

На правах рукописи



ЯВОРСКАЯ ЕЛЕНА ЕВГЕНЬЕВНА

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ
ГАЗОНЕФТЕПРОВОДОВ В УСЛОВИЯХ НЕОДНОРОДНОСТИ ГРУНТОВ
НА ТЕРРИТОРИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЛОЩАДОК

2.8.5. Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ухта – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном
образовательном учреждении высшего образования
«Ухтинский государственный технический университет»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
кафедры проектирования и
эксплуатации магистральных
газонефтепроводов, доцент
Исупова Екатерина Владимировна

Официальные оппонент: **Чучкалов Михаил Владимирович**, доктор
технических наук, Главный инженер -
первый заместитель генерального директора
ООО «Газпром трансгаз Казань»;
Попов Григорий Геннадьевич, кандидат
технических наук, научный сотрудник
Научного центра "Проблем переработки
минеральных и техногенных ресурсов"
ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский горный
университет императрицы Екатерины II»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Российский государственный
университет нефти и газа (национальный
исследовательский университет) имени
И.М. Губкина».

Защита диссертации состоится «11» декабря 2024 г. в 13 ч. 30 мин. на
заседании диссертационного совета **75.1.011.01** на базе ООО «Газпром
ВНИИГАЗ» по адресу: 142717, РФ, Московская область, г.о. Ленинский, п.
Развилка,
ул. Газовиков, зд. 15, стр. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ООО «Газпром
ВНИИГАЗ» и на сайте www.vniigaz.gazprom.ru.

Автореферат разослан « » _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,



Лаптева Татьяна Ивановна

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Промышленные площадки (далее – ПП) нефтеперекачивающих, компрессорных, газораспределительных и других станций с размещенным на их территории оборудованием, включая подземные сооружения, являются важнейшими элементами магистральных трубопроводов нефти и газа. Для обеспечения надежной работы подземных сооружений применяют катодную защиту в соответствии с ГОСТ 9.602-2016 и ГОСТ Р 51164-98, однако зачастую не обеспечивается защита по протяженности и во времени в соответствии с СТО Газпром 9.2-002-2019.

Причинами локального снижения эффективности работы средств катодной защиты, проявляющегося в уменьшении защитного потенциала по абсолютной величине, являются: ухудшение защитных свойств изоляционных покрытий; влияние блуждающих токов и сторонних станций катодной защиты, расположенных на территории объекта; влияние смежных систем на процесс токораспределения; неоднородность грунтовых условий на территории ПП.

В настоящее время при проектировании и вводе в эксплуатацию систем ЭХЗ технологических трубопроводов не учитывается то, что в ряде случаев осуществляется обработка слабонесущего или агрессивного грунта, а также может проводиться его полная или частичная замена. Вследствие этого возникают риски ускоренного коррозионного износа подземных сооружений, работающих на территории ПП, что обуславливает угрозу жизни и здоровью обслуживающего персонала, недопоставки продукции потребителю, значительный материальный, экологический ущерб.

Степень разработанности темы исследования. Вопросам повышения эффективности противокоррозионной защиты сооружений ПП внимание уделяли А. Г. Коротяев, Л. А. Селина, И. Г. Телетьен, А. С. Кузьбожев, Ф. К. Фатрахманов, В. Н. Юшманов и другие. В настоящее время разработаны методики оптимизации работы средств электрохимической защиты от коррозии трубопроводов, в т.ч. на территории промышленных площадок, а также изучены вопросы негативного влияния сторонних факторов и систем на процессы токораспределения в системе ЭХЗ трубопроводов.

Оптимизация потенциалов на трубопроводах и сооружения ПП рассмотрена в публикациях Р. В. Агинеи, Ю. В. Александрова, И. В. Глотова, З. Х. Ягубова, A. Gummow, B. R. Husock, E. L. Kirkpatrick и многих других.

Задача, связанная с влиянием блуждающих токов, решены в работах О. Ю. Александрова, А. В. Фуркина, А. И. Яблучанского, Ф. М. Мустафина и др.

Вопросам эксплуатации систем электрохимической защиты совместно со смежными системами, посвящены работы В. В. Притулы, Н. Н. Скуридина, Е. В. Исуповой, В. Ю. Корзинина, А. А. Фатхулина, В. Н. Ткаченко, Е. Н. Тихомирова.

Однако вопросы, связанные с катодной защитой подземных сооружений на территории ПП в условиях неоднородности грунтовых характеристик решены не в полной мере, что является актуальной научно-практической задачей.

Объектом исследования являются подземные участки технологических газонефтепроводов промышленных площадок.

Предметом исследования является эффективность защиты от коррозии трубопроводов, расположенных на территории промышленных площадок, в условиях неоднородности грунтовых характеристик.

Цель работы – обеспечение противокоррозионной защиты трубопроводов, расположенных на территории промышленных площадок, с учетом влияния неоднородности грунтов на параметры токораспределения в системе электрохимической защиты (ЭХЗ) нефтегазовых объектов.

Задачи исследования:

1. Установить влияние существующих методов технической мелиорации грунтовых оснований площадочных объектов нефтегазопроводов на параметры системы электрохимической защиты от коррозии трубопроводов на различных стадиях жизненного цикла.

2. Построить математическую модель расчета интегрального удельного электрического сопротивления грунта для определенного диапазона практически значимых параметров удельного электрического сопротивления среды ($100 \div 700$) Ом·м и объемной концентрации до 0,4.

3. Экспериментально оценить влияние грунтовых характеристик на параметры токораспределения в условиях экранирования катодного тока.

4. Разработать методику учета неоднородности грунтовых условий при проектировании средств электрохимической защиты газонефтепроводов промышленных площадок для обеспечения эффективности ее работы.

Соответствие паспорту специальности. Представленная диссертационная работа соответствует паспорту специальности 2.8.5 – «Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ», в частности, пункту 2 – «Научные основы системного комплексного (мультидисциплинарного) проектирования конструкций, прочностных, гидромеханических, газодинамических и теплофизических расчетов сухопутных и морских систем трубопроводного транспорта для добычи, сбора, подготовки, транспортировки и хранения углеводородов, распределения, газоснабжения и нефтепродуктообеспечения, подземных и наземных газонефтехранилищ, терминалов, инженерной защиты и защиты от коррозии, организационно-технологических процессов их сооружения, эксплуатации, диагностики, обеспечения системной надежности, механической и экологической безопасности».

Научная новизна:

1) Для обеспечения системы ЭХЗ на различных стадиях жизненного цикла площадочных сооружений нефтегазопроводов разработан и обоснован новый критерий грунтовых характеристик K_n для оценки и учета влияния показателей неоднородности грунтовых условий на параметры токораспределения в системе ЭХЗ.

2) Получена математическая модель для расчета ЭХЗ трубопроводов площадочных сооружений в условиях экранирования катодного тока, позволяющая оценить интегральную величину удельного электрического сопротивления неоднородного грунта для диапазона значений $(100 \div 700)$ Ом·м и объемной концентрации до 0,4.

3) Разработана методика для проектирования средств электрохимической защиты газонефтепроводов промышленных площадок с учетом неоднородности грунтовых условий.

Положения, выносимые на защиту.

1. Разработанный критерий, обосновывающий принятия решения при проектировании и эксплуатации системы ЭХЗ площадочных сооружений магистральных газонефтепроводов, с учетом оценки изменяющихся условий неоднородности грунтов и результатов технической мелиорации.

2. Разработанная методика, позволяющая принимать технические решения для обеспечения системы ЭХЗ площадочных сооружений магистральных газонефтепроводов на различных стадиях их жизненного цикла, с учетом определяемой интегральной величины удельного электрического сопротивления неоднородного грунта.

Методология и методы исследования. Исследования проведены с использованием системного анализа данных и фактических результатов об электропроводности грунта и эксплуатации системы ЭХЗ ПП магистральных газонефтепроводов, планирования и проведения экспериментальных исследований, стандартных и стандартизированных средств измерения, методов статистической обработки результатов измерений в программе «Поиск-01».

Адекватность полученных результатов подтверждается их не противоречием относительно положениям, известных из работ других авторов И. В. Глотова, Е. В. Исуповой.

Апробация и внедрение результатов работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международной научно-технической конференции имени профессора Н. А. Малюшина «Нефтегазовый терминал» (г. Тюмень, 15 марта 2020 г.), национальной научно-технической конференции «Нефть и газ: технологии и инновации» (г. Тюмень, 12-20 ноября 2020 г.), XIV всероссийской конференции «Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых» (г. Пермь, 9-12 ноября 2021 г.), всероссийской научно-практической конференции «Комплексное изучение и освоение недр Европейского Севера России» (г. Ухта, 16-17 сентября 2021 г.), Межрегиональных вебинарах им. И. Н. Андропова «Актуальные проблемы транспорта нефти и газа» (г. Ухта, 2020-2023 гг.).

Результаты диссертационного исследования используются в учебном процессе обучающихся по направлениям подготовки 21.03.01, 21.04.01 Нефтегазовое дело и 21.05.06 Нефтегазовая техника и технологии в рамках дисциплин «Электрохимические методы защиты» и «Пусконаладочные работы при сооружении систем ЭХЗ».

Разработанная методика оценки неоднородности грунтовых условий для обеспечения требуемых параметров противокоррозионной защиты трубопроводов промышленных площадок и рекомендации по повышению эффективности противокоррозионной защиты трубопроводов промышленных площадок на стадии проектирования, проведения пусконаладочных работ и эксплуатации, использована на подземных трубопроводах промышленных площадок НПС «Ухта-1», НПС «Микунь», НПС «Урдома» (*акты о внедрении от 06.02.2023 г. и от 05.06.2023 г.*) и 124 км газопровода «Вуктыл – Ухта» 1-я нитка: 126,0 от 67-193 км (*акт о внедрении от 23.01.2023г.*).

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

- установлено влияние технической мелиорации на характеристики токораспределения в системе электрохимической защиты трубопроводов на территории промышленных площадок;

- разработана математическая модель интегральной величины удельного электрического сопротивления грунта с учетом неоднородности его параметров для определенного диапазона практически значимых параметров удельного электрического сопротивления среды ($100 \div 700$) Ом·м и объемной концентрации до 0,4.

Практическая значимость работы:

Разработан способ (патент РФ 2751713), позволяющий ограничить возможное негативное влияние неоднородности грунтовых характеристик на параметры токораспределения в системе катодной защиты.

Методика определения качественной и количественной оценки неоднородности грунтовых характеристик при проектировании и эксплуатации систем ЭХЗ трубопроводов и оборудования промышленных площадок, дает возможность повысить достоверность определения величины удельного

электрического сопротивления грунта и, как следствие – эффективность дальнейшей эксплуатации средств противокоррозионной защиты.

Сведения о публикациях автора: по теме диссертации опубликовано 15 печатных работ, из них 5 - в ведущих рецензируемых изданиях, включенных в перечень ВАК Минобрнауки России, в том числе один патент на изобретение РФ.

Структура и объем работы: диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов, содержит 166 страниц с учетом приложений. Текст включает 63 рисунка, 17 таблиц, список литературы из 134 наименований и три Приложения (акты о внедрении результатов исследования).

Личный вклад автора заключается в изучении отечественных и зарубежных достижений в соответствующей области науки, проведении теоретических и экспериментальных исследований, анализе полученных результатов, их промышленной апробации, подготовке публикаций по выполненной работе, подготовке заявочных материалов на получение патента на изобретение РФ, разработке алгоритма и методики оценки неоднородности грунтовых условий при проектировании средств ЭХЗ газонефтепроводов и внедрении результатов исследования.

Автор благодарит за помощь в подготовке диссертации и поддержку своего руководителя и наставника канд. техн. наук, доцента Исупову Екатерину Владимировну и д-ра техн. наук, профессора Агинея Руслана Викторовича.

Также автор выражает глубокую признательность и благодарность д-ру техн. наук, профессору Земенкову Юрию Дмитриевичу и д-ру техн. наук, доценту Земенковой Марии Юрьевне (ФГБОУ ВО «ТИУ») за советы, ценные замечания и помощь в процессе работы над диссертацией.

Содержание работы

В первой главе проведена оценка влияния грунтовых характеристик на параметры токораспределения в условиях экранирования катодного тока, проанализированы возможные причины, последствия и решения проблемы возникновения участков трубопроводов с пониженным уровнем защищенности от коррозии (Рисунок 1).



Рисунок 1 – Классификация причин и возможных решений проблемы защищенности участков трубопроводов от коррозии

Неравномерность распределения катодного тока, возникающая при реализации различных методов обработки грунта на территории промышленной площадки (Рисунок 2).

В нормальном режиме работы системы катодной защиты 2 весь катодный ток I натекает на защищаемый трубопровод 1.

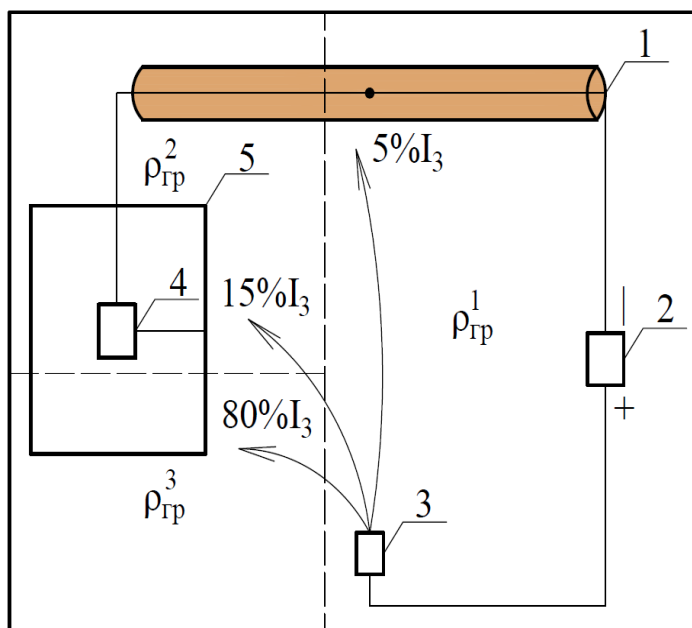


Рисунок 2 – Схема токораспределения при наличии электрического контакта трубопровода и контура заземления при $\rho_{\text{гр}}^1 > \rho_{\text{гр}}^2 > \rho_{\text{гр}}^3$:
 1 – катоднозащищаемый трубопровод; 2 – установка катодной защиты; 3 – анодное заземление; 4 – электроустановка; 5 – контур защитного заземления; I – ток катодной защиты; $\rho_{\text{гр}}^1$, $\rho_{\text{гр}}^2$, $\rho_{\text{гр}}^3$ – распределение токов в зависимости от УЭС каждого типа грунтов, преобладающих на ПП

Однако при наличии зон, в которых величина удельного электрического сопротивления грунта снижена (как правило, данные зоны располагаются вблизи электрооборудования 4, электрически связанного с системой защитного заземления 5) нарушается равномерность токораспределения, большая часть катодного тока натекает на контур защитного заземления 5 ввиду малого сопротивления среды, окружающей подземные сооружения, что приводит к снижению эффективности защиты газонефтепроводов от коррозии, повышенному и нерациональному износу материала анодного заземления 3, перерасходу электроэнергии на регулирование параметров установок катодной защиты и невозможности обеспечения плавного регулирования указанных параметров.

Современные методики проектирования средств электрохимической защиты трубопроводов промышленных площадок предусматривают использование в качестве исходных данных для расчета сопротивления растеканию трубопровода величины среднего удельного электрического сопротивления грунта. Такой подход оценки свойств грунта на территории объекта не отражает реальной картины распределения свойств грунтов, а также не позволяет оценить влияние неоднородности их параметров при проектировании и эксплуатации средств противокоррозионной защиты трубопроводов и смежных систем, работающих на промышленных площадках.

Таким образом, проведение исследований влияния грунтовых характеристик на параметры токораспределения в условиях экранирования катодного тока и разработка методики оценки грунтовых условий для повышения эффективности противокоррозионной защиты трубопроводов промышленных площадок, является актуальной научной задачей.

Во второй главе представлено математическое моделирование УЭС грунта с учетом неоднородности его характеристик, выполнен анализ существующих моделей расчета интегрального показателя объема гетерогенной среды, содержащей сферические включения, оказывающие влияние на распределение напряженности электрического поля. Установлено, что для определения показателей проводимости и электрического сопротивления грунта как статистической смеси могут быть использованы формулы для двухкомпонентных или многокомпонентных сред, формула К. Лихтенеккера.

Для проведения экспериментальных исследований удельных электрических сопротивлений разнородных грунтов разработан стенд (Рисунок 3). Стенд представляет собой емкость (2,5 м x 0,6 м x 0,6 м), разделенную на 10 равных участков, заполненных разными категориями грунтов. В качестве грунтов использовались: супесь, глина, чернозем, торф, суглинок без обработки и супесь, чернозем, торф, суглинок, увлажненные 1-5% раствором NaCl. Измерения удельного электрического сопротивления (далее – УЭС) грунтов в емкости выполнялись по четырехэлектродной схеме (Таблица 1).

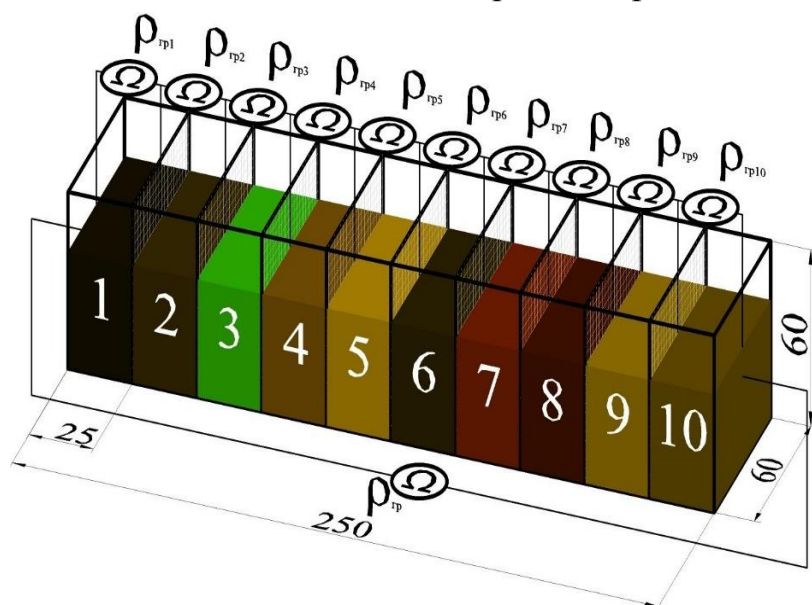


Рисунок 3 – Схема экспериментального стенда:
 1 – чернозем с обработкой;
 2 – суглинок с обработкой;
 3 – глина без обработки;
 4 – супесь с обработкой;
 5 – супесь без обработки;
 6 – чернозем без обработки;
 7 – торф без обработки;
 8 – торф с обработкой;
 9 – супесь с обработкой;
 10 – суглинок без обработки.

Таблица 1 – Результаты измерений значений УЭС

№ участка	Категория грунта	Удельное электрическое сопротивление, Ом·м
1	Чернозем (увлажненный 3% раствором NaCl)	32
2	Суглинок (увлажненный 1% раствором NaCl)	45
3	Глина	48
4	Супесь (увлажненный 5% раствором NaCl)	112
5	Супесь	155
6	Чернозем	46
7	Торф	25
8	Торф (увлажненный 3% раствором NaCl)	30
9	Супесь (увлажненный 3% раствором NaCl)	133
10	Суглинок	56
11	Весь грунт между электродами А и В	89

Расчет средней величины УЭС по СТО Газпром 9.2-003-2009 «Защита от коррозии. Проектирование электрохимической защиты подземных сооружений» показал, что $\bar{\rho} = 68,2$ Ом·м, это свидетельствует о том, что среднее значение не превышает измеренного значения УЭС грунтов всех десяти участков одновременно – 89 Ом·м, однако измеренное значение характеризует, что ошибка достигает порядка 30% и выше. Очевидно, что при некорректном определении интегральной величины УЭС грунта значения участков с большими значениями нивелируются и их роль в увеличении средней величины мала, на практике они могут существенно влиять на условия протекания тока.

Среднее значение удельного электросопротивления для указанного примера определялось по формуле (1) К. Лихтенеккера:

$$\epsilon_c^* = \epsilon_2 (\epsilon_1 / \epsilon_2)^V, \quad (1)$$

где ϵ_1 и ϵ_2 – показатели проводимости I и II компонента среды, См/м;

V – объемная концентрация первой (примесный грунт) среды во второй (основной грунт) среды, отн. ед.

Следует отметить, что формула К. Лихтенеккера предназначена для расчета обратных УЭС величин, т.е. для удельной электрической проводимости (УЭП): $\epsilon_c^* = 0,0075(0,0248/0,0075)^{0,3} = 0,01074$ См/м или $\bar{\rho} = 93,11$ Ом·м. Полученное значение на 37% больше величины, полученной по стандартной методике расчета среднего значения и менее чем на 5% отличается от данных измерения, что является удовлетворительным для практики результатом.

Зависимость интегральной проводимости от объемной концентрации среды, полученная по формуле К. Лихтенеккера может характеризоваться аналитически, в качестве примера на рисунке 4 представлен частный случай зависимости $\varepsilon_c^* = f(V)$ для $V \in (0,05;0,35)$ (Рисунок 4).

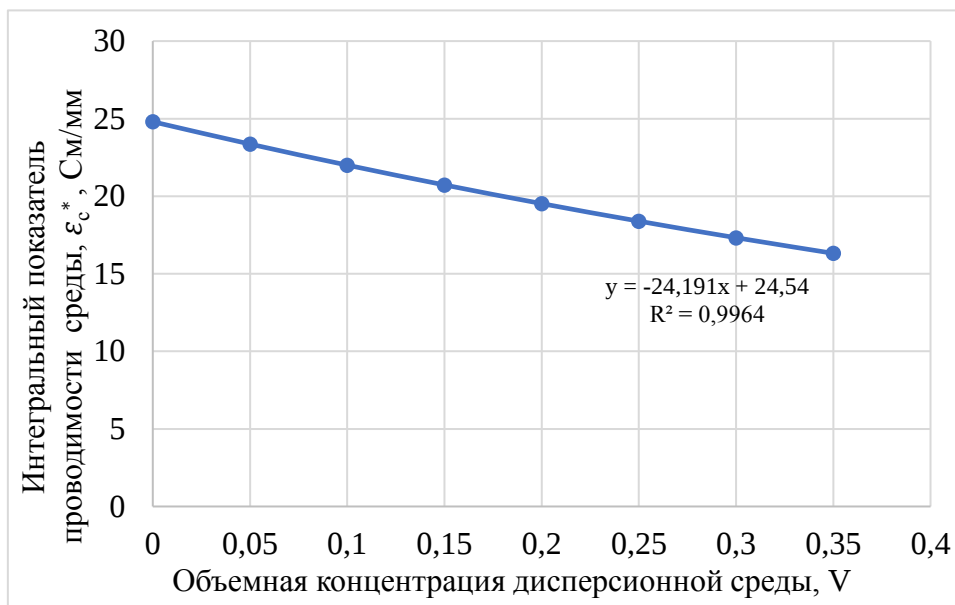


Рисунок 4 –
График
зависимости
интегральной
проводимости от
объемной
концентрации
среды,
полученный по
формуле
К. Лихтенеккера

Зависимость (Рисунок 4) аппроксимирована линейным уравнением общего вида $y=kx+b$, при этом параметр b соответствует УЭП основной среды, параметр k зависит от объемной концентрации. На основании этого построили семейство трехмерных графиков зависимости интегрального удельного электрического сопротивления первой (примесный грунт) среды ($100 \div 700$) Ом·м от объемной концентрации до 0,4 при УЭС второй (основной грунт) среды ($40 \div 200$) Ом·м.

На рисунке 5 показан пример такого графика для различных значений УЭС первой (примесный грунт) среды ($100 \div 700$) от объемной концентрации до 0,4 при УЭС второй (основной грунт) среды 200 Ом·м.

Определен общий вид уравнения (2) для расчета интегрального сопротивления:

$$R_{\text{инт}} = R_{\text{осн}} \cdot e^{(N \cdot V)}, \quad (2)$$

где $R_{\text{осн}}$ – УЭС основной среды, Ом·м; N – параметр зависящий от отношения сопротивления сред $\frac{R_{\text{прим}}}{R_{\text{осн}}}$, отн. ед.

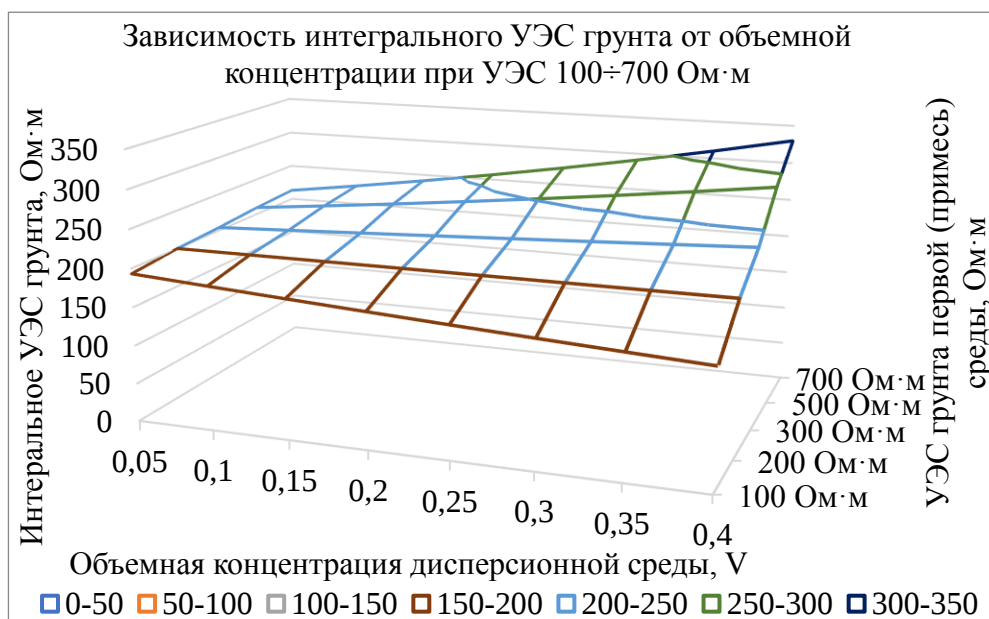


Рисунок 5 –
График зависимости интегрального УЭС первой (примесный грунт) среды (100÷700) Ом·м от объемной концентрации до 0,4 при УЭС второй (основной грунт) среды 200 Ом·м

Для диапазона основной среды $R_{\text{осн}} \in (40 \div 200)$ Ом·м и примесной среды $R_{\text{прим}} \in (100 \div 700)$ Ом·м, $N = 0,9 \cdot \frac{R_{\text{прим}}}{R_{\text{осн}}} - 1,04$ при условии отношение сопротивлений $\frac{R_{\text{прим}}}{R_{\text{осн}}} \in [1,0; 2,0)$, а при отношении $\frac{R_{\text{прим}}}{R_{\text{осн}}} \in [2,0; 12,0]$, $N = 0,15 \cdot \frac{R_{\text{прим}}}{R_{\text{осн}}} + 0,7$.

Таким образом интегральное УЭС грунта определяется следующей системой уравнений (3) при различных соотношениях УЭС сред:

$$\begin{cases} R_{\text{инт}} = R_{\text{осн}} \cdot e^{(0,9 \cdot \frac{R_{\text{прим}}}{R_{\text{осн}}} - 1,04) \cdot V}, & \text{при } \frac{R_{\text{прим}}}{R_{\text{осн}}} \in [1,0; 2,0) \\ R_{\text{инт}} = R_{\text{осн}} \cdot e^{(0,15 \cdot \frac{R_{\text{прим}}}{R_{\text{осн}}} + 0,7) \cdot V}, & \text{при } \frac{R_{\text{прим}}}{R_{\text{осн}}} \in [2,0; 12,0] \end{cases}, \quad (3)$$

где $R_{\text{прим}}$ – УЭС первой (примесный грунт) среды, $R_{\text{прим}} \in (100 \div 700)$ Ом·м; $R_{\text{осн}}$ – УЭС второй (основной грунт) среды, $R_{\text{осн}} \in (40 \div 200)$ Ом·м; V – объемная концентрация первой (примесный грунт) среды во второй (основной грунт), $V \in (0,05; 0,4)$, отн. ед.

Таким образом, интегральное УЭС грунта определяется системой уравнений при различных соотношениях УЭС сред (3), которые дают удовлетворительные результаты при выбранных диапазонах параметров и могут быть использованы в качестве математической модели для расчета токораспределения в системе ЭХЗ. Проведена верификация разработанной

математической модели по отношению к базовой формуле К. Лихтенеккера и установлено, что для первого уравнения при $\frac{R_{\text{прим}}}{R_{\text{осн}}} \in [1,0; 2,0]$ ошибка составляет не более 5% и для второго уравнения при $\frac{R_{\text{прим}}}{R_{\text{осн}}} \in [2,0; 12,0]$ ошибка составляет не более 7%, что доказывает адекватность модели в принятых диапазонах значений исходных данных.

В третьей главе проведены экспериментальные исследования влияния грунтовых характеристик на параметры токораспределения в условиях экранирования катодного тока, разработан экспериментальный стенд (Рисунок 6) в виде емкости (250 см × 60 см × 60 см), заполненной увлажненным песчаным грунтом. В емкость помещен участок трубопровода (L=200 см; D_н=2,5 см; δ = 0,2 см). Марка стали участка трубопровода – 09Г2С. Имитация катодной защиты осуществляется путем подключения источника питания постоянного тока и анодного заземления. Расстояние между трубопроводом и анодным заземлением 17 см. В ходе экспериментального исследования использовались два вида анодного заземления - пластина, выполненная из стали марки 09Г2С и токопроводящего эластомера. Измерение УЭС грунта выполнялись по четырехэлектродной схеме. Экспериментальное исследование проведено в несколько этапов: подготовительный, I, II, III, заключительный.

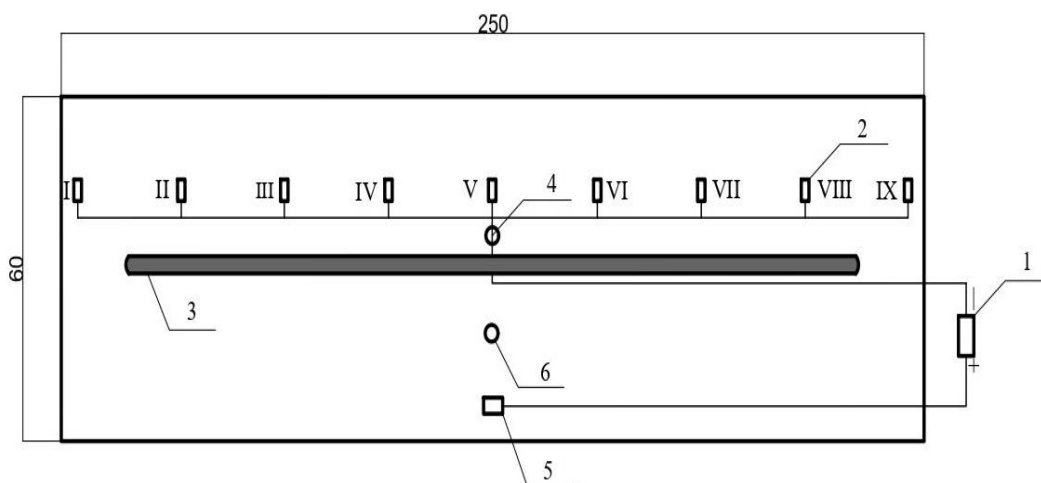


Рисунок 6 – Схема экспериментального стенда: 1 – источник постоянного тока; 2 – медносульфатный электрод сравнения; 3 – участок трубопровода; 4 – мультиметр; 5 – анодное заземление; 6 – защитный заземлитель

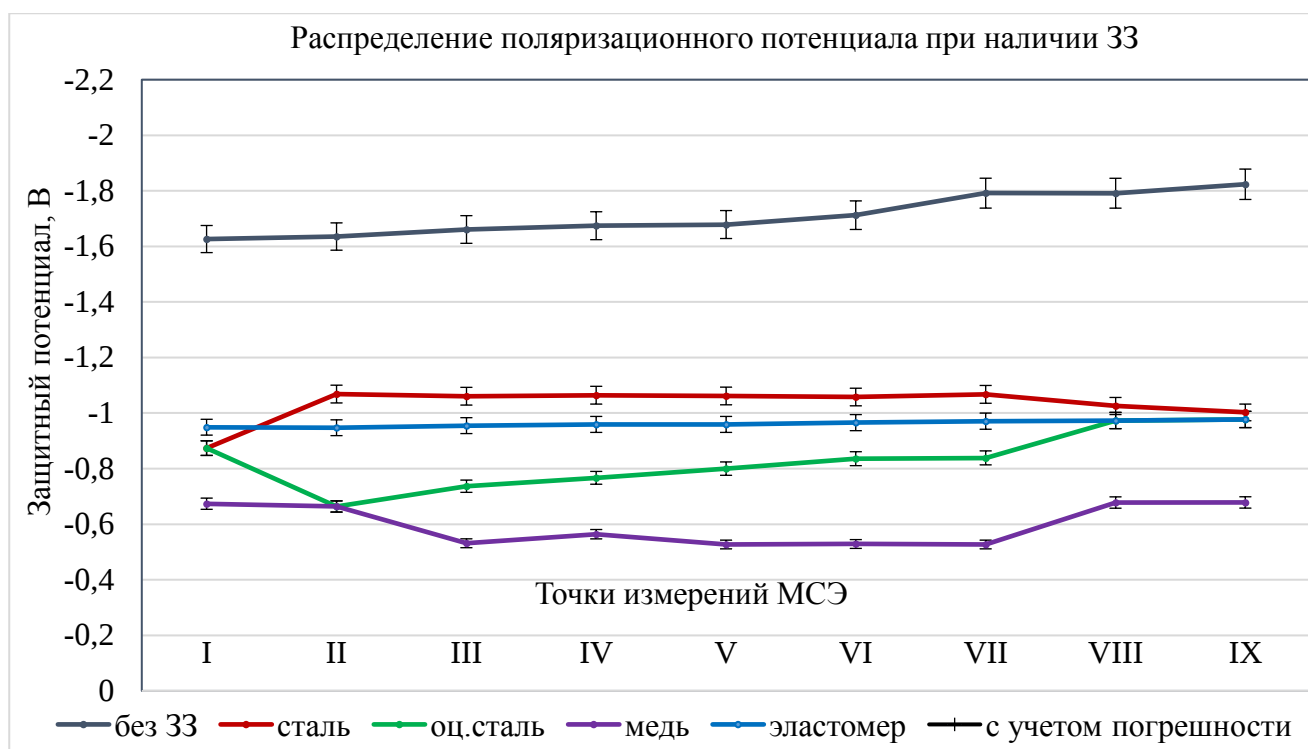
На первом этапе проведена оценка распределения разности потенциалов «труба–земля» путем измерения с использованием мультиметра при

перемещениях медносульфатного электрода сравнения последовательно по точкам I-IX, расположенным вдоль рассматриваемого участка трубопровода на расстоянии 30 см друг от друга. В качестве анодного заземления последовательно подключались элементы в виде стальной пластины и эластомерной пластины. Среднее значение поляризационного потенциала в точке дренажа составило $U_{Т-3} = -1,75$ В.

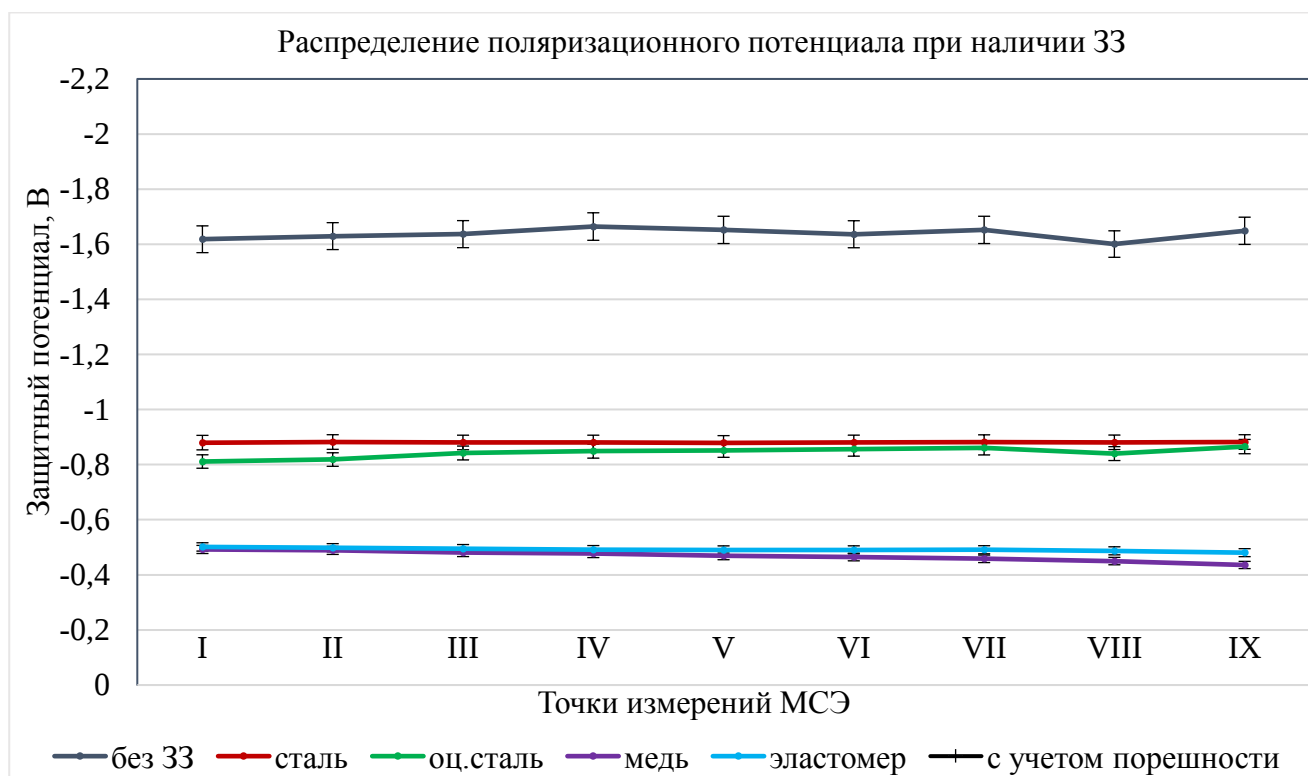
На втором этапе проводилось исследование влияния наличия различных имитаторов вертикальных заземляющих электродов из стали, оцинкованной стали, меди и эластомерного материала соответственно, располагаемых поочередно между трубопроводом и анодным заземлением, на распределение поляризационного потенциала вдоль участка модели трубопровода. В ходе данного этапа исследования установлено, что при установке в качестве анодного заземления эластомерной пластины негативное влияние заземляющих электродов менее выражено, за исключением случая использования в качестве заземляющих элементов и анодного заземления элементов из одинакового материала (токопроводящего эластомера), когда смещение величины защитного потенциала в положительную область достигает существенных значений.

На третьем этапе измерения защитного потенциала проводились с учетом наличия электрического соединения заземляющих электродов с катоднозащищаемым трубопроводом при условии, что на участке наблюдается неоднородность грунтовых характеристик, выражающаяся в виде локального снижения величины УЭС грунта в местах установки заземляющего электрода и анодного заземления. Обработка грунта проводилась последовательно с использованием соли и коксовой засыпки зонами радиусом 6 см вокруг рассматриваемого элемента глубиной обработки 10 см (послойно по 2 см).

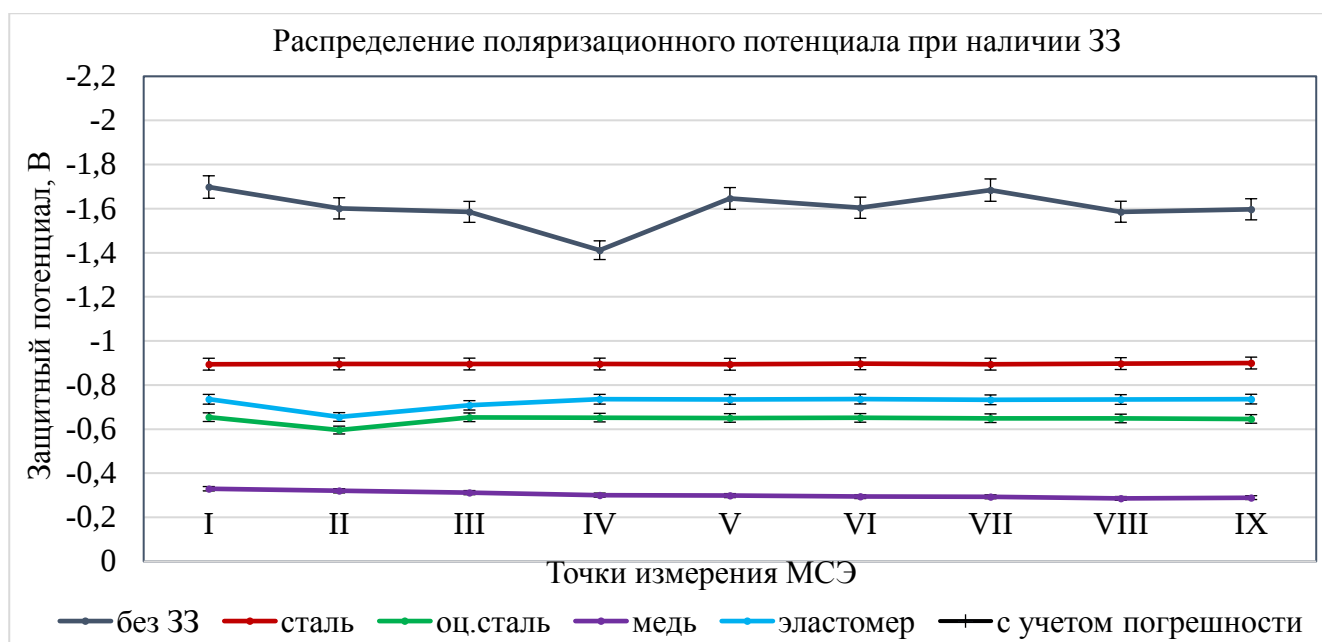
Отмечено, что при обработке грунта вокруг оцинкованного заземляющего электрода с целью уменьшения его УЭС его негативное влияние на распределение защитного тока в системе ЭХЗ резко увеличивается. Кроме того, установлено, что использование в контурах заземления эластомерных токопроводящих материалов может способствовать предотвращению или минимизации экранирующего влияния объектов, не включенных в систему катодной защиты с подключенным анодным заземлением из стали (Рисунок 7).



а) Защитное заземление (ЗЗ) в соли, анодное заземление – сталь



б) Анодное заземление в коксе, анодное заземление - сталь



в) Защитное заземление (ЗЗ) в соли, анодное заземление в коксе,
анодное заземление - сталь

Рисунок 7 – Распределение защитного потенциала трубопровода при трех вариантах неоднородности удельного электрического сопротивления грунта

В таблице 2 приведены результаты расчета значений снижения поляризационного потенциала при наличии влияния заземляющих электродов заземлений и с учетом неоднородности грунтовых характеристик в местах установки анодного и защитного заземления.

Красным цветом отмечены величины защитного потенциала, которые не соответствуют требованиям к минимально допустимым значениям для данных условий. Отмечено, что влияние медных и эластомерных заземляющих электродов в большинстве случаев оказывает негативное влияние.

В условиях неоднородности грунтовых характеристик по причине обработки грунта в зоне установки защитных заземлений использование в качестве заземлителей из оцинкованной стали, а также эластомерных электродов (в случае, если анодное заземление также выполнено из аналогичного материала) приводит к снижению уровня защищенности от коррозии подземного трубопровода, что может повлечь за собой дополнительные расходы, связанные с необходимостью наладки или реконструкции системы ЭХЗ трубопроводов и оборудования промышленных площадок.

Таблица 2 – Результаты измерений защитного поляризационного потенциала

Материал анодного заземления	Материал заземляющего электрода	Грунтовые характеристики					
		Зона	Удельное электрическое сопротивление грунта $\rho_{гр}$, Ом·м				
			трубопровод	100	100	100	100
			заземляющий электрод	100	0,22	0,22	100
			анодное заземление	100	100	2,6	2,6
		Снижение величины защитного потенциала по абсолютной величине $\Delta U_{Т-З}$, В					
Сталь	Сталь	0,6	0,6	0,8	0,8		
	Оцинкованная сталь	0,7	0,9	1,0	0,8		
	Медь	1,1	1,2	1,3	1,2		
	Эластомер	0,9	0,7	0,8	1,2		
Токопроводящий эластомер	Сталь	0,6	0,7	0,9	0,8		
	Оцинкованная сталь	0,7	0,9	1,0	0,8		
	Медь	0,9	1,2	1,3	1,2		
	Эластомер	1,2	1,2	1,1	1,2		

Определены доминирующие факторы, оказывающие влияние на изменение защитного потенциала на территории промышленных площадок: материал анодного заземления в составе установок катодной защиты; материал элементов системы защитного заземления и молниезащиты; значения УЭС грунта вблизи катоднозащищаемых сооружений и заземляющих элементов в условиях неоднородности грунтовых характеристик.

Таким образом, установлено результатами графического и дисперсионного анализа данных измерений защитного потенциала в условиях неоднородности грунтовых характеристик, что факторы, оказывающие влияние на величину защитного потенциала подземного трубопровода, являются взаимовлияющими.

В четвертой главе разработана методика в виде алгоритма определения оптимальных грунтовых условий для обеспечения требуемых параметров противокоррозионной защиты трубопроводов ПП, описаны рекомендации и подходы, разработанные для применения при проектировании и вводе в эксплуатацию нефтегазопроводов ПП (Рисунок 8).

Разработанная методика, представленная в виде алгоритма принятия решений и выбора мероприятий по установлению факта и оценке неоднородности грунтовых условий, разделена на три этапа мероприятий.

I. Анализ данных, полученных в ходе оценки физико-химических свойств грунта

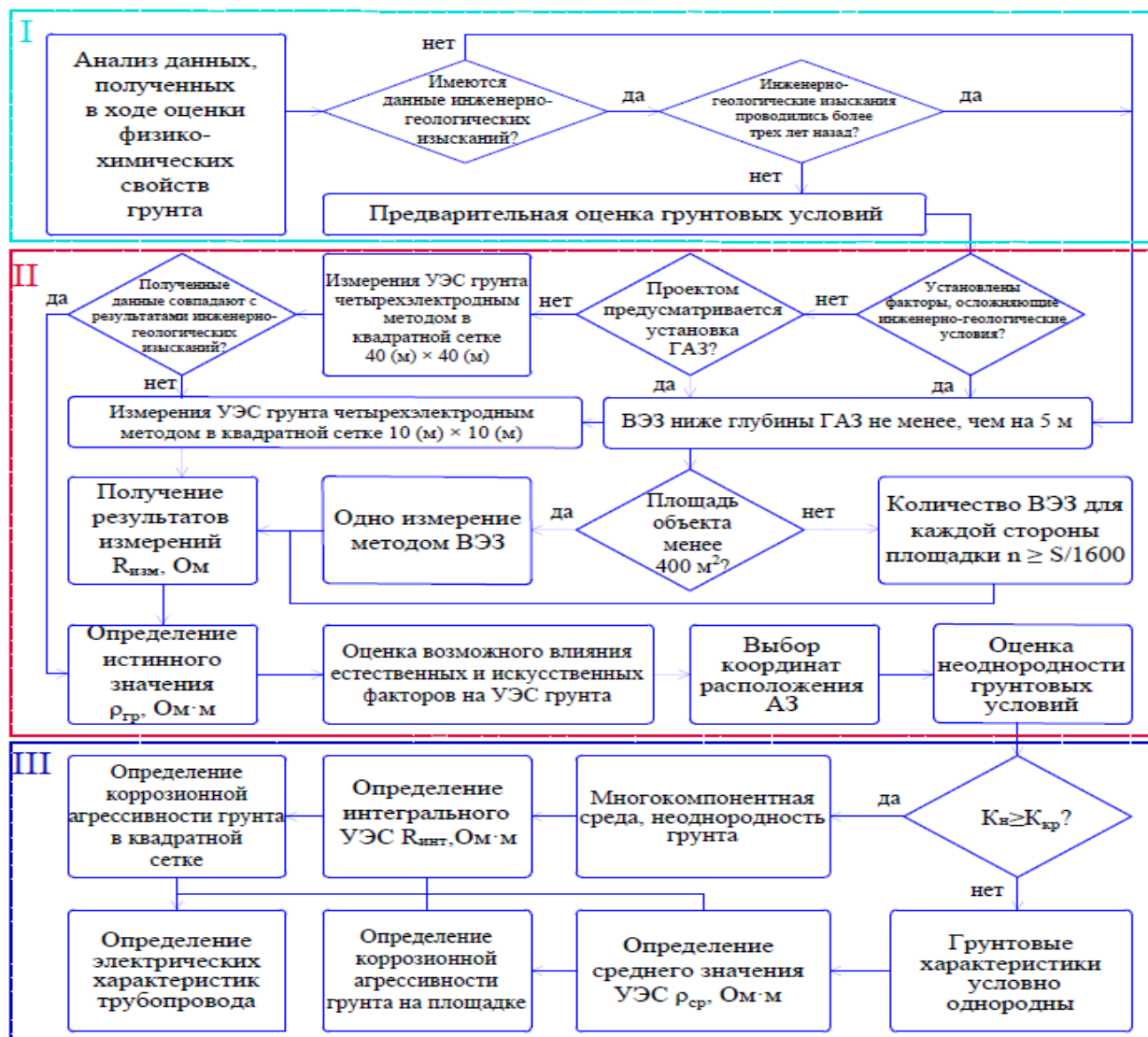


Рисунок 8 – Алгоритм методики оценки неоднородности грунтовых условий при проектировании средств электрохимической защиты газонефтепроводов

На стадии проектирования системы ЭХЗ трубопроводов ПП анализируют материалы инженерно-геологических изысканий. Особое внимание уделяют результатам геофизических и гидрогеологических исследований (при распространении подземных вод), полевых и лабораторных исследований грунтов для оценки неоднородности грунтовых параметров на территории ПП потребуется бурение скважин, проходка шурфов, статического и динамического зондирования. По результатам изысканий определяют наличие или отсутствие влияния факторов, осложняющих инженерно-геологические условия.

II. Проведение измерений и обработка полученных данных

В случае если объем информации является недостаточным или не позволяет выполнить достоверную оценку степени неоднородности грунтовых условий по площади и по глубине, то проводят дополнительные мероприятия по выполнению измерений УЭС грунта четырехэлектродным методом в квадратной сетке 10(м)х10(м), а также путем ВЭЗ, для площадки площадью $S < 400 \text{ м}^2$ выполняется одно ВЭЗ, для площадок более 400 м^2 , на которых могут иметь место некоторая неоднородность по удельному сопротивлению верхнего слоя (ρ_1) и изменение толщины этого слоя (h_1), число зондирований увеличивают. При площади контура S до 2000 м^2 минимальное число зондирований: $n \geq S/400$, соответственно, количество ВЭЗ для каждой стороны площадки: $n \geq S/1600$.

III. Оценка грунтовых условий

Для оценки степени влияния неоднородности грунтовых условий на параметры токораспределения в системе ЭХЗ и необходимости внедрения мероприятий по повышению эффективности защиты подземных трубопроводов от коррозии введем новый критерий - коэффициент неоднородности грунтовых характеристик K_n . В порядок расчета включены следующие этапы:

1. Определение среднего УЭС грунта, Ом·м;
2. Определение K_n – коэффициента неоднородности грунтовых характеристик по формуле (4):

$$K_n = \sqrt{\frac{\sum (\rho_i - \rho_{\text{ср}})^2}{n(n-1)}}, \quad (4)$$

где $\rho_{\text{ср}}$ – среднее значение УЭС грунта, Ом·м; ρ_i – значение УЭС грунта, полученное при проведении измерений, Ом·м; n – общее количество участков, на которых проводились измерения УЭС грунта.

3. Сравнение с критериальным значением:

- $0 < K_n < 10$ – однокомпонентная среда, грунтовые характеристики однородны;
- $K_n > 10$ – многокомпонентная среда, необходимо учитывать неоднородность грунтовых характеристик.

Если грунт представляет однокомпонентную среду, то используют общепринятую методику определения среднего значения УЭС грунта. В случае, если грунт - многокомпонентная среда, то он рассматривается как гетерогенная структура и расчет интегрального УЭС грунта выполняют на основании системы

уравнений (3) для указанных диапазонов основной среды $R_{\text{осн}} \in (40 \div 200)$ Ом·м, примесной среды $R_{\text{прим}} \in (100 \div 700)$ Ом·м и объемной концентрации первой (примесный грунт) среды во второй (основной грунт) $V \in (0,05; 0,4)$ отн. ед:

$$\begin{cases} R_{\text{инт}} = R_{\text{осн}} \cdot e^{(0,9 \cdot \frac{R_{\text{прим}}}{R_{\text{осн}}} - 1,04) \cdot V}, & \text{при } \frac{R_{\text{прим}}}{R_{\text{осн}}} \in [1,0; 2,0) \\ R_{\text{инт}} = R_{\text{осн}} \cdot e^{(0,15 \cdot \frac{R_{\text{прим}}}{R_{\text{осн}}} + 0,7) \cdot V}, & \text{при } \frac{R_{\text{прим}}}{R_{\text{осн}}} \in [2,0; 12,0] \end{cases}.$$

Таким образом, на основе полученных данных АО «Траснефть-Север» разработанная методика показала удовлетворительные результаты при выбранных диапазонах параметров и рекомендуется к применению при проектировании средств ЭХЗ газонефтепроводов и оборудования на территории ПП при определении расчетного значения УЭС грунта и оценки степени неоднородности грунтовых характеристик.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана классификация, позволяющая систематизировать существующие методы технической мелиорации грунтов и оценить влияние их на параметры токораспределения в системе ЭХЗ подземных участков трубопроводов, реализуемые на территории промышленных площадок.

2. Экспериментально установлено, что разработанная модель оценки интегральной величины УЭС неоднородного грунта в виде системы уравнений может быть использована для расчета токораспределения в системе ЭХЗ.

3. Доказано, что значения удельного электрического сопротивления грунта, определяемые в ходе комплексных коррозионных обследований систем ЭХЗ промышленных площадок не в полной мере характеризуют условия работы системы катодной защиты и защитного заземления по причине неоднородности грунтовых характеристик, являющейся следствием технической мелиорации грунтов.

4. Разработан способ выполнения анодного заземления (патент РФ 2751713), позволяющий ограничить возможное негативное влияние неоднородности грунтовых характеристик на параметры токораспределения в системе катодной защиты на стадии эксплуатации.

5. Разработана методика определения расчетного значения УЭС грунта, внедрение которой позволяет обеспечить противокоррозионную защиту газонефтепроводов расположенных на территории ПП с учетом влияния неоднородности грунтовых условий. Методика принята к использованию на объектах АО «Траснефть-Север» и ООО «Газпром добыча Краснодар».

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России:

1. Исупова, Е. В. Определение эффективного радиуса действия вертикального заземлителя в условиях экранирования катодного тока подземных нефтегазопроводов площадных объектов / Е. В. Исупова, Р. В. Агиней, Е. Е. Яворская // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2020. – № 3 (117). – С. 73-78. Журнал категории К2.

2. Яворская, Е. Е. Экспериментальное исследование влияния грунтовых характеристик на параметры токораспределения в системе электрохимической защиты трубопроводов промышленных площадок / Е. Е. Яворская, Е. В. Исупова // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2021. – № 1. – С. 5-12. Журнал категории К2.

3. Яворская, Е. Е. Совершенствование методики оценки грунтовых условий промышленных площадок при проектировании системы электрохимической защиты от коррозии / Е. Е. Яворская, Е. В. Исупова, Р. В. Агиней // Наука и техника в газовой промышленности. – 2022. – № 3(91). – С. 65-78. Журнал категории К2.

4. Яворская, Е. Е. Создание математической модели для расчета интегрального удельного электрического сопротивления грунта на различных участках промышленных площадок / Е. Е. Яворская, Е. В. Исупова, Р. В. Агиней // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2024. – № 1-2. – С. 82-88. Журнал категории К2.

Патент на изобретение:

5. Патент RU 2751713 С9. Российская Федерация, МПК С23F 13/00. Способ выполнения анодного заземления: № 2020139836: заявл. 2020.12.02: опубл. 2021.09.07 / Агиней Р. В., Исупова Е. В., Савченков С. В., Яворская Е. Е. – 7 с.

В других изданиях:

6. Сивкова, Е. Р. Совершенствование методики оценки грунтовых условий промышленных площадок при проектировании системы противокоррозионной защиты / Е. Р. Сивкова, Е. Е. Яворская // Трубопроводный транспорт - 2023 : тезисы докладов международной научно-практической конференции / редкол: Р. Н. Бахтизин, С. М. Султанмагомедов и др. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2023. – С. 163-164.

7. Яворская, Е. Е. Создание математической модели для расчета интегрального удельного электрического сопротивления грунта / Е. Е. Яворская, Е. В. Исупова, Р. В. Агиней // Нефтегазовый терминал. Вып. 26: Сборник научных трудов международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы транспорта и хранения углеводородных ресурсов при освоении Арктики и Мирового океана» / под общей редакцией Ю. Д. Земенкова. – Тюмень: ТИУ. – 2023. – С. 212-216.

8. Филиппов, С. Ю. Совершенствование методики оценки коррозионной агрессивности грунта на территории промышленных площадок / С. Ю. Филиппов, Е. Е. Яворская // Сборник научных трудов : материалы международной молодежной научной конференции «Севергеозкотех-2022» : Ухта : УГТУ, 2022. – С. 385-391.

9. Яворская, Е. Е. Совершенствование математической модели для расчета интегрального удельного электрического сопротивления грунта / Е. Е. Яворская, Е. В. Исупова // Проблемы геологии, разработки и эксплуатации месторождений, транспорта и переработки трудноизвлекаемых тяжёлых нефтей : материалы всероссийской научно-технической конференции (с международным участием) : – Ухта : УГТУ, 2022. – С. 169-172.

10. Яворская, Е. Е. Методы повышения эффективности электрохимической защиты трубопроводов и оборудования промышленных площадок / Е. Е. Яворская, Е. В. Исупова // Сборник научных трудов : Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых : материалы всероссийской научно-технической конференции : в 2 т. ; т. 1. – Пермь : ПНИПУ, 2021. – С. 229-233.

11. Исупова, Е. В. Совершенствование технических решений по устройству анодного заземления на участках экранирования катодного тока защитными заземлениями / Е. В. Исупова, Е. Е. Яворская, Р. В. Агинец // Нефтегазовый Терминал. Сборник научных трудов международной научно-технической конференции имени профессора Н. А. Малюшина : Тюмень : ТИУ, 2021. – С. 181-185.

12. Яворская, Е. Е. Влияние методов технической мелиорации грунтов на параметры токораспределения в системе ЭХЗ подземных участков трубопроводов промышленных площадок / Е. Е. Яворская, Е. В. Исупова // Проблемы геологии, разработки и эксплуатации месторождений и транспорта трудноизвлекаемых запасов углеводородов : материалы всероссийской научно-технической конференции : в 2 ч. ; ч. 1. – Ухта : УГТУ, 2020. – С. 175-186.

13. Яворская, Е. Е. Влияние методов технической мелиорации грунтов промышленных площадок на параметры токораспределения в условиях экранирования катодного тока / Е. Е. Яворская // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2020. – № 1 (292). – С. 45-53.

14. Исупова, Е. В. Анализ факторов, влияющих на параметры электрохимической защиты трубопроводов промышленных площадок / Е. В. Исупова, Е. Е. Яворская, В. А. Беляева // Нефтегазовый терминал. Вып. 18: Сборник научных трудов международной научно-технической конференции имени профессора Н. А. Малюшина / под общей редакцией М. А. Александрова – Тюмень: ТИУ. – 2020. – С. 62-66.

15. Яворская, Е. Е. Анализ причин снижения эффективности электрохимической защиты от коррозии трубопроводов и оборудования ПП / Е. Е. Яворская, Е. В. Исупова // Нефть и Газ: Технологии и Инновации: материалы Национальной научно-практической конференции : в 3 т. ; т. 2. – Тюмень : ТИУ, 2020. – С. 41-43.