

На правах рукописи



Александров О.Ю.

АЛЕКСАНДРОВ ОЛЕГ ЮРЬЕВИЧ

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ
И МЕТОДИК ЭКСПЛУАТАЦИИ МАГИСТРАЛЬНЫХ
ГАЗОНЕФТЕПРОВОДОВ, ПОДВЕРЖЕННЫХ
ВЛИЯНИЮ ТЕЛЛУРИЧЕСКИХ БЛУЖДАЮЩИХ ТОКОВ

Специальность 25.00.19 – Строительство и эксплуатация
нефтегазопроводов, баз и хранилищ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ухта – 2018

Диссертация выполнена в
Ухтинском государственном техническом университете на кафедре
«Проектирование и эксплуатация магистральных газонефтепроводов»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
заместитель генерального директора
по науке АО «Гипрогазцентр»
Агиней Руслан Викторович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор, про-
фессор кафедры Уфимского государственного
нефтяного технического университета
Мустафин Фаниль Мухаметович
кандидат технических наук
начальник отдела Департамента
ПАО «Газпром»
Юшманов Валерий Николаевич

Ведущая организация: Российский государственный университет
нефти и газа (национальный исследователь-
ский университет) имени И.М. Губкина

Защита состоится 13 декабря 2018 г. в 10⁰⁰ часов на заседании диссертаци-
онного совета Д 212.291.02 в Ухтинском государственном техническом уни-
верситете по адресу: 169300, г. Ухта, Республика Коми, ул. Первомайская, 13.

С авторефератом и диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный технический университет», а также
на сайте вуза по адресу www.ugtu.net в разделе «Наука→Диссертации».

Автореферат разослан «10» ноября 2018 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета, кандидат
технических наук



Д.А. Борейко

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Россия обладает значительной и постоянно развивающейся разветвленной сетью магистральных трубопроводов, включая газо-, нефте-, продуктопроводы общей протяженностью порядка 250 тыс. км. Такие трубопроводы прокладываются преимущественно подземно и транспортируют подготовленный продукт. Полувековая практика эксплуатации магистральных трубопроводов как в РФ, так и за рубежом, свидетельствует о том, что основным типом дефектов, а также основной причиной разрушения магистральных трубопроводов является почвенная коррозия, разрушающая наружную поверхность стенок труб.

Почвенная коррозия имеет электрохимическую природу и связана с образованием гальванопар, обуславливающих движение электрического тока, от плотности которого пропорционально зависят коррозионные потери.

Блуждающие токи (далее – БТ), протекающие по грунту, могут обладать существенной силой и приводить к ускоренной коррозии труб, поэтому учет наличия и опасности блуждающих токов в обязательном порядке выполняется и при проектировании и последующей эксплуатации магистральных нефтегазопроводов. Так, по данным В.А. Попова (ООО «Газпром трансгаз Екатеринбург») на газопроводе «Свердловск - Нижний Тагил», работающем в зоне блуждающих токов от железных дорог только за первые 25 лет эксплуатации было ликвидировано 26 свищей и 3 разрыва. Таким образом, совершенствование проектных решений и методик эксплуатации трубопроводов, работающих в зонах воздействия блуждающих токов, является актуальной задачей.

Степень разработанности. Основным источником блуждающих токов является электрифицированный ж.д. транспорт, поэтому методы коррозионных изысканий при проектировании нефтегазопроводов, планируемые при проектировании превентивные мероприятия, методы оценки опасности, разработаны только для таких источников блуждающих токов.

Однако в последние годы отмечается влияние на нефтегазопроводы т.н. «неклассических» источников блуждающих токов, например, связанных с индукционным влиянием воздушных линий электропередач (ЛЭП) или влиянием теллурических токов. Существенный вклад в развитие методов проектирования и эксплуатации подземных нефтегазопроводов, подверженных влиянию высоковольтных ЛЭП внесли Е.И. Крапивский, П.А. Яблучанский, D. Markovic, V. Tribollet, M. Meyer и др.

Теллурические токи могут возникнуть в трубопроводе при изменении геомагнитного поля. Наличие таких источников зафиксировано в России (нефтепровод «Восточная Сибирь – Тихий океан», газопроводы «Пунга – Вуктыл», «Ямал-Европа», «Бованенково-Ухта»), а также за рубежом – в Канаде, США, Германии, Финляндии, Чехии и др. Изучению влияния геомагнитных токов на подземные трубопроводы посвящены работы Григорьева Ю.М., Ефремова Е.Н., Козлова В.И., Тарабукина Л.Д., Корсакова А.А., Авакяна С. В., Воронина Н. А., Кузнецова В.А., Муллаярова В.А., Каримова Р.Р., Адаменко С.В., Александрова Ю.В., Зубкова А.А., Иволина А.А., Фуркина А.В., Гуревича В.И., Hejda P., Pulkkinen A., Trichtchenko L. Rajunpaa K., Pirjola R., Viljanen A. и др.

Для трубопроводов, подверженных геомагнитно-индуцированным токам, даны некоторые рекомендации в ISO/CD 21857:2018 «Petroleum, petrochemical

and natural gas industries. Prevention of corrosion on pipeline systems influenced by stray currents», однако не разработаны методы прогнозирования их проявления при коррозионных изысканиях, мероприятия, закладываемые на стадии проектирования, методы идентификации геомагнитных источников, методы локализации и оценки опасности на стадии эксплуатации нефтегазопроводов.

Цель работы – Обеспечение противокоррозионной защиты магистральных нефтегазопроводов от геомагнитных источников блуждающих токов, путем совершенствования проектных решений и методов эксплуатации газонефтепроводов.

Задачи исследования:

1. выполнить математическое моделирование процессов образования геомагнитно-индуцированного тока (далее – ГИТ) в подземном протяженном трубопроводе;

2. разработать программное обеспечение по моделированию процессов геомагнитно-индуцированного тока в подземном протяженном трубопроводе;

3. провести экспериментальные исследования вида и параметров работы источника блуждающего тока, воздействующего на современные системы магистральных газопроводов «Бованенково-Ухта» и «Ухта-Торжок»;

4. разработать новые и усовершенствовать имеющиеся подходы в области проектирования и эксплуатации газонефтепроводов, подверженных действию геомагнитных источников БТ.

Соответствие паспорта специальности. Представленная диссертационная работа соответствует паспорту специальности 25.00.19 – «Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ», а именно области исследования: 2 «Разработка и оптимизация методов проектирования, сооружения и эксплуатации сухопутных и морских нефтегазопроводов, нефтебаз и газонефтехранилищ с целью усовершенствования технологических процессов с учетом требований промышленной экологии» и 6 «Разработка и усовершенствование методов эксплуатации и технической диагностики оборудования насосных и компрессорных станций, линейной части трубопроводов и методов защиты от коррозии».

Научная новизна:

1) Предложены математические выражения, позволяющие проводить расчет силы тока и разности потенциалов между трубопроводом и грунтом при зависящих от линейной координаты параметрах (продольное сопротивление трубопровода, проводимость изоляционного покрытия, напряженность внешнего электрического поля).

2) Установлены критерии определения границ участка трубопровода, подверженного геомагнитному влиянию, а также уточнены критерии идентификации источника блуждающего тока на исследуемом участке трубопровода при его эксплуатации.

3) Разработан алгоритм прогнозирования проявления геомагнитных токов на проектируемом участке трубопровода и выбора превентивных мероприятий для обеспечения эффективной защиты от коррозии.

4) Предложен алгоритм оценки опасности геомагнитного источника блуждающего тока на действующие магистральные газонефтепроводы, позво-

ляющий определить потенциальную скорость коррозии от действия геомагнитных токов на основании результатов трассовых электроизмерений.

Положения, выносимые на защиту.

1. Реализация разработанного алгоритма прогнозирования проявления геомагнитного источника тока на магистральных газонефтепроводах позволяет на стадии проектирования и выбора решений по обеспечению защиты участка трубопровода от коррозии, оценить вероятность появления геомагнитных токов в трубопроводе и снизить опасность действия блуждающих токов до приемлемого уровня.

2. Применение разработанной методики проведения электрометрических измерений, действующих нефтегазопроводов, позволяет локализовать участок влияния ГИТ, идентифицировать его природу, оценить коррозионную опасность ГИТ, выбрать мероприятия, противодействующие негативному влиянию источника.

Методология и методы исследования. Поставленные задачи решены с использованием методов математического моделирования, а также экспериментальных исследований на действующем объекте – магистральном газопроводе. При этом, при проведении экспериментов использовались такие методы как: измерения, идеализация, абстрагирование и обобщение. При проведении электрометрических измерений применены инновационные методы определения силы квазипостоянного тока, протекающего по трубопроводу, а также статистические методы обработки экспериментальных данных.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов подтверждается сходимостью результатов математического моделирования с данными электроизмерений, полученными на участке действующего газопровода, а также результатами внедрения разработанных решений по локализации участков трубопровода, предрасположенных к воздействию геомагнитных источников блуждающих токов и оценке их опасности на системе магистральных газопроводов «Бованенково-Ухта». Полученные в работе результаты удовлетворительно согласуются с выводами, полученными другими исследователями.

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на Межрегиональных вебинарах «Актуальные проблемы нефтегазотранспортной отрасли», УГТУ (г. Ухта – г. Н. Новгород, 2015-2018 гг.); Международных семинарах «Рассохинские чтения», УГТУ (г. Ухта, 2015 г., 2017 г., 2018 г.); Международной конференции «Трубопроводный транспорт. Теория и практика - 2016», АО «ВНИИСТ» (г. Москва, 3-5 февраля 2016 г.); Международной научно-практической конференции обучающихся, аспирантов и ученых «Опыт, актуальные проблемы и перспективы развития нефтегазового комплекса» (г. Нижневартовск, 20 апреля 2017 г.); Международной конференции «Трубопроводный транспорт: теория и практика – 2017», АО «ВНИИСТ» (г. Москва, 7-8 февраля, 2017 г.), на XII Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России» РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина (г. Москва, 12-14 февраля 2018 г.).

Теоретическая и практическая значимость исследования определяется тем, что:

- доказано, что при воздействии квазипеременного геомагнитного поля на участок трубопровода с изоляционным покрытием, имеющим не бесконечно высокое переходное сопротивление, возникает электрический ток, максимальная сила которого обнаруживается в середине указанного участка, максимальные по модулю потенциалы – на его границах;

- получены уравнения, позволяющие рассчитать силу тока в трубопроводе и разность потенциалов «труба-земля» при заданных электрических и геометрических характеристиках трубопровода с покрытием;

- изучено влияние протяженности участка трубопровода, его диаметра, электрической проводимости металла труб, переходного электрического сопротивления изоляции труб, величины электрического поля, создаваемой геомагнитным полем на характеристики возникающего блуждающего тока;

- введен новый термин «электрически неопределенный» участок трубопровода, протяженность L которого находится в интервале $1/\gamma < L \leq 4/\gamma$ (γ – постоянная распространения тока);

- проведена модернизация критериев, идентифицирующих природу источника блуждающего тока, воздействующего на участки магистральных трубопроводов;

- разработан способ и устройство для защиты от источников геомагнитных блуждающих токов (патент РФ на изобретение 2642141, опубл. 24.01.2018 г.);

- определены необходимые диагностические методы исследования участка трубопровода, подверженного воздействию ГИТ для оценки коррозионной опасности;

- создано программное обеспечение, предназначенное для исследования закономерностей образования геомагнитно-индуцированного тока, а также для оценки величины силы тока и разности потенциалов между трубопроводом и грунтом при разных значениях электрических и геометрических параметров;

- разработан алгоритм, позволяющий на стадии проектирования спрогнозировать появление блуждающих токов геомагнитной природы и обосновать выбор превентивных проектных решений, минимизирующих риск развития коррозии, вызванной источником ГИТ.

- результаты работы внедрены при разработке проектной и рабочей документации на капитальный ремонт магистрального газопровода Ухта-Торжок-3.

Сведения о публикациях автора: по теме диссертации опубликовано 9 печатных работ, из них 5 - в ведущих рецензируемых изданиях, включенных в перечень ВАК РФ, одно учебное пособие, получены 2 патента РФ на изобретения «Способ защиты участков трубопроводов от геомагнитно-индуцированных блуждающих токов и устройство для его осуществления», «Способ определения технического состояния изоляционного покрытия подземного трубопровода», получено положительное решение по заявке на изобретение РФ «Способ локализации участка трубопровода, подверженного влиянию блуждающих токов».

Структура и объем работы: состоит из введения, четырех глав, заключения, содержит 160 страниц текста, 74 рисунка, 15 таблиц, список литературы из 142 наименований и одного приложения.

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач исследования, изучении отечественных и зарубежных достижений в области защиты трубопроводов от блуждающих токов, проведении теоретических и экспериментальных исследований, анализе полученных результатов, их апробации, подготовке публикаций по выполненной работе, оформлении патентных заявок, разработке методик по эксплуатации и проектирования трубопроводов, подверженных ГИТ.

Содержание работы

Во введении охарактеризовано состояние вопроса в мировой практике по выбранной теме исследований, освещены проблемы противокоррозионной защиты подземных трубопроводов от действия блуждающих токов, обозначены направление и актуальность исследований.

В первой главе «Анализ отечественных и зарубежных методов проектирования, строительства и эксплуатации трубопроводов, работающих в условиях действия блуждающих токов» показано, что противодействие блуждающим токам на стадии проектирования, строительства и эксплуатации подземных трубопроводов является важной научно-практической задачей, т.к. ее решение позволяет обеспечить их безаварийную эксплуатацию в течение расчетного срока службы.

Наиболее изученными источниками блуждающих токов являются источники, связанные с натеканием тока по грунту, например, от электрифицированных железных дорог. Нетипичными источниками являются источники, частью которых является сама труба: индуцированные источники тока от переменных магнитных полей линий электропередач и квазипостоянных геомагнитных полей во время магнитных бурь. Количество участков трубопроводов с индукционным влиянием увеличивается в связи с повышением качества строительства и интегрального переходного сопротивления изоляционного покрытия.

Моделированием геомагнитных токов, занимались ряд иностранных исследователей, однако не решена задача прогнозирования ГИТ на стадии проекта. Кроме этого, актуальным видится создание программных комплексов, позволяющих выполнять расчеты в автоматизированном режиме для быстрых вычислений при проектировании и эксплуатации трубопроводов.

С целью определения опасности источника и применения превентивных мероприятий по защите трубопровода, важным аспектом является идентификация типа источника блуждающего тока (рис. 1). В работах А.В. Фуркина предложена методика идентификации, перечень сформулированных критериев является верным, но далеко не полным. А значит, при помощи этих критериев невозможно достоверно определить источник, как геомагнитный и невозможно корректно определить его опасность и назначить эффективный комплекс превентивных мероприятий.

Анализ существующих методик, применяемых на стадиях проектирования, эксплуатации подземных магистральных нефтегазопроводов, включая технологии защиты от негативного действия блуждающих токов, показал, что такие методы не подходят для работы с «неклассическими» источниками, например, геомагнитными. Это приводит к тому, что действие таких источников обнаруживается уже «постфактум» на построенных объектах, например, на системе МГ «Бованенково-Ухта», как описано в работах Ивонина А.А.



Рисунок 1 – Последовательность реализации мероприятий по противодействию блуждающим токам на подземных нефтегазопроводах

Во второй главе «**Математическое моделирование процессов образования геомагнитно-индуцированного тока в подземном протяженном трубопроводе**», показано, что возникновение геомагнитно-индуцированного тока в трубопроводе объясняется следующей последовательностью явлений: 1. образование ионосферных токов (переменных токов в ионосфере Земли на высотах от 50 км); 2. образование переменного магнитного поля (геомагнитных вариаций), связанного с ионосферными токами в соответствии с Законом Био-Савара-Лапласа; 3. образование переменного электрического поля, связанного с переменным магнитным полем в соответствии с Законом Фарадея; 4. образование переменного ГИТ в грунте и протяженных металлических коммуникациях под действием переменного электрического поля.

Процесс возникновения геомагнитно-индуцированного тока схематично изображен на рисунке 2.

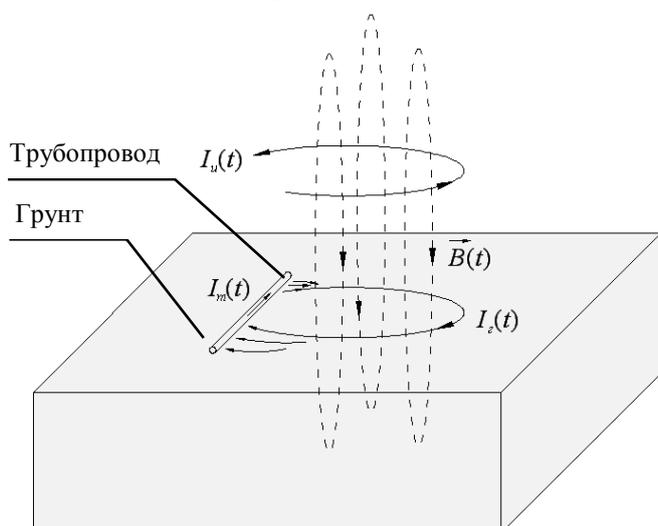


Рисунок 2 – Механизм образования геомагнитно-индуцированного тока. Обозначения: $I_u(t)$ – ионосферный ток, $I_s(t)$ – геомагнитно-индуцированный ток в грунте, $I_m(t)$ – геомагнитно-индуцированный ток в трубопроводе, $B(t)$ – вектор магнитной индукции

Непосредственное проведение количественной оценки связи магнитного и электрического полей в определенной области на поверхности Земли затрудняется тем, что на практике не известны характеристики (размеры, положение, сила тока) системы ионосферных токов, а также не определен контур, по которому протекает ток в грунте. Поэтому для установления количественной связи между напряженностью электрического поля и индукцией магнитного поля используются различные приближения, например, метод «плоских волн».

Если величины B_{x0} , B_{y0} , E_{x0} , E_{y0} представляют собой компоненты индукции магнитного поля и напряженности электрического поля на поверхности Земли (при $z = 0$), то поверхностный импеданс Земли или магнитотеллурический импеданс Z , численно равен:

$$Z = -\frac{E_{y0}}{B_{x0}} = \frac{E_{x0}}{B_{y0}} = \frac{\omega}{k}. \quad (1)$$

где ω – круговая (циклическая) частота колебаний;
 k – параметр, определяемый из выражения:

$$k = \sqrt{\mu\mu_0(\omega^2\varepsilon\varepsilon_0 - i\omega\sigma)}. \quad (2)$$

где μ – магнитная проницаемость среды, μ_0 – магнитная постоянная, ε – диэлектрическая проницаемость среды, ε_0 – электрическая постоянная, σ – проводимость среды. При частотах, характерных для геомагнитных вариаций, выполняется условие квазистационарности $\sigma \gg \varepsilon\varepsilon_0\omega$, таким образом, уравнение (2) может быть записано в следующем виде:

$$k = \sqrt{-i\omega\sigma\mu\mu_0} = \sqrt{\omega\sigma\mu\mu_0} e^{-i\frac{\pi}{4}} = (1-i)\sqrt{\frac{\omega\sigma\mu\mu_0}{2}}. \quad (3)$$

Соответственно, уравнение для величины Z примет следующий вид:

$$Z = \sqrt{\frac{i\omega}{\mu\mu_0\sigma}}. \quad (4)$$

В работе проведена оценка амплитуды изменения напряженности электрического поля на поверхности грунта с использованием следующих характерных значений параметров: $\mu = 1$, $\sigma = 10^{-3} \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$, $\omega = 10^{-3} \text{ Гц}$. Если типичные значения амплитуды вариаций величины B_x лежат в диапазоне от 10^{-2} до 10^{-1} мкТл, то значения амплитуды вариации величины E_y лежат в диапазоне от 10^{-5} до 10^{-4} В/м.

Если допустить, что z – продольное сопротивление металла труб, Y – проводимость изоляционного покрытия, E – напряженность поля, которые не зависят от координаты участка трубопровода x , т.е. $Z(x) = Z$; $Y(x) = Y$; $E(x) = E$, то по результатам моделирования может быть получено следующее уравнение, описывающее распределение силы тока вдоль трубопровода:

$$\frac{d^2 I(x)}{dx^2} - YZI(x) + YE = 0. \quad (5)$$

Распределение разности потенциалов между трубопроводом и грунтом вдоль трубопровода связано с распределением силы тока следующим известным соотношением:

$$U(x) = -\frac{1}{Y} \frac{dI(x)}{dx}. \quad (6)$$

Уравнение (5) представляет собой линейное неоднородное дифференциальное уравнение второго порядка с постоянными коэффициентами. Общее решение такого уравнения записывается в виде:

$$I(x) = C_1 e^{\sqrt{YZ}x} - C_2 e^{-\sqrt{YZ}x} + \frac{E}{Z}, \quad (7)$$

где C_1 и C_2 - постоянные, значения которых определяются из граничных условий.

Если длина рассматриваемого участка трубопровода L , а сила тока на концах участка равна нулю ($I(x=0)=0, I(x=L)=0.$), то с учетом (7), можно записать следующие уравнения:

$$C_1 = \frac{E}{Z} \frac{e^{-\sqrt{YZ}L} - 1}{e^{\sqrt{YZ}L} - e^{-\sqrt{YZ}L}}; C_2 = \frac{E}{Z} \frac{1 - e^{\sqrt{YZ}L}}{e^{\sqrt{YZ}L} - e^{-\sqrt{YZ}L}}. \quad (8)$$

Распределение разности потенциалов между трубопроводом и грунтом вдоль трубопровода при известной функции $I(x)$ (7) определяется в соответствии с уравнением (6):

$$U(x) = -\sqrt{\frac{Z}{Y}} (C_1 e^{\sqrt{YZ}x} - C_2 e^{-\sqrt{YZ}x}) \quad (9)$$

На основании полученных выражений, разработано программное обеспечение (далее – ПО) (рис. 3) для моделирования процесса образования геомагнитно-индуцированного тока в подземном трубопроводе, позволяющее проводить расчет силы тока и разности потенциалов между трубопроводом и грунтом как при не зависящих от линейной координаты параметрах, когда указанные величины могут быть рассчитаны аналитически, так и в общем случае (при зависящих от линейной координаты параметрах), когда для расчета необходимо использовать численные методы.

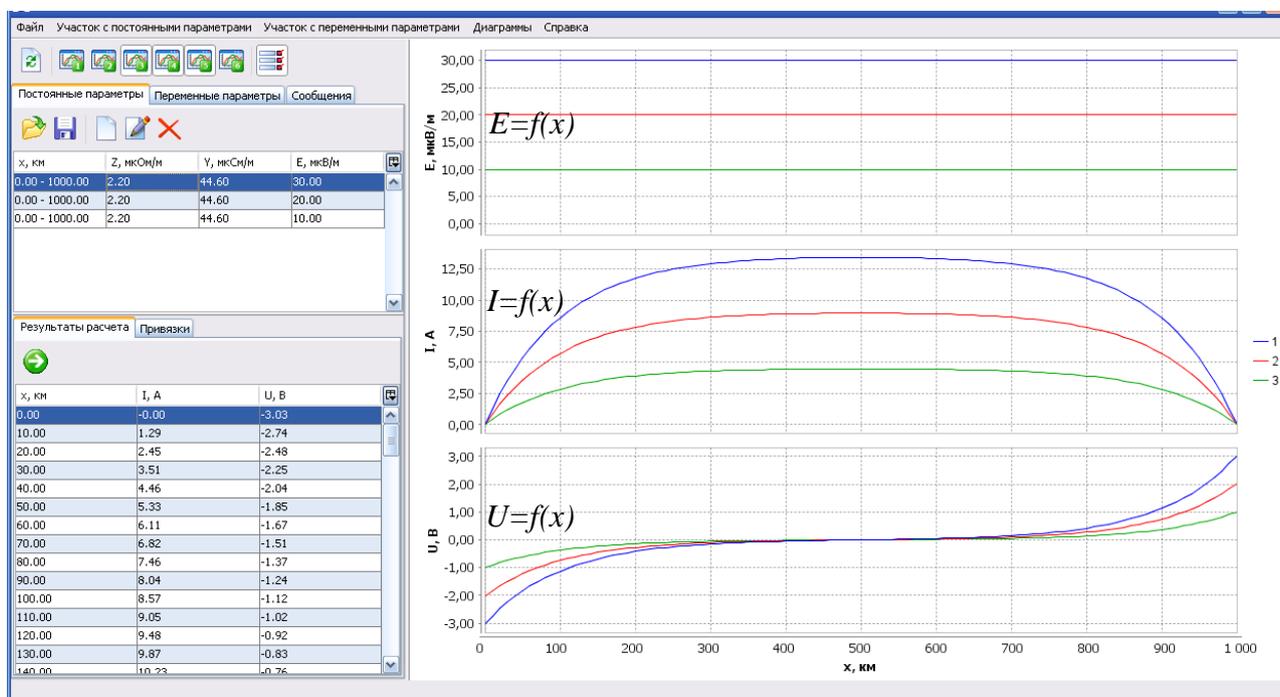


Рисунок 3 – Главное окно ПО для моделирования процесса образования ГИТ в подземном трубопроводе с представленными зависимостями $I(x)$ и $U(x)$ при трех разных значениях E : 10; 20 и 30 мкВ/м

При постоянных параметрах на участке трубопровода длиной L , электри-

чески отсоединенном от других участков, сила тока I максимальна по абсолютной величине в центре участка (при $x = L/2$) и равна нулю на границах участка (при $x = 0$ и $x = L$). Значения I в точках, находящихся на одинаковом расстоянии от границ участка, равны: $I(x) = I(L - x)$. Разность потенциалов между трубопроводом и грунтом U максимальна по абсолютной величине на границах участка (при $x = 0$ и $x = L$) и равна нулю в центре участка (при $x = L/2$).

В диссертации сделаны оценки амплитуды вариаций силы геомагнитно-индуцированного тока и связанной с этим током разности потенциалов между трубопроводом и грунтом. Например, при наружном диаметре трубопровода 1420 мм, толщине стенки 16 мм, сопротивлении изоляции $1 \cdot 10^5 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$, длине рассматриваемого участка трубопровода 1000 км и диапазоне изменения напряженности внешнего электрического поля $\pm 20 \text{ мкВ/м}$ сила тока в центре участка изменяется в диапазоне $\pm 9,0 \text{ А}$, разность потенциалов между трубопроводом и грунтом на границах участка изменяется в диапазоне $\pm 2,0 \text{ В}$.

Получены зависимости силы тока в трубопроводе в середине участка $I_{x=L/2}$ и разности потенциалов между трубопроводом и грунтом в начале участка $U_{x=0}$ от продольного сопротивления трубопровода Z , проводимости изоляционного покрытия Y , напряженности внешнего электрического поля E , длины участка трубопровода L . При увеличении Z абсолютные значения $I_{x=L/2}$ и $U_{x=0}$ уменьшаются. При увеличении Y абсолютное значение $I_{x=L/2}$ увеличивается и выходит на насыщение, абсолютная величина $U_{x=0}$ уменьшается. Зависимости $I_{x=L/2}(E)$ и $U_{x=0}(E)$ – прямо пропорциональные.

Расчеты показали, что негативному влиянию ГИТ на разность потенциалов «труба-земля», в наибольшей степени подвержены протяженные участки трубопроводов большого диаметра, причем при повышении качества изоляционного покрытия амплитуда колебаний разности потенциалов на границах изолированного участка и протяженность области изменения разности потенциалов возрастают. Например, если рассматривается участок трубопровода длиной 1000 км с наружным диаметром 1420 мм и толщиной стенки 16 мм, находящийся во внешнем электрическом поле напряженностью 20 мкВ/м, то при повышении сопротивления изоляции с $5 \cdot 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$ до $3 \cdot 10^5 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$ абсолютная величина разности потенциалов между трубопроводом и грунтом на границах участка повышается от 1,4 В до 3,5 В.

Разработанное ПО может быть применено при определении мест установки электроизолирующих вставок, точек подключения и характеристик протекторов, определения значений силы тока и разности потенциалов в заданных точках на основании результатов экспериментальных измерений в нескольких опорных точках. По результатам теоретических исследований усовершенствованы критерии идентификации геомагнитно-индуцированного тока в подземном трубопроводе, а также разработаны способ определения сопротивления изоляционного покрытия трубопроводов по результатам измерений вариаций геомагнитно-индуцированного тока и связанной с этим током разности потенциалов между трубопроводом и грунтом (патент РФ № 2641794 RU).

В третьей главе «Экспериментальные исследования вида и параметров работы источника блуждающего тока, воздействующего на систему магистральных газопроводов «Бованенково-Ухта» и «Ухта-Торжок» выполнены исследования, целью которых являлась разработка критериев иденти-

фикации источника тока, воздействующего на магистральные газонефтепроводы. Применяемые методы исследования основаны на синхронном измерении силы тока в трубопроводе и потенциала «труба-земля» в различных точках участка трубопровода, подверженного воздействию ГИТ. Далее выполнялись: анализ корреляционной связи между изменением силы тока, протекающего в трубопроводе и суммарным потенциалом «труба-земля»; определение скорости изменения потенциала «труба-земля» во времени (dU/dt) и анализ корреляционной связи между dU/dt и величиной экстремумов функции $U=f(t)$; установление корреляционной связи между суммарным потенциалом «труба-земля» и потенциалами в грунте, измеренными методом «креста» при выключенных станциях катодной защиты; спектральный анализ функции $U=f(t)$.

В качестве объекта исследования выбран участок магистрального газопровода «Бованенково-Ухта» и «Ухта-Торжок», протяжённостью 202 км, имеющий высокое переходное сопротивление покрытие. Для измерений применялись поверенные и сертифицированные приборы: самопишущий вольтметр с функцией определения поляризационного потенциала ИПП-1 «Менделеевец», бесконтактный измеритель квазипостоянного тока в трубопроводе «БИТА-2». На участке трубопровода были намечены четыре точки контроля (рис. 4).

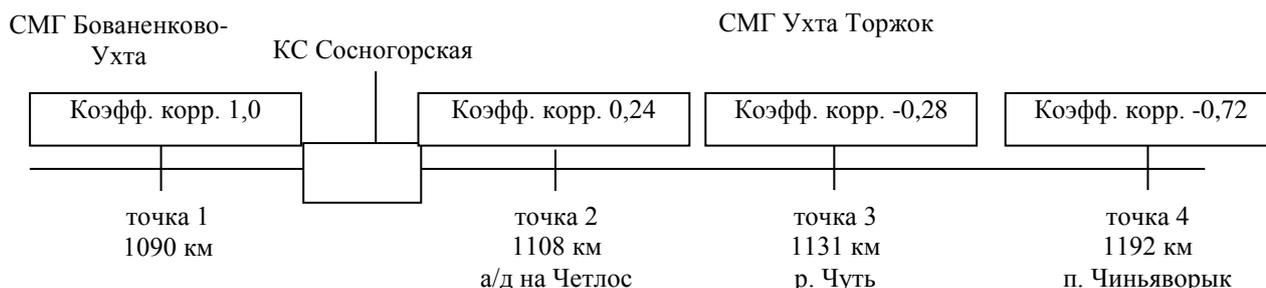


Рисунок 4 - Схема расположения точек измерения на объекте исследования (значения коэффициентов корреляции приведены для первой точки в сравнении с последующими)

Результаты расчета коэффициента линейной корреляции между массивами данных для рядов «разность потенциалов» - «разность потенциалов» и «сила тока – сила тока» приведены в таблице 1.

Таблица 1. Значения коэффициентов линейной корреляции между значениями «разность потенциалов» - «разность потенциалов» («сила тока – сила тока»), при синхронных измерениях во время магнитных бурь

Точка контроля	Точка контроля			
	1	2	3	4
1	1,0 (1,0)	0,24 (0,48)	-0,28 (0,59)	-0,72 (0,21)
2	0,24 (0,54)	1,0 (1,0)	-0,39 (0,85)	-0,56 (0,62)
3	-0,28 (0,34)	-0,39 (0,85)	1,0 (1,0)	0,62 (0,55)
4	-0,72 (0,21)	-0,45 (0,62)	0,60 (0,55)	1,0 (1,0)

Полученные экспериментальные данные хорошо согласуются с результатами теоретического моделирования. Также была выдвинута гипотеза: если источник блуждающего тока связан геомагнитными вариациями, то, в соответствии с Законом М. Фарадея, разность потенциалов «труба-земля» должна зависеть от скорости изменения магнитного потока и должна наблюдаться корреляция

ляционная связь, между параметрами «скорость изменения разности потенциалов (или силы тока)» - «величина изменения разности потенциалов (или силы тока)»

Для оценки взаимосвязи между величиной изменения силы тока (потенциала «труба-земля») и скоростью этого изменения, результаты измерений анализировались следующим образом. На основании имеющейся зависимости силы тока от времени $I(t)$ (рис. 5 а) рассчитывались значения производных силы тока по времени dI/dt (рис. 5 б). В диссертационной работе определялись точки экстремумов функции $I(t)$ – значения времени t_k ($k = 1, 2, \dots, n$, n – количество экстремумов), в которых производная dI/dt равна нулю.

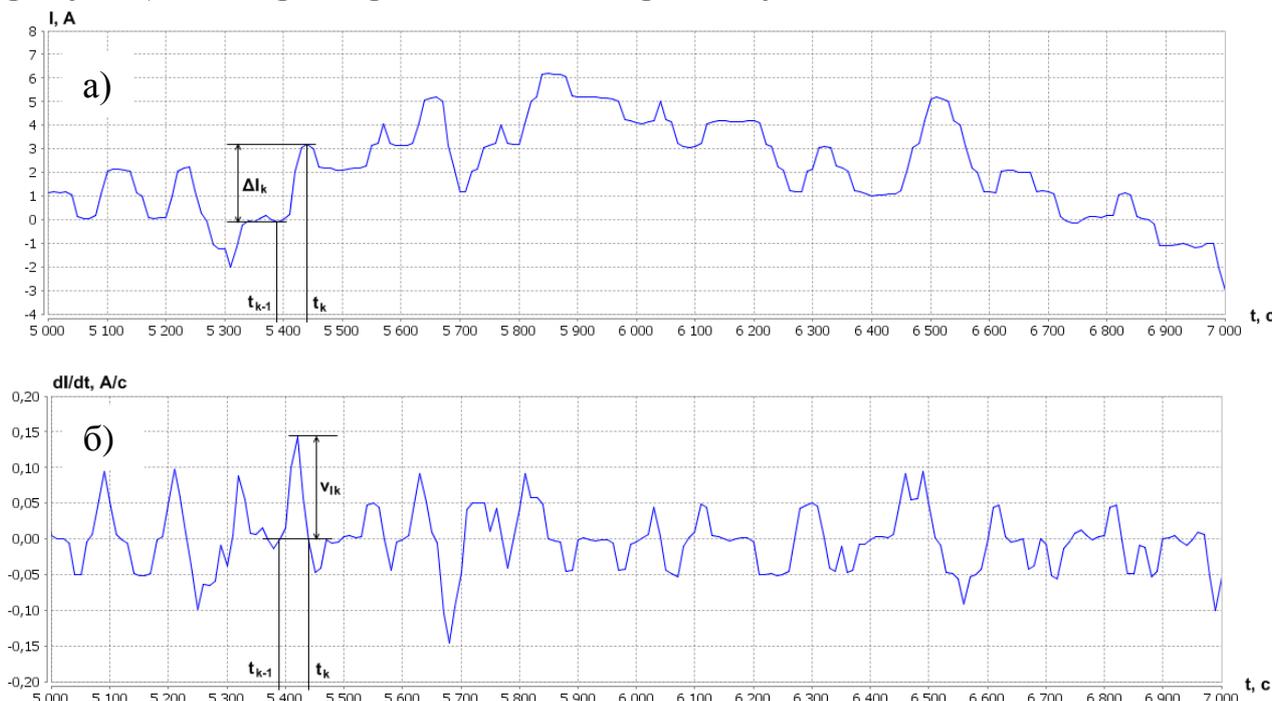


Рисунок 5 – К задаче определения взаимосвязи между величиной изменения силы тока и скоростью этого изменения. Фрагмент графика зависимости $I(t)$ (а) и соответствующий фрагмент зависимости $dI/dt(t)$ (б)

Вычислялись значения силы тока в точках экстремумов $I_k = I(t_k)$. Для каждого экстремума, начиная со второго, рассчитывалась величина $\Delta I_k = I_k - I_{k-1}$ (величина изменения силы тока). Определялись величины v_{Ik} – максимальные (по абсолютной величине) значения производной dI/dt на интервалах от t_{k-1} до t_k ($k = 2, 3, \dots, n$). Если $\Delta I_k > 0$, то $v_{Ik} > 0$, а если $\Delta I_k < 0$, то $v_{Ik} < 0$. После этого рассчитывались коэффициенты корреляции значений v_I и ΔI , строились зависимости $v_I(\Delta I)$, эти зависимости аппроксимировались прямо пропорциональными функциями, рассчитывались параметры указанных прямо пропорциональных функций (коэффициенты наклона). Аналогичные расчеты выполнялись для зависимостей потенциала «труба-земля» от времени $U(t)$.

Графики зависимостей $v_I(\Delta I)$ и $v_U(\Delta U)$, а также аппроксимирующие прямо пропорциональные функции и их параметры представлены на рисунке 6.

Зависимости $v_I(\Delta I)$ для всех четырех точек измерения могут быть аппроксимированы функциями вида $v_I = a\Delta I$, где коэффициент a принимает значения от 0,031 до 0,042 Гц. Зависимости $v_U(\Delta U)$ для всех четырех точек измерения могут быть аппроксимированы функциями вида $v_U = b\Delta U$, где коэффициент b

принимает значения от 0,029 до 0,036 Гц.

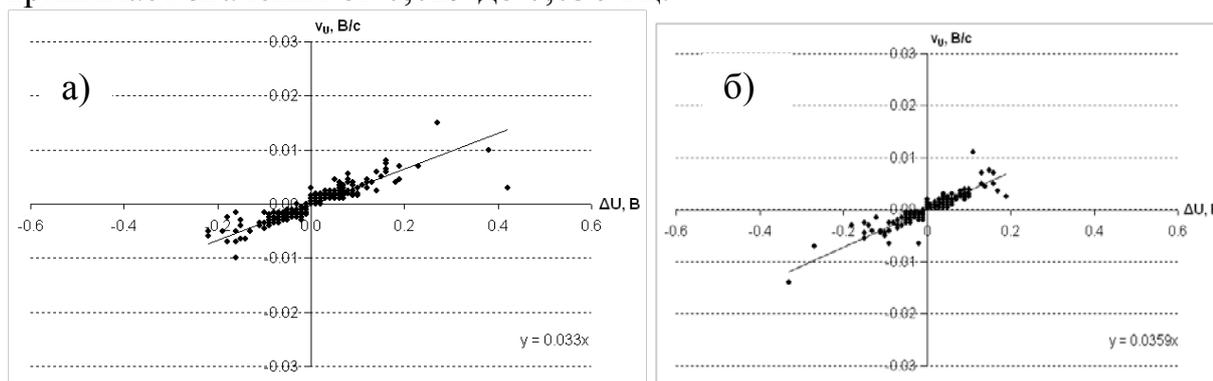


Рисунок 6 – Графики зависимостей $v_U(\Delta U)$ в точках 1 (а) и 4 (б)

Коэффициенты корреляции значений v_I и ΔI , а также значений v_U и ΔU для точек измерения для всех точек измерения составляет более 0,91, следовательно, гипотеза о геомагнитном источнике подтверждается.

Из литературных источников известно, что амплитуда длиннопериодных пульсаций магнитного поля Земли класса Рс-6 может достигать нескольких сотен нТл, при этом их частота составляет 1,7 мГц, т.е. период более 600 с. Результаты расчетов спектров полученных сигналов на примере изменения силы тока в точке 1 с применением пакета MATLAB Simulink представлены на рисунке 7.

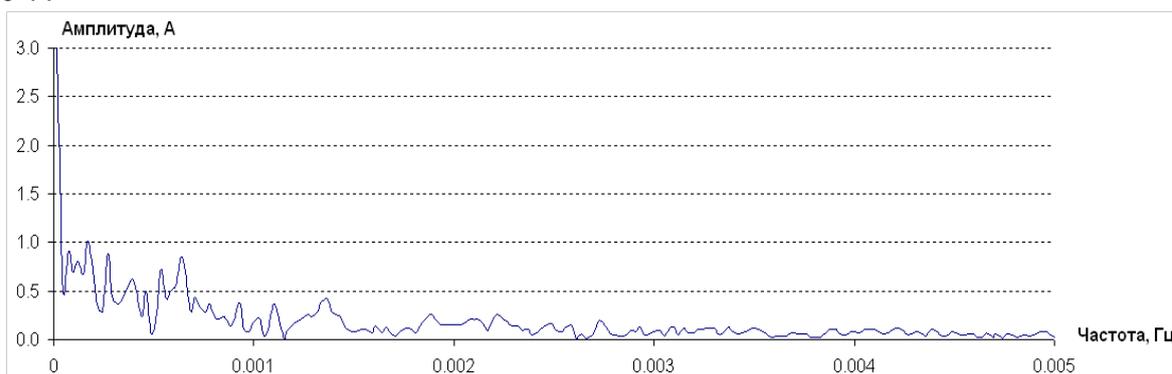


Рисунок 7 – Результаты расчета спектра колебаний силы тока

На спектрах наблюдаются составляющие с частотами в диапазоне от $\sim 1 \cdot 10^{-4}$ Гц до $\sim 8 \cdot 10^{-4}$ Гц, что соответствует периодам колебаний от ~ 20 минут до ~ 3 часов, т.е. вариациям класса Рс-6, которые характеризуются максимальными величинами пульсаций.

Полученные результаты, позволили уточнить и дополнить критерии идентификации источников блуждающих токов геомагнитной природы, сформулированные А.В. Фуркиным, А.А. Зубковым и др., включающие: 1. единство источника блуждающего тока, действующего на протяженный участок МГ(более 100 км); 2. связь между экстремумами функции разности потенциалов (силы тока) по времени и скоростями нарастания соответствующих функций, на участке перед этими экстремумами; 3. особенности распределения разности потенциалов и силы тока на участке трубопровода; 4. частоты наиболее высокоамплитудных колебаний соответствуют геомагнитным колебаниям группы Рс-6; закономерности изменения коэффициентов корреляции между значениями разности потенциалов и силы тока, измеренными синхронно.

В четвертой главе «Разработка методик в области проектирования, сооружения и эксплуатации газопроводов, подверженных действию геомагнитных источников» представлены рекомендации по проектированию участков трубопроводов. На основе моделирования было установлено, что степень воздействия ГИТ зависит от того, является ли трубопровод «длинным» или «коротким» по сравнению с параметром $1/\gamma$, определяющим электрические характеристики трубопровода, где γ – постоянная распространения тока в трубопроводе, $1/\text{м}$. Электрическая длина зависит от величины отклонения зависимости $U(x)$ от линейной функции. Если трубопровод является «длинным», то максимальные изменения потенциала «труба-земля» происходят на концах участка трубопровода, причем, такое поведения распределения потенциала «труба-земля» не зависит от длины рассматриваемого участка (рис. 8, а). Для «короткого» трубопровода сила тока стремится к нулю, а максимальное напряжение возникает только на границах участка трубопровода и составляет половину произведения электрического поля на длину участка трубопровода (рис.8, б). Кроме этого, в диссертации введено понятие «электрически неопределенного» участка трубопровода (см. табл. 2).

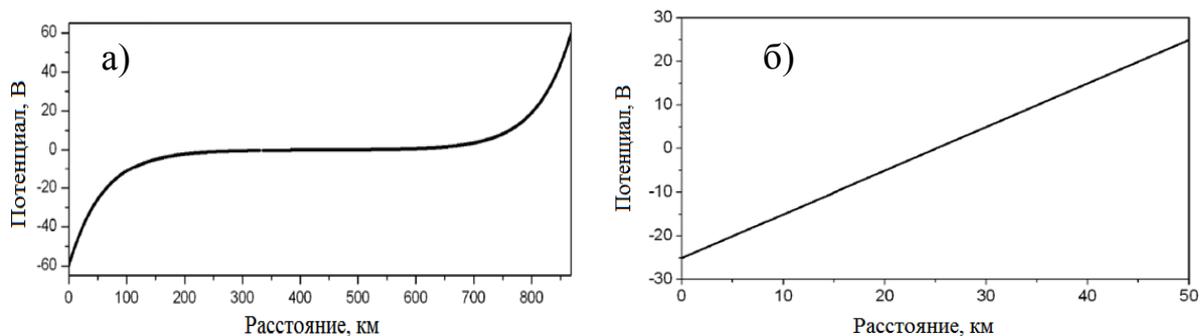


Рисунок 8 – Изменение потенциала «труба-земля» с расстоянием вдоль «длинного» а) и «короткого» б) трубопровода

В качестве количественной характеристики отклонения зависимости $U(x)$ от линейной может быть использована величина ψ , названная коэффициентом геомагнитного влияния, определяемая следующим образом:

$$\psi = \frac{U'_{x=0} - U'_{x=L/2}}{U'_{x=0}}. \quad (10)$$

Здесь $U'_{x=0} = U'(x=0)$ – значение U' на краю рассматриваемого участка трубопровода, $U'_{x=L/2} = U'(x=L/2)$ – значение U' в центре рассматриваемого участка трубопровода. Величина ψ изменяется в диапазоне от 0 до 1. Чем ближе ψ к нулю, тем ближе зависимость $U(x)$ к линейной. Коэффициент геомагнитного влияния ψ зависит от произведения γL (рис. 9).

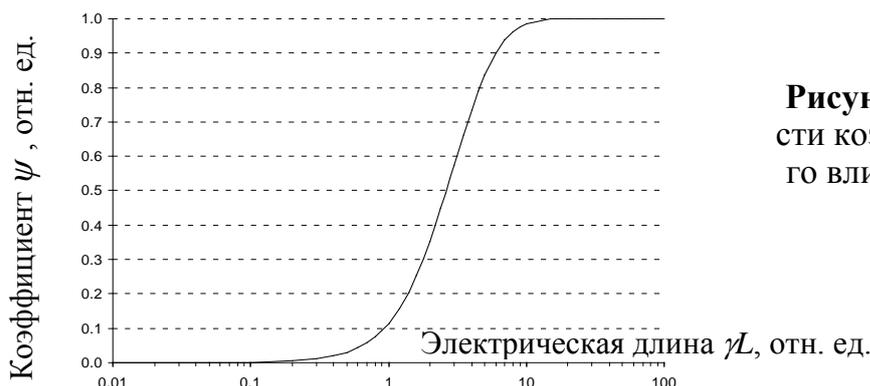


Рисунок 9 – График зависимости коэффициента геомагнитного влияния ψ от электрической длины участка γL

На изменение потенциала трубопровода, вызванного воздействием источника ГИТ, влияют и другие факторы, важнейшим из которых является сопротивление изоляционного покрытия (рис. 10).

Для магистральных трубопроводов характерно наличие изменений траектории трассы в виде изгибов, поворотов и ответвлений. В условиях равномерного электрического поля изменение направления траектории трассы приводит к тому, что составляющая электрического поля, параллельная трубопроводу, будет отличаться по обе стороны от точки изменения направления трассы.

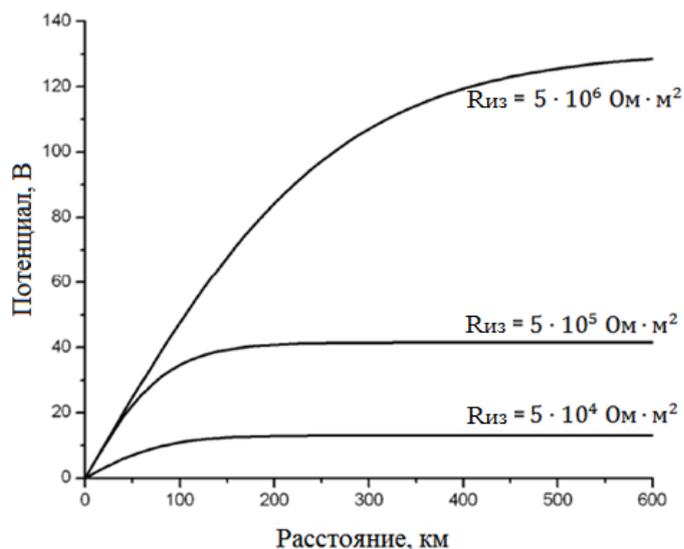


Рисунок 10 – Потенциал «труба-земля» как функция от длины трубопровода с покрытиями различным сопротивлением изоляционного покрытия $R_{из}$, $\text{Ом} \cdot \text{м}^2$

В результате сформулированы основные параметры, которые необходимо учитывать при отнесении участка трубопровода к потенциально опасному в отношении воздействия ГИТ (таблица 2).

Таблица 2 – Факторы, учитываемые при проектировании нефтегазопроводов

Фактор		Характеристика фактора	Балльная оценка
K_1	Географическая широта	от 0° до 40° с. ш.	1
		от 40° до 60° с. ш.	3
		$> 60^\circ$ с. ш.	5
K_2	Длина участка трубопровода L , км	«электрически короткие» трубопроводы $L \leq 1/\gamma$	1
		«электрически неопределенные» трубопроводы $1/\gamma < L \leq 4/\gamma$	5
		«электрически длинные» трубопроводы $L > 4/\gamma$	10
K_3	Изменение траектории трассы трубопровода	нет	0
		угол поворота $\leq 30^\circ$	1
		угол поворота $30^\circ \dots 60^\circ$	3
		угол поворота $> 60^\circ$	5
	ответвление	7	
K_4	Сопротивление изоляционного покрытия трубопровода $R_{из}$, $\text{Ом} \cdot \text{м}^2$	$R_{из} \leq 5 \cdot 10^4$	1
		$5 \cdot 10^4 < R_{из} \leq 1 \cdot 10^5$	5
		$1 \cdot 10^5 < R_{из} \leq 3 \cdot 10^5$	7
		$R_{из} > 3 \cdot 10^5$	10

Определение опасности воздействия ГИТ на проектируемый участок трубопровода проводится путем суммирования баллов, присваиваемых участку в зависимости от его характеристик, по четырем факторам:

- $\sum_{i=1}^4 K_i \geq 20$ – высокая вероятность негативного влияния ГИТ;
- $\sum_{i=1}^4 K_i < 20$ – низкая вероятность негативного влияния ГИТ.

Суммарная балльная оценка является критерием для определения приоритета использования дополнительных защитных средств, исключающих негативное влияние ГИТ на проектируемый участок трубопровода. В случае, если на участке проектируемого трубопровода наблюдается высокая вероятность негативного влияния ГИТ, при проектировании рекомендуется предусматривать следующие мероприятия:

1. Электрическое секционирование трубопровода на электрически изолированные участки путем установки вставок электроизолирующих (ВЭИ), что позволяет сделать каждый отдельный участок трубопровода «электрически коротким».

2. Создание условия для стекания ГИТ с участка трубопровода путем подключения заземляющего устройства. Такой способ является эффективной мерой, поскольку происходит псевдоснижение переходного сопротивления покрытия, т.к. повышается проводимость в цепи «металла трубы – грунт». Более рациональным способом защиты является установка протекторов, снижающих нагрузку на действующие системы электрохимической защиты. В разработанном автором патенте РФ №2642141 RU протекторы отключаются в отсутствие магнитных бурь.

Проектирование системы противокоррозионной защиты нефтегазопроводов, подверженных влиянию ГИТ, осуществляется в соответствии с алгоритмом, представленной на рисунке 11.

В случае, когда проектируемый трубопровод присоединяется к существующему участку магистрального трубопровода, проводят измерения потенциала «труба-земля» вдоль рассматриваемого участка. Если по результатам измерений выявлены колебания разности потенциалов «труба-земля», не связанные с неисправностями в работе станций катодной защиты или воздействием сторонних промышленных источников тока, то приступают к определению величины постоянной распространения тока. При проектировании нового магистрального трубопровода после определения его основных характеристик (длина участка, диаметр и толщина стенки трубопровода, удельное электрическое сопротивление стали, тип изоляционного покрытия), выполняют балльную оценку влияющих факторов.

Если по результатам оценки опасности негативного влияния ГИТ по таблице 2 выявлено, что рассматриваемый участок относится к потенциально опасным участкам, в процессе проектирования средств противокоррозионной защиты предусматривают мероприятия, ограничивающие воздействие ГИТ на участок трубопровода. Способ защиты проектируемого участка трубопровода от воздействия ГИТ и устройство для его осуществления определяют с учетом технико-экономического обоснования выбора проектного решения.

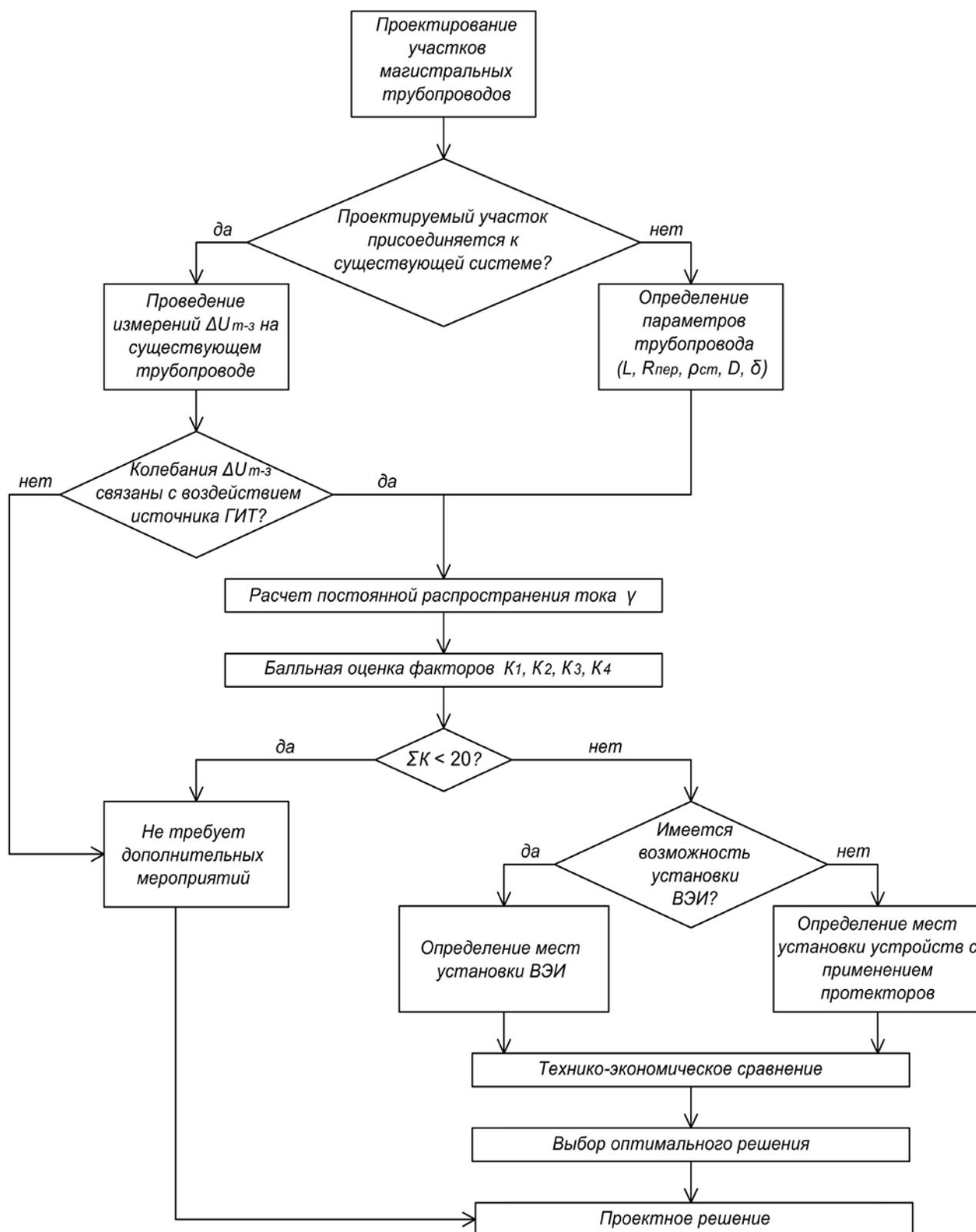


Рисунок 11 – Алгоритм выбора проектных решений, минимизирующих влияние ГИТ на вновь сооружаемых участках магистральных газонефтепроводов

Оценка опасности ГИТ при эксплуатации трубопроводов. При оценке опасности действующего ГИТ, априори исходят из положения о том, что раз действие источника наблюдается, значит, переходное сопротивление изоляци-



Рисунок 12 – Алгоритм оценки и устранения риска коррозионного разрушения трубопровода под воздействием ГИТ

онного покрытия трубопровода высокое. Опасность может быть скрыта только в том случае, если на фоне в целом отличной изоляции имеются отдельные сквозные дефекты, в которых может наблюдаться высокая плотность стекающего с трубопровода в грунт тока.

Поэтому наличие на участке трубопровода геомагнитных токов, предъявляет особые требования к контролю изоляции. Кроме этого, актуальной является задача разработки методики оценки потенциальной скорости коррозии в дефектах изоляции и прогноза ресурса трубопровода (рис. 12).

Связь между массой проржавевшего металла и прошедшим количеством электричества, описывается Законом Фарадея посредством электрохимического эквивалента (\mathcal{E}): $\mathcal{E} = A/nF$, где A – атомная масса металла, валентность, F – число Фарадея.

Для железа $\mathcal{E} = 9,1$ кг/А·год.

Пусть имеется оголенный участок площадью $S_{\text{деф}}$ трубопровода, незащищенный изоляцией, через который в

грунт стекает анодный ток силой I . За время t это приводит к утонению стенки трубы на величину $h_{\text{деф}}$. Тогда, масса проржавевшего металла составит:

$$M_{\text{деф}} = S_{\text{деф}} \cdot h_{\text{деф}} \cdot \rho_{\text{ст}}, \quad (11)$$

где $\rho_{\text{ст}}$ – плотность стали.

С другой стороны, масса потеря массы металла составляет

$$M_{\text{деф}} = \mathcal{E} \cdot I \cdot t \quad (12)$$

Приравняем правые части 11 и 12, выразим $h_{\text{деф}}$ через произведение скорости коррозии $C_{\text{корр}}$ на время t и время t сократим. Тогда:

$$C_{\text{корр}} = \frac{\mathcal{E} \cdot I}{\rho_{\text{ст}} S_{\text{деф}}} \quad \text{или} \quad C_{\text{корр}} = \frac{\mathcal{E} \cdot j}{\rho_{\text{ст}}} \quad (13)$$

где j – плотность анодного коррозионного тока.

Если задаться критической скоростью коррозии 0,1 мм/год, значение которой определяет эффективность противокоррозионной защиты, плотностью стали 7850 кг/м³, получим критическую плотность тока порядка 8,6 мА/см².

Однако данный критерий будет справедлив только при условии, что 100% времени действует ГИТ, в большинстве случаев, действие будет кратковременным, поэтому в диссертации рекомендовано применять коэффициент, численно равный соотношению времени действия ГИТ к общему времени. Для большей точности требуется интегрирование функции плотности тока по времени для определения воздействия.

При реализации методики оценки опасности источника геомагнитного тока на первом этапе необходимо выполнить работы по идентификации источника блуждающего тока с учетом разработанных критериев и локализовать участок воздействия токов. Работы автором предложено выполнять в следующей последовательности.

При помощи электрометрических методов обследования трубопроводов, по максимальным колебаниям разности потенциала «труба-земля» во время геомагнитных возмущений, обнаруживают точку на трассе трубопровода, в которой трубопровод подвержен наибольшему по изменению потенциала «труба-земля» влиянию геомагнитно-индуцированных токов (начальную точку). Проводят синхронные измерения разности потенциалов «труба-земля» в начальной и текущих точках, расположенных с определенным шагом по трассе трубопровода. Рассчитывают коэффициент линейной корреляции между показаниями потенциалов «труба-земля», измеренными в начальной и текущей точках, строят график зависимости «коэффициент линейной корреляции – координата трассы трубопровода».

Для локализации участка трубопровода, подверженного влиянию геомагнитных блуждающих токов, используют построенный график зависимости «коэффициент корреляции – линейная координата участка исследования», на котором за начало участка трубопровода, подверженного влиянию ГИТ, принимают точку на графике, в которой коэффициент линейной корреляции составляет 0,4 и предшествует первому по ходу движения продукта экстремуму, за конец участка – точку с коэффициентом линейной корреляции минус 0,4, установленную после второго экстремума по ходу движения продукта. По разработанному способу получено положительное решение на выдачу патента на изобретения (заявка РФ № 2018100507/28(000629)).

Когда участок локализован, определены его границы и установлены точки с максимальными вариациями защитного потенциала, переходят ко второму этапу выполнения работ - поиску дефектов изоляции на участке трубопровода с применением приборов типа БИТА-1, Radiodetection RD-400 или их аналогов.

В точках с максимальным изменением разности потенциала «труба-земля», вызванного ГИТ при помощи систем дистанционного коррозионного мониторинга или выполнением измерений с выездом на трассу трубопровода снимают график изменения плотности стекающего тока во времени. С целью получения максимально адекватных значений при измерении применяют электроды площадью, сопоставимой с площадью выявленных повреждений. Для этой задачи можно применять электроды с тарированной площадью контакта с грунтом в зависимости от погружения электрода.

Основные выводы:

1. Выполнено математическое моделирование процессов образования геомагнитно-индуцированного тока в подземном протяженном трубопроводе, которое показало, что при постоянных параметрах (диаметр, сопротивление изоляции, толщина стенки трубы) на участке трубопровода сила тока максимальна в центре участка и равна нулю на его границах, а разность потенциалов между трубопроводом и грунтом максимальна по абсолютной величине на границах участка и равна нулю в центре участка.

2. Разработано программное обеспечение по моделированию процессов геомагнитно-индуцированного тока в подземном протяженном трубопроводе «PTCModeller», при помощи которого установлено, что негативному влиянию геомагнитно-индуцированного тока в наибольшей степени подвержены протяженные участки трубопроводов большого диаметра, причем при повышении качества изоляционного покрытия амплитуда колебаний разности потенциалов на границах изолированного участка и протяженность области изменения разности потенциалов возрастают. Например, если рассматривается участок трубопровода длиной 1000 км с наружным диаметром 1420 мм и толщиной стенки 16 мм, находящийся во внешнем электрическом поле напряженностью 20 мкВ/м, то при повышении сопротивления изоляции с $5 \cdot 10^4$ Ом·м² до $3 \cdot 10^5$ Ом·м² абсолютная величина разности потенциалов между трубопроводом и грунтом на границах участка повышается от 1,4 В до 3,5 В;

3. Выполнены экспериментальные исследования на магистральных газопроводах «Бованенково-Ухта» и «Ухта-Торжок», результаты которых подтвердили выводы полученные при математическом моделировании и позволили сформулировать критерии идентификации вида источника блуждающего тока, включающие протяженность участка, определенный характер изменения коэффициента корреляции между значениями синхронных измерений разности потенциалов труба-земля в различных точках участка трубопровода. Высокий коэффициент корреляции между экстремумами функции изменения разности потенциалов во времени и скоростью изменения потенциала, предшествующей этим экстремумам, а также определенный спектр колебаний функции потенциала.

4. Разработаны и усовершенствованы методики в области проектирования и эксплуатации газопроводов, подверженных действию геомагнитных источников БТ, включая критерии отнесения участка трубопровода к потенциально опасному в отношении воздействия источника блуждающего тока такие как: географическая широта участка прокладки; длина участка; наличие изменения траектории проектируемого трубопровода; свойства изоляционного покрытия, позволившее разработать алгоритм выбора оптимальных проектных решений. Разработан алгоритм оценки опасности источников блуждающего тока на действующем трубопроводе, а также новый способ защиты трубопроводов от ГИТ.

5. Результаты работы внедрены при разработке проектной и рабочей документации по объектам капитального ремонта ООО «Газпром трансгаз Ухта»: «Магистральный газопровод Ухта-Торжок-3»: 1139 от 40-1179 км» Приводинского ЛПУМГ и «Магистральный газопровод Ухта-Торжок-3: 40.0 от 0-40 км» Сосногорского ЛПУМГ.

**Основные положения диссертации опубликованы
в следующих работах**

Учебно-методические издания:

1. Агиней, Р.В., Александров Ю.В., Никулин С.А., Александров О.Ю. Проектирование средств противокоррозионной защиты газонефтепроводов: Учебное пособие / Р.В. Агиней, Ю.В. Александров, С.А. Никулин, О.Ю. Александров – СПб.: Издательство «Недра», 2016. – 256 с.

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ:

1. Александров, О.Ю. Обзор результатов исследования влияния геомагнитно-индуцированных токов на подземные магистральные нефтегазопроводы / О.Ю. Александров, Е.В. Исупова, Р.В. Агиней // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе, 2017. – №1. – С. 44 – 49.

2. Агиней, Р.В. Особенности проектирования системы противокоррозионной защиты нефтегазопроводов, подверженных влиянию геомагнитного источника блуждающего тока / Р.В. Агиней, О.Ю. Александров // Трубопроводный транспорт: теория и практика, 2017. – №2. – С. 57 – 61.

3. Александров, О.Ю. Оценка коррозионной опасности для подземного трубопровода блуждающего тока, вызванного геомагнитными вариациями / О.Ю. Александров, Р.В. Агиней // Трубопроводный транспорт: теория и практика, 2017. – №5 (63). – С. 17 – 22.

4. Александров, О.Ю. Защита подземных трубопроводов от вредного влияния геомагнитно-индуцированных блуждающих токов / Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса, 2017. – №5. – С. 48 – 54.

5. Александров, О.Ю. Уточнение критериев идентификации геомагнитного источника блуждающего тока, воздействующего на магистральные нефтегазопроводы / О.Ю. Александров, Р.В. Агиней, Ю.В. Александров, Е.В. Исупова // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья, 2017. – №6. – С. 11 – 16.

Свидетельства и патенты:

1. Пат. 2642141 Российская Федерация, МПК G 01 N 17/04. Способ защиты участков трубопроводов от геомагнитно-индуцированных блуждающих токов и устройство для его осуществления / Агиней Р.В., Александров О.Ю., Александров Ю.В., Исупова Е.В., Колтаков С.М.; патентообладатель АО «Гипрогазцентр». – № 2017100848; заявл. 10.01.2017; опубл. 24.01.2018, Бюл. № 3. – 6 с.: ил.

2. Пат. 2641794 Российская Федерация, МПК F 17 D 5/02. Способ определения технического состояния изоляционного покрытия подземного трубопровода / Агиней Р.В., Гуськов С.С., Мусонов В.В., Колтаков С.М., Александров О.Ю.; патентообладатель АО «Гипрогазцентр» и ООО «Газпром трансгаз Ухта» – № 2017126824; заявл. 25.07.17; опубл. 22.01.18, Бюл. № 3. – 9 с.: ил.

Статьи в научно-технических сборниках и других изданиях:

1. Александров О.Ю., Гуськов С.С., Агиней Р.В., Александров Ю.В. Теоретические основы моделирования геомагнитно-индуцированных токов, воздействующих на газонефтепроводы / О.Ю. Александров, С.С. Гуськов, Р.В. Агиней, Ю.В. Александров // Ресурсы Европейского Севера. Технологии и экономика освоения, 2016. – №4 (06). – С. 73 – 87.

Отпечатано в типографии
Ухтинского государственного технического университета
Республика Коми, г. Ухта, ул. Октябрьская, 13
Подписано в печать 12.10.2018 г.
Усл. п. л. 1,6. Тираж 100 экз. Заказ №5628