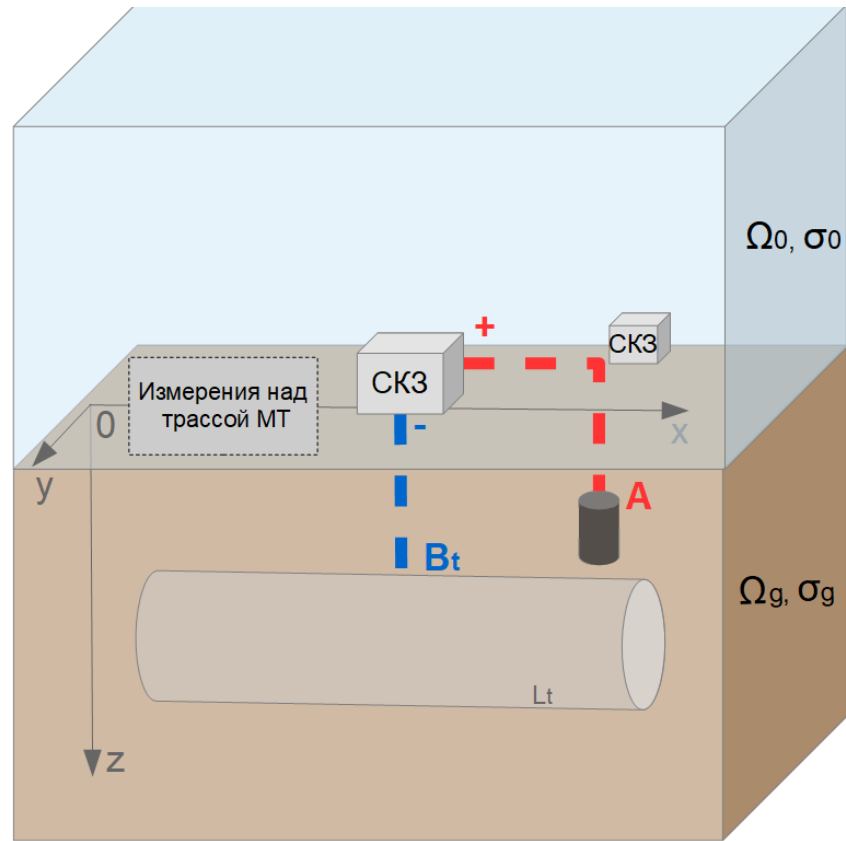


Рисунок 3.8 – Схема катодной защиты магистрального трубопровода в однородном полупространстве (составлено автором)

Через точечный анодный заземлитель $A_a^k(x_a^k, y_a^k, z_a^k)$ в систему инжектируются постоянный защитный ток I_a^k . С поверхности трубопровода в точке B_t^k . Координаты точек A_a^k и B_t^k в декартовой системе координат известны.

Математическая модель, описывающая распределение потенциала поля постоянного электрического тока в системе в произвольной точке пространства $P(x_P, y_P, z_P)$, имеет вид (3.15) – (3.20) [74]:

$$\Delta U_g(P) = -\frac{I_a^k}{\sigma_g} \delta(P - A_a^k), k = \overline{1, N_{cs}}; \quad (3.15)$$

$$\Delta U_m(P) = 0; \quad (3.16)$$

$$\left. \frac{\partial U_g(P)}{\partial z} \right|_{z=0} = 0; \quad U_g(P) \rightarrow 0, P \rightarrow \infty; \quad (3.17)$$

$$\left. \frac{\partial U_m}{\partial x} \right|_{x=0; L_t} = 0; \quad (3.18)$$

$$U_g(P) - C_{gm}(P)\sigma_g(P) \frac{\partial U_g(P)}{\partial n} \Big|_{S_{gm}} = U_m(P); \quad (3.19)$$

$$\left[\frac{\partial U_m(P)}{\partial x} \right] \Big|_{B_t^k} = \frac{I_a^k}{\sigma_m S_m}, k = \overline{1, N_{cs}}. \quad (3.20)$$

Принятые в модели индексы и обозначения аналогичны используемым в уравнениях (3.1) – (3.7). Уравнения в математической модели (3.15) – (3.20) описывают следующие процессы:

- (3.15) – распределение потенциала электрического тока в грунте;
- (3.16) – распределение потенциала электрического тока в металле трубы;
- (3.17) – непротекание тока через границу «воздух/грунт» и условие регулярности решения на бесконечности;
- (3.18) – непротекание тока на торцевых границах для металла трубы;
- (3.19) – перетекания тока через границу «грунт/металл»;
- (3.20) – подключения катодной станции к трубопроводу в точке дренажа.

Для решения прямой задачи (3.15) – (3.20) может быть применен метод фиктивных источников [65, 29]. Для каждого такого сегмента будем считать, что рассматриваемые электрические свойства постоянны, и равны некоторому среднему значению. Описание метода представлено в п. 3.1.1.

Потенциал электрического поля в произвольной точке $P(r_p) = P(x_p, y_p, z_p)$, ($P \in \Omega_g$) можно рассчитать [23, 60] по формуле (3.21):

$$U_g(P) = \sum_{k=1}^{N_{cs}} I_a^k \cdot G(P, A_a^k) - \sum_{j=1}^{M_t} I_{gm,j} \cdot G(P, B_t^k) \quad (3.21)$$

Здесь функция $G(P, Q)$ – функция Грина [73], имеющая вид (3.22):

$$G(P, Q) = \frac{1}{4\pi\sigma_1} \left[\frac{1}{\sqrt{(x_P - x_Q)^2 + (y_P - y_Q)^2 + (z_P - z_Q)^2}} + \frac{1}{\sqrt{(x_P - x_Q)^2 + (y_P - y_Q)^2 + (z_P + z_Q)^2}} \right] \quad (3.22)$$

где (x_P, y_P, z_P) – координаты точки P ,

(x_Q, y_Q, z_Q) – координаты точки Q .

Плотность электрического тока в произвольной точки $P(r_p)$ в грунте вмещающего трубопровод полупространства определяется по формуле (3.23):

$$j(r_p) = -\sigma_g \cdot \bar{\nabla} U_g(r_p), \quad (3.23)$$

где $U_g(r_p)$ – потенциал электрического поля в произвольной точке полупространства.

Вмещающее трубопровод полупространство по его магнитным свойствам будем считать однородным, изотропным и постоянным. Тогда вектор магнитной индукции $B(r_0)$ в произвольной точке пространства (в воздухе над трассой трубопровода), задаваемой радиус-вектором r_0 , может быть вычислен по известному распределению векторного поля плотности тока $j(r)$ по формуле Био-Савара-Лапласа [30] (3.24):

$$B(r_0) = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \int_V \frac{[j(r)dV, r_0 - r]}{|r_0 - r|^3}, \quad (3.24)$$

Решение прямой задачи – задачи расчета в воздухе над трассой трубопровода векторного поля магнитной индукции, возбуждаемого электрическими токами системы катодной защиты – можно представить следующей вычислительной последовательностью (3.25):

$$U(r, c_{gm}(s)) \xrightarrow{(3.23)} j(r, U, c_{gm}(s)) \xrightarrow{(3.24)} B(r_0, U, c_{gm}(s)), \quad (3.25)$$

где точки с радиус-векторами r_0 находятся на измерительной траектории датчиков магнетометра V .

Над стрелками проставлены номера расчетных формул. Функция $c_{gm}(s)$ – кусочно-постоянна, она описывает среднее для дискретного сегмента трубы переходное сопротивление ее изоляционного покрытия.

Определение переходного сопротивления изоляционного покрытия трубы – есть обратная задача по определению нелинейной коэффициентной функции $c_{gm}(s)$, входящей в граничное условие третьего рода на границе «грунт/труба».

Для поиска решения обратной задачи – функции переходного сопротивления изоляционного покрытия трубы $c_{gm}(s)$ – применим вариационный метод академика А.Н. Тихонова [59], согласно которому искомое решение ищется как экстремаль (минимизирующий элемент) регуляризирующего функционала на решении прямой задачи (3.26):

$$F^\alpha(c_{gm}(s)) = F_1(c_{gm}(s)) + \alpha \cdot F_2(c_{gm}(s)) \quad (3.26)$$

где $F_1(c_{gm}(s))$ – функционал невязки;

$F_2(c_{gm}(s))$ – стабилизирующий функционал.

В регуляризирующем функционале (49) функционал невязки (3.27):

$$F_1(c_{gm}(s)) = |||B(r_0, c_{gm})| - |B^M(r_0, c_{gm})|||_{L_2(V)}^2, \quad (3.27)$$

где $|B^M(r_0, c_{gm})|$ – модуль измеренного вектора магнитной индукции, $|B(r_0, c_{gm})|$ – моделируемый модуль вектора магнитной индукции, решение прямой задачи.

Стабилизирующий функционал имеет следующий вид (3.28):

$$F_2(c_{gm}) = \beta ||c_{gm}(s) - c_{gm}^0(s)||_{L_2(K)}^2 + (1 - \beta) ||c_{gm}(s) - c_{gm}^0(s)||_{L_1(K)}^2, \quad (3.28)$$

В качестве метода минимизации регуляризирующего функционала использован метод нулевого порядка Хукка-Дживса (конфигураций). Метод дает достаточно хорошую сходимость с относительно малым, по сравнению с другими апробированными методами нулевого порядка, количеством обращений к решению прямых задач при поиске минимума функций вида. Это свойство метода позволяет сократить время работы, затрачиваемое на поиск решения.

3.1.4 Программно-алгоритмическое обеспечение определения местоположения дефекта внешнего изоляционного покрытия

Алгоритм решения обратной задачи программно реализован на языке C++. Результат проведения вычислительного эксперимента подтвержден свидетельствами о государственной регистрации для ЭВМ № 2023662303 [51] и отражены в ряде публикаций [27, 39, 25].

В таблице 3.2 приведены значения параметров проведенных вычислительных экспериментов. В качестве дефектных сегментов трубы, на которых переходное сопротивление изоляции отлично от «базового», назначены как отдельно стоящие сегменты, так и последовательные, имитирующие локальные и протяженные дефекты. Их номера, координаты средних точек, значения сопротивлений указаны в таблице 3.3.

Таблица 3.2 – Исходные данные для вычислительного эксперимента

Параметр	Обозначение	Значение	Ед. изм.
1 Длина магистрального трубопровода	L_t	16000	м
2 Количество сегментов	M_t	990	шт.
3 Длина одного сегмента	h_{gsm}	16,424	м
4 Глубина залегания магистрального трубопровода	H_t	1,500	м
5 Внешний диаметр магистрального трубопровода	D_t	0,530	м
6 Толщина стенки магистрального трубопровода	h_{tm}	0,008	м
7 Постоянный ток станции катодной защиты	I_a	1,200 (0,800)	А
8 Удельное электрическое сопротивление металла	σ_m	$2,450 \cdot 10^{-7}$	(Ом·м)
9 Удельная электрическая проводимость грунта	σ_g	0,016	(Ом·м) ⁻¹
10 Номер сегмента точки дренажа	B_t	5001	-
11 Номер сегмента с дефектом внешней изоляции	-	2501	-
12 Номер сегмента с дефектом внутренней изоляции	-	2501	-
13 Переходное сопротивление внешней изоляции магистрального трубопровода	C_{gm}	14000	Ом·м ²
14 Количество обслуживающих станций	N_{CS}	2	шт.
15 Высота перемещения датчиков	h_{ms}	$h_{ms} = h_{gsm} \cdot koef,$ $koef = \{0.25, 0.5; 1; 2; 3; 4\}$	м

Таблица 3.3 – Координаты дефектных сегментов

Параметры	Обозначение	Переходное сопротивление изоляции	Ед. изм.
401 (6577,91), 402 (6594,33), 403 (6610,76)	C_{gm_def}	4200,0 (30)	Ом·м ² (%)
404 (6627,18), 405 (6643,61), 406 (6660,03), 407 (6676,45), 408 (6692,88)		1400,0 (10)	
409 (6709,30), 410 (6725,73), 411 (6742,15), 412 (6758,57)		2800,0 (20)	
421 (6906,39), 422 (6922,82), 423 (6939,24)		1400,0 (10)	
430 (7054,21)		1400,0 (10)	

В качестве отрезка исследования рассмотрен участок трубопровода, находящийся между точками дренажа катодных станций, за исключением примыкающих к точкам дренажа отрезков длиной в 200 м, из предположения, что при больших, чем 200 м удалениях вдоль трубы точек интегрирования в формуле Био-Савара-Лапласа (3.24), влияние электрических токов на магнитное поле будет незначительным на всех рассматриваемых высотах.

Для заданной вдоль трубы (рисунок 3.9) функции переходного сопротивления, как решение прямой задачи находились потенциалы электрического поля и плотности электрических токов текущих в трубопроводе и грунте (рисунок 3.10 а-в), вычислялись компоненты векторного поля магнитной индукция $B(r_0, c_{gm})$ и его модуль $|B(r_0, c_{gm})|$ (рисунок 3.10 г) на фиксированной прямолинейной траектории полета датчиков магнитометрической системы, проходящей над осью трубопровода, на высоте, $h_{ms} = h_{gsm} \cdot koeff$.

График функции C_{gm_def} заданного дефектного сегмента вдоль трубопровода показан на рисунке 3.9 [74].

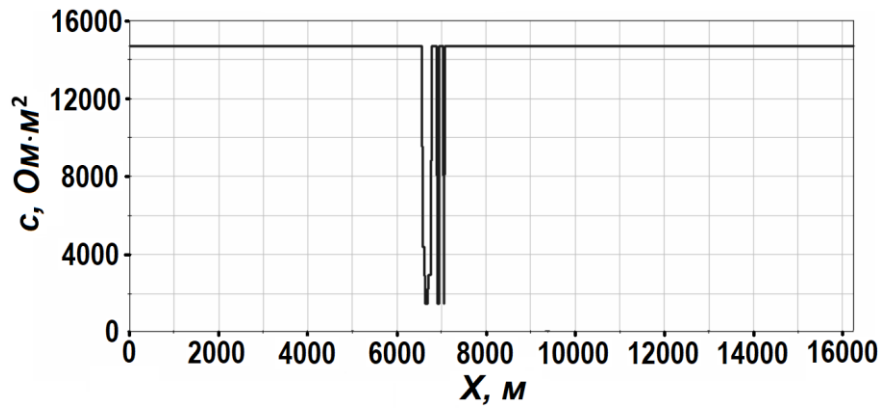


Рисунок 3.9 – Заданное «дефектное» переходное сопротивление изоляции на границе труба/грунт [74]

На рисунке 3.10 приведены графики токораспределения вдоль трассы трубопровода, полученного как решение прямой задачи. Здесь всплески значений величин наблюдаются в окрестностях точек дренажа, и на дефектных участках.

Решение обратной задачи осуществлялось по следующему алгоритму:

- при заданном «дефектном» переходном сопротивлении изоляции трубы в вычисленные значения модуля вектора магнитной индукции добавлялся случайный шум заданного уровня (0%, 10%, 20%) с равномерным вероятностным законом распределения. Тем самым, формировался файл «измеренных» магнитометрических данных $|B^V(r_0, c_{gm})|$, который входит в функционал невязки регуляризирующего функционала А.Н. Тихонова;

- исходные данные о «дефектных» участках «забывались» и, априори известной, считалась ситуация, когда все сегменты трубы (в том числе и дефектные) имели лишь «базовые» характеристики, в нашем случае описываемые постоянной функцией C_{gm} . Эта априори заданная функция учитывается при формировании стабилизирующего функционала;

- многомерным методом Хукка-Дживса (конфигураций) нулевого порядка искомое экстремальное решение задачи, минимизирующее регуляризирующий функционал (3.26) – кусочно-постоянная ограниченная по вариации на сегментах трубы функция переходного сопротивления на границе «грунт/труба» C_{gm} . Параметры в функционале принимали значения $\alpha = 0,001$, $\beta = 0,02$.

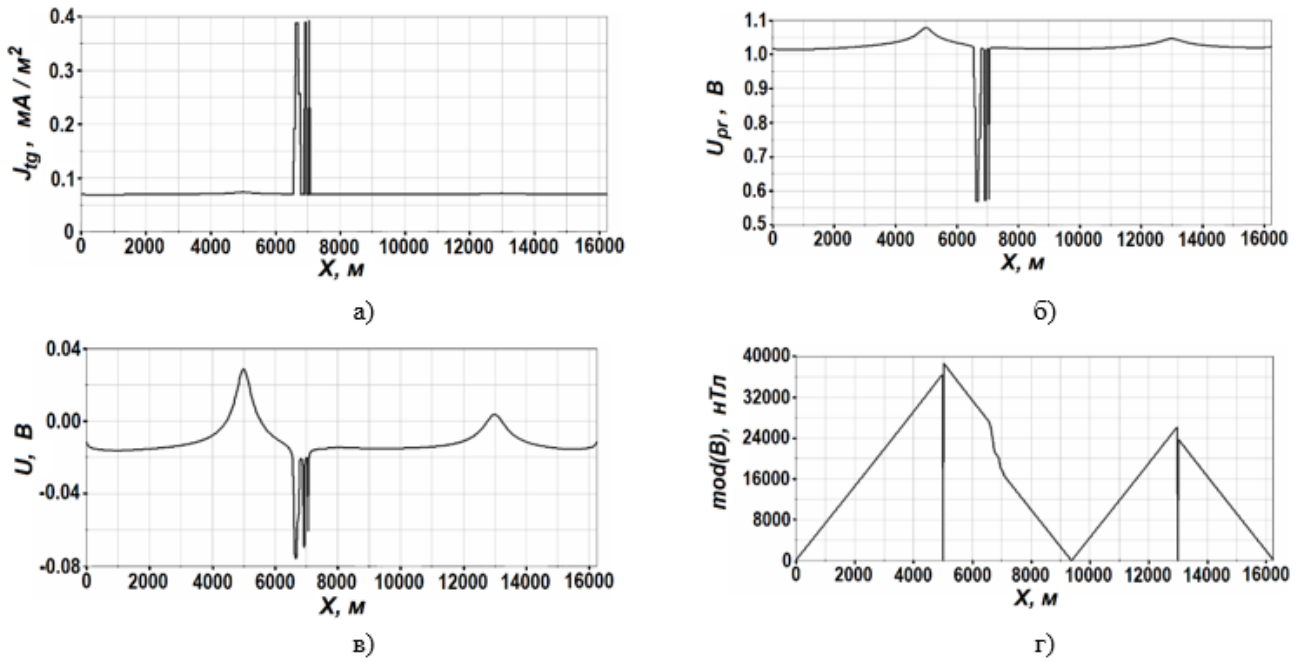


Рисунок 3.10 – Параметры вдоль трубы: а) плотность тока (мА/м²), текущего через боковую поверхность трубы; б) защитный потенциал; в) потенциал электрического тока на границе «грунт/воздух» над осью трубопровода; г) модуль вектора магнитной индукции (нТл) на высоте 1 м в воздухе над осью трубопровода [74]

– по найденному решению C_{gm} вычислялась мера его отклонения от изначально заданной функции сопротивления C_{gm_def} в виде евклидовой векторной нормы $\rho_c = \|C_{gm}(s) - C_{gm_def}(s)\|$, которая для дискретных функций имеет вид $\rho_c = \sqrt{\sum_{i=1}^{M_t} (C_{gm_def,i} - C_{gm,i})^2}$;

– вычислялась также мера различия магнитных полей (начального незашумленного и полученного при решении обратной задачи)

$$\rho_B = \sqrt{\sum_{i=1}^{M_t} (|B_i(r_0, c_{gt_def})| - |B_i(r_0, c_{gm_def})|)^2}.$$

На рисунке 3.11 приведены основные результаты вычислительных экспериментов по определению переходного сопротивления изоляции на границе «труба/грунт» на различных высотах движения датчиков магнитометрической системы [74].

а)



б)



в)



Рисунок 3.11 – Функции переходного сопротивления «грунт/труба» для различных высот прохождения аппаратуры над осью магистрального трубопровода: а) 25% длины исследуемого сегмента магистрального трубопровода; б) 100% длины исследуемого сегмента магистрального трубопровода; в) 400% длины исследуемого сегмента магистрального трубопровода (составлено автором)

Часть результатов представлена в Приложении В. Основные результаты представлены и описаны ниже.

Предложенная выше математическая модель задачи имеет упрощенный вид – в ней не учитывается остаточная намагниченность звеньев труб, участков напряженно-деформируемого состояния и ряда других параметров. Влияние неучтенных параметров требует дополнительных исследований.

По результатам экспериментов установлено, что:

– переходное сопротивление изоляции на границе «грунт/труба», отражающее состояние внешнего изоляционного покрытия трубопровода, может быть определено и локализовано;

– проведенные вычислительные эксперименты свидетельствуют о возможности определения характеристик состояния изоляции магистрального трубопровода.

3.2 Выводы по главе 3

В данной главе были сформированы:

1) разработано программно-алгоритмическое обеспечение с применением математической модели для расчета потенциала электрического поля внутритрубного зонда в транспортируемой жидкости;

2) разработано программно-алгоритмическое обеспечение с применением математической модели задачи определения переходного сопротивления на границе «грунт/труба» магистрального катодно-поляризуемого трубопровода по данным магнитометрии в воздухе.

Также было выявлено, что вычисленные значения потенциала в месте дефекта изоляции, зависящие от электрической проводимости транспортируемого продукта, позволяют характеризовать состояние внутренней изоляции магистрального трубопровода.

Полученные результаты позволяют локализовать место нарушения внутренней и внешней изоляции и определить степень ее поражения.

ГЛАВА 4 ПРОГРАММНО-АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ МАГИСТРАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДА

4.1 Алгоритмическое обеспечение принятия решений по эксплуатации магистрального трубопровода по оценкам состояния внешнего и внутреннего изоляционного покрытия

На долю аварий связанной с коррозией внешней поверхности магистрального трубопровода приходится до 42% отказов, а на долю внутренней не более 4 % отказов [56]. Однако за последние 15 лет наблюдается увеличение содержания серы в добываемых нефтях, в связи с чем увеличивается ее концентрация в сырье, перекачиваемом по магистральным трубопроводам. Рост коррозионной агрессивности среды приводит к повышению риска разрушения внутренней изоляции трубопровода и сопровождается возникновением аварийной ситуации.

Предложенная методика вычисления потенциала (Глава 3) и последующего расчета переходного сопротивления «металл/жидкость» позволяет локализовать дефектные участки внутренней изоляции и предварительно оценить степень ее повреждения.

По нормативному документу рекомендации организации [44] внутритрубная дефектоскопия проводится по алгоритму, состоящему из нескольких этапов:

- 1) планирование работ, подготовка технической документации;
- 2) подготовительные работы:
 - а) очистка трубопровода от грязи, металлических и посторонних предметов;
 - б) установление реального минимального проходного сечения трубопровода путем пропуска снаряда-калибра;
 - в) получение информации о внутренней геометрии трубы и фактических радиусах изгиба на участке путем пропуска снаряда-профилемера;

- г) устранение возможных дефектов внутренней геометрии трубы;
- д) определение мер по обеспечению режима движения внутритрубного инспекционного снаряда;
- 3) диагностирование состояния металла трубы с помощью комбинированного магнитно-ультразвукового снаряда-дефектоскопа;
- 4) предварительная обработка полученных данных, составление оперативного отчета по результатам внутритрубной дефектоскопии;
- 5) дополнительный дефектоскопический контроль, обследования в шурфах, верификация полученных результатов;
- 6) анализ данных внутритрубной инспекции:
 - а) составление конструктивной схемы участка трубопровода;
 - б) на основе полученных данных формирование диаграммы распределения дефектов по трассе трубопровода;
 - в) ранжировка дефектов на опасные, потенциально опасные и неопасные;
- 7) проведение комплексного анализа технического состояния трубопровода:
 - а) оценка динамики развития дефектов во времени;
 - б) оценка влияния рельефа, гидрогеологии трассы, состояния изоляции и катодной защиты на зарождение и развитие дефектов трубопроводов;
- 8) корректировка плана ремонтных работ на основе результатов анализа технического состояния трубопровода.

Объемы обследований, регламентированные нормативными документами [13, 6, 47], с применением внутритрубной дефектоскопии, в большинстве случаев существенно превышают реальное количество труб с опасными дефектами, требующими проведения дополнительного дефектоскопического контроля и ремонтных мероприятий [44]. Оценка состояния трубопровода в шурфах является наиболее затратной частью инспекционных мероприятий ввиду необходимости проведения работ в труднодоступных местах.

Внедрение системы оценки состояния внутренней изоляции трубопровода позволит повысить общую репрезентативность результатов внутритрубной

дефектоскопии, что позволит сократить количество ремонтов. Кроме того, повсеместное использование данной технологии, постепенное накопление данных о качестве внутренней изоляции и их анализ неизбежно приведет к повышению надежности используемых изоляционных покрытий.

Несмотря на то, что разработка и промышленный выпуск внутритрубных дефектоскопов, включающих электрометрическую составляющую, потребуют значительных затрат, ввиду относительного простого устройства такого снаряда [42] и растущего объема процедуры внутритрубной дефектоскопии в России, такие затраты оправданы.

Однако, с помощью только внутритрубной дефектоскопии невозможно провести полное обследование состояния трубопровода. Так, согласно ГОСТ [10] на участках трубопровода, в которых невозможно проведение внутритрубной дефектоскопии или необходимы дополнительные исследования состояния изоляции, рекомендуется проводить наземное электрометрическое диагностирование. Данный метод имеет множество недостатков, главный из которых, как было упомянуто ранее, заключается в больших временных и трудовых затратах на его осуществление.

На обследование трубопровода с помощью носимых магнитометрических станций затрачивается значительно меньше времени ввиду отсутствия необходимости непосредственного контакта электродов с поверхностью [45]. Несмотря на это, трудовые ресурсы для магнитометрии все еще нужно воспроизводить в значительном количестве. Этот недостаток призваны решить разрабатываемые в настоящее время роботизированные магнитометрические системы.

Алгоритм проведения магнитометрии магистрального трубопровода согласно руководящему документу по диагностике технического состояния трубопроводов бесконтактным магнитометрическим методом [45] состоит из следующих этапов:

- 1) планирование работ, анализ эксплуатационной документации по трубопроводу;
- 2) подготовительные работы для проведения обследования:
 - а) расчистка трассы трубопровода от препятствий;
 - б) предварительная разметка оси трубопровода;
- 3) обследование трубопровода магнитометрическим методом;
- 4) предварительная обработка полученных данных, разметка участков для дополнительного дефектоскопического контроля;
- 5) проведение дополнительного диагностического контроля арбитражными методами в контрольных шурфах;
- 6) итоговый анализ технического состояния трубопровода, подготовка отчета.

Проведение магнитометрического исследования изоляции трубопровода с помощью автоматизированных беспилотных аппаратов затруднено ввиду ограничений чувствительности существующих приборов и ряда ограничений с законодательной стороны. Так, при помощи наиболее современного магнитометрического комплекса бесконтактной диагностики «КБД-2П» (производства ООО «ДИАС»), согласно техническим характеристикам [38], можно определить дефектные участки трубопровода на расстоянии до 5 м от тела трубы в зависимости от диаметра трубопровода и рабочего давления.

В связи с этим, для разработки алгоритма проведения обследования внешней изоляции трубопровода с помощью магнитометрии, приняты измерения на высоте не более 5 метров, но сохраняющие свойства определения дефектных сегментов. В этом случае, согласно результатам моделирования обратной задачи, длина таких сегментов составит от 1 м до 2,5 м.

Таким образом, в алгоритм проведения магнитометрического обследования магистрального трубопровода необходимо внедрить составление дополнительного отчета с диаграммой распределения дефектов внешней

изоляции по ВРД 39-1.10-026-2001 [6], пример которой представлен на рисунке 4.1.

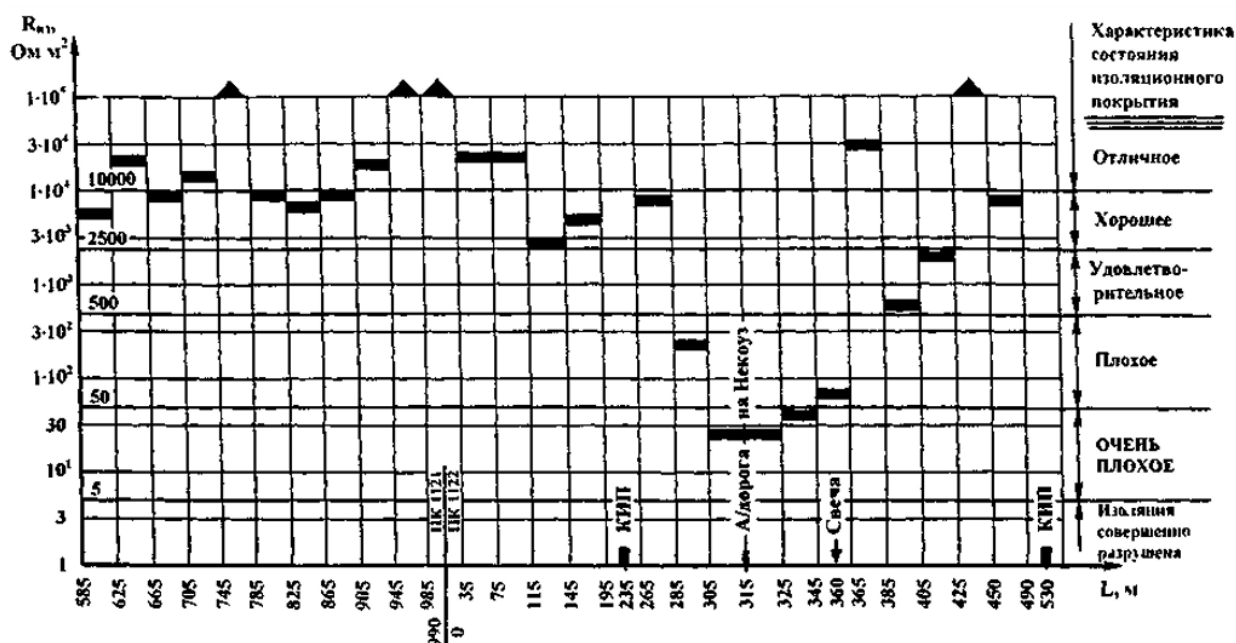
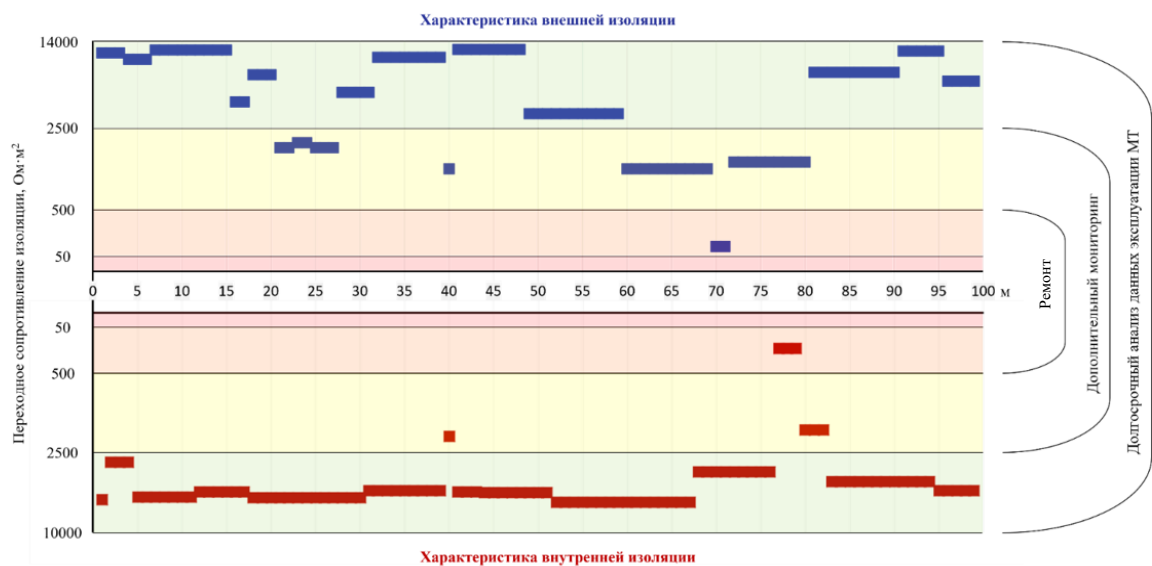


Рисунок 4.1 – Диаграмма распределения дефектов внешней изоляции на 3-ей нитке трубопровода Ухта-Торжок [6]

Полученные результаты оценки состояния изоляции трубопровода позволят с большей точностью определить участки для дополнительных исследований и скорректировать проведение ремонтных работ. Кроме того, благодаря ускорению процесса сбора данных о повреждениях изоляции и их анализа, проведение такого контроля станет более доступным и его возможно будет проводить с большей частотой, что позволит значительно увеличить количество информации о влиянии различных факторов на состояние трубопровода.

По итогам модифицирования порядка проведения внутритрубной дефектоскопии и наземного обследования трубопровода, предлагается составлять отдельный отчет в виде комплексной диаграммы состояния изоляции, изображенный на рисунке 4.2.

Таким образом, по результатам анализа диаграммы состояния изоляции, в системе принятия решений по эксплуатации магистрального трубопровода и проведению ремонтных работ сформирована подсистема оценки технического состояния изоляции магистрального трубопровода.



- 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 4.2 – Пример комплексной диаграммы состояния изоляции на участке трубопровода длиной 100 м (составлено автором на основе источника [6])

Для существующих нормативных документов по интерпретации данных о состоянии изоляции трубопроводов предложены следующие рекомендации по принятию решений:

На участках магистрального трубопровода с коррозионными повреждениями изоляции, характеризующимися значениями переходного сопротивления менее $500 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$, предлагается в обязательном порядке проводить дополнительный дефектоскопический контроль с последующим оперативным ремонтом изоляционного покрытия при технологической возможности такового.

При удовлетворительном состоянии изоляции трубопровода (от 500 до $2500 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$) факт ее повреждения не является достаточным условием для проведения ремонта, однако данные промежутки рекомендуется учесть при планировании даты проведения следующего мониторинга технического состояния трубопровода и/или скорректировать режим работы системы катодной электрохимической защиты и рабочее давление магистрального трубопровода. В зависимости от типа изоляции, условий эксплуатации трубопровода и режима

работы станции катодной защиты данные дефектные участки могут стать опасными в течение 6 месяцев или более длительного срока [6].

Данные о состоянии изоляции 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 магистрального трубопровода.

Таким образом, составлен общий алгоритм проведения оценки состояния изоляционных покрытий трубопровода, представленный на рисунке 4.3.

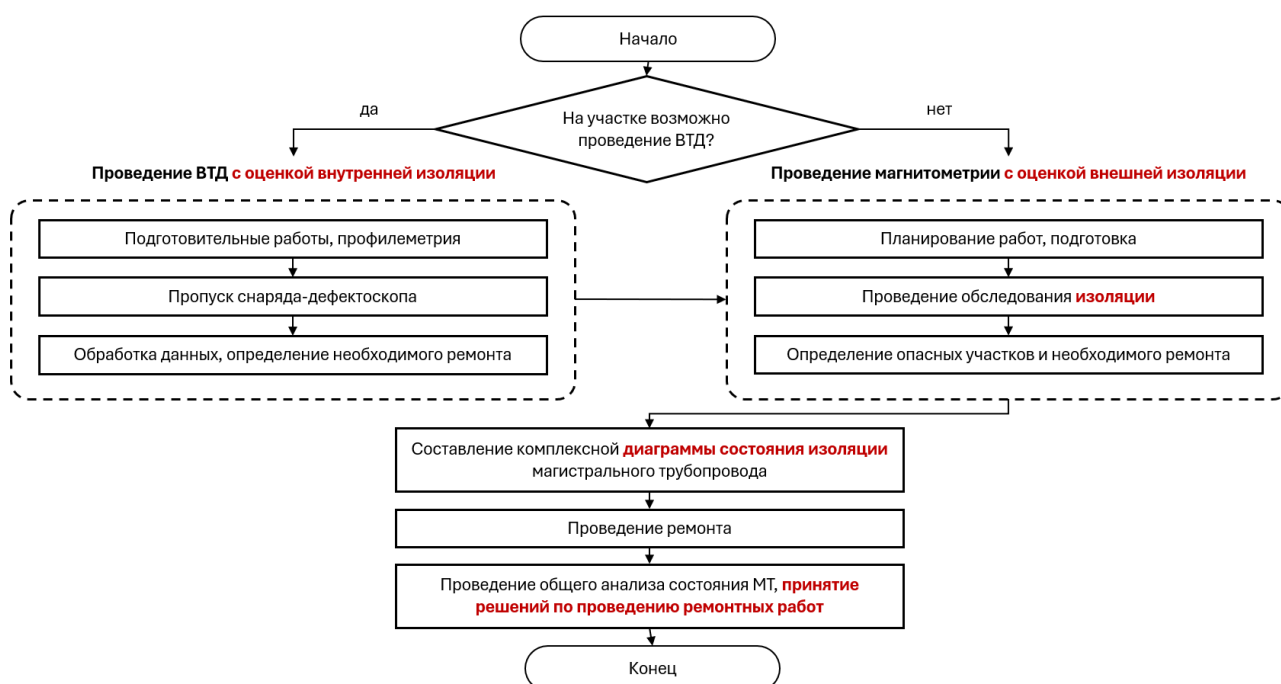


Рисунок 4.3 – Блок-схема метода оценки состояния изоляции магистрального трубопровода

4.2 Оценка эффекта от внедрения разработанной системы на эксплуатацию трубопровода

Для определения эффекта от внедрения подсистемы оценки технического состояния изоляции магистрального трубопровода на систему обеспечения его работы необходимо провести анализ участков магистрального трубопровода, отказавших по причине разрушения изоляционного покрытия, и сравнить вероятность аварии на этих участках в отсутствии разработанной подсистемы и с ее применением.

Для расчета вероятности аварии при разрушении изоляционного покрытия магистрального трубопровода воспользуемся установленной зависимостью количества отказов от плотности тока, необходимой для обеспечения электрохимической защиты трубопровода (см. рисунок 4.4), построено по статистическим данным аварий на трубопроводах с различными режимами работы станции катодной защиты в течение 10 лет, 2003 г. [43].

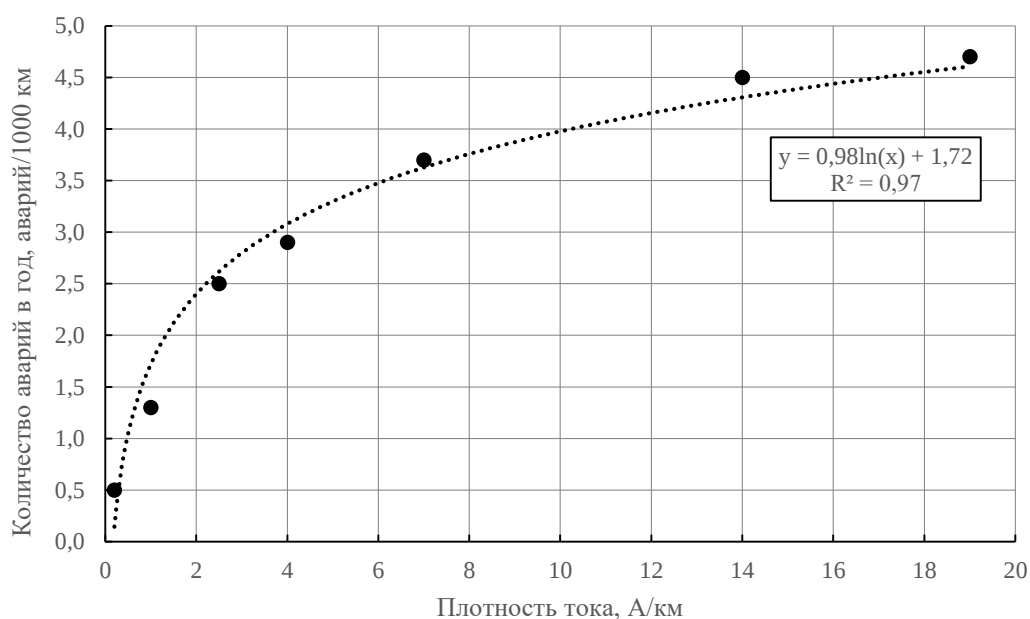


Рисунок 4.4 – Зависимость количества отказов магистрального трубопровода от плотности тока (состояния изоляции), необходимого для электрохимической защиты [43]

Согласно методике, описанной в [54, 12], вероятность возникновения на обследуемом участке магистрального трубопровода хотя бы одной аварии вычисляют по формуле (4.1):

$$Q = 1 - e^{\left(-\lambda_a \cdot t \cdot \frac{L}{1000}\right)}, \quad (4.1)$$

где λ_a – интенсивность аварий обследуемого участка, $\frac{\text{аварий}}{1000 \text{ км} \cdot \text{год}}$;

t – период последующей эксплуатации магистрального трубопровода (расчетный период), годы;

L – длина обследуемого участка магистрального трубопровода, км.

В качестве характеристики эксплуатации магистрального трубопровода рассчитывается время до проведения следующей экспертизы промышленной безопасности, которое определяется исходя из того, что за расчетный период вероятность безотказной эксплуатации обследуемого участка составит 0,9, т. е. будет установлена вероятность аварии $Q = 0,1$ (4.2):

$$t_3 = \frac{\ln(0,9) \cdot 1000}{L \cdot \lambda_a}. \quad (4.2)$$

Эффект от внедрения разработанной подсистемы оценки технического состояния изоляции магистрального трубопровода может быть определен как коэффициент снижения вероятности аварии ΔQ после своевременного принятия решений по проведению дополнительных мероприятий для сохранения эксплуатационных характеристик изоляционного покрытия трубопровода (4.3).

$$\Delta Q = \left(\frac{Q_1}{Q_2} - 1 \right) \cdot 100\% \quad (4.3)$$

где Q_1 – вероятность аварии до проведения мероприятий,

Q_2 – вероятность аварии после осуществления выбранных мероприятий.

После комплексного обследования изоляции магистрального трубопровода (или только магнитометрии в зависимости от технической возможности осуществления внутритрубной дефектоскопии) с целью повышения эксплуатационной надежности участка трубопровода могут быть приняты решения [38, 5] о проведении следующих мероприятий:

- дополнительный дефектоскопический контроль состояния изоляции в шурфах;
- изменение параметров технологического процесса (в первую очередь, рабочего давления);
- повторное нанесение изоляционного покрытия в полевых условиях;
- замена труб, на которых обнаружены дефектные участки с повреждениями изоляции, на новые;
- дренирование на поврежденном участке магистрального трубопровода.

В документе [53] разработана методика принятия решений по ремонтным работам и своевременному диагностированию, представленная в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Градация показателей технического состояния

Значение величины переходного сопротивления изоляции линейного участка магистрального трубопровода по результатам внутритрубной дефектоскопии, Ом · м ²	Рекомендованные мероприятия по обеспечению работы магистрального трубопровода
от 2500 до 10000	выборочный ремонт с преимущественным применением технологий ремонта, не требующих остановки транспорта
500 до 2500	текущий ремонт
50 до 500	диагностика с применением наружных сканеров дефектоскопов и пере изоляция участка с частичной заменой труб
от 0 до 50	вывод линейного участка магистрального трубопровода в капитальный ремонт с полной заменой труб

Представленный перечень мероприятий не является полным. В зависимости от местности прохождения трассы трубопровода и технико-экономических возможностей эксплуатирующего предприятия могут быть осуществлены другие мероприятия по обеспечению работы магистрального трубопровода.

Обоснование полного перечня мероприятий, анализ их эффективности и разработка методики по выбору оптимального решения в той или иной ситуации не входят в рамки данного диссертационного исследования, в связи с чем для определения эффекта от внедрения подсистемы оценки состояния изоляции магистрального трубопровода рассматриваются примеры использования только указанных в перечне мероприятий, а также существующая методика определения действий по обеспечению эксплуатационной надежности магистрального трубопровода.

В качестве исходных были использованы данные об аварийных отказах на подземных магистральных трубопроводах, которые представлены в таблице 4.2 [57].

Таблица 4.2 – Характеристики аварийных участков магистрального трубопровода с повреждениями изоляции

Протяженность линейного участка магистрального трубопровода, км	Плотность тока на участке в период возникновения аварии, мА/м	Расчетная интенсивность аварий, λ_{a1}	Вероятность отказа, Q_1	Время до проведения экспертизы, $t_{э1}$
13	4,5	3,19	0,34	2,54
13	5	3,30	0,35	2,46
15	4	3,08	0,37	2,28

Для обоснования степени снижения вероятности отказа магистрального трубопровода после проведения ремонтных мероприятий были использованы расчетные данные о пяти участках различных магистральных трубопроводов [57], представленные в таблице 4.3. Среднее снижение вероятности отказа при полной замене труб составляет 54%, а при выборочном ремонте поврежденных участков 50%.

Таблица 4.3 – Расчетные данные участков магистрального трубопровода

Вероятность отказа до проведения ремонта	Вероятность отказа после замены труб	Степень снижения после замены труб, %	Вероятность отказа после выборочного ремонта	Степень снижения после выборочного ремонта, %
0,23	0,08	65%	0,08	65%
0,38	0,14	63%	0,16	58%
0,75	0,34	55%	0,38	49%
0,27	0,16	41%	0,16	41%
0,23	0,12	48%	0,15	35%
0,372	0,168	54%	0,186	50%

С целью определения характеристик магистральных трубопроводов после применения оценки технического состояния изоляции магистрального трубопровода был проведен расчет вероятности отказа, интенсивности возникновения аварий и времени до проведения экспертизы промышленной безопасности (см. таблицу 4.4).

Таблица 4.4 – Характеристики аварийных участков магистрального трубопровода после принятия решений в результате применения системы оценки состояния изоляции магистрального трубопровода

Вероятность отказа до проведения ремонта, Q_1	Степень снижения Q , %	Вероятность отказа после проведения ремонта, Q_2	Интенсивность аварий, λ_{a2}	Время до проведения экспертизы, $t_{э2}$
0,34	50%	0,17	1,45	5,61
0,35	50%	0,18	1,49	5,45
0,37	54%	0,17	1,23	5,69

По результатам расчета среднее снижение интенсивности аварий по трем проанализированным аварийным участкам составило 56%, а среднее время до следующей экспертизы промышленной безопасности – 5,58 лет. При проведении комплексной диагностики не реже чем раз в 5 лет достаточный объем ремонтных мероприятий в зависимости от состояния магистрального трубопровода обеспечивает его работы.

Согласно нормативной документации по определению влияния различных факторов на техническое состояние трубопровода [53], весовой коэффициент показателя состояния изоляционного покрытия составляет 0,3. Соответственно, на представленных трех участках магистрального трубопровода подсистема оценки состояния изоляционного покрытия влияет на принятие решений о проведении ремонтных мероприятий на 30%.

По представленным данным разработанная подсистема обеспечивает снижение вероятности отказа магистрального трубопровода до 15%. При этом затраты по диагностике состояния изоляции увеличиваются не значительно. Обоснование экономической составляющей применения подсистемы оценки технического состояния изоляционного покрытия магистрального трубопровода приведено в следующей главе работы.

4.3. Экономическая часть

После оценки технологического эффекта от внедряемой подсистемы мониторинга состояния изоляционного покрытия магистрального трубопровода

необходимо определить экономическую эффективность предлагаемого решения. Методика такой оценки описана в работе [37], согласно которой необходимо учесть изменения графика мероприятий по предотвращению аварий и снижение вероятности отказа.

Примем для оценки участки трубопроводов, использованные для расчетов вероятностей отказа до и после применения мониторинга изоляции. Соответственно, в базовом варианте по данным участкам трубопроводов предусмотрено проведение внутритрубной дефектоскопии раз в 5 лет. При этом отказы происходят с интенсивностью λ_{a1} .

В варианте «с проектом» для участков №2 и №3 предполагается реконструкция 1 км дефектных труб с проведением перед этим комплексной диагностики состояния изоляции. Для участка 1 предусмотрена замена 1,5 км труб. При этом отказы происходят со скорректированной интенсивностью λ_{a2} .

Результаты расчетов интенсивности аварий и времени до необходимости диагностирования на рассматриваемых участках приведены в таблице 4.2. График проведения работ по вариантам «без проекта» и «с проектом» приведены соответственно в таблицах 4.5 и 4.6. Расчетный период оценки $t = 10$ лет.

Основные статьи затрат для варианта «без проекта» представлены в списке:

- 1) проведение внутритрубной диагностики – стоимость 150 тыс. руб. за 1 км диагностируемого участка с учетом количества данных мероприятий;
- 2) ликвидация аварий, исходя из расчета 10 млн руб. на одно разрушение;
- 3) оплата штрафа по загрязнению окружающей среды в размере 3 млн руб.

Таблица 4.5 – График проведения мероприятий для варианта «без проекта»

№ участка	Годы										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Д			А		Д			А		
2		Д			А		Д			А	
3			Д			А		Д			А

Примечание:
Д – внутритрубная дефектоскопия (ВТД);
А – вероятное возникновение аварийной ситуации.

Таблица 4.6 – График проведения мероприятий для варианта «с проектом»

№ участка	Годы										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	И+П						Д (Э)				
2	И+П						Д (Э)				
3	И+З					Д (Э)					
Примечание: Д (Э) – внутритрубная дефектоскопия с дополнительной электрометрией И – комплексная оценка технического состояния магистрального трубопровода с применением подсистемы оценки изоляции П – переизоляция труб на участке магистрального трубопровода З – замена труб на участке магистрального трубопровода											

Для варианта «с проектом» расходы связаны со следующими мероприятиями:

1) проведение комплексной диагностики состояния трубопровода стоимостью 220 тыс. руб. за 1 км исходя из удорожания стоимости внутритрубной дефектоскопии при использовании электрической дефектоскопии на 30 тыс. руб. и дополнительной стоимости магнитометрии в 40 тыс. руб. на 1 км;

2) переизоляция потенциально опасных участков по стоимости 1 млн руб. за 1 км труб;

3) замена труб участка магистрального трубопровода на новые в сумме 25 млн руб. за 1 км исходя из затрат в 22 млн руб. на закуп труб и их монтаж стоимостью 3 млн руб.

По условиям расчета норма дисконта составляет 14%; система цен использована в рамках 2023 г. В качестве параметров экономической эффективности использованы следующие общепринятые расчетные показатели:

- чистый дисконтированный доход (ЧДД);
- внутренняя норма доходности (ВНД);
- срок окупаемости (простой) и с учетом дисконтирования;
- индекс доходности инвестиций (ИД);

Результаты расчета данных показателей и денежных потоков обоих вариантов представлены в таблицах 4.7 – 4.9 (значения в тыс. руб., если не указано иное).

Таблица 4.7 – Затраты на эксплуатацию участка магистрального газопровода для варианта «без проекта»

Статья затрат	Год											Всего за 10 лет
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Среднегодовые затраты на ВТД	1620	1620	1620	1620	1620	1620	1620	1620	1620	1620	1620	17820
Среднегодовые затраты на ликвидацию аварий	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000	66000
Оплата штрафов	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	3300
Итого	7920	7920	7920	7920	7920	7920	7920	7920	7920	7920	7920	87120

Таблица 4.8 – Затраты на эксплуатацию участка магистрального газопровода для варианта «с проектом»

Статья затрат	Год											Всего за 10 лет
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Среднегодовые затраты на ВТД	2160	2160	2160	2160	2160	1944	1944	1944	1944	1944	1944	20520
Затраты на реконструкцию, в т.ч.	27000											27000
Участок №1	25000											
Участок №2	1000											
Участок №3	1000											
Итого	29160	2160	2160	2160	2160	1944	1944	1944	1944	1944	1944	47520

Таблица 4.9 – Расчет экономического эффекта от реализации проекта и показателей его эффективности

Период, пройденных лет	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ЧД без проекта	7920	7920	7920	7920	7920	7920	7920	7920	7920	7920	7920
ЧД с проектом	29160	2160	2160	2160	2160	1944	1944	1944	1944	1944	1944
Эффект от проекта	-21240	5760	5760	5760	5760	5976	5976	5976	5976	5976	5976
Накопленный эффект от проекта	-21240	-15480	-9720	-3960	1800	7776	13752	19728	25704	31680	37656
Норма дисконта	14%	14%	14%	14%	14%	14%	14%	14%	14%	14%	14%
Коэффициент. диск., д. ед.	1,00	0,88	0,77	0,67	0,59	0,52	0,46	0,40	0,35	0,31	0,27
ЧДД	-21240	5053	4432	3888	3410	3104	2723	2388	2095	1838	1612
Накопленный ЧДД	-21240	-16187	-11755	-7867	-4457	-1353	1369	3758	5852	7690	9302
ВНД, %	24%										
Простой срок окупаемости, лет	3,31										
Дисконтированный срок окупаемости, лет	5,50										
ИД, д. ед.	2,39										
ИДД, д. ед.	1,34										

Таким образом, положительный экономический эффект от проекта достигается при ставке дисконтирования не более 24%, а с принятой нормой дисконта срок окупаемости проекта составляет 5,5 лет. Соответственно, накопленный доход от реализации проекта внедрения подсистемы оценки состояния изоляции магистрального трубопровода на трех участках для компании-оператора составит 9,3 млн. руб.

4.4 Выводы по главе 4

Таким образом, в системе принятия решений по эксплуатации магистральных трубопроводов и проведению ремонтных работ сформирована подсистема оценки технического состояния изоляции магистрального трубопровода.

Данные о переходных сопротивлениях изоляционного покрытия магистрального трубопровода, полученные с помощью разработанного программно-алгоритмического обеспечения, рекомендовано использовать для своевременного применения мероприятий по обеспечению безопасной работы магистрального трубопровода.

Выполнен расчет технологического и экономического эффекта от внедряемой подсистемы мониторинга состояния изоляционного покрытия магистрального трубопровода.

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 ЛИТЕРАТУРЫ

1 Ахметгареев, Р.О. Системы поддержки принятия решений при мониторинге магистральных трубопроводов / Ахметгареев Р.О., Бушмелева К.И. / Труды международного симпозиума «Надежность и качество». – 2013.

2 Баяк, И.О. Математическое моделирование анизотропных эффективных упругих свойств карбонатных коллекторов сложного строения / И. О. Баяк, О. В. Постникова, В. И. Рыжков, И. С. Иванов // Технологии сейсморазведки. – 2012. – № 3. – С. 42-55. – EDN RJPKND.

3 Болотнов, А. М. Математическое моделирование и численное исследование электрических полей в системах с протяженными электродами / А. М. Болотнов, Н. П. Глазов, В. Д. Киселев, Ф. З. Хисаметдинов // Вестник Башкирского университета. – 2006. – Т. 11, № 2. – С. 17-21. – EDN ICIQJV.

4 Болотнов, А. М. Определение сопротивления изоляции трубопровода по результатам измерений разности потенциалов "грунт-труба" / А. М. Болотнов, Ф. З. Хисаметдинов // Вестник Башкирского университета. – 2017. – Т. 22, № 1. – С. 20-24. – EDN YLXYDJ.

5 Волкова, В.Н. Системный анализ и принятие решений: словарь-справочник / В.Н. Волкова, В.Н. Козлов. – М: Высшая школа, 2004. – 616 с.

6 ВРД 39-1.10-026-2001 Ведомственный руководящий документ «Методика оценки фактического положения и состояния подземных трубопроводов»: утвержден Членом Правления ОАО "ГАЗПРОМ" Будзуляком Б.В., введен в действие 29.01.2001 г. Издан: ООО «Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий – ВНИИГАЗ» (ООО "ВНИИГАЗ") – 2001.

7 Ву, Ван-Мынг Оценка эффективности установки катодной защиты морских сооружений с использованием питания от солнечных панелей/ Ву Ван-Мынг, Чернов Б.Б., Нугманов А.М. // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. – 2019. – №6. – С. 1141-1151.

8 Гоголинский, К.В., Алехнович, В.В., Ивкин, А.Е., Уманский, А.С., Соломенчук, П.В. Исследование методов входного контроля металлических покрытий шаровой запорной арматуры трубопроводов// Контроль и диагностика. – 2023. – Т.26– № 4. С. 38-47. doi 10.14489/td.2023.04.pp.038-047

9 Голубев, И.А., Голубев, А.В., Лаптев, А.Б. Практика применения аппаратов магнитной обработки для интенсификации процессов первичной подготовки нефти// Записки Горного института. – 2020. – Т. 245. – С. 554-560. doi: 10.31897/PMI.2020.5.7

10 ГОСТ 34181-2017 Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Техническое диагностирование. Основные положения: принят Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 4 июля 2017 г. N 633-ст, введен в действие с 1 марта 2018 г.– М.: Издательство «Стандартинформ». – 2019.

11 ГОСТ 9.602-2016 Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии: Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 7 октября: 2016 г. № 1327-ст: введен в действие с 1 июля 2017 г. – М.: Издательство «Стандартинформ». – 2017.

12 ГОСТ Р 27.303-2021 (МЭК 60812:2018). Национальный стандарт Российской Федерации. Надежность в технике. Анализ видов и последствий отказов: Утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 21 сентября 2021 г. N 987-ст. М: – Стандартинформ, оформление. – 2019

13 ГОСТ Р 51164-98 Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии: утвержден и введен в действие Постановлением Госстандарта России от 23 апреля 1998 г. № 144 – М.: ИПК Издательство стандартов. – 1998.

14 ГОСТ Р 55435-2013 Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Эксплуатация: утвержден и введен в действие Приказом

Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 23 мая 2013 г. N 121-ст. – М.: Издательство «Стандартинформ». – 2014.

15 Гуськов, М. А. Анализ причин аварий на опасных производственных объектах магистрального трубопроводного транспорта газа / М. А. Гуськов, Е. Е. Фомина, А. А. Могило // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2024. – № 4(319). – С. 62-69. – EDN BPTPOS.

16 Идрисов, Р. Х. Анализ аварийности магистральных трубопроводов России/ Р. Х. Идрисов, К. Р. Идрисова, Д. С. Кормакова // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2019. – № 2. – С. 44-46. DOI 10.24411/0131-4270-2019-10209. – EDN LIJUQF.

17 Кадакин, В. П. Контроль коррозионного состояния магистральных нефтепроводов на основе внутритрубной диагностики / В. П. Кадакин // Территория Нефтегаз. – 2008. – № 10. – С. 32-43. – EDN KNPWWR.

18 Кадников, С. Н. Математическое моделирование магнитного поля в кусочно-однородной анизотропной среде/ Кадников С. Н., Сергеева И. Е. // Вестник ИГЭУ. – 2009. – №2. – С. 1-4.

19 Карабельская, И.В. Примеры расчета электрических полей при электрохимической защите трубопроводов от коррозии // Электротехнические и информационные комплексы и системы.– 2015. – №2. С. 23-29.

20 Киселев, В. Г. Основные принципы проектирования катодной защиты подземных металлических сооружений / В. Г. Киселев // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2011. – № 4(135). – С. 111-116. – EDN OYOTHV.

21 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.

22 Кризский, В.Н. Математическое моделирование электрического поля внутритрубного диагностического зонда катодно-поляризуемого трубопровода/

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

23 Кризский, В.Н., Александров, П.Н., Ковальский, А.А., Викторov, С.В. Математическое моделирование электрических полей катодной защиты магистральных трубопроводов в анизотропных средах // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2020. – Т.10, №1. – С.52-63, doi:10.28999/2541-9595-2020-10-1-52-63

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

25 Кризский, В. Н. Мониторинг изоляционного покрытия катодно-поляризуемого магистрального трубопровода по данным магнитометрии с учетом слоистости вмещающей среды / В. Н. Кризский, С. В. Викторov, **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.

26 Кризский, В.Н. Об адекватности математической модели токораспределения в системе катодной защиты трубопровода / Кризский В.Н., Викторov С. В. / материалы IX Международной молодежной научно-практической конференции «Математическое моделирование процессов и систем». – 2019. – С. 229-231.

27 Кризский, В. Н. Об определении переходного сопротивления катодно-поляризуемого магистрального трубопровода по данным магнитометрии / В. Н. Кризский, С. В. Викторov, **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.

28 Кризский, В. Н. О математическом моделировании систем катодной защиты трубопроводов / В. Н. Кризский, С. В. Викторов // Математическое моделирование процессов и систем : материалы IX Международной молодежной научно-практической конференции, Стерлитамак, 30 октября – 01 2019 года. – Стерлитамак: Башкирский государственный университет, Стерлитамакский филиал. – 2019. – С. 229-231. – EDN ZOLTQZ.

29 Кризский, В. Н. Электронная монография «Математическое моделирование геоэлектрических полей в кусочно-однородных квазитрехмерных средах» / В. Н. Кризский, С. В. Викторов, М. Б. Беляева // Хроники объединенного фонда электронных ресурсов Наука и образование. – 2015. – № 12(79). – С. 21. – EDN VKNWYJ.

30 Ландау, Л. Д., Лифшиц, Е. М. Теория поля. – М.: Наука, – 1988, – 512 с.

31 Лисин, Ю. В. Мониторинг магистральных нефтепроводов в сложных геологических условиях / Ю. В. Лисин, А. А. Александров // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2013. – № 2(10). – С. 22-27. – EDN QIVDJR.

32 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.

33 Лунтовская, Я. А. Формирование математических моделей электромагнитных полей систем управления катодной защитой магистральных трубопроводов / Я. А. Лунтовская, В. Н. Кризский, О. В. Косарев // Известия

Тулского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 9. – С. 81-87. – DOI 10.24412/2071-6168-2023-9-81-82.

34 Любчик, А. Н. Способ дистанционного магнитометрического контроля технического состояния магистральных трубопроводов / А. Н. Любчик // Записки Горного института. – 2012. – Т. 195. – С. 268-271. – EDN QZEPFJ.

35 Масленникова, Н.Ю. Понятие и сущность мониторинга с позиции системного подхода / Масленникова Н.Ю., Слинкова О.К / Science time. – 2014. – № 6 (6) – С.110-121.

36 Медведева, М. Л. Коррозия и защита магистральных трубопроводов и резервуаров: учебное пособие для вузов нефтегазового профиля / М. Л. Медведева, А. В. Мурадов, А. К. Прыгаев. Издательский центр РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина. – 2013. С. – 250.

37 Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов (вторая редакция). – Утв. Минэкономки РФ, Минфином РФ, Госстроем РФ 21.06.1999 N ВК 477. – М., 2004.

38 Мушик, Э. Методы принятия технических решений / Мушик Э., Мюллер П. – М.: Мир, 1990. – 208 с.

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

40 Описание типа средства измерений Магнитометры КБД-2П: Приложение к приказу Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии № 1799 от «6» ноября 2020 г. Изготовитель: ООО «ДИАС». – 2020.

41 Патент № 2626609 Российская Федерация, МПК F16L 58/00 (2006.01), C23F 13/00 (2006.01). Способ оценки технического состояния изоляционного покрытия подземного трубопровода : № 117839 : заявлено 04.05.2016 : опубликовано 31.07.2017 / Агинеи Р.В., Никулин С.А., Карнавский Е.Л., Третьякова М.В. заявитель АО «Гипрогазцентр». – С. 12: 2 ил.

42 Патент № 2679042 Российская Федерация, МПК F17D 5/06 (2006.01). Способ и устройство для дефектоскопии внутренних защитно-изоляционных покрытий действующих промышленных трубопроводов: № 2017123805: заявлено 05.0.2017: опубликовано 05.02.2019 / Наянзин А.Н. Заявитель Наянзин А.Н. – С. 17: 6 ил.

43 Притула, В.В. Подземная коррозия трубопроводов и резервуаров / Притула В.В. Издательство «Акела», г. Москва. – 2003.

44 Р Газпром 9.4-050-2015. Методические рекомендации по проведению детального комплексного коррозионного обследования [Текст]: рекомендации организации: издание официальное: введены впервые: дата введения 2017-03-31 / Публичное акционерное общество «Газпром»; ООО «Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий – Газпром ВНИИГАЗ». – Санкт-Петербург: Газпром экспо, – 2018.

45 РД 102-008-2002 Инструкция по диагностике технического состояния трубопроводов бесконтактным магнитометрическим методом: утвержден АО ВНИИСТ 09.10.2002 г. – ОАО «ВНИИСТ-ПОЛИГРАФИЯ». – 2003.

46 Рудой, В.М., Останин Н.И., Зайков Ю.П. Проектирование катодной защиты подземных магистральных трубопроводов / Учебное электронное текстовое издание. Подготовлено кафедрой «Технология электрохимических производств» ГОУ ВПО УГТУ–УПИ. Екатеринбург – 2005 г.

47 Руководство по безопасности «Техническое диагностирование трубопроводов линейной части и технологических трубопроводов магистральных нефтепроводов и нефтепродуктопроводов»: утверждено приказом Федеральной

службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 2 августа 2018 г. N 330. – М.: ЗАО НТЦ ПБ. – 2018.

48 Садыгов, А. Б. Математические модели автоматизированного управления системами противокоррозионной защиты магистральных трубопроводов / А. Б. Садыгов, Р. Э. Мамедли, Р. М. Зейналов // Современное программирование : Материалы II Международной научно-практической конференции, Нижневартонск, 14–16 ноября 2019 года / Отв. редактор Т.Б. Казиахмедов. – Нижневартонск: Нижневартонский государственный университет, 2019. – С. 68-76. – EDN QGPCUO.

49 Саксон, В. М. Диагностика стальных трубопроводов методом бесконтактной магнитометрии / В. М. Саксон, А. Б. Сергеев, А. Б. Проказин // Мир измерений. – 2012. – № 6. – С. 17-21. – EDN OYHLJT.

50 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/ Кризский В.Н., Косарев О.В., **Лунтовская Я.А.**; заявитель СПГУ. – 8 с.: ил. – Текст: непосредственный.

51 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023662303 Российская Федерация. Программа моделирования магнитного поля внутритрубного диагностического зонда катодно-поляризуемого трубопровода: № 2023661579: заявл. 01.06.2023: опубл. 07.06.2023/ Кризский В.Н., Косарев О.В., **Лунтовская Я.А.**; заявитель СПГУ. – 8 с.: ил. – Текст: непосредственный.

52 СП 36.13330.2012 Магистральные трубопроводы : утвержден приказом Федерального агентства по строительству и жилищно-коммунальному хозяйству (Госстрой) от 25 декабря 2012 г. N 108/ГС и введен в действие с 1 июля 2013 г.: М.: Госстрой, ФАУ "ФЦС", 2013 г.

53 СТО Газпром 2-2.3-292-2009 Правила определения технического состояния магистральных газопроводов по результатам внутритрубной

инспекции: утвержден и введен Распоряжением ОАО «Газпром» от 23 декабря 2008 г. № 518 ООО «Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий – Газпром ВНИИГАЗ». – 2009.

54 СТО Газпром 2-3.5-252-2008 Стандарт организации «Методика продления срока безопасной эксплуатации магистральных газопроводов»: утвержден и введен Распоряжением ОАО «Газпром» от 15 августа 2008 г. № 251 с 15.04.2009. ООО «Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий – Газпром ВНИИГАЗ». – Санкт-Петербург: Газпром экспо, – 2009.

55 Судницына, П. А. Анализ аварийности на магистральных трубопроводах / П. А. Судницына, Л. С. Аюпова // Вестник магистратуры. – 2022. – № 12-1(135). – С. 9-11. – EDN HVVNIY.

56 Табульдин, И. И. Особенности применения противокоррозионных полимерных покрытий стальных труб трубопроводов для транспортировки природного газа / И. И. Табульдин, Т. В. Кожина // Инновационные подходы в решении научных проблем: Сборник трудов по материалам XV Международного конкурса научно-исследовательских работ, Уфа, 2023 года. – Уфа: ООО «Научно-издательский центр «Вестник науки», 2023. – С. 36-40. XFDACX.

57 Теплинский, Ю.А., Альбом аварийных разрушений на объектах ЛЧ МГ ООО «Севергазпром»: Альбом/ Конакова М.А. и др. – Ухта: Севернипигаз. – 2006. С. – 345.

58 Теплинский, Ю.А. Управление эксплуатационной надежностью магистральных газопроводов / Теплинский Ю.А., Быков И.Ю. – М. «ЦентрЛитНефтеГаз». Москва. – 2007. С. – 400.

59 Тихонов, А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука: Главная редакция физико-математической литературы. – 1986. – 288 с.

60 Ткаченко, В. Н. Расчет электрохимической защиты трубопроводных сетей от коррозии методом дискретизации / В. Н. Ткаченко // Электричество. – 2007. – № 12. – С. 41-47. – EDN KXCGKX.

61 Харисов, Р.А. Основные причины возникновения дефектов изоляционных покрытий / Р. А. Харисов, А. Р. Хабирова, Ф. М. Мустафин, Р. А. Хабиров // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. – 2005. – № 1. – С. 16. EDN TWWMEP.

62 Хисаметдинов, Ф. З. Компьютерное моделирование и визуализация параметров электрического поля катодной защиты подземного трубопровода / Ф. З. Хисаметдинов // Современные наукоемкие технологии. – 2018. – № 9. – С. 126-130. – XZTGXB.

63 Четверушкин, Б.Н. Моделирование многофазных течений в подземном пространстве на суперкомпьютерах с применением явных разностных схем/ Четверушкин Б.Н., Люпа А.А., Трапезникова М.А., Чурбанова Н.Г. //Актуальные проблемы нефти и газа. – 2018. – №2(21). – С. 1-17.

64 Чухарева, Н. В. Коррозионные повреждения при транспорте скважинной продукции : методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу "Подготовка, транспорт и хранение скважинной продукции" для студентов IV курса, обучающихся по направлению 130500 "Нефтегазовое дело" специальности 130501 "Проектирование, сооружение и эксплуатация газонефтепроводов и газонефтехранилищ" / Н. В. Чухарева, Р. Н. Абрамова, Л. М. Болсуновская ; Томский политехнический университет (ТПУ). – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – 2009. – 66 с. – EDN VLWYTR.

65 Ягола, А.Г., Янфей Ван, Степанова И.Э., Титаренко В.Н. Обратные задачи и методы их решения. Приложения к геофизике. – М.: Бином. Лаборатория знаний, – 2014, – 216 с.

66 Aulia, R. Dynamic reliability model for subsea pipeline risk assessment due to third-party interference / Aulia R., Tan H., Sriramula S. // Journal of Pipeline Science and Engineering. – 2021. – Vol.1 (3). – P. 277-289. doi: 10.1016/j.jpse.2021.09.006

67 Bolzon, G. Mathematical model for galvanic and macro mechanical analysis of gas pipeline steels / Bolzon G., Rivolta B., Nykyforchyn H., Zvirko O. // *Procedia Structural Integrity*. – 2017. – № 5. – P. 627-632.

68 gosnadzor.ru: Интернет-сайт Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору: сайт. – Москва, 2004 г. – URL: <https://gosnadzor.ru/industrial/oil/lessons/> (дата обращения: 27.02.2025). – Режим доступа: открытый. – Текст: электронный.

69 Idachaba, F. Current Technologies and the Applications of Data Analytics For Crude Oil Leak Detection in Surface Pipelines / Idachaba F., Rabiei M. // *Journal of Pipeline Science and Engineering*. – 2021. – Vol.1. – P. 1-29. doi:10.1016/j.jpse.2021.10.001

70 Jabbari, M. Risk assessment of fire, explosion and release of toxic gas of Siri–Assalouyeh sour gas pipeline using fuzzy analytical hierarchy process / Jabbari M., Gholamnia R., Esmaili R., Hasan Kouhpaee H. // *Heliyon*. – 2021. – № 8 (7). – <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07835>

71 Khan, F. Risk-based pipeline integrity management: A road map for the resilient pipelines / Yarveisy R., Abbassi R. // *Journal of Pipeline Science and Engineering*. – 2021. – № 1 (1). – P. 74-87. doi:10.1016/j.jpse.2021.02.001

72 Krizsky, V. N. Modeling of electromagnetic fields of pipelines cathodic protection systems in horizontally-layered media // *Science & Technologies Oil and Oil Products Pipeline Transportation*. – 2019. – № 5 (9). – P. 558-567. – doi:10.28999/2541-9595-2019-9-5-558-567

73 Krizsky, V. N., Alexandrov, P. N., Kovalskii, A. A., & Victorov, S. V. Determination Transition Resistance of Cathode-Polarized Main Pipeline on Magnetometry Data. In *International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences*. International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences plus Mangey Ram. – 2021. – Vol. 6 – Issue 6. – P. 1729-1740 DOI: 10.33889/ijmems.2021.6.6.102

74 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 – pp. 312–322. doi: 10.1134/S2070048223020102

75 Li, Y.-T. Risk analysis and maintenance decision making of natural gas pipelines with external corrosion based on Bayesian network / Li Y.-T., He X.-N., Shuai J. // Petroleum Science. – 2021. – P. 1250-1261. doi: 10.1016/j.petsci.2021.09.016

76 Makhutov, N. A., Neganov, D. A., Studenov, E. P., & Zorin, N. E. Development of status, strength and operating life diagnostics and monitoring methods for continuously operating oil trunk pipelines. In Procedia Structural Integrity. – 2022. – Vol. 40. – P. 283-295 doi: 10.1016/j.prostr.2022.04.038

77 Mayet, A.M., Alizadeh, S.M., Nurgalieva, K.S., et al. Extraction of Time-Domain Characteristics and Selection of Effective Features Using Correlation Analysis to Increase the Accuracy of Petroleum Fluid Monitoring Systems, Energies, issue 62932. – 2022. – Vol. 15. doi: 10.3390.

78 Naseer, A. Modeling of cathodic protection for pipelines / Naseer A., Alhabobi A., Th. Albayati // Journal of Petroleum Research & Studies (JPR & S) . – 2016. – № 11. – P. 85-99. doi:10.52716/jprs.v6i1.140

79 Rajabalizadeh, Z. Corrosion protection and mechanical properties of the electroless Ni-P-MOF nanocomposite coating on AM60B magnesium alloy // Journal of Magnesium and Alloys.– 2021. – Vol.10. P. 2280-2295. doi:10.1016/j.jma.2021.08.013

80 Samimi, A. Corrosion classification of pipelines in hydrocracking units (ISOMAX) by data mining / Samimi A., Zarinabadib S., Shahbazi A.H., Kootenaeia, Azimia A., Mirzaeia M.// South African Journal of Chemical Engineering. – 2020. – Vol.31 – P. 44-50. doi:10.1016/j.sajce.2019.11.006

81 Sofiya, V., Iosif B., Vladimir K. Universal mathematical model of leakage currents and currents spread on elements of high-voltage pillar // Procedia Engineering.– 2015. № 100. – P. 1515-1521. doi:10.1016/j.proeng.2015.01.523

82 Soufeiani, L. Corrosion protection of steel elements in façade systems – A review // Journal of Building Engineering. – 2020. – Vol. 32. doi:10.1016/j.jobbe.2020.101759

83 Syromyatnikova, A. The corrosion damage mechanisms of the gas pipelines in the Republic of Sakha (Yakutia) // Procedia Structural Integrity.– 2019. – Vol. 20. – P. 259-264. doi:10.1016/j.prostr.2019.12.149

84 tehnior.ru: Интернет-сайт оборудование для работ внутри труб и трубопроводов: сайт. – Санкт-Петербург, – 2014 г. – URL: <https://tehnior.ru/oborudovanie-dlya-diagnostiki-kontrolya-i-inspektsii-truboprovodov/diagnostika-beskontaktnym-metodom/> (дата обращения: 18.05.2025). – Режим доступа: открытый. – Текст: электронный.

85 Tesfamariam, S. General corrosion vulnerability assessment using a Bayesian belief network model incorporating experimental corrosion data for X60 pipe steel / Tesfamariam S., Woldehellasse H., Xu M., Asselin E.// Journal of Pipeline Science and Engineering. – 2021. – Vol. 1 (3). – P. 329-338. doi: 10.1016/j.jpse.2021.08.003

86 Tsynaeva, A. A. Cathode protection systems of cross-country pipelines // Procedia Engineering. – 2015. – № TFoCE (111). – P. 777-782. doi: 10.1016/j.proeng.2015.07.145

87 Wang, Y. Mechano-electrochemical interaction for pipeline corrosion: A review //Journal of Pipeline Science and Engineering. – 2021. – № 1 (1). P. 1-16. doi:10.1016/j.jpse.2021.01.002

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Акт о внедрении результатов диссертации



Общество с ограниченной ответственностью

СПЕЦГЕОСЕРВИС**Инженерные изыскания**

info@sgs.spb.ru

+7-812-9399300

ОГРН 1167847063999 ИНН 7801299314

Адрес: 199106, г. Санкт-Петербург, ул. Шкиперский проток, дом 14, корпус 10

Утверждаю

Генеральный директор

ООО «Спецгеосервис»


 А.И. Куликов
 « 09 » 2025 г.
АКТ

о внедрении (использовании) результатов кандидатской диссертации

Лунтовской Яны Алексеевны

по научной специальности 2.3.1. «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика»

Комиссия в составе:

Председатель: Генеральный директор Куликов А.И.

Члены комиссии: Главный инженер, к.т.н. Ефимова Н.Н., начальник отдела изысканий, к.г.-м.н. Куликова Н.В.

составили настоящий акт о том, что результаты диссертации Лунтовской Я.А. на тему «Программно-алгоритмическое обеспечение принятия решений при оценке состояния изоляционного покрытия магистральных трубопроводов» (науч. рук. – Кризский В.Н.), представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы в ООО «Спецгеосервис» для расчета и анализа электрических полей систем катодной электрохимической защиты (СКЗ) трубопроводов при транспорте хорошо проводящих ток жидкостей (вода, соляные рассолы, химические растворы) с учетом переходного сопротивления изоляционного покрытия на границах «грунт-труба» и «труба - транспортируемая жидкость» в виде:

– программы моделирования электрического поля внутритрубоного диагностического зонда катодно-поляризуемого трубопровода.

Использование вышеуказанных результатов позволяет:

– учесть влияние переходных сопротивлений внешнего и внутреннего изоляционных покрытий трубопровода на измерения поля зонда;

– учесть влияние удельной электропроводности транспортируемой жидкости на измерения поля зонда.

Председатель комиссии

Генеральный директор ООО «Спецгеосервис»


 А.И. Куликов
Члены комиссии:

Главный инженер


 Н.Н. Ефимова

Начальник отдела изысканий


 Н.В. Куликова

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023611883

**Программа моделирования электрического поля
внутритрубного диагностического зонда катодно-
поляризуемого трубопровода**

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет» (RU)*

Авторы: *Кризский Владимир Николаевич (RU), Косарев Олег
Валерьевич (RU), Лунтовская Яна Алексеевна (RU)*



Заявка № 2023610768

Дата поступления 20 января 2023 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 26 января 2023 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Документ подписан электронной подписью
Сертификат 68b90077e14e5010a94ed624145d5c7
Владелец: **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 26.01.2022 по 25.05.2023

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023662303

**Программа моделирования магнитного поля
внутритрубного диагностического зонда катодно-
поляризуемого трубопровода**

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет» (RU)*

Авторы: *Кризский Владимир Николаевич (RU), Косарев Олег
Валерьевич (RU), Лунтовская Яна Алексеевна (RU)*



Заявка № 2023661579

Дата поступления 01 июня 2023 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 07 июня 2023 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Результаты вычислительных экспериментов

Распределение потенциала «нормального» поля зонда (при ненарушенной внутренней и внешней изоляции и нулевом токе станции катодной защиты 0 А) – сплошная синяя кривая 1, суперпозиции полей станции катодной защиты + зонда для «дефектной» по изоляционному покрытию трубы (штриховая коричневая кривая, 2) и разность между «рабочим» и «нормальным» сплошная линия – 3 поля в транспортируемой жидкости показано на рисунке В.1. Здесь по оси Ox взят отрезок, включающий в себя сегмент с дефектной изоляцией (№ 2501).

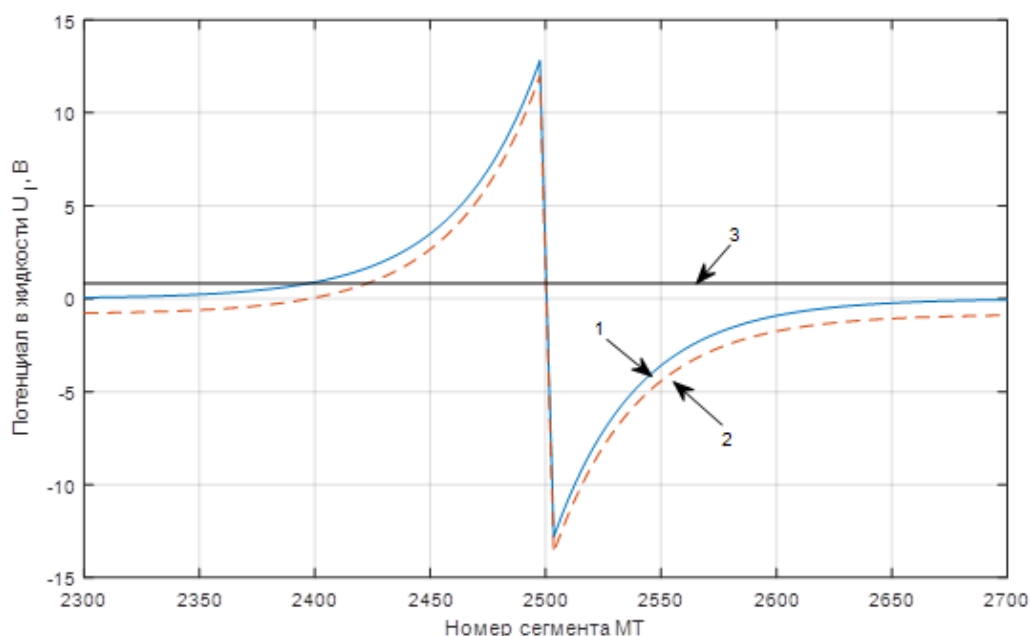


Рисунок В.1 – Распределение потенциала «нормального» (1), рабочего (2) и разность «рабочего» и «нормального» (3) поля электрического тока в транспортируемой жидкости при нулевом положении зонда
(составлено автором [22])

На Рисунок В.2 показаны фрагменты потенциала поля, вычисленные при некоторых смещениях внутритрубного зонда.

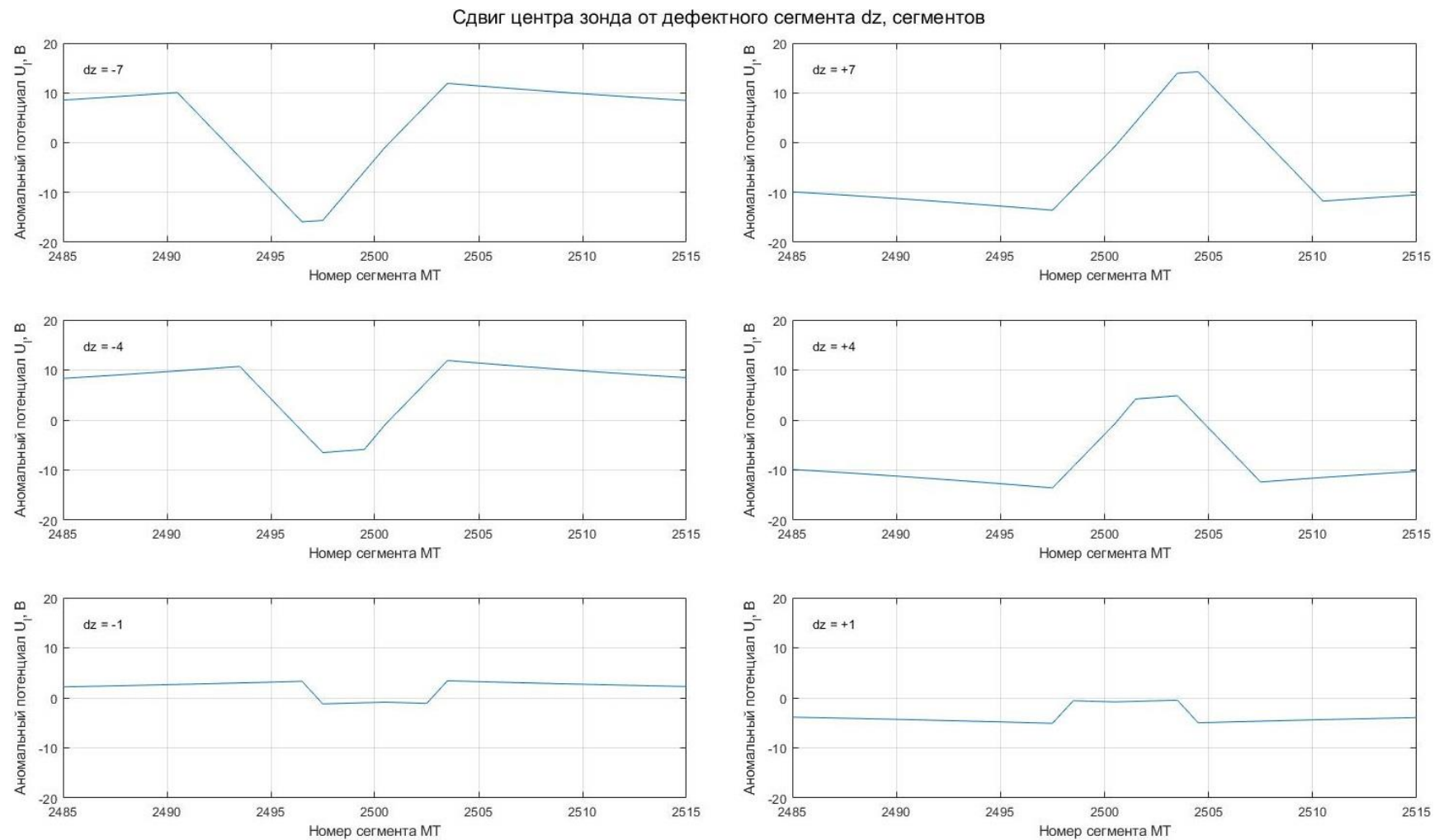


Рисунок В.2 – Эпюры потенциала U_g в транспортируемой жидкости (составлено автором [22])

Диапазон перемещений центрального сегмента зонда – в диапазоне отрезка $[-7; +7]$ сегментов трубы относительно сегмента с нарушенной изоляцией.

На рисунке В.3 показаны градиенты поля, построенные на основе разностей потенциалов между симметричными сегментами зонда, при движении зонда внутри трубопровода. На рисунке буквами z_x обозначены используемые для нахождения конечных разностей сегменты зонда (x – смещение сегмента относительно среднего сегмента z_0).

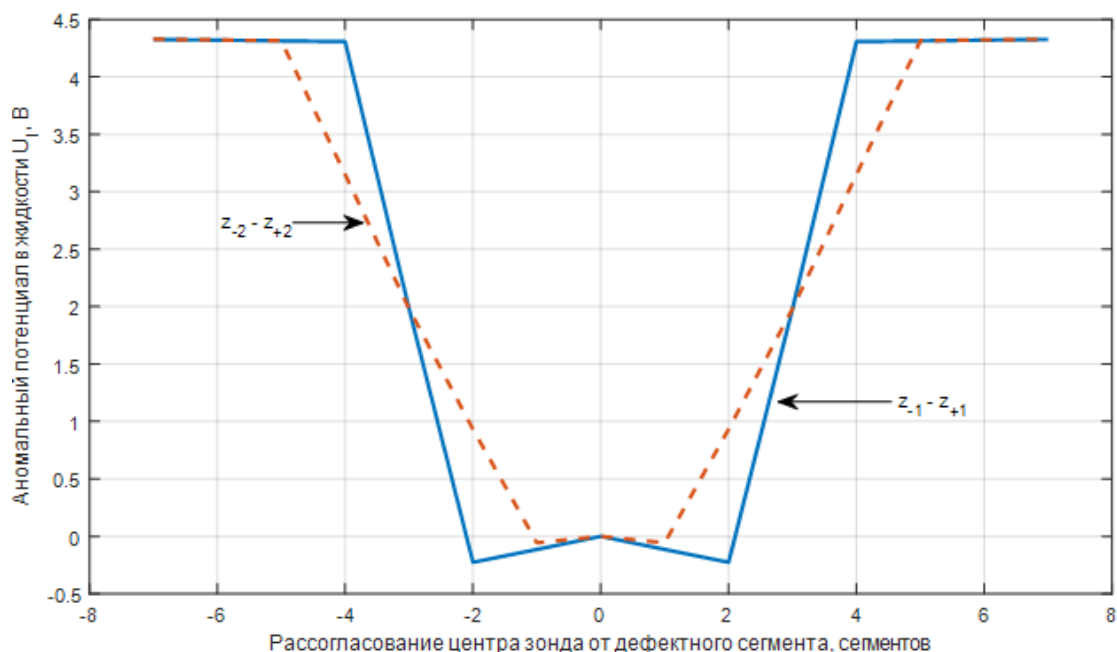


Рисунок В.3 – Распределение градиента поля в жидкости при движении зонда
(составлено автором [22])

На рисунках В.4 – В.9 представлены результаты вычислительных экспериментов, функции переходного сопротивления «грунт/труба» магистрального трубопровода при различных уровнях зашумления на различных высотах движения датчиков, которые задавались произведением длины сегмента трубы на коэффициент $koef$.

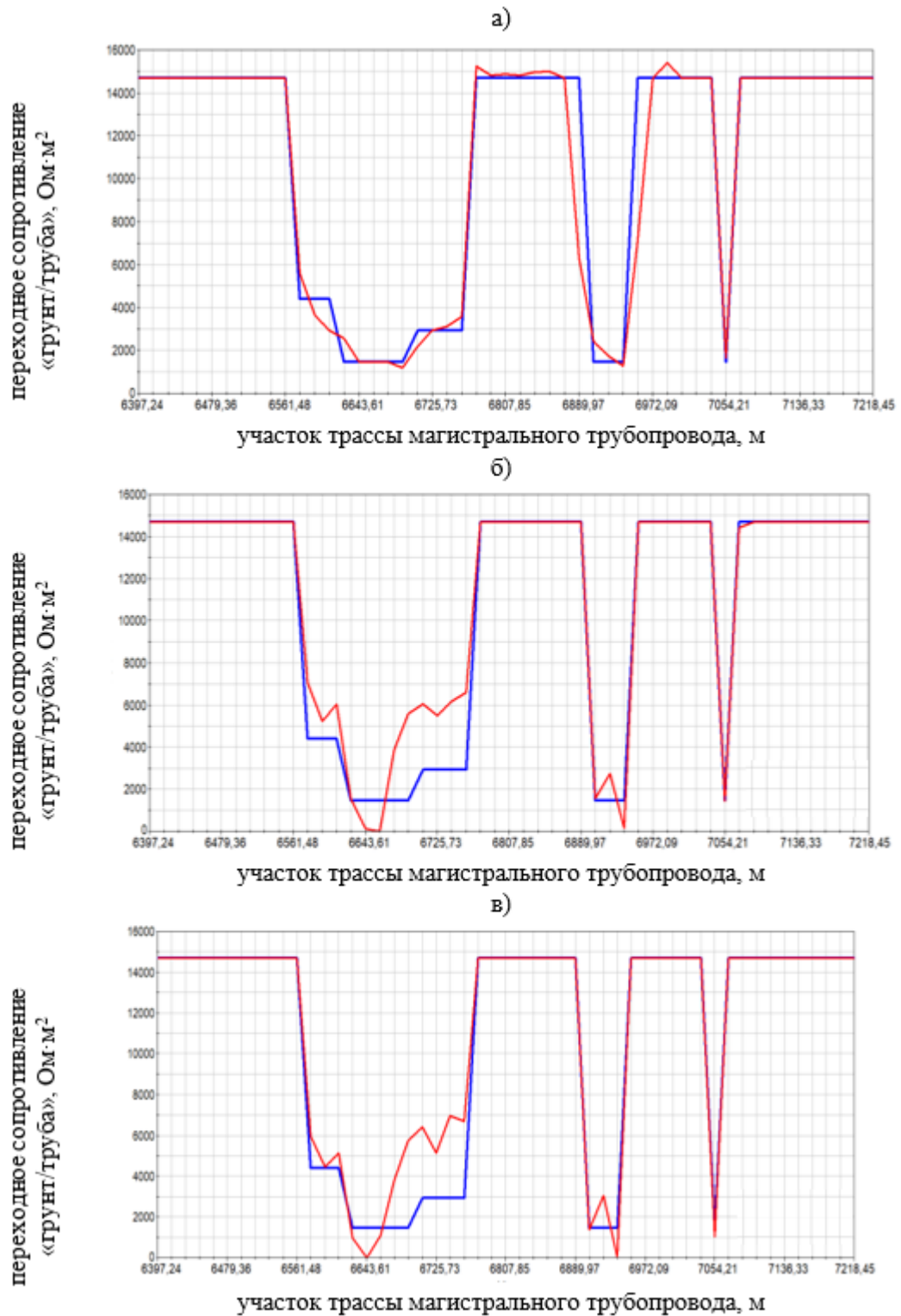


Рисунок В.4 – Функции переходного сопротивления «грунт/труба» над осью магистрального трубопровода 25% длины исследуемого сегмента: а) уровень зашумления 0%; б) уровень зашумления 10 %; в) уровень зашумления 20% (составлено автором [74])

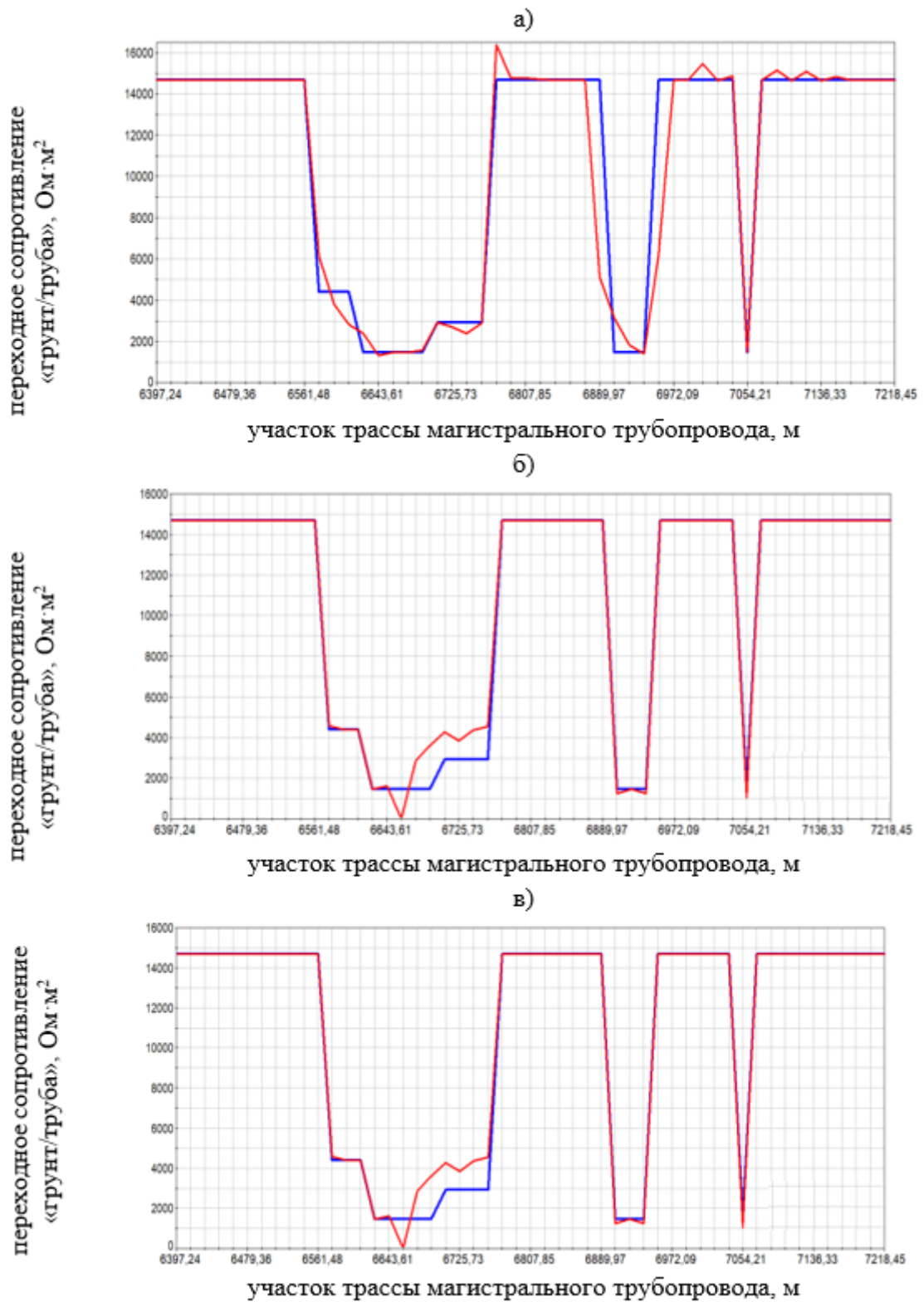


Рисунок В.5 – Функции переходного сопротивления «грунт/труба» над осью магистрального трубопровода 50% длины исследуемого сегмента: а) уровень зашумления 0%; б) уровень зашумления 10 %; в) уровень зашумления 20% (составлено автором [74])

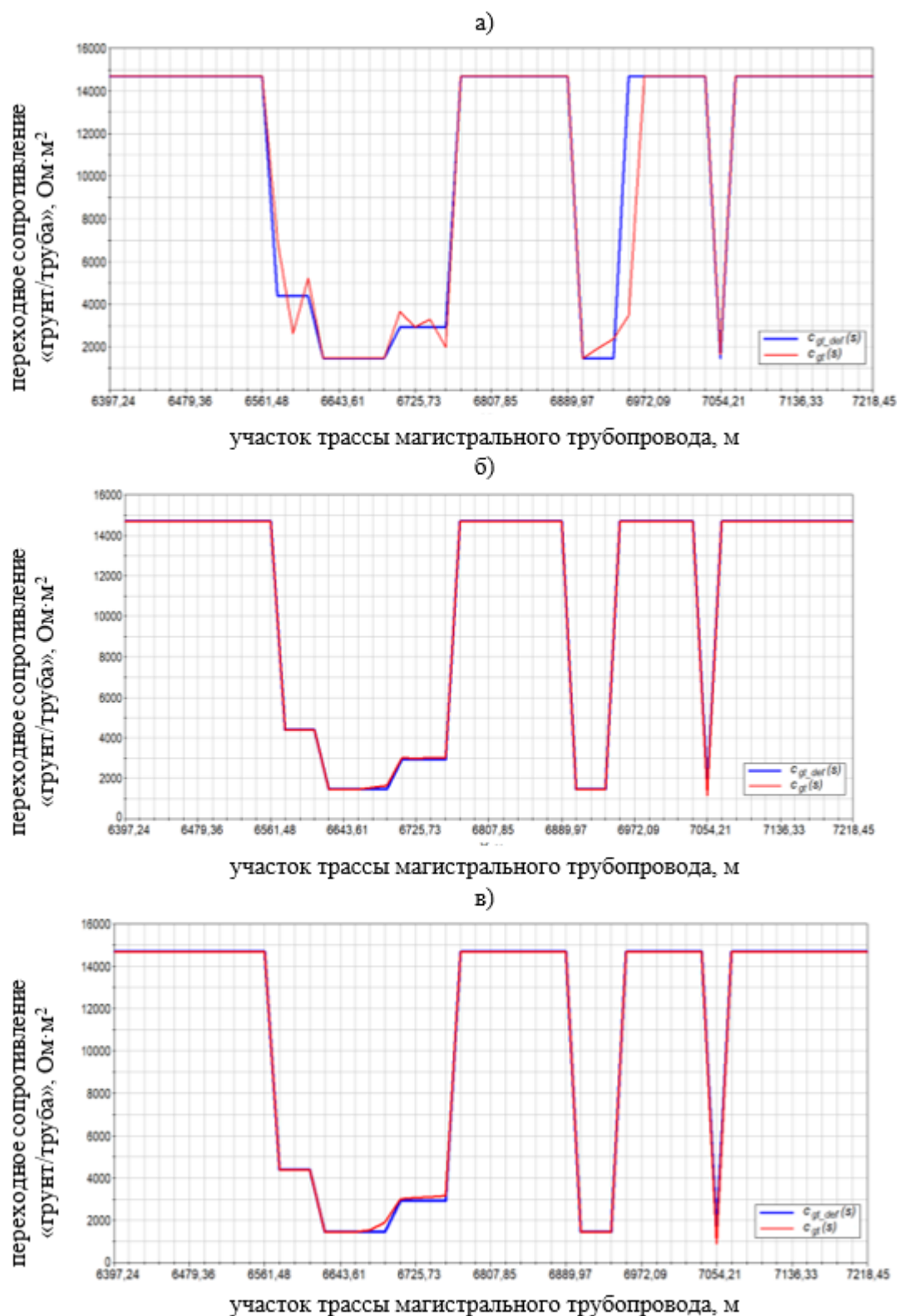


Рисунок В.6 – Функции переходного сопротивления «грунт/труба» над осью магистрального трубопровода 100% длины исследуемого сегмента: а) уровень зашумления 0%; б) уровень зашумления 10 %; в) уровень зашумления 20% (составлено автором [74])

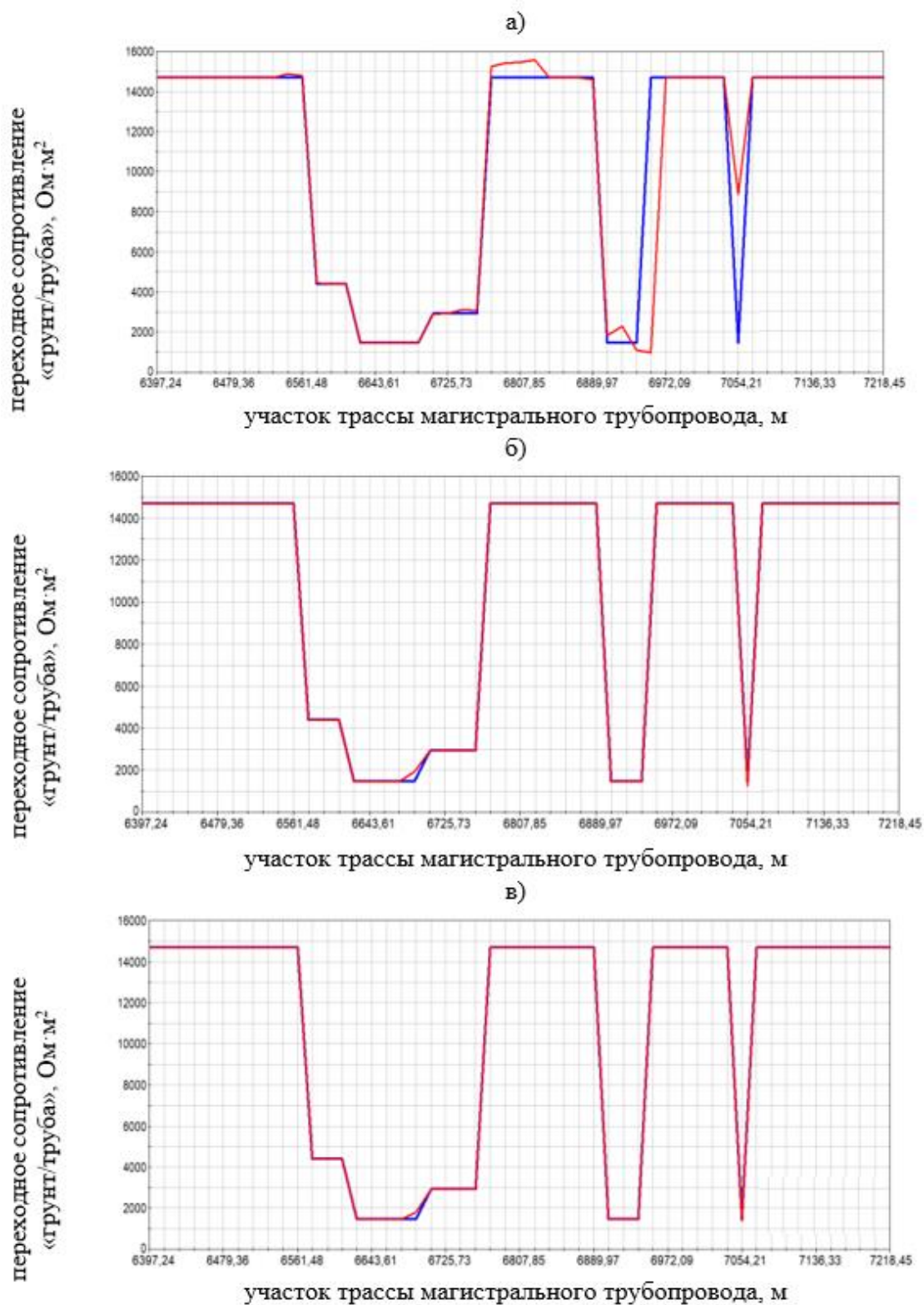


Рисунок В.7 – Функции переходного сопротивления «грунт/труба» над осью магистрального трубопровода 200% длины исследуемого сегмента: а) уровень зашумления 0%; б) уровень зашумления 10 %; в) уровень зашумления 20% (составлено автором [74])

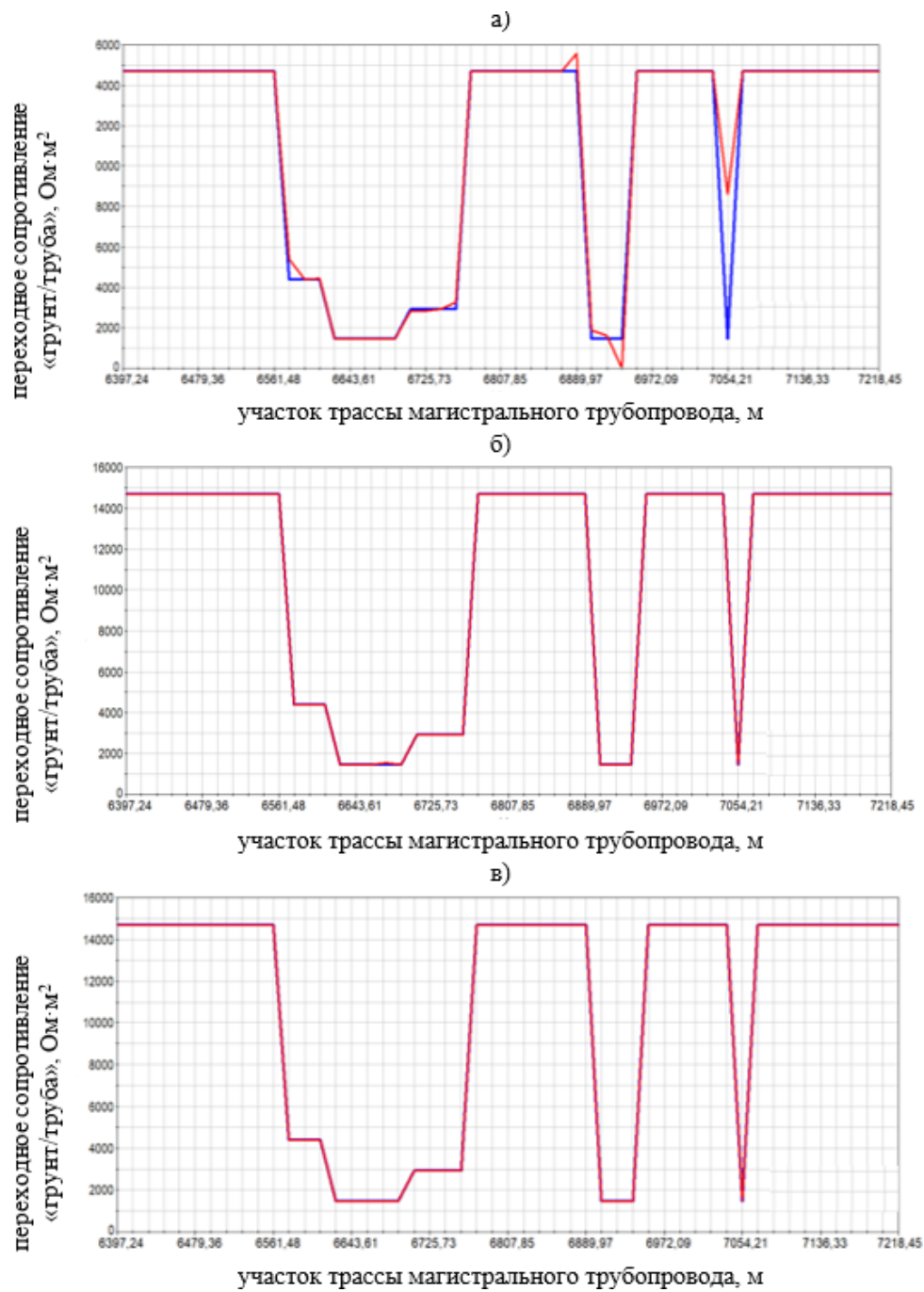


Рисунок В.8 – Функции переходного сопротивления «грунт/труба» над осью магистрального трубопровода 300% длины исследуемого сегмента: а) уровень зашумления 0%; б) уровень зашумления 10 %; в) уровень зашумления 20% (составлено автором [74])

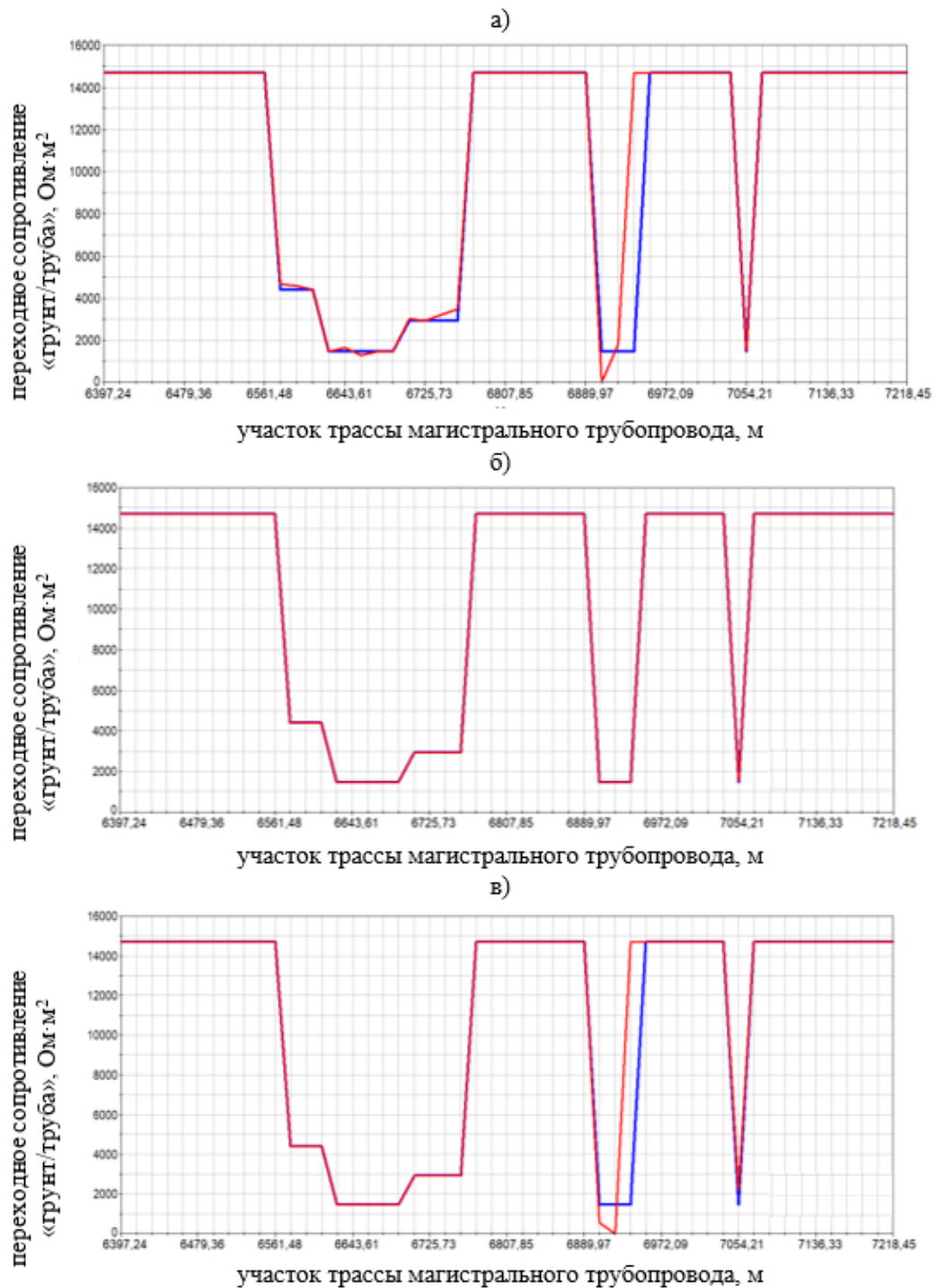


Рисунок В.9 – Функции переходного сопротивления «грунт/труба» над осью магистрального трубопровода 400% длины исследуемого сегмента: а) уровень зашумления 0%; б) уровень зашумления 10 %; в) уровень зашумления 20% (составлено автором [74])