

ФГБОУ ВО «УХТИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

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

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

канд. техн. наук, доцент

Исупова Екатерина Владимировна

Ухта – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ГРУНТОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НА ПАРАМЕТРЫ ТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ЭКРАНИРОВАНИЯ КАТОДНОГО ТОКА	11
1.1 Причины, вызывающие несоответствие защитного потенциала требованиям нормативной документации на территории промышленной площадки	11
1.2 Обзор и анализ способов технической мелиорации грунтов, реализуемой на территории промышленных площадок.....	19
1.3 Выводы по главе 1	44
ГЛАВА 2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ГРУНТА С УЧЕТОМ НЕОДНОРОДНОСТИ ЕГО ХАРАКТЕРИСТИК	47
2.1 Анализ подходов к моделированию неоднородности грунтовых условий ..	47
2.2 Создание математической модели для расчета интегрального удельного электрического сопротивления грунта	50
2.3 Верификация математической модели	72
2.4 Выводы по главе 2	77
ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ГРУНТОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НА ПАРАМЕТРЫ ТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ЭКРАНИРОВАНИЯ КАТОДНОГО ТОКА.....	79
3.1 Проведение экспериментальных исследования в лабораторных условиях влияния грунтовых характеристик на параметры токораспределения в системе электрохимической защиты подземных трубопроводов промышленных площадок.....	79
3.2 Анализ влияния доминирующих факторов на защищенность подземных технологических трубопроводов от коррозии в условиях неоднородности грунтовых характеристик.....	99
3.3 Выводы по главе 3.....	112

ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГРУНТОВЫХ УСЛОВИЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТРЕБУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОТИВОКОРРОЗИОННОЙ ЗАЩИТЫ ТРУБОПРОВОДОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЛОЩАДОК.....	114
4.1 Анализ подходов к оценке грунтовых условий при проектировании средств электрохимической защиты газонефтепроводов	114
4.2 Совершенствование методики оценки неоднородности грунтовых условий при проектировании средств электрохимической защиты газонефтепроводов	121
4.3 Разработка рекомендаций, ограничивающих негативное влияние, обусловленное неоднородностью грунтовых условий на территории промышленной площадки, на параметры ЭХЗ газонефтепроводов.....	137
4.4 Выводы по главе 4.....	143
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	144
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	145
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	146
ПРИЛОЖЕНИЕ А	162
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	163
ПРИЛОЖЕНИЕ В	166

ВВЕДЕНИЕ

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 [27], однако зачастую не обеспечивается защита по протяженности и во времени в соответствии с СТО Газпром 9.2-002-2019 [85].

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 промышленных площадок.

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 промышленной площадки, 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 промышленных площадок внимание уделяли А. Г. Коротяев, Л. А. Селина, И. Г. Телетьен, А. С. Кузьбожев, Ф. К. Фатрахманов, В. Н. Юшманов и другие [20, 21, 22, 39, 55, 64, 86, 87, 89, 93, 94, 109, 110-134].

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 [3, 5, 20, 21, 33, 93, 104].

Оптимизация потенциалов на трубопроводах и сооружения промышленных площадок рассмотрена в публикациях Р. В. Агинеи, Ю. В. Александрова, И. В. Глотова, З. Х. Ягубова, А. Gummow, В. 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. Яблчанского, 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 промышленных площадок в условиях неоднородности грунтовых характеристик решены не в полной мере, что является актуальной научно-практической задачей.

Объектом исследования являются подземные участки технологических газонепроводов 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÷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», а именно области исследования: «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» (п. 2).

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.

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.

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.

Степень достоверности и апробация результатов.

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.), международной научно-технической конференции «НЕФТЕГАЗОВЫЙ ТЕРМИНАЛ» (г. Тюмень, 02-03 декабря 2021 г.), всероссийской научно-технической конференции (с международным участием) «Проблемы геологии, разработки и эксплуатации месторождений, транспорта и переработки трудноизвлекаемых тяжёлых нефтей» (г. Ухта, 08-10 декабря 2021 г.), всероссийской научно-практической конференции «Комплексное изучение и освоение недр Европейского Севера России» (г. Ухта, 16-17 сентября 2021 г.), межрегиональных вебинарах имени И. Н. Андропова «Актуальные проблемы транспорта нефти и газа» (г. Ухта, 2020-2023 гг.), XVIII международной научно-практической конференции «ТРУБОПРОВОДНЫЙ ТРАНСПОРТ – 2023» (г. Уфа, 16-17 ноября 2023 г.).

Результаты диссертационного исследования **используются** в учебном процессе обучающихся по направлениям подготовки 21.03.01, 21.04.01 Нефтегазовое дело и 21.05.06 Нефтегазовые техника и технологии в рамках дисциплин «Электрохимические методы защиты» и «Пусконаладочные работы при сооружении систем ЭХЗ» (*акт о внедрении от 16.02.2023г.*) (приложение А).

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.*) (приложение Б).

Сведения о публикациях автора.

По теме диссертации опубликовано 15 печатных работ, из них 5 - в ведущих рецензируемых изданиях, включенных в перечень ВАК при Минобрнауки России, в том числе один патент на изобретение (в соавторстве) (приложение В).

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, 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 Агиней 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.

ГЛАВА 1 ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ГРУНТОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НА ПАРАМЕТРЫ ТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ЭКРАНИРОВАНИЯ КАТОДНОГО ТОКА

1.1 Причины, вызывающие несоответствие защитного потенциала требованиям нормативной документации на территории промышленной площадки

Согласно требованиям действующей нормативной документации Российской Федерации [27] все подземные трубопроводы должны быть защищены активными и пассивными средствами защиты от коррозии [24]. В практике эксплуатации площадочных сооружений объектов магистрального трубопроводного транспорта существует проблема ускоренного коррозионного износа подземных сооружений, что в свою очередь приведет к отказам, инцидентам, авариям и к случаям смертельного травматизма [132]. Существует задача предупреждения, которая известна на ведущих предприятиях нефтегазовой отрасли и их актуальность отмечена в программах инновационного развития ПАО «Газпром» и ПАО «Транснефть» [133, 134].

Как показывает практика, довольно распространенным явлением обнаруживается временное или установившееся несоответствие величины поляризационного потенциала нормируемым значениям, причем чаще всего приходится сталкиваться с необеспеченностью на отдельных участках подземных газонефтепроводов требуемого уровня защиты от коррозии. Выявляют подобные нарушения нормируемых требований при новом строительстве либо после проведения работ по реконструкции системы электрохимической защиты или участков подземных трубопроводов на стадии ввода объектов в эксплуатацию путем проведения измерений защитного потенциала с использованием переносных или постояннодействующих электродов сравнения. Кроме того, значение

поляризационного потенциала подлежит постоянному контролю при эксплуатации в рамках проведения комплексных электрометрических обследований трубопроводов промышленных площадок (рисунок 1.1).



а – пересекающиеся трубопроводы; б – коррозионные повреждения металла трубопроводов под покрытием из полимерных лент

Рисунок 1.1 – Технологические трубопроводы промышленной площадки

Причинами локального снижения эффективности работы средств катодной защиты, заключающегося в уменьшении защитного потенциала по абсолютной величине, являются следующие факторы (рисунок 1.2):

- ухудшение защитных свойств изоляционных покрытий;
- влияние источников блуждающих токов;
- взаимовлияние станций катодной защиты, расположенных на территории объекта;
- влияние смежных систем на процесс токораспределения в системе электрохимической защиты;
- неоднородность грунтовых условий на территории промышленной площадки [4].

Необходимо отметить, что особую опасность с точки зрения появления и развития коррозионных повреждений подземных технологических трубопроводов представляют собой сочетания двух или более факторов, приведенных выше. Такие

условия работы могут повлечь за собой рост потребления и неравномерное распределение тока катодной защиты, сокращение ресурса анодных заземлений, а также невозможность ввода в эксплуатацию объектов по причине несоответствия условий работы средств электрохимической защиты требованиям нормативной документации. При возникновении подобной ситуации при проведении пусконаладочных работ либо в результате анализа данных плановых электрометрических обследований принимают решение о необходимости реализации следующих мероприятий или их комплекса (рисунок 1.2) [33, 107]:

- оптимизация параметров катодной защиты (определение такого режима работы, при котором все коммуникации промышленной площадки будут защищены от почвенной коррозии, а суммарная электрическая мощность, расходуемая на защиту, будет минимальной);

- реконструкция средств электрохимической защиты: ремонт или дополнительная установка глубинных или распределенных анодных заземлений, увеличение мощности преобразователей, установка дополнительных установок, дополнительное применение протекторной защиты;

- реализация отдельной защиты коммуникаций площадного объекта;

- реализация мероприятий по реконструкции контура защитного заземления электрооборудования с применением оцинкованных материалов;

- разработка и реализация технических решений по ремонту изоляционного покрытия.

В работах [3, 4, 5, 20, 21, 22, 23, 33, 93] приведены некоторые решения, способствующие повышению эффективности противокоррозионной защиты при наличии негативного влияния блуждающих токов классических и неклассических источников, взаимовлияния нескольких установок катодной защиты и экранирования катодного тока контурами защитного заземления электрооборудования, работающего на территории промышленных площадок.



Рисунок 1.2 – Классификация причин и возможных решений проблемы защищенности участков трубопроводов от коррозии

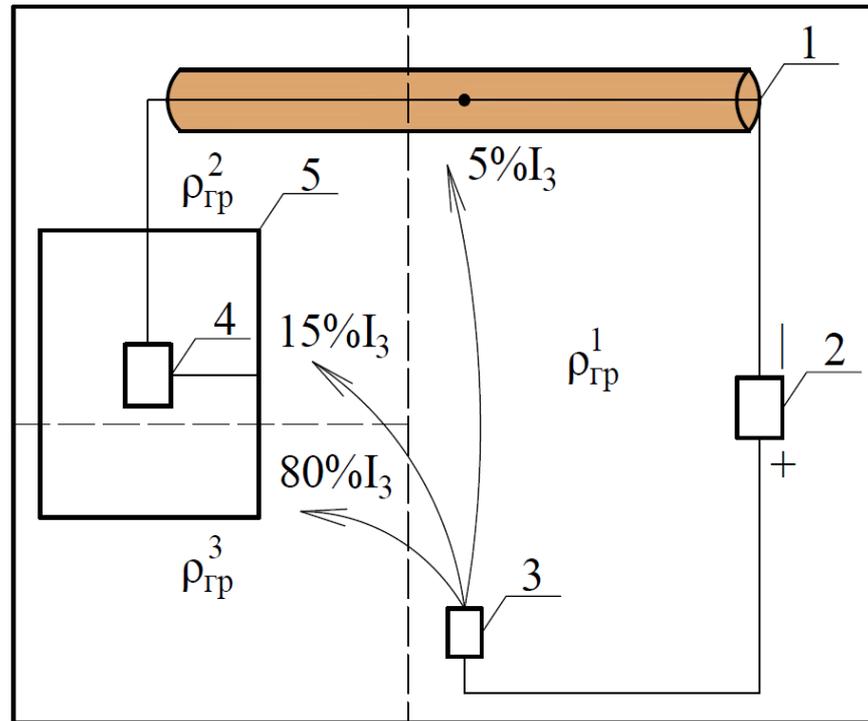
Однако, в настоящее время при проектировании и вводе в эксплуатацию систем электрохимической защиты технологических трубопроводов не учитывается тот факт, что в ряде случаев осуществляется обработка слабонесущего или агрессивного грунта с целью обеспечения его деаэрации, гидрофобизации, нейтрализации щелочами или кислотами, а также производится частичная замена на менее агрессивный грунт или специальная засыпка. Эти мероприятия

направлены на придание грунтам свойств, повышающих надежность использования грунтов в качестве оснований фундаментов объектов, снижающих коррозионную активность среды, в которой эксплуатируются подземные трубопроводы, а также с целью повышения эффективности работы элементов системы защитного заземления и молниезащиты. Такая обработка грунта приводит к изменению его физико-химических свойств, что в конечном итоге, может оказать влияние на параметры токораспределения в системе электрохимической защиты подземных трубопроводов. Особенно это касается обработки грунта в ходе эксплуатации объекта, например, в системе защитного заземления с целью улучшения условий для стекания тока с защитного заземления путем уменьшения удельного электрического сопротивления окружающего его грунта. Учитывая тот факт, что защитные заземления являются элементами, препятствующими нормальному протеканию от анода, входящего в состав установки катодной защиты, к трубопроводу, то повышение эффективности их работы может привести к снижению показателей, характеризующих уровень защиты от коррозии, вплоть до ускоренного развития коррозионных дефектов и износа анодных заземлений.

Кроме того, в действующей нормативной документации не приведены методики, позволяющие оценивать параметры токораспределения в системе электрохимической защиты, изменяющиеся в том числе в зависимости от метода обработки грунта на территории промышленной площадки, что приводит к еще большей неравномерности распределения катодного тока (рисунок 1.3).

В случае, если катоднозащищаемый трубопровод электрически связан с оборудованием, подлежащем заземлению, зачастую возникает опасность натеканию большей части защитного тока на контур или элементы заземления. При этом, если на территории промышленной площадки грунты существенно отличаются по своим характеристикам, что весьма вероятно при реализации мероприятий по обработке грунта вокруг защитного заземления с целью повышения эффективности их работы, то до 80-90% катодного тока натекает на заземление, что существенно влияет на уменьшение поляризационного потенциала по абсолютной величине, приводит к ускоренному нерациональному износу

анодного заземления и повышает вероятность возникновения и развития коррозионных повреждений, что может представлять опасность с точки зрения разгерметизации трубопроводов и выхода из строя оборудования с выходом на поверхность перекачиваемой среды, представляющей опасность для окружающей среды [1].



1 – катодозащищаемый трубопровод; 2 – установка катодной защиты;
 3 – анодное заземление; 4 – электроустановка; 5 – контур защитного заземления; I – ток катодной защиты; $\rho_{гр}^1$, $\rho_{гр}^2$, $\rho_{гр}^3$ – распределение токов в зависимости от УЭС каждого типа грунтов, преобладающих на ПП

Рисунок 1.3 – Схема токораспределения при наличии электрического контакта трубопровода и контура заземления при $\rho_{гр}^1 > \rho_{гр}^2 > \rho_{гр}^3$

Помимо этого, необходимо учитывать возможное влияние смежных систем на параметры электрохимической защиты, которое выражается как правило в непроектном смещении величины защитного потенциала в некоторых участках трубопроводных систем. Например, в работе [33] показано, что зачастую при вводе систем ЭХЗ промышленных площадок в эксплуатацию наблюдаются непроектные

смещения защитного потенциала, что может быть вызвано негативным влиянием контуров защитных заземлений на систему ЭХЗ. Необходимо отметить, что влияние на эффективность противокоррозионной защиты могут оказывать блуждающие токи классического и неклассического источников [3, 4, 5, 20, 21, 22, 23, 35, 95, 96], а также наведенное электромагнитное поле, создаваемое сторонними системами (например, высоковольтными линиями электропередачи переменного тока) [84, 100].

Кроме того, в результате проведенных электроизмерений защитного потенциала выполненных на подземных трубопроводах промплощадки компрессорной станции КС-3 Вуктыльского ЛПУМГ ООО «Газпром трансгаз Ухта», установлено и отмечено следующее:

- выявлены участки с недостаточным и избыточным защитным потенциалом трубопровода;
- установлено, что на ряде трубопроводов имеются одновременно участки с недостаточным и избыточным потенциалом, что свидетельствует о том, что на данных трубопроводах не удастся обеспечить регламентированный потенциал простым регулированием режима работы действующей станции;
- на входном шлейфе насосной станции зафиксировано значение потенциала положительнее минус 0,55 В, что больше потенциала трубопроводной стали в грунте. Этот факт свидетельствует о наличии анодной поляризации, вызываемой, например, блуждающими токами от сторонних источников постоянного напряжения;
- длительное воздействие анодной поляризации может привести к интенсивному разрушению металла трубопровода;
- применение большого количества вертикальных и горизонтальных заземляющих устройств;
- близость расположения оборудования вследствие пространственной ограниченности;
- отступления от проектных решений вследствие недостаточного контроля выполнения строительно-монтажных работ средств ЭХЗ;

– отсутствие контроля и оценки качества выполняемых пусконаладочных работ;

– отсутствие при проектировании расчетов по определению оптимальных параметров катодной защиты при наличии негативного влияния защитных заземлений.

Вышеперечисленные причины, вызывающие колебания величины поляризационного потенциала на территории площадных объектов, приведены без учета наиболее значимого фактора – состояния окружающей среды защищаемых от коррозии трубопроводов и объектов. Общеизвестно, что при наличии дефектов изоляционного покрытия трубопроводов существенное влияние на скорость развития коррозионных процессов оказывают такие грунтовые характеристики как структурный и гранулометрический состав, влажность, состав почвенного электролита, общая кислотность (щелочность) - концентрация водородных ионов, воздухопроницаемость, окислительно-восстановительный потенциал и т. д. На достаточно обширной площади компрессорных, нефтеперекачивающих и газораспределительных станций грунтовые условия, в которых эксплуатируются трубопроводные системы и оборудование, весьма неоднородны. На территории одного объекта могут встречаться различные типы грунтов с большим разбросом значений удельного электрического сопротивления, что в совокупности со сложностью обеспечения нормативных значений защитного потенциала ввиду большого количества взаимнопересекающихся газонепроводов и смежных систем создает значительные трудности при проектировании, вводе в эксплуатацию и обеспечении оптимального уровня защиты от коррозии подземных сооружений [36, 42, 43, 48].

В ходе обзора научно-технической [5, 20, 33, 36, 41, 65, 77, 93] и нормативной документации [17, 26-29, 57, 61, 64, 79-87, 89] установлено, что в настоящий момент отсутствуют исследования влияния грунтовых характеристик на параметры токораспределения, в т.ч. в условиях экранирования катодного тока контурами защитного заземления.

Вышеперечисленные примеры снижения эффективности работы средств

защиты от коррозии свидетельствуют о необходимости проведения комплексных исследований, направленных на совершенствование инструментов оценки влияния различных факторов на параметры электрохимической защиты трубопроводов промышленных площадок.

1.2 Обзор и анализ способов технической мелиорации грунтов, реализуемой на территории промышленных площадок

На этапе строительства, для решения задач упрочнения грунтов прибегают к технической мелиорации, так как большая часть грунтов площадочных объектов по своим прочностным показателям не обеспечивает требования современной нормативной документации. К тому же, практика возведения промышленных объектов показала, что переменные нагрузки, воздействующие на грунты от сооружений и миграция грунтовых вод способствуют снижению их прочности во время эксплуатации, что влечет за собой на этапе строительства разработку специальных инженерно-геологических мероприятий, связанных с вводом в грунты органических компонентов, которые в последствии неким образом влияют на функционирование внешнего покрытия объекта [7, 11, 14, 19, 29, 32, 38, 44, 45, 51, 56, 62, 63, 68, 70, 73, 76, 88, 96, 98, 99, 118].

Современные методы технической мелиорации могут существенно изменять и укреплять природные грунты и придавать им необходимые свойства на стадии проектирования, сооружения промышленных площадок и в трубопроводном строительстве.

Техническая мелиорация грунтов может проводиться как в период сооружения на территории площадных объектов систем различного назначения, так и в период их эксплуатации и/или ремонта. Обработка грунта с целью придания особых свойств, необходимых для дальнейшей эксплуатации систем, может проводиться как в системе основного оборудования и трубопроводов промышленной площадки, так и в сопутствующих системах защитного заземления электроустановок. Классификация методов технической мелиорации грунтов

промышленных площадок в зависимости от цели и стадии реализации представлена на рисунке 1.4.

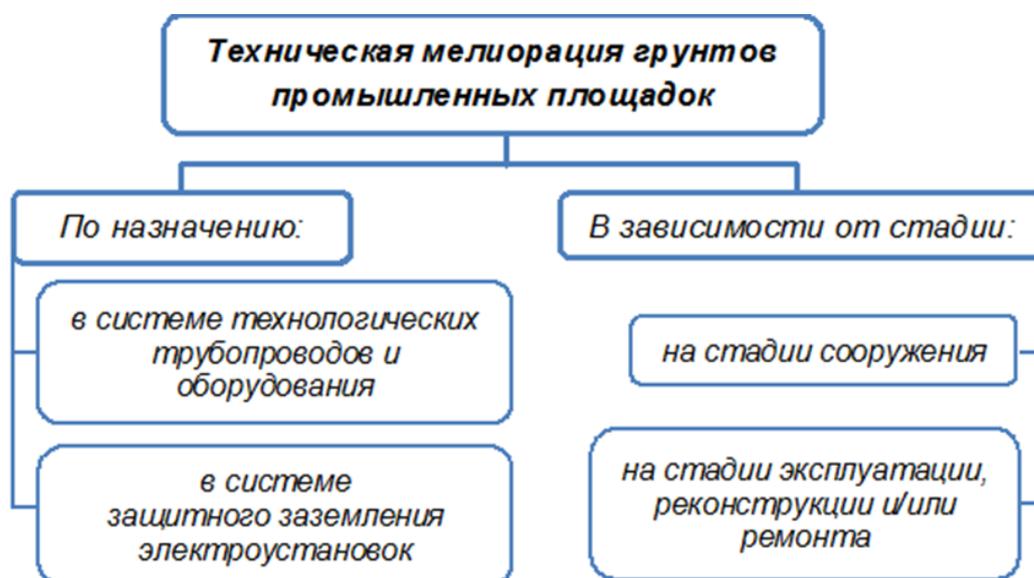


Рисунок 1.4 – Техническая мелиорация грунтов ПП

В практике строительства магистральных трубопроводов и нефтегазовых сооружений выделяют следующие методы, направленные на повышение прочности грунтового массива:

- уплотнение, которое направлено на сокращение межпористого пространства между дисперсными частицами грунта, что приводит к снижению сжимаемости и водопроницаемости грунтового основания;
- закрепление, путем ввода в грунтовой массив разнообразных химических компонентов (органические добавки, цементы, жидкое стекло), добавление в грунт конструктивных элементов (металлической и стеклопластиковой арматуры), искусственного замораживания грунтового массива;
- изменение температурного режима грунтов, путем нагревания или замораживания грунтового массива теплофизическими методами.

Выбор данных методов зависит от ряда критериев:

- инженерно-геологических и климатических характеристики района местности;
- минералогические особенности грунтов;

– наличие и химический состав примесей в грунтах.

Улучшение свойств рыхлых и связных грунтов на стадии проектирования и сооружения трубопроводов промышленных площадок проводится физико-механическими, физико-химическими и химическими методами.

А) Физико-механический (механический и физический) метод дает возможность уплотнять дисперсные грунты внешними нагрузками (давлением, ударами, вибрацией).

Механические способы уплотнения слабых грунтов: 1) трамбование; 2) грунтонабивные сваи; 3) виброуплотнение; 4) энергия взрыва; 5) укатка; 6) гравитация; 7) замачивание.

Для повышения прочностных характеристик дисперсных грунтов с отрицательной температурой используют специальные методы, основанные на следующем воздействии:

– физико-механическом (различные типы уплотнения грунта, укатка, трамбовка, применение камуфлетных зарядов и грунтовых свай, замачивание лессовидного типа грунта, температурное воздействие на грунты, осушение грунта электрическим током);

– физико-химическом (обработка грунта соляными растворами, гидростопами, материалами с пониженной проницаемостью);

– химическом (применение органических и неорганических вяжущих уплотнителей).

Физические методы используют физические поля (электрические, температурные, магнитные). С помощью этих методов повышают плотность, прочность, водо- и морозостойкость грунтов, устраняют просадочные свойства в лессовых образованиях. Наибольшее распространение получили методы, в основе которых положены:

– использование постоянного электрического тока (электрохимическое закрепление и осушение грунтов);

– технологии воздействия на грунты высоких положительных температур (обжиг) и отрицательных температур (замораживание).

Сущность методов заключается в пропускании через сильно влажные глинистые грунты постоянного электрического тока. Для этого в грунт забивают металлические трубы - электроды и пропускают ток. В рамках основной задачи диссертационного исследования рассмотрена возможность повышения эффективности способа упрочнения грунта обработкой электрическим током совместно с вводом специальных химических компонентов в грунт, способствующих улучшению его физико-химических свойств, образованию устойчивых соединений частиц друг с другом, и как следствие обеспечение надежности, коррозионной стойкости и устойчивости возводимых и эксплуатируемых на них площадочных объектов.

Б) Методы «термического закрепления» грунта.

Обжиг. В основе метода «обжиг» лежат высокие температуры, которые обжигают грунты и тем самым придают им прочность. Метод часто называют «термическим закреплением» грунтов. Разработка изобретения по обеспечению устойчивости грунта начались в 30-е годы 19 века и относятся к области промышленного строительства, были предложены различные разработки по заморозке грунта, силикатизации, цементации [6, 7].

Замораживание грунтов — искусственное охлаждение грунтов в естественном залегании до отрицательных температур с целью их стабилизации и достижения водонепроницаемости. Отрицательные температуры используются для временного закрепления обводненных грунтов, главным образом, в целях прекращения движения грунтовой воды и проникновения ее в будущий строительный котлован.

Существуют два практических способа:

- замораживание грунта рассольным способом;
- низкотемпературное замораживание грунта с использованием жидкого азота.

В) Физико-химические методы. Эти методы предназначены для обработки на поверхности земли дисперсных грунтов. Они дают возможность сохранять и даже несколько упрочнять их структуру, защищать ее от воздействия воды. Улучшение

свойств осуществляется путем обработки грунтов небольшим количеством (не более 1-3 % от веса грунта) определенных реагентов, которые воздействуют на поверхность минеральных частиц, грунты после такой обработки значительно увеличивают свою прочность, водо- и морозостойкость, уменьшается их водопроницаемость. Наиболее широко из химических методов применяют битумизацию и смолизацию (органические вяжущие), силикатизацию, цементацию и известкование (минеральные вяжущие). При повышении прочности грунтов под воздействием химических уплотнителей, выделяют поверхностные (применение органических компонентов) и глубинные (применение неорганических примесей) методы. Также существует метод введения физико-химических растворов и материалов, которые подразделяются на следующие виды:

- соли (солонцевание);
- глины (кольматация);
- ПАВы (гидрофобизация).

Помимо этого, имеется практика добавления в грунт углеродных компонентов (дегтя, битумы), которые воздействуют для укрепления межструктурных связей частиц песков, суглинков и супесей.

Рассмотренные методы, основанные на введение различных компонентов в грунт, как показывает практика их использования, имеют различный результат укрепления грунта, однако, наиболее высокие показатели обеспечения прочности, показывает метод добавления в грунт глин, принцип которых основан на заполнении пор и межпорового пространства, обеспечивая в свою очередь непроницаемость и прочность грунта [6].

Битумизация и глинизация грунтов. Битумные и дегтевые материалы применяют для понижения фильтрационных свойств оснований зданий и сооружений и особенно гидротехнических сооружений. Битумизация крупнообломочных грунтов и трещиноватых скальных оснований может осуществляться двумя способами: горячей битумизацией и эмульсионным способом.

Эмульсионная битумизация заключается в нагнетании в грунт с помощью инъекторов жидкой эмульсии. Эмульсия готовится из 60-65% битума, 35-40% воды и эмульгатора. Эмульсионный способ пригоден в тех случаях, что и способ горячей битумизации, а также для закрепления мелких песчаных грунтов.

Глинизацию применяют для снижения водопроницаемости песчаных грунтов. В этом случае через инъекторы, погруженные в грунт, закачивается водная суспензия бентонитовой глины. Глинистые частицы заполняют поры песка, вследствие чего водопроницаемость его заметно снижается.

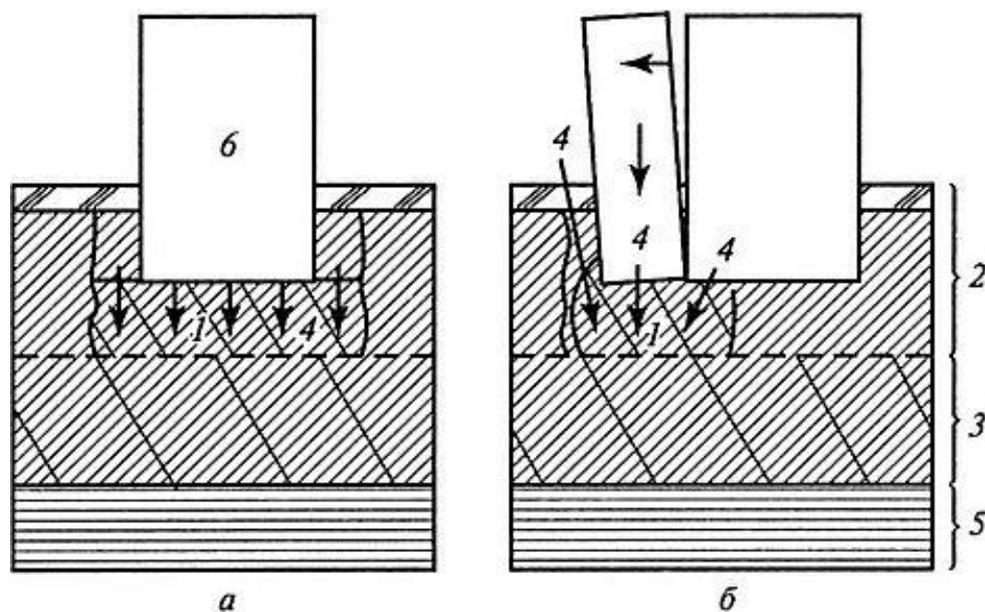
Метод минеральных добавок. Свойства грунтов можно улучшать с помощью добавления в них цемента, синтетических полимеров (смолов) и технического силиката натрия (жидкого стекла) [6, 98].

Закрепление грунта с применением цементного раствора рекомендуется для глинистых и супесчаных грунтов, насыщенных компонентами Са, способствующие к снижению способности размокания и набухания грунта, в особенности применения для этих целей портландцемента [6, 102, 118].

Разновидностью закрепления скальных и просадочных грунтов, а также песков выступают компоненты жидкого стекла (силикатизация), аналогичным образом работающие как цементы (рисунок 1.5).

Процесс силикатизации грунта основан на внедрении в грунтовое основание сооружения силиката натрия через специальные скважины, в результате чего основание приобретает деформационную стойкость как у строящихся, так и уже построенных объектов.

Процесс *цементации* грунтов по своему принципу внедрения аналогичен силикатизации, и основан на введении в скважины инъекторы портландцемента или цемента с добавками, обеспечивающие упрочняющее действие скальных, песчаных, суглинистых и супесчаных грунтов по всей толщине грунта [6, 44].



а – до строительства; б – при деформации зданий в результате просадки в период эксплуатации; 1 – участок силикатизации; 2 – лессовые просадочные грунты; 3 – то же, непросадочные; 4 – направление инъекции; 5 – подстилающая толща; 6 – здания

Рисунок 1.5 – Силикатизация лессовых грунтов

На сегодняшний день в практике улучшения свойств грунтов активно используется способ закрепления путем погружения в грунтовый массив упрочняющих элементов (армогрунты), из различных материалов и геометрического исполнения (сталь, пластмассы, геосинтетические каркасы).

Однако, развитие методов улучшения грунтов является перспективным направлением в области повышения эффективности строительного производства.

Метод химических добавок

При улучшении свойств глинистых грунтов различными добавками необходимо, чтобы грунты имели влажность на уровне $W_{\text{опт}}$. Для поддержания влажности грунтов на уровне $W_{\text{опт}}$ в летнее время грунты предварительно обрабатывают гигроскопическими солями, которые притягивают к себе пары воды из воздуха и имеют слабую испаряющую способность. Например, CaCl_2 , притягивая воду, увеличивают свой вес в 4-5 раз. Внесение в грунты хлористого кальция или хлористого магния обеспечивает в течение продолжительного

времени наиболее благоприятные условия для максимального уплотнения грунтовых смесей.

Метод комплексных добавок

Введение в грунты какой-либо одной добавки (минеральной, органической и т.д.) не всегда дает положительный эффект. Цементогрунты – хрупкие, имеют недостаточную морозостойкость и истираемость, битумогрунты – недостаточно прочные, излишне пластичные. Недостатков методов можно избежать, если одновременно применять несколько методов, или комплекс добавок. При этом одна добавка является основной, а другие – дополнительными, восполняющими недостатки основной добавки. Как одним из перспективных способов повышения прочностных характеристик грунтов является введение в них поверхностно-активных веществ ПАВ (CaCl_2 , Na_2CO_3 , MgSO_4), способствующих снижению воздействия минеральных вод на проницаемость поверхности.

Для получения высоких строительных свойств грунтов (обеспечения прочности, водостойкости, морозостойкости) применяют комбинированный способ введения добавок, а именно совместно с добавлением химических реагентов вводят такие компоненты как цемент, битум, известь, которые в свою очередь передают грунту свое свойство.

При строительстве подземных трубопроводов в грунтах с добавками обеспечивается минимизация воздействия коррозионных процессов и биокоррозии на объект, не допускаются процессы смерзания конструктивных элементов с грунтом, увеличивается водостойкость грунтового массива, что предотвращает процессы размыва грунта под сооружением.

Одним из вариантов в качестве тепловой изоляции трубопроводов применяется специальная обсыпка участка грунтами с добавлением нефтяной смеси, находящейся в объеме порядка 8% от веса грунта [42].

Закрепленный нефтяным остатком грунт обладает высокой балластирующей способностью, что влечет за собой не только экономически эффективную технологию упрочнения грунтов при строительстве магистральных трубопроводов, но и определяет качество сооружения МТ и сокращает сроки

строительства. В зависимости от диаметра трубопровода и свойств грунтов определяют схему закрепления грунтов, которая разделяется на две группы: сплошным слоем (для МТ $D < 720$ мм) или в виде отдельных закреплённых участков (для МТ $D > 720$ мм).

Для магистральных трубопроводов при закреплении грунта используют добавки в виде остатка гудрона нефти совместно с легким газойлем и нефтяной битум [6, 47, 49, 50].

Помимо способа закрепления грунта, существуют еще ряд перспективных способов улучшающие его механические свойства:

- деаэрация электролита грунта (уменьшение концентрации кислорода воздуха в почве, производится инертным газом) [5, 21, 93];
- снижение вероятности процессов биокоррозии (введение в грунт химических компонентов типа извести) [8];
- применение гидростопов (гидрофобизация, осуществляется вводом компонентов, которые делают грунты водоустойчивыми) [50];
- улучшение физико-механических свойств, путем замены естественного грунта на менее коррозионно-активный, ввод кислот и щелочей в грунт (нейтрализация) [47, 49].

Наличие в грунте растворенных химических элементов способствует его коррозионной активности при контакте с металлическими объектами. Активному коррозионному воздействию подвергаются подземные трубопроводы промышленных площадок, которые располагаются на глубине до 2х метров, где грунт наиболее коррозионно-активный и способствует электрохимическому разрушению металла [102]. Однако существует прямая связь между физико-химическими свойствами грунтов и скорости протекания процесса коррозии металлических объектов (таблица 1.1).

В отечественной практики за критерий оценки коррозионной агрессивности грунта по отношению к стальным подземным сооружениям принят параметр удельного электрического сопротивления [26].

Таблица 1.1 – Скорость коррозии металла в различных грунтах

Вид грунта	Единицы измерения	
	мм/год	г/(м ² ·год)
Нейтральный (песок, глина, каменистый грунт, $\rho_{гр.} > 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$)	0,01-0,05	70-350
Коррозионно-активный (суглинистые, лесные, слабые черноземы, $20 \leq \rho_{гр.} \leq 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ (торфяники, черноземы, перегной, $\rho_{гр.} < 20 \text{ Ом}\cdot\text{м}$)	0,05-0,2	350-1400
Неаэрированный (глинистый, влажность 30%, содержащий раствор 20% NaCl, температура: 250С, удельное электросопротивление: $\rho_{гр.} = 2,8 \text{ Ом}\cdot\text{м}$)	0,1-0,4	700-2800

В виду неоднородности залегания грунтов вдоль трасс протяженных объектов транспорта углеводородов, на разных участках трубопровода образуются различные потенциалы из-за разности притока кислорода к поверхности трубы.

Такое явление обуславливает процессы дифференциальной аэрации, которые возникают вследствие изменения сопротивления грунта на участках подземной прокладки трубопровода. В грунтах, которые содержат большое количество растворенных солей и малый приток кислорода к своей поверхности, образуются аноды, как правило их называют низкоомные грунты. В грунтах, где имеется малое количество солей и большой приток кислорода, возникают катоды и называют такие грунты – высокоомные.

Существует ряд параметров, которые в той или иной мере способствуют возникновению и скорости грунтовой коррозии, влияющей на целостность подземных трубопроводов, к ним относят: общие и специфические физико-химические свойства грунтов, наличие минералов и водородных ионов, концентрация микроорганизмов в почве и гальванической пары.

Как было отмечено ранее, на территории промышленных площадок обработка грунта может проводиться не только с целью снижения скорости коррозии, расхода металла анодных заземлений, улучшения работы протекторных

сплавов и т.п., но и с целью повышения эффективности работы защитных заземлителей электроустановок. Надежность защитного заземления зависит от:

- геоэлектрической структуры грунтов,
- величины удельного электрического сопротивления грунта,
- правильного выбора оптимального метода расчета заземляющих устройств и их рациональных конструкций [10, 55].

В качестве активных методов защиты трубопровода от коррозионных процессов в зависимости от удельного электрического сопротивления грунта используют широкий ряд разнородных заземлителей, самыми распространёнными из которых являются вертикальные, горизонтальные и глубинные. Однако, применение таких заземлителей связано с рядом трудностей, которые заключаются в высоких затратах на монтажные и эксплуатационных работы, увеличение металлоемкости схемы заземления, наведению высокого потенциала из контура заземления на близлежащие токопроводящие части технологических объектов.

Для искусственного снижения переходного электрического сопротивления электрод – грунт и повышения эффективности заземлителей, сегодня используется различные виды около электродных заполнителей, такие как: засыпка из минеральных солей, засыпка из глины, а также угольная засыпка или коксовая мелочь и некоторые другие. Опыт показывает, что максимальное уменьшение сопротивления заземления достигается при использовании электролитов, древесного угля и коксовой мелочи. Наиболее популярные из них:

А) Добавление в грунт минеральных солей

Засыпка из минеральных солей вокруг заземлителя повышает электропроводность грунта, так как соль, смешиваясь с грунтовой влагой, превращается в электролит. Для снижения сопротивления высокоомных грунтов для проводимости защитного тока применяют раствор поваренной соли, которая в свою очередь предотвращает образование ледяных образований на самом заземлителе в период зимы, а также применяют хлористый кальций и сернокислую медь. Однако, соль агрессивно влияет на ресурс материала электрода (около 8 лет), вызывая процесс его коррозии. Кроме того, со временем концентрация электролита

в грунте понижается за счет вымывания солей из грунта весенним таянием и после дождей в летний период, в результате чего снижается срок эффективной работоспособности электрода до 40% за 3-4 года. Таким образом, данный метод имеет прямую зависимость от скорости миграции влаги в грунте, и является совершенно неприемлемым в скальных и гравелистых грунтах. Указанным способом можно добиться сравнительно большого снижения величины сопротивления заземления, но непродолжительный срок (2-4 года), после чего требуется пропитывать грунт электролитом [75].

Практически можно использовать два способа искусственного снижения удельного сопротивления грунта: создание вокруг заземлителя зоны с пониженным удельным сопротивлением и обработка грунта солью [37].



Рисунок 1.6 – Создание вокруг заземлителя зоны с пониженным удельным сопротивлением

Для создания вокруг заземлителя зоны с пониженным удельным сопротивлением в грунте делается выемка (котлован) радиусом 1,5-2,0 м и глубиной, равной длине забиваемого стержня. После заполнения выемки грунтом (рисунок 1.6) устанавливается заземлитель и грунт утрамбовывается. В качестве

грунта-заполнителя может быть применен любой грунт, имеющий сопротивление в 5-10 раз меньше, чем удельное сопротивление основного грунта. Если заземление устраивается в песчаном или каменистом грунте, то заполнителями могут быть глина, торф, чернозем, суглинок, шлак. Таким способом достигается снижение сопротивления заземления в среднем в 2,5-3,0 раза.

Сопротивление растеканию тока R_3 , Ом, в случае окружения заземлителя грунтом с другим удельным сопротивлением находится по формуле:

$$R_3 = \frac{1}{2\pi l} \left[\rho_n \ln \frac{2l}{r_0} + \frac{1}{2} (\rho - \rho_n) \ln \frac{\sqrt{l^2 + r^2 + l}}{\sqrt{l^2 + r^2 - l}} \right], \quad (1.1)$$

где ρ – удельное сопротивление основного грунта, Ом·м;

ρ_n – удельное сопротивление грунта-заполнителя, Ом·м;

r_0 – радиус стержня заземлителя, м;

r – радиус выемки котлована, м;

l – глубина котлована, приблизительно равная длине заземлителя, м [94].

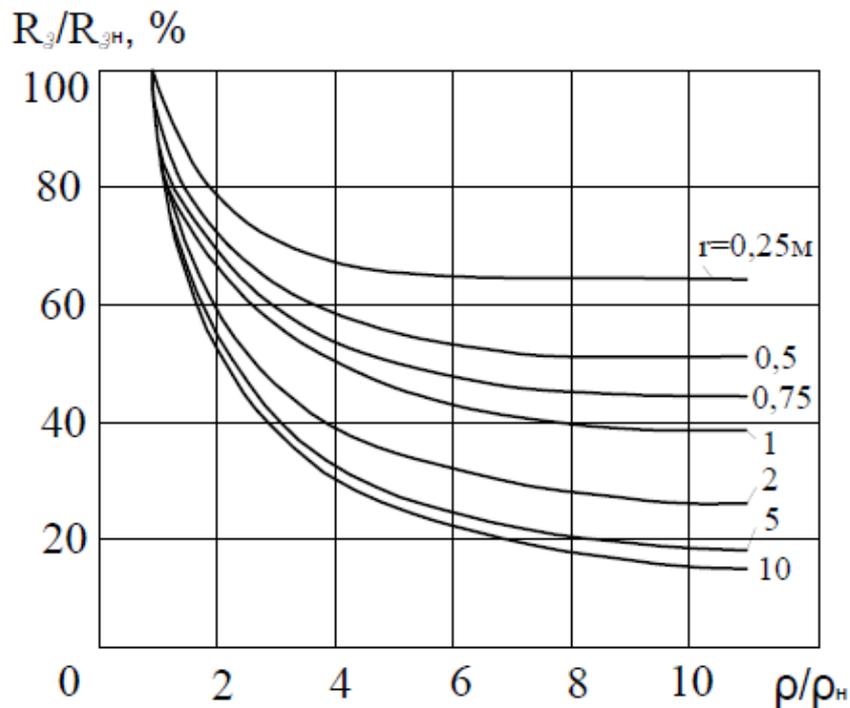


Рисунок 1.7 – Относительное снижение сопротивления заземления в случае применения насыпного грунта при различных радиусах выемки

На графике приведены кривые изменения (в %) отношения сопротивления R_3 заземлителя, помещенного в котлован с насыпным грунтом, к сопротивлению $R_{3Н}$ заземлителя, помещенного в основной грунт, в зависимости от отношения удельного сопротивления основного грунта ρ к удельному сопротивлению насыпного грунта ρ_H . Эти кривые для котлованов с радиусом $r = 0,25-10$ м.

Чтобы снизить температуру замерзания грунта и уменьшить его удельное сопротивление применяют обработку грунта поваренной солью, как один из самых действенных и дешевых способов [66, 67].

Существуют разные способы укладки соли близ заземлителя. В практике распространена укладка около трубчатого заземлителя соли слоями так, как это показано на рисунке 1.8 а. Соль может также укладываться вся на глубине возле трубчатого заземлителя (рисунок 1.8 б) или на небольшом расстоянии от него (рисунок 1.8 в). Последний способ является более удобным в том отношении, что коррозия заземлителя в этом случае будет минимальной.

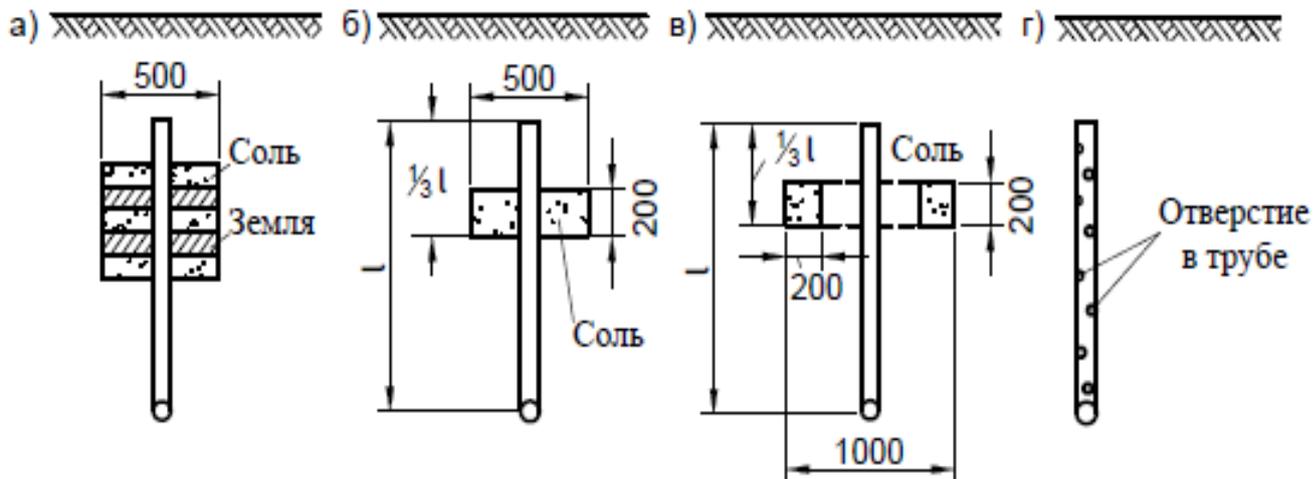


Рисунок 1.8 – Способы укладки соли около вертикального заземлителя

Количество соли, требующееся для обработки заземления, зависит от длины электрода: от 1,5 до 10 кг на 1 м заземлителя. Иногда солью заполняется пространство внутри заземлителя, выполненного в виде полой трубы с отверстиями, через которые раствор соли выходит в окружающий грунт (рисунок 1.8 г).

Однако, грунт с солью имеет неоднородную степень обработки в толще и ограниченный срок снижения сопротивления (около 4 лет), а зона обработки и стойкости распространения напрямую зависит от гранулометрического состава грунта и их физико-механических свойств. Оптимальное снижение сопротивления грунта, обработанного солью проявляются на 2-3ий год, а к концу 4ого года значительно уменьшаются. Таким образом, данный способ обработки грунта, проявил некоторые недостатки, связанные с необходимостью периодической обработки (раз в 2-4 года) и скорому разрушению заземлителей, в результате воздействия на них соленых растворов [66].

Делались попытки устранить эти недостатки. Так, в Германии был предложен способ, по которому в грунт вокруг заземлителя вводятся металлы в тонкоизмельченном виде, как, например, в коллоидных растворах, или в виде мелкой металлической стружки [66]. Если при этом тонко измельченные металлы выбраны так, чтобы не могли возникать гальванические пары с самим заземлителем, то последний корродировать не будет.

Однако коллоиды не более устойчивы в грунте, чем соли и соляные растворы. Они постепенно вымываются из близлежащих к заземлителю слоев дождевой водой, вследствие чего достигнутое уменьшение сопротивления заземлителя с течением времени пропадает. В США предложен способ задержания вымывания соляных растворов из грунта путем смешивания соляного раствора (медный купорос) с нерастворимой в воде пластмассовой смесью и впрыскивания их в грунт под большим давлением [116, 117]. Этот способ является дорогим и продолжительность его действия не определялась.

Из других способов искусственного снижения сопротивления заземлителей, предложенных в различных странах, в первую очередь заслуживает внимания шведский способ – обработка грунта вокруг заземлителя при помощи электролитов, образующих гель.

В результате смешения концентрированного раствора сернокислой меди с эквивалентным количеством концентрированного раствора соли щелочного синеродистого железа получается нерастворимый в воде продукт реакции -

железистосинеродистая медь, которая при известных условиях образует однородный электропроводящий гидрогель. Электрические и физические свойства гидрогеля не меняются сколь-либо существенно от длительного воздействия воды и являются устойчивыми при колебаниях температуры в пределах от -60 до $+60$ °С. Однако он эффективен при снижении очень высоких сопротивлений заземлений (порядка 400-600 Ом) и малоэффективен при величинах сопротивлений порядка 20-30 Ом.

Б) Замена грунта вокруг электрода глинистой смесью

Так как электрическое сопротивление заземлителя прямо пропорционально удельному сопротивлению окружающего грунта, то замена части грунта вокруг электрода на глину, например бентонит, которая имеет хорошую электропроводность, решает эту проблему. Дополнительным плюсом является то, что глина не растворима в воде и практически не вымывается из приэлектродного пространства. Например, на промплощадках компрессорных станций КС-9 «Малоперанская» и КС-14 Приводинского ЛПУМГ грунты песчаные с удельным сопротивлением 1000 Ом·м. Искусственно снижают удельное сопротивления данного грунта с помощью грунта-заполнителя вокруг заземлителя. В качестве заполнителя служит глина, имеющая удельное сопротивление в 5-10 раз меньше, чем удельное сопротивление основного грунта. Таким способом достигается снижение сопротивления заземления в среднем в 2,5-3 раза.

Существенным недостатком этого способа является значительное объемное расширение глины (до 300%) при насыщении ее водой, и при высыхании, что приводит к образованию воздушных полостей между глинистым заполнителем и телом заземлителя и резкому увеличению переходного сопротивления электрод – грунт. Кроме того, глина относится к пучинистым грунтам, в результате чего возрастает вероятность, так называемого, «морозного выдавливания» заземлителя из грунта. В засушливый сезон, высыхая, глина превращается в барьер для воды, который не позволяет грунтовой влаге проникать к заземлителю.

В) Угольная засыпка или засыпка коксовой мелочью

Несмотря на хорошую электропроводность, такие засыпки плохо удерживают влагу вокруг заземлителя из-за низкой смачивающей способности угля, что существенно сказывается на величине электрического сопротивления заземления, особенно в засушливых районах. Кроме того, неоднородность фракции заполнителя приводит к недостаточной сплошности засыпки и образованию воздушных полостей в приэлектродном пространстве, что также негативно влияет на общую эффективность работы ЗУ.

При устройстве заземлений, дистанционно питаемых по системе «трубопровод-земля», анодных заземлений установок катодной защиты от коррозии трубопроводов, а также других заземлений, находящихся в процессе эксплуатации под положительным потенциалом относительно земли, т.е. подвергающихся в процессе эксплуатации растворению вследствие электролиза, между электродами и землей целесообразно укладывать слой коксовой мелочи.

Применение стальных электродов в коксовой засыпке исключает необходимость использования для снижения величины сопротивления заземления соли, которая разрушающе действует на стальные электроды.

Как один из способов снижения параметра сопротивления грунта применяют стальные электроды в специальной коксовой засыпке, что исключает применение обработки грунта солью, которая разрушает электроды. При этом существуют специальные условия применения коксовой засыпки, а именно оптимальное значение удельного электрического сопротивления грунта (порядка $0,1 \text{ Ом} \cdot \text{м}$) и требуемая величина сопротивления заземления для его долговечной работы без замены.

На промышленных площадках «Амурский газоперерабатывающий завод» ПАО «Газпром» и ГКС «Сахалин» для искусственного снижения переходного электрического сопротивления электрод – грунт и повышения эффективности заземлителей используется коксо-минеральный активатор, т.к. на площадках высокоомный грунт-песок с удельным сопротивлением $400-1500 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Система катодной защиты на этих площадках включает в себя глубинные анодные

заземлители из блоков типа «Менделеевец МГ». В скважину и прианодное пространство был засыпан коксо-минеральный активатор фракцией не более 20 мм на высоту 0,2 м.

Г) Устройство электролитического заземления

На протяжении нескольких десятилетий наиболее распространенным методом защиты энергоустановок от разрушительного воздействия токов большой величины являются системы электролитического заземления. Впервые данная технология была запатентована в 1971 году в США, и до недавнего времени именно Штаты оставались основным поставщиком оборудования для заземления на российском рынке.

Однако практика применения западных систем заземления в нашей стране ярко продемонстрировала их недостаточную эффективность для отечественного потребителя. Дело в том, что надежность работы заземлителя во многом зависит от удельного электрического сопротивления среды, в которую он погружен, – то есть от таких характеристик грунта, как почвенный состав, годовой разброс температур, содержание грунтовой влаги, степень засоленности, наличие многолетней мерзлоты и т. д. А между тем российские промышленные объекты зачастую расположены в районах с экстремальным климатом и, как следствие, стоят на изолирующем грунтовом основании (вечномерзлый грунт, каменистый грунт и скальные породы, сухой песок). К столь жестким условиям западные системы заземления оказались попросту не приспособлены. В результате чего нашли оптимальное решение, которое легло в основу «МАГ-2000» - минеральный активатор электродов, представляющий собой сухую смесь, которая при затворении водой превращается в нерастворимый электропроводящий гидрогель, не меняющий свои свойства сколь угодно долго, способный работать в большом температурном диапазоне от -60 до +60 °С. Данная технология реализована в минеральном активаторе МАГ-2000 (пр-во ООО «Бипрон», РФ), который используется в качестве засыпки около электродного пространства в системах заземления, при укладке заземлителей в грунты, удельное сопротивление которых более 40 Ом·м. Впервые электроды «Бипрон-30ВВ» с использованием

минерального активатора МАГ-2000 были использованы для заземления подстанции при нефтеперекачивающей станции № 12 нефтепровода ВСТО, а также для заземления емкостей для хранения сжиженного газа на заводе по переработке газа и конденсата ОАО «ЯТЭК» в пос. Кысыл-Сыр (Якутия).

Для натекания защитного тока в высокоомных грунтах на защищаемый трубопровод используют специальный запатентованный комплект МАГ-2000 с удельным сопротивлением порядка $0,04 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, который в свою очередь хорошо удерживает влагу вокруг электрода, обеспечивает однородность засыпки и выравнивание потенциалов между взаимодействующими объектами [30]. Данный комплект представляет из себя сухую смесь в мешках по 30 кг, которая подлежит разбавлению водой перед использованием.

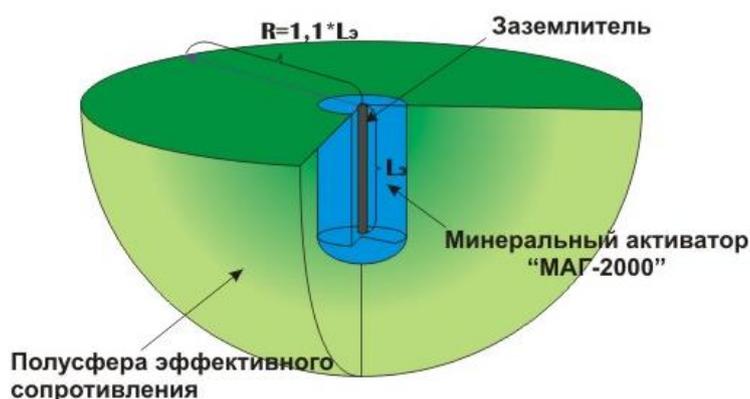
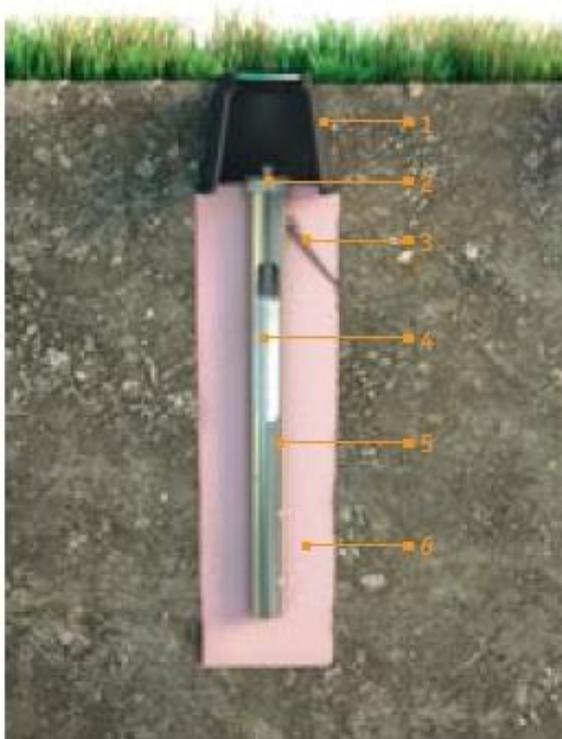


Рисунок 1.9 – Совместное использование заземлителя «Бипрон» и минерального активатора «МАГ-2000»

Наиболее действенным данный наполнитель проявил себя при использовании его совместно с электродами «Бипрон», имеющим перфорационные отверстия в стенках заземлителя, через которые активатор проникает в грунт, преобразуя электролитическую связь. Такой наполнитель выбирается исходя из почвенно-климатических условий и показывает высокую эффективность, имея небольшую длину до 6 м.

Заземлители «Бипрон» выпускаются в горизонтальном и вертикальном исполнениях и поставляются готовыми комплектами, благодаря чему:

- значительно сокращаются трудозатраты на устройство контура заземления [30];
- требуется минимум машин и инструмента;
- обеспечивается удобство монтажа даже в самых труднодоступных районах за счет небольшого веса комплектов заземления;
- сокращаются затраты на транспортировку заземлителей к месту монтажа.



- а) вертикальные электроды «Бипрон» б) горизонтальные электроды «Бипрон»
- 1 – сервисный колодец; 2 – резьбовая заглушка; 3 – кабель присоединения к проводнику; 4 – электролитический модуль; 5 – отверстия (перфорация) в стенках; 6 – минеральный активатор электрода МАГ-2000

Рисунок 1.10 – Схема установки электрода «Бипрон»

Общая классификация методов технической мелиорации при строительстве, эксплуатации, реконструкции и/или ремонта трубопроводных систем и методы обработки грунта в системе защитного заземления представлена на рисунке 1.11.

В результате обзора методов технической мелиорации грунтов промышленных площадок, выполняемой с целью придания особых свойств на стадии сооружения, эксплуатации и/или ремонта трубопроводных систем и оборудования, а также смежных систем, обеспечивающих бесперебойную и безопасную работу оборудования, сосредоточенного на территории компрессорных, нефтеперекачивающих, газораспределительных станций и других площадных объектов нефтегазовой промышленности, разработана классификация, представленная на рисунке 1.11.

Отметим, что не все из представленных методов технической мелиорации способны изменять свойства и состав грунта, оказывая влияния на параметры токораспределения в системе «катоднозащищаемый объект – грунт». Выполним анализ особенностей влияния методов обработки на основные параметры грунтов промышленных площадок.

На параметры токораспределения в системе катодной защиты подземных трубопроводов главным образом влияют температура, влажность, минерализация (наличие хлоридов, сульфатов), скопления газовой фазы и коррозионная активность [1, 2, 38, 48, 90].

В таких условиях регулирование параметров ЭХЗ трубопроводов не приведет к ожидаемому повышению уровня защиты от коррозии, поскольку на территории промышленной площадки могут наблюдаться множество электрических соединений катоднозащищаемых трубопроводов с защитными заземлениями, работающими в обработанном грунте, обеспечивающем наиболее интенсивное перетекание защитного тока от системы ЭХЗ к заземлениям электроустановок.

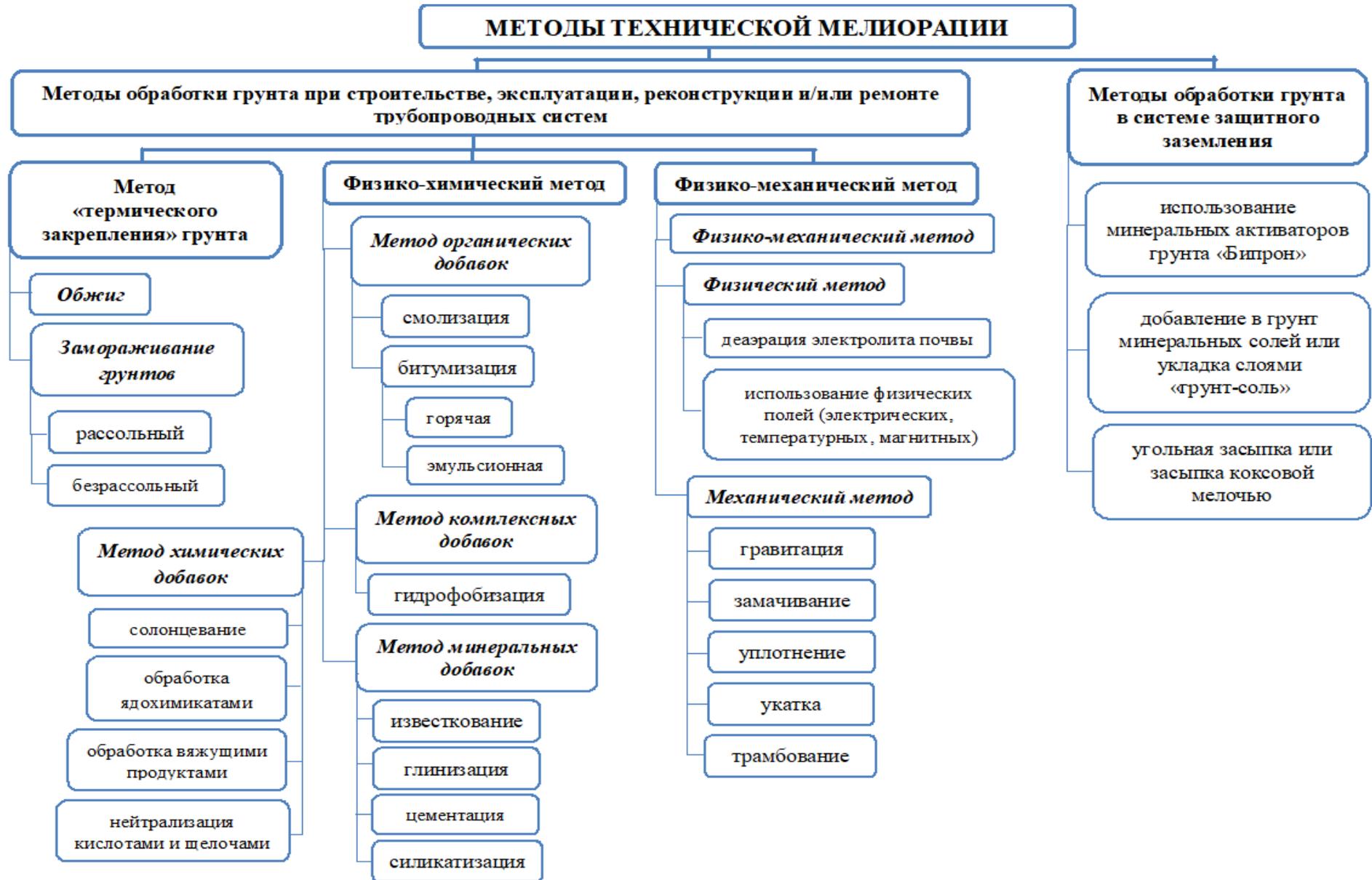


Рисунок 1.11 – Классификация методов технической мелиорации грунтов

В таблице 1.2 показано, что основными причинами изменения условий протекания катодного тока являются различные способы обработки грунта в системе защитного заземления с целью уменьшения электрического сопротивления заземлителей. Данная проблема осложняется тем, что сами заземлители, выполненные как правило из меди, черной или оцинкованной стали, зачастую вызывают экранирование катодного тока, т.е. натекание большей части защитного тока на заземлители электроустановок. Это снижает работоспособность и срок службы анодных заземлений, а также приводит к тому, что коэффициент загрузки преобразователей станций катодной защиты по току и мощности превышает 0,7-0,8, что снижает их надежность и приводит к невозможности обеспечения эффективной противокоррозионной защиты трубопроводов [35, 36].

Таблица 1.2 – Анализ влияния методов технической мелиорации на характеристики грунтов промышленных площадок

Метод обработки грунта	Температура грунта	Влажность грунта	Минерализация грунта	Пористость грунта	Проницаемость грунта	Коррозионная активность
1	2	3	4	5	6	7
Метод «термического закрепления» грунта: - обжиг; - замораживание грунтов	↑ ↓	↓	-	↓	↓	↓ ↑
Метод органических добавок: - смолизация; - битумизация	↑	↓	-	↓	↓	↓
Метод комплексных добавок: - гидрофобизация	-	↓	-	-	↓	↓
Метод химических добавок: - солонцевание - обработка ядохимикатами - обработка вяжущими продуктами - нейтрализация кислотами и щелочами	↑	↓	↑	↓	↓	↑

Продолжение таблицы 1.2

Метод минеральных добавок: - известкование - цементация - глинизация - силикатизация	↑	↓	↑	↓	↓	↓
Физический метод - деаэрация электролита почвы	-	-	-	-	↓	↓
Механический метод: - гравитация - замачивание - уплотнение - укатка - трамбовка	-	↓	-	↓	↓	↓
Методы обработки грунта в системе защитного заземления: - использование минеральных активаторов грунта - добавление минеральных солей - добавление угольной засыпки или коксовой мелочью	↑	↓	↑	↓	↓	↓
Примечание: «-» - не оказывает влияние на показатель; «↑» - количественное увеличение показателя; «↓» - количественное уменьшение показателя.						

В таких условиях регулирование параметров ЭХЗ трубопроводов не приведет к ожидаемому повышению уровня защиты от коррозии, поскольку на территории промышленной площадки могут наблюдаться множество электрических соединений катоднозащищаемых трубопроводов с защитными заземлениями, работающими в обработанном грунте, обеспечивающем наиболее интенсивное перетекание защитного тока от системы ЭХЗ к заземлениям электроустановок.

Устранить электрическую связь систем ЭХЗ и защитного заземления практически невозможно, поскольку зачастую это приведет к повышению опасности поражения током персонала, обслуживающего большое количество

электрооборудования, подлежащего заземлению в обязательном порядке [17, 52, 53, 54].

Кроме того, существуют определенные трудности в согласовании не только проектных решений службами электроснабжения и ЭХЗ, касающихся оптимального расположения подведомственных объектов с целью минимизации их влияния друг на друга, но и определенных действий в ходе пусконаладочных работ и эксплуатации системы защитного заземления (перенос или установка дополнительных заземляющих электродов, установка перемычек с целью уравнивания потенциалов, обработка грунта с целью улучшения процесса стекания тока в грунт и т.п.).

Методика проектирования средств электрохимической защиты трубопроводов промышленных площадок подразумевает использование в качестве исходных данных для расчета сопротивления растеканию трубопровода величины среднего удельного электрического сопротивления грунта, вычисляемого по формуле [59, 84]:

$$\rho_2 = L_3^2 \cdot \left(\sum_{i=1}^n L_i / \sqrt{\rho_i} \right)^{-2}, \quad (1.2)$$

где L_3 – длина защитной зоны, м;

L_i – длина i -го участка с удельным электрическим сопротивлением ρ_i , м;

n – количество участков грунта.

Величина среднего удельного электрического сопротивление грунта ρ_r [Ом·м] используется в действующих стандартах для определения усредненного значения удельного электрического сопротивления грунта на стадии проектирования систем ЭХЗ на территории промплощадок в центре квадратов со стороной 10 (м) × 10 (м) со стороной, равной 10 м (количество квадратов определяется из общей площади объекта).

Такой подход оценки свойств грунта на территории объекта является упрощенным и 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, а определение усреднённого значения удельного электрического сопротивления грунта не позволяет учесть его неоднородность, а также отсутствие рекомендаций по оценке неоднородности по глубине в результате установки глубинного анодного заземления, в связи с этим существенно снижается достоверность расчетных параметров систем и оборудования, что снижает эффективность и долговечность их функционирования. Появление погрешности измерения уже на стадии изысканий и проектирования, дальнейшая обработка грунта в случае, если он слабонесущий и обработка грунта вокруг защитных и анодных заземлений, приводит к необходимости совершенствования методики измерений удельное сопротивление, оценки результатов и влияния на параметры ЭХЗ на территории промплощадок.

Таким образом, можно сделать вывод, что проведение исследований влияния грунтовых характеристик на параметры токораспределения в условиях экранирования катодного тока с целью разработки методики определения оптимальных грунтовых условий для обеспечения требуемых параметров противокоррозионной защиты трубопроводов промышленных площадок является актуальной научно-технической задачей, решение которой позволит повысить эффективность защиты от коррозии технологических трубопроводов и оборудования [101, 103, 105, 106].

1.3 Выводы по главе 1

1. На основании проведенного обзора научно-технической литературы разработана классификация, позволяющая систематизировать основные методы технической мелиорации грунтов, реализуемые на территории промышленных площадок нефтегазопроводов, а также выявить основные методы, оказывающие

влияние на параметры токораспределения в системе электрохимической защиты подземных участков трубопроводов.

2. Установлено, что в действующей нормативной документации отсутствуют методики оценки влияния на параметры грунта различных методов обработки, в т.ч. проводимой для улучшения эффективности работы объектов смежных систем.

3. Показано, что для улучшения условий протекания катодного тока в системе «трубопровод-грунт» необходимо совершенствовать методику проектирования средств электрохимической защиты трубопроводов с учетом имеющегося или возможного влияния контуров защитного заземления электроустановок, а также разработать методику определения оптимальных грунтовых условий для обеспечения требуемых параметров противокоррозионной защиты трубопроводов промышленных площадок.

На основании выводов по главе 1 можно сформулировать цель и задачи настоящего исследования.

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÷700) Ом·м и объемной концентрации до 0,4.

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

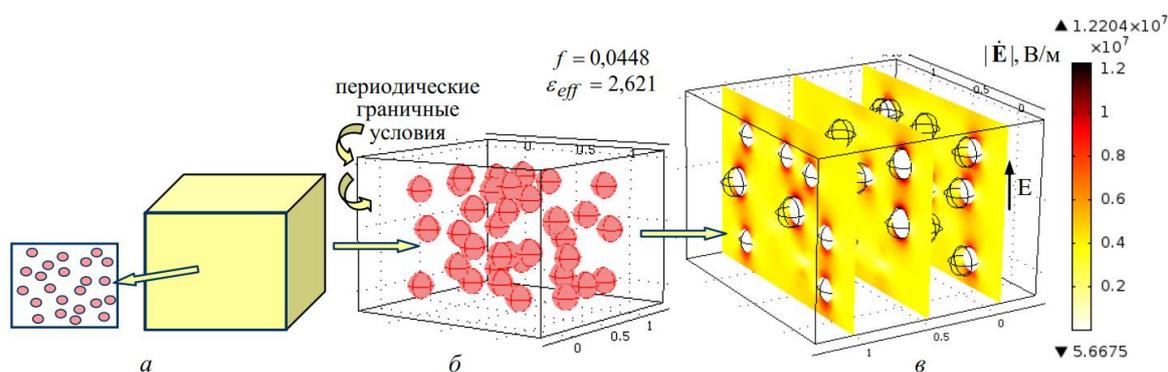
4. Разработать методику учета неоднородности грунтовых условий при проектировании средств электрохимической защиты газонефтепроводов промышленных площадок для обеспечения эффективности ее работы.

ГЛАВА 2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ГРУНТА С УЧЕТОМ НЕОДНОРОДНОСТИ ЕГО ХАРАКТЕРИСТИК

2.1 Анализ подходов к моделированию неоднородности грунтовых условий

Различают общие формулы, которые позволяют рассчитать интегральный показатель объема гетерогенной среды, содержащей сферические включения, оказывающие влияние на распределение напряженности электрического поля. Это формулы Максвелла, Бруггемана, Лихтенекера, Релея, Бетхера, Лорентца-Лоренца и другие, применяемые отдельно в каждом конкретном случае в зависимости от вида гетерогенной среды (например, при наличии сферических, цилиндрических включений или многослойных сред), а также в зависимости от расстояния включений друг от друга и соотношения проводимости среды. Для определения показателей проводимости и электрического сопротивления грунта как статистической смеси могут быть использованы формулы для двухкомпонентных или многокомпонентных сред, например, формула К. Лихтенекера [45, 110].

Рассматриваемая двухкомпонентная статистическая смесь схематически отображена на рисунке 2.1 а, расчетная область со сферическими включениями объемной фракции $f = 0,0448$ показана на рисунке 2.1 б. В таком случае распределение напряженности электрического поля в трех различных сечениях расчетной области приведено на рисунке 2.1 в. Более сложный характер распределения поля в области обусловлен расположением в ней включений случайным образом [45] (рисунок 2.1).



а – схема двухкомпонентной статистической смеси; б – расчетная область со сферическими включениями объемной фракции $f = 0,0448$; в – распределение напряженности электрического поля в трех различных сечениях расчетной области [45]

Рисунок 2.1 – Распределение напряженности электрического поля в матричной смеси со сферическими включениями при различном объёмном содержании включений f и эффективного интегрального показателя композиционной среды ϵ_{eff}

В таблице 2.1 представлены различные варианты моделей расчета интегрального показателя проводимости среды.

Таблица 2.1 – Модели расчета интегрального показателя проводимости среды для ПП

N п/п	Вид гетерогенной среды	Условия применения	Модель расчета интегрального показателя проводимости среды
1	2	3	4
1	Композит, содержащий n слоев	Параллельное соединение слоев	$\epsilon_c^* = \frac{\sum_{i=1}^n \epsilon_i d_i}{\sum_{i=1}^n d_i} \quad (2.1)$
2	Матричная смесь сферических включений (формула Максвелла)	Разница в проводимости среды и включений не слишком заметна. Расстояние между включениями велико по сравнению с их диаметром $V \ll 1$	$\epsilon_c^* = \epsilon_2 \left[1 + \frac{3V(\epsilon_1 - \epsilon_2)}{\epsilon_1 + 2\epsilon_2} \right] \quad (2.2)$

Продолжение таблицы 2.1

1	2	3	4
3	Матричная смесь сферических включений (формула Бруггемана)	Проводимость среды и включений различаются более чем в 4 раза и объемная концентрация включений превышает 0.2	$\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_c^*}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} = (1 - V) \sqrt{\frac{\varepsilon_c^*}{\varepsilon_2}} \quad (2.3)$
4	Статистическая смесь (формула Бетхера), двухкомпонентная среда		$\frac{\varepsilon_c^* + \varepsilon_2}{3\varepsilon_c^*} = V \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + 2\varepsilon_c^*} \quad (2.4)$
5	Статистическая смесь (формула Бетхера), многокомпонентная среда	Сферические включения	$\sum V_i \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_c^*}{\varepsilon_i + 2\varepsilon_c^*} = 0 \quad (2.5)$
6	Статистическая смесь (формула В. И. Оделевского)	Сферические включения	$\varepsilon_c^* = a + \sqrt{a^2 + \varepsilon_1 \varepsilon_2 / 2}, \quad (2.6)$ где $a = \frac{(3V - 1)\varepsilon_1 + 2(2 - 3V)\varepsilon_2}{4}$
7	Статистическая смесь (формула К. Лихтенекера), двухкомпонентная среда	Включения могут иметь сферическую или другую форму	$\varepsilon_c^* = \varepsilon_2 (\varepsilon_1 / \varepsilon_2)^V \quad (2.7)$
8	Статистическая смесь (формула К. Лихтенекера), многокомпонентная среда	Включения могут иметь сферическую или другую форму	$\varepsilon_c^* = \prod_{i=1}^n \varepsilon_i V_i \quad (2.8)$
где	ε_i - показатели проводимости среды, См/м; ε_1 и ε_2 - показатели проводимости I и II компонента среды, См/м; ε_c^* - интегральный показатель проводимости среды, См/м; d - толщина слоев среды, м; V - объемная концентрация первой (примесный грунт) среды во второй (основной грунт) среды, отн. ед.		

Если проанализировать, наиболее элементарные модели (двухслойную последовательную и параллельную), можно прийти к выводу, что по указанным

формулам можно определить интегральную проводимость объема среды, в частности, грунта. Для наших задач наиболее подходят формулы для статистических смесей с неоднородными компонентами. Для удельного электрического сопротивления нужно только преобразовать соответствующую формулу.

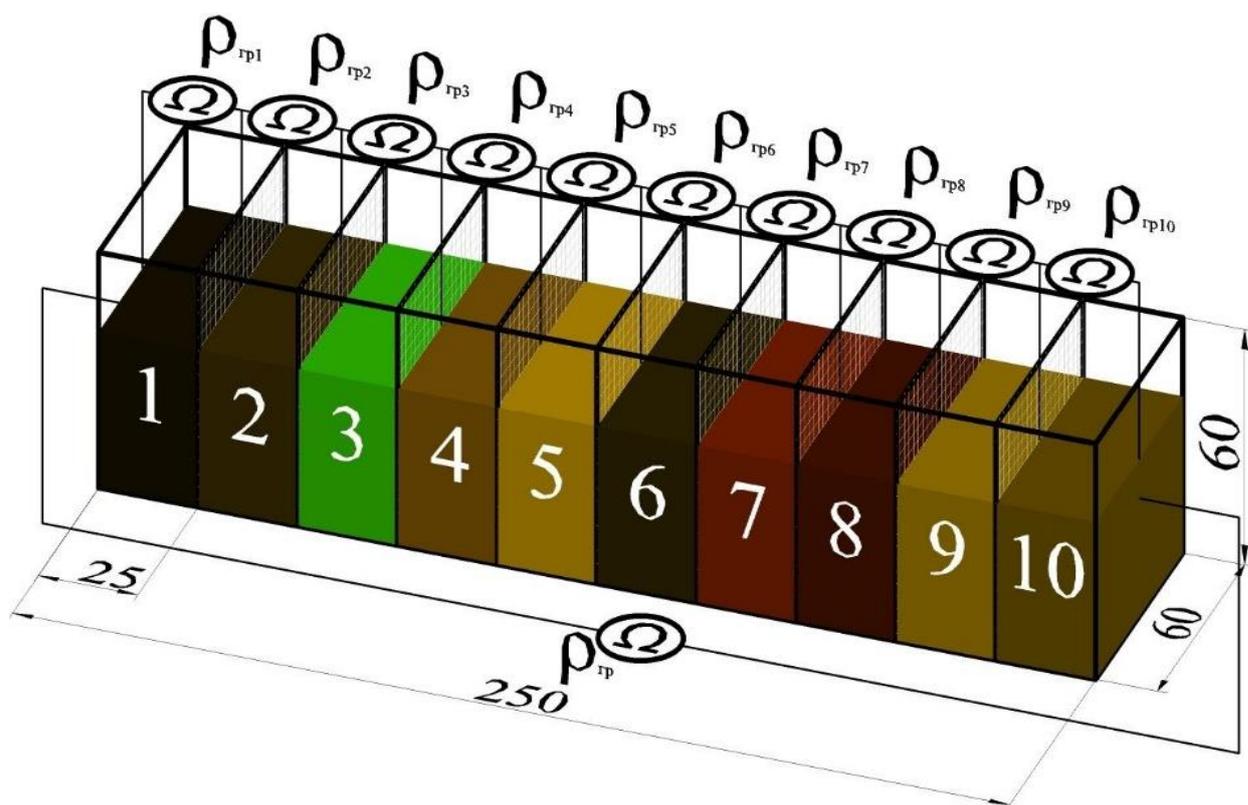
2.2 Создание математической модели для расчета интегрального удельного электрического сопротивления грунта

В настоящее время для расчета удельного электросопротивления грунта, как правило, используют формулу [26]. Для учета разнородности грунта и для расчета интегрального удельного электрического сопротивления грунта может быть использована известная формула 2.1 для учета последовательного соединения слоев и усреднённой величины ρ , при условии $\varepsilon=1/\rho$.

Для проведения измерений значений удельных электрических сопротивлений разнородных грунтов был разработан стенд, схема которого представлена на рисунке 2.2. Стенд представляет собой емкость (2,5 м × 0,6 м × 0,6 м), поделенную на 10 равных участков, заполненных различными видами наиболее характерных типов грунтов на подземных трубопроводах промышленных площадок НПС «Ухта-1», НПС «Микунь» и НПС «Урдома» на глубину 0,5 м. В качестве грунтов использовались: супесь, глина, чернозем, торф, суглинок без обработки и супесь, торф, чернозем, суглинок, умеренно увлажненные 1-5% раствором поваренной соли.

Описание стенда

Измерения удельного электрического сопротивления грунтов в емкости выполнялись по четырехэлектродной схеме с помощью измерителя сопротивления ИС-10 в комплекте со стальными стержнями (4 шт., L = 150 мм), кабелей и зажимов типа «крокодил».



- 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

Рисунок 2.2 – Схема экспериментального стенда

Участок грунта между электродами А и В, который поделен на 10 равных участков с разными типами грунта, по которым получены следующие значения удельных электрических сопротивлений представлен в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Результаты измерений значений УЭС грунта для площадочных сооружений

Номер участка	Категория грунта	Уд. электрическое сопротивление, Ом·м
1	2	3
1	Чернозем (увлажненный 3% раствором NaCl)	32
2	Суглинок (увлажненный 1% раствором NaCl)	45
3	Глина	48

Продолжение таблицы 2.2

1	2	3
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

В результате эксперимента наблюдается двуимодальное распределение случайной величины удельного электрического сопротивления грунта. При этом, участки 1-3; 6-7; 10 – имеют более низкое сопротивление, чем участки 4-5 и 9, а УЭС всех 10 участков разных типов грунтов между электродами А и В по результатам измерения получилось 89 Ом·м.

Расчет средней величины удельного электрического сопротивления всего грунта в емкости $\rho_{гр}$, Ом·м согласно [26, 86, 87] 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 очевидно, что при некорректном определении интегральной величины удельного электрического сопротивления 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. Например, имеется участок протяженностью 5% от общей длины рассматриваемого участка, сопротивлением на порядок выше, чем сопротивление соседних участков, тогда он увеличит значение средней величины на 45%, в действительности, такой участок может явиться более существенным препятствием для движения тока.

Рассчитаем средние значения удельного электросопротивления для указанного примера по формуле:

$$\bar{\rho} = \frac{\sum_{i=1}^n \rho_i}{n}, \quad (2.9)$$

$\bar{\rho}_1 = (32+45+48+46+25+30+56)/7 = 40,28$ Ом·м, соответственно по формуле $\varepsilon = \frac{1}{\rho}$, находим $\varepsilon_1 = 0,0248$ См/м; $\bar{\rho}_2 = (112+155+133)/3 = 133,33$ Ом·м, соответственно $\varepsilon_2 = 0,0075$ См/м.

По формуле К. Лихтенеккера:

$$\varepsilon_c^* = \varepsilon_2 (\varepsilon_1 / \varepsilon_2)^V = 0,0075 (0,0248 / 0,0075)^{0,3} = 0,01074 \text{ См/м или } \bar{\rho} = 93,11 \text{ Ом·м.}$$

В результате получаем, что среднее значения удельного электрического сопротивления для указанного примера по формуле К. Лихтенеккера на 37% больше чем, получается расчетом среднего значения по [26, 86, 87].

Формула В. И. Оделевского:

$\varepsilon_c^* = a + \sqrt{a^2 + \varepsilon_1 \varepsilon_2 / 2}$, где $a = \frac{(3V-1)\varepsilon_1 + (2-3V)\varepsilon_2}{4}$, при тех же исходных данных дает показания $\varepsilon_c^* = 0,013679$ См/м, соответственно $\bar{\rho} = 74,25$ Ом·м.

Исходя из этого следует, что в случае, когда грунт представляет собой двух или многокомпонентную среду, корректнее использовать формулы К. Лихтенеккера и В. И. Оделевского, которые дают более точные значения, нежели значения полученные по формуле средней величины удельного электрического сопротивления всего грунта в емкости $\rho_{гр}$, Ом·м. Согласно [26], для двух или многокомпонентного грунта, формула средней величины дает существенную погрешность, влияющую на распределение защитного потенциала, что ведет к искаженному представлению об эффективности противокоррозионной защиты трубопроводов на промышленных площадках.

Зависимость интегральной проводимости от объемной концентрации среды, полученная по формуле К. Лихтенеккера может характеризоваться аналитически, в качестве примера на рисунке 2.4 представлен частный случай зависимости $\varepsilon_c^* = f(V)$ для $V \in (0,05; 0,4)$ (рисунок 2.4)

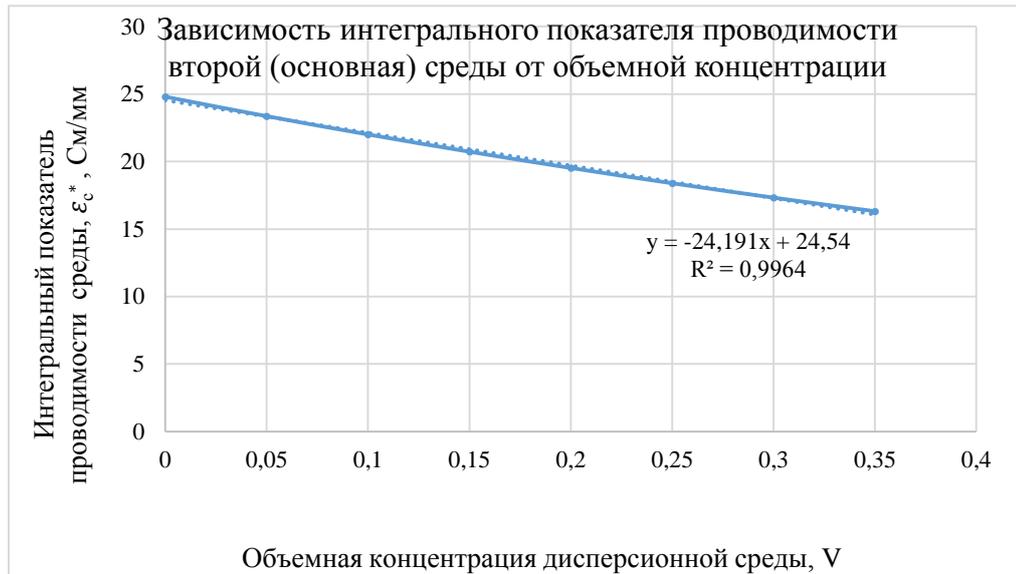


Рисунок 2.4 – График зависимости интегрального показателя проводимости среды от объемной концентрации для формулы К. Лихтенеккера

Построим графики для различных значений удельного электрического сопротивления первой (примесный грунт) среды ($100 \div 700$) при УЭС второй (основной грунт) среды $40 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

Для удельного электрического сопротивления первой (примесный грунт) среды $100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ график изображен на рисунке 2.5.

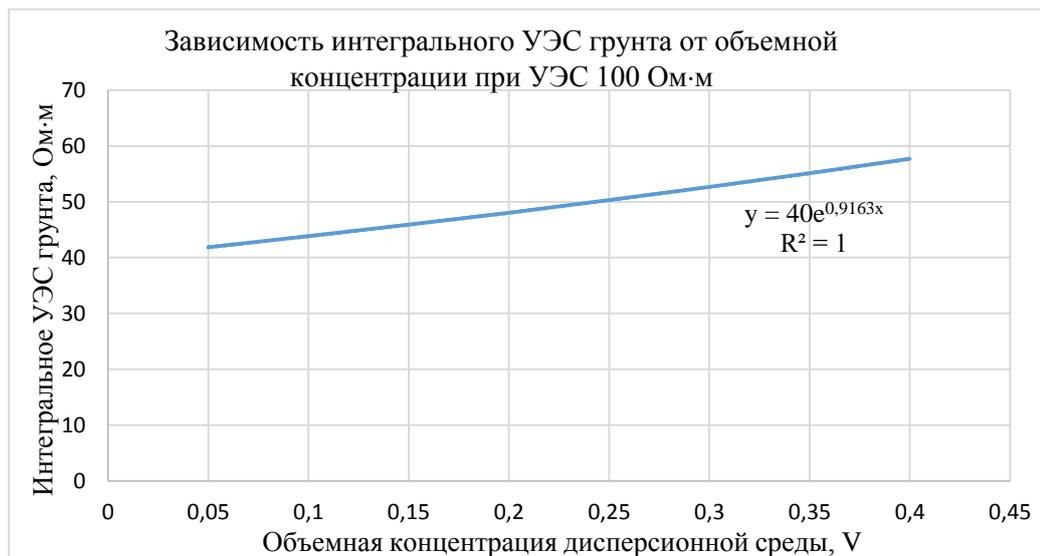


Рисунок 2.5 – График зависимости интегрального удельного электрического сопротивления грунта от объемной концентрации при УЭС первой (примесный грунт) среды $100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$

Для удельного электрического сопротивления первой (примесный грунт) среды 200 Ом·м график изображен на рисунке 2.6.

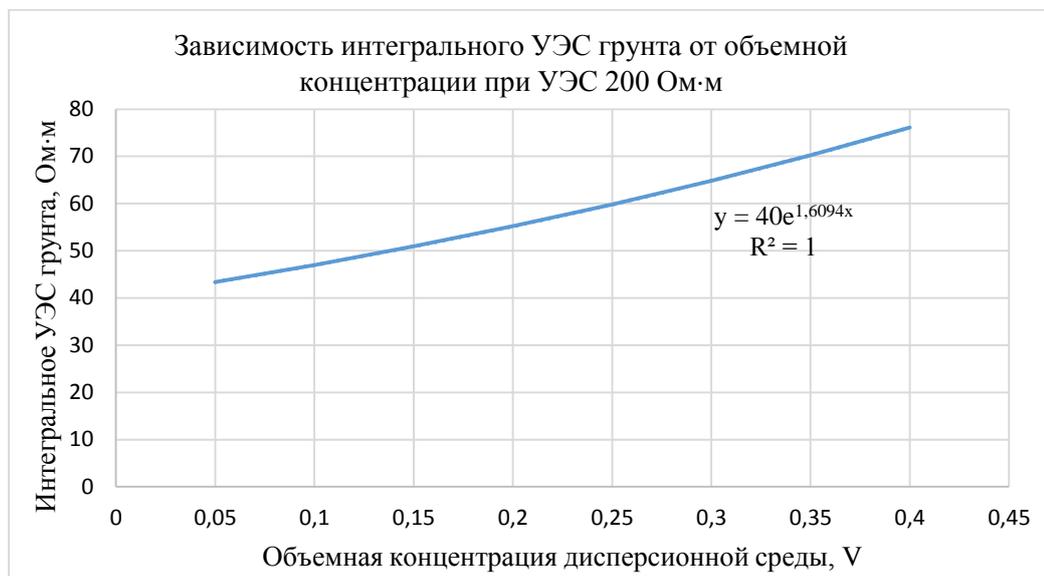


Рисунок 2.6 – График зависимости интегрального удельного электрического сопротивления грунта от объемной концентрации при УЭС первой (примесный грунт) среды 200 Ом·м

Для удельного электрического сопротивления первой (примесный грунт) среды 300 Ом·м график изображен на рисунке 2.7.

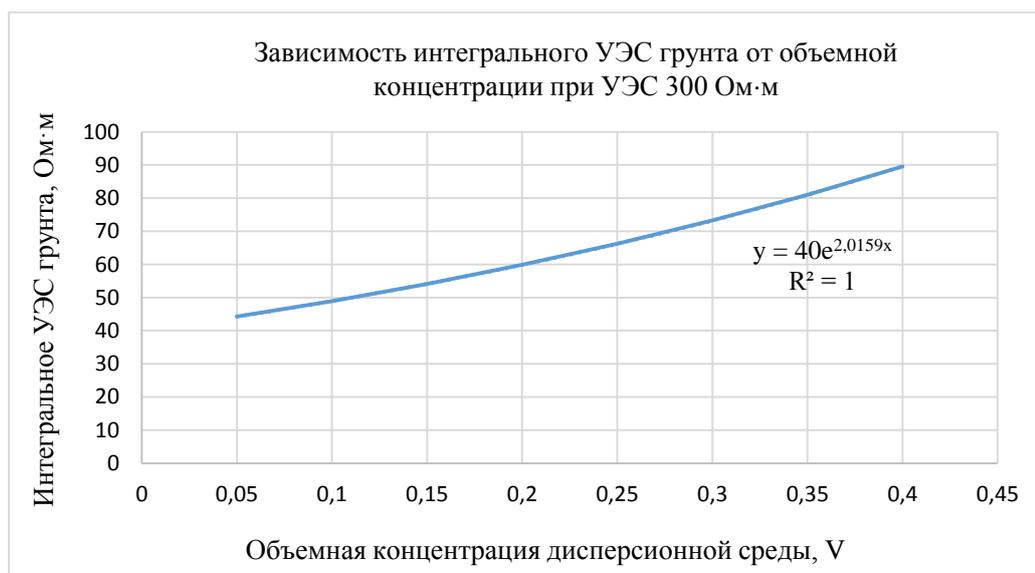


Рисунок 2.7 – График зависимости интегрального удельного электрического сопротивления грунта от объемной концентрации при УЭС первой (примесный грунт) среды 300 Ом·м

Для удельного электрического сопротивления первой (примесный грунт) среды 500 Ом·м график изображен на рисунке 2.8.

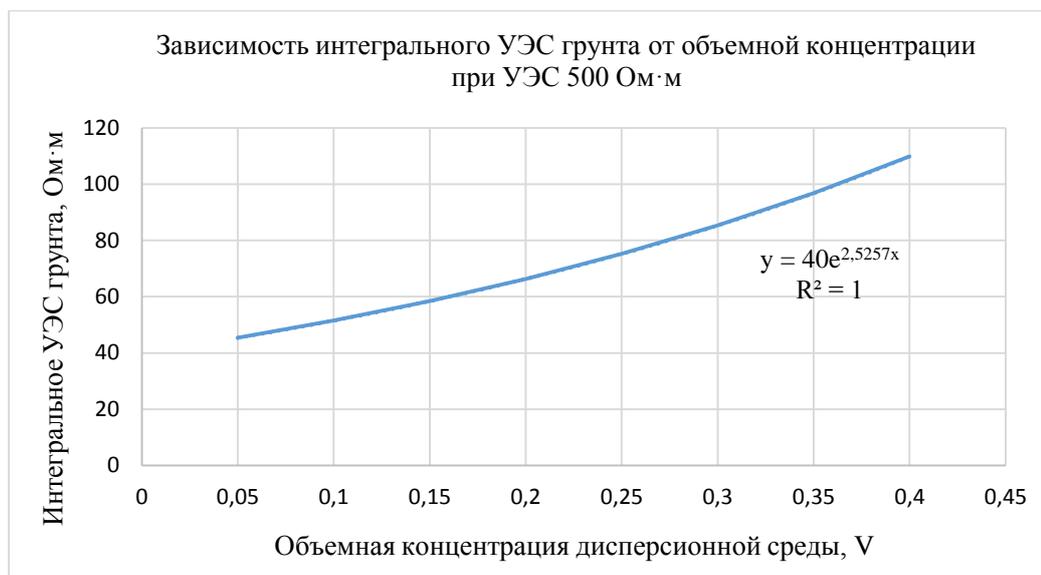


Рисунок 2.8 – График зависимости интегрального удельного электрического сопротивления грунта от объемной концентрации при УЭС первой (примесный грунт) среды 500 Ом·м

Для удельного электрического сопротивления первой (примесный грунт) среды 700 Ом·м график изображен на рисунке 2.9.

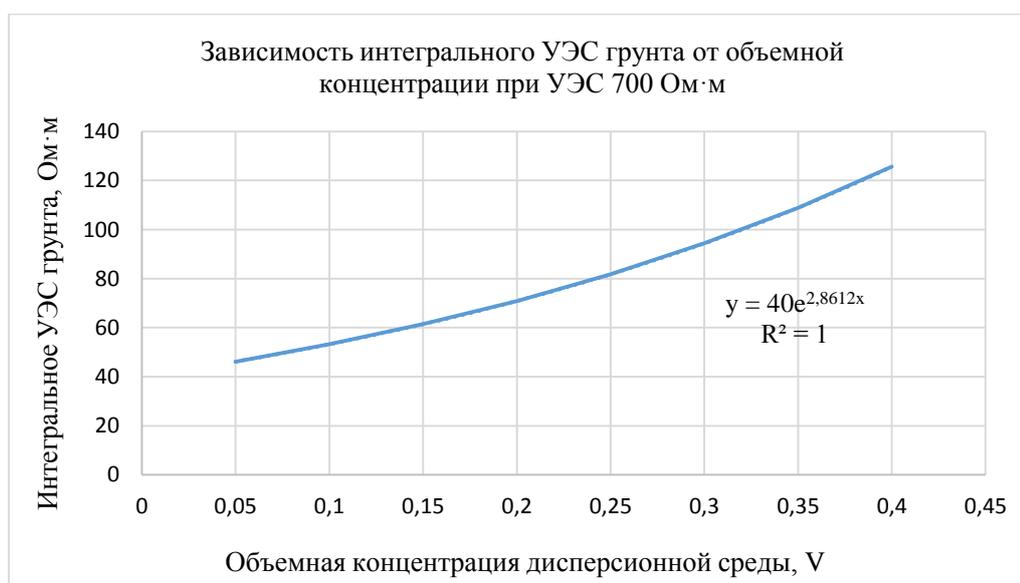


Рисунок 2.9 – График зависимости интегрального удельного электрического сопротивления грунта от объемной концентрации при УЭС первой (примесный грунт) среды 700 Ом·м

Построим графики для различных значений удельного электрического сопротивления первой (примесный грунт) среды (100÷700) от объемной концентрации при УЭС второй (основной грунт) среды 80 Ом·м.

Для удельного электрического сопротивления первой (примесный грунт) среды 100 Ом·м график изображен на рисунке 2.10.

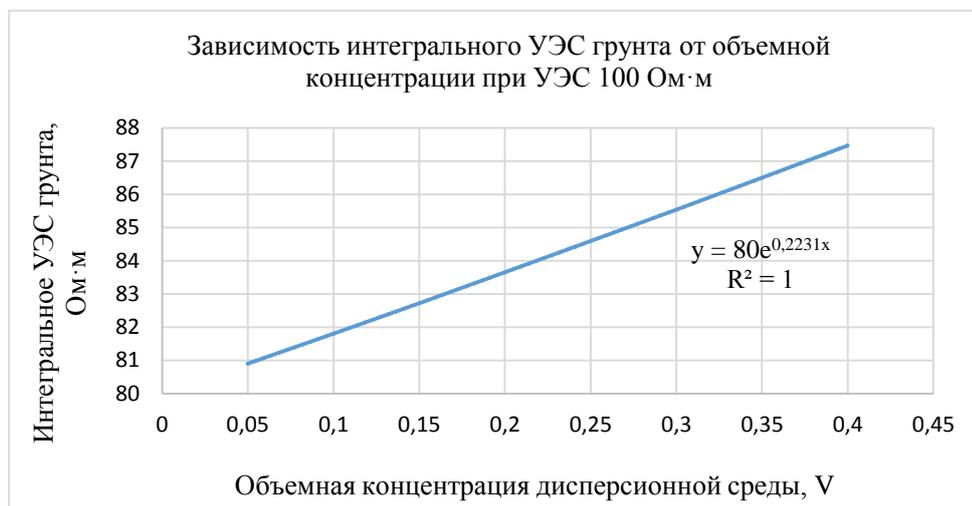


Рисунок 2.10 – График зависимости интегрального удельного электрического сопротивления грунта от объемной концентрации при УЭС первой (примесный грунт) среды 100 Ом·м

Для удельного электрического сопротивления первой (примесный грунт) среды 200 Ом·м график изображен на рисунке 2.11.

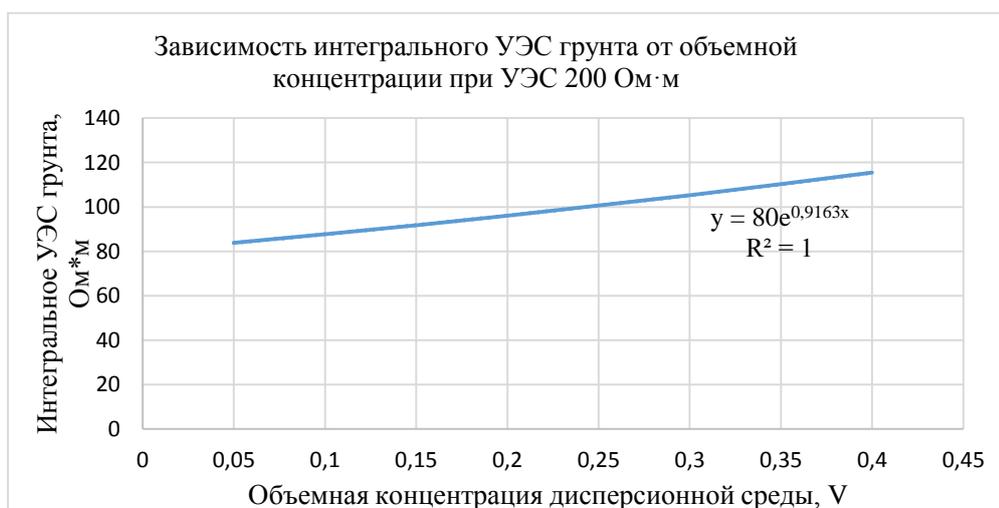


Рисунок 2.11 – График зависимости интегрального удельного электрического сопротивления грунта от объемной концентрации при УЭС первой (примесный грунт) среды 200 Ом·м

Для удельного электрического сопротивления первой (примесный грунт) среды 300 Ом·м график изображен на рисунке 2.12.

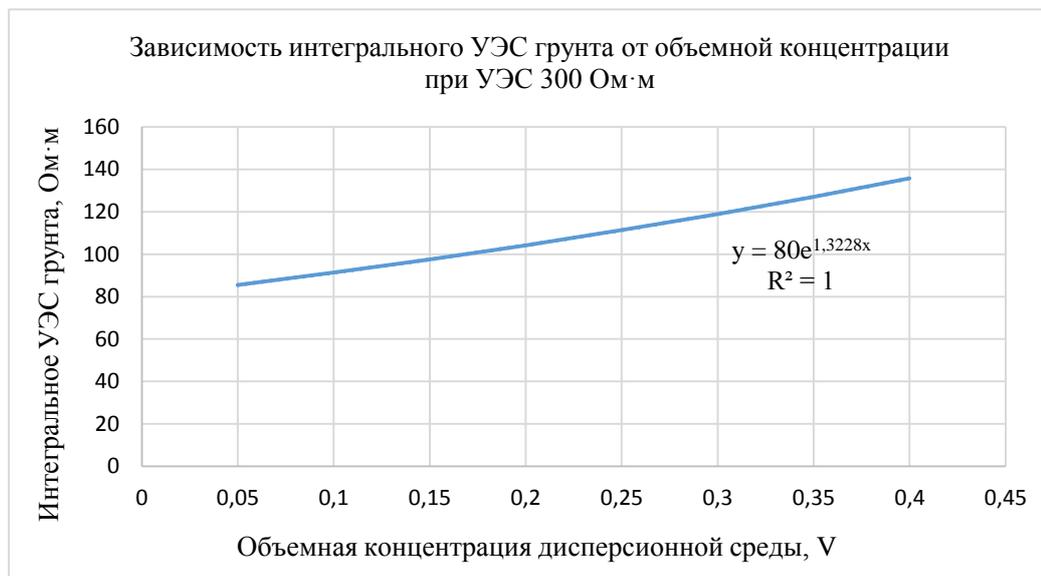


Рисунок 2.12 – График зависимости интегрального удельного электрического сопротивления грунта от объемной концентрации при УЭС первой (примесный грунт) среды 300 Ом·м

Для удельного электрического сопротивления первой (примесный грунт) среды 500 Ом·м график изображен на рисунке 2.13.

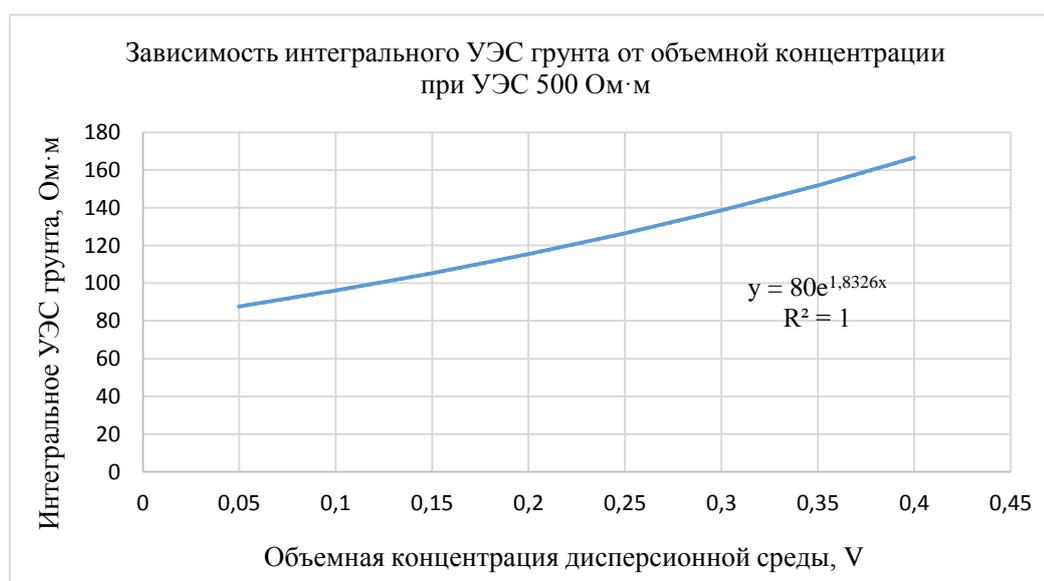


Рисунок 2.13 – График зависимости интегрального удельного электрического сопротивления грунта от объемной концентрации при УЭС первой (примесный грунт) среды 500 Ом·м

Для удельного электрического сопротивления первой (примесный грунт) среды 700 Ом·м график изображен на рисунке 2.14.

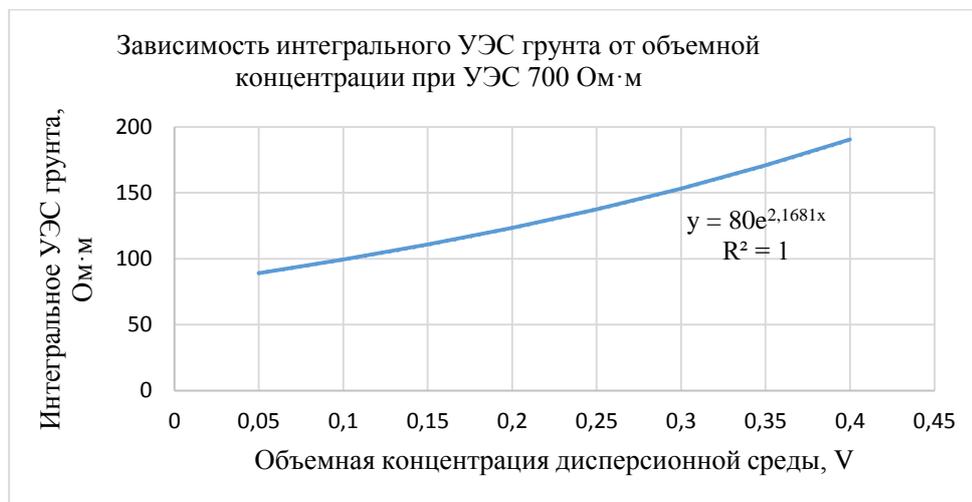


Рисунок 2.14 – График зависимости интегрального удельного электрического сопротивления грунта от объемной концентрации при УЭС первой (примесный грунт) среды 700 Ом·м

Построим графики для различных значений удельного электрического сопротивления первой (примесный грунт) среды (100÷700) от объемной концентрации при УЭС второй (основной грунт) среды 120 Ом·м.

Для удельного электрического сопротивления первой (примесный грунт) среды 100 Ом·м график изображен на рисунке 2.15.

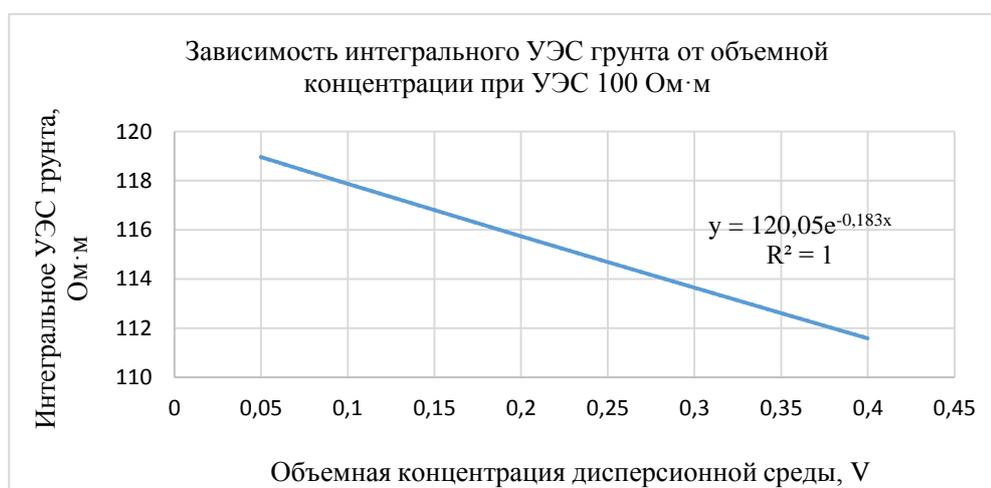


Рисунок 2.15 – График зависимости интегрального удельного электрического сопротивления грунта от объемной концентрации при УЭС первой (примесный грунт) среды 100 Ом·м

Для удельного электрического сопротивления первой (примесный грунт) среды 200 Ом·м график изображен на рисунке 2.16.

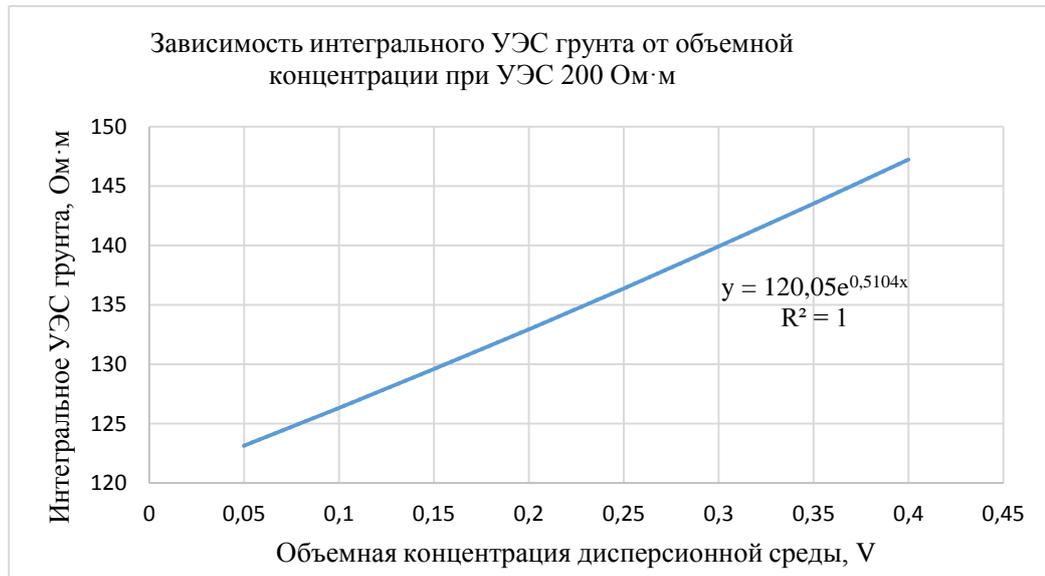


Рисунок 2.16 – График зависимости интегрального удельного электрического сопротивления грунта от объемной концентрации при УЭС первой (примесный грунт) среды 200 Ом·м

Для удельного электрического сопротивления первой (примесный грунт) среды 300 Ом·м график изображен на рисунке 2.17.

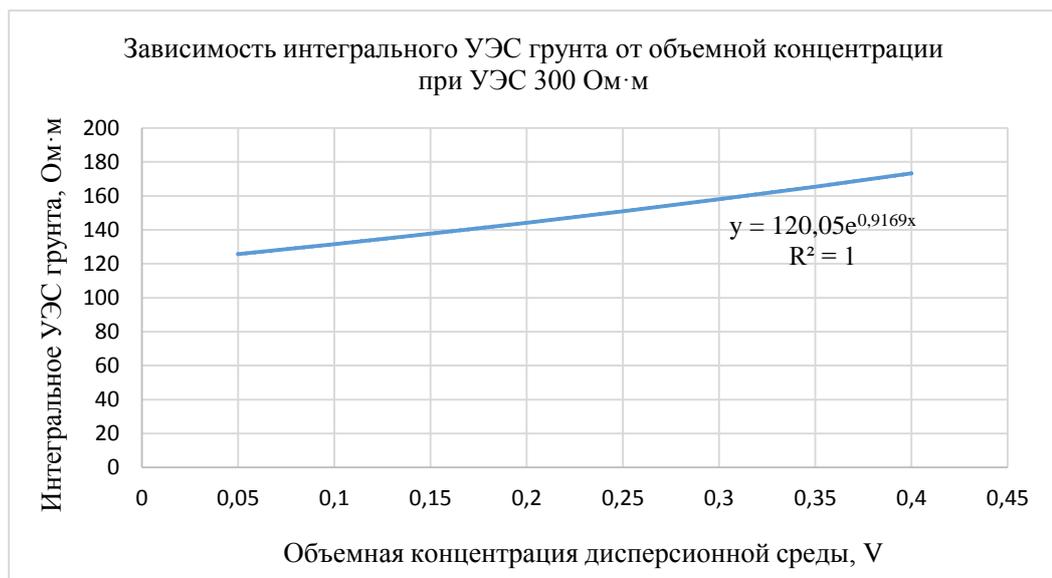


Рисунок 2.17 – График зависимости интегрального удельного электрического сопротивления грунта от объемной концентрации при УЭС первой (примесный грунт) среды 300 Ом·м

Для удельного электрического сопротивления первой (примесный грунт) среды 500 Ом·м график изображен на рисунке 2.18.

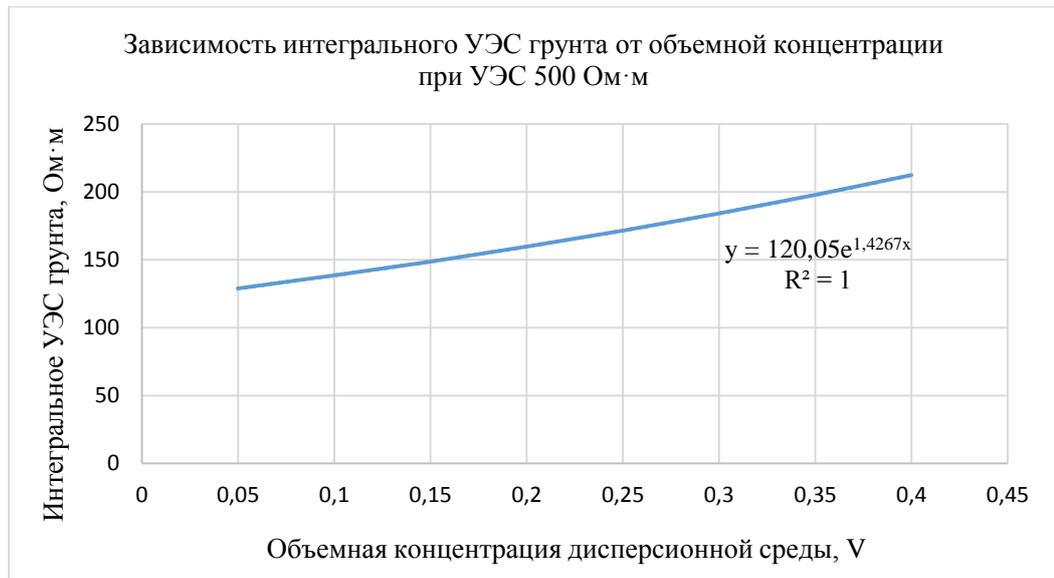


Рисунок 2.18 – График зависимости интегрального удельного электрического сопротивления грунта от объемной концентрации при УЭС первой (примесный грунт) среды 500 Ом·м

Для удельного электрического сопротивления первой (примесный грунт) среды 700 Ом·м график изображен на рисунке 2.19.

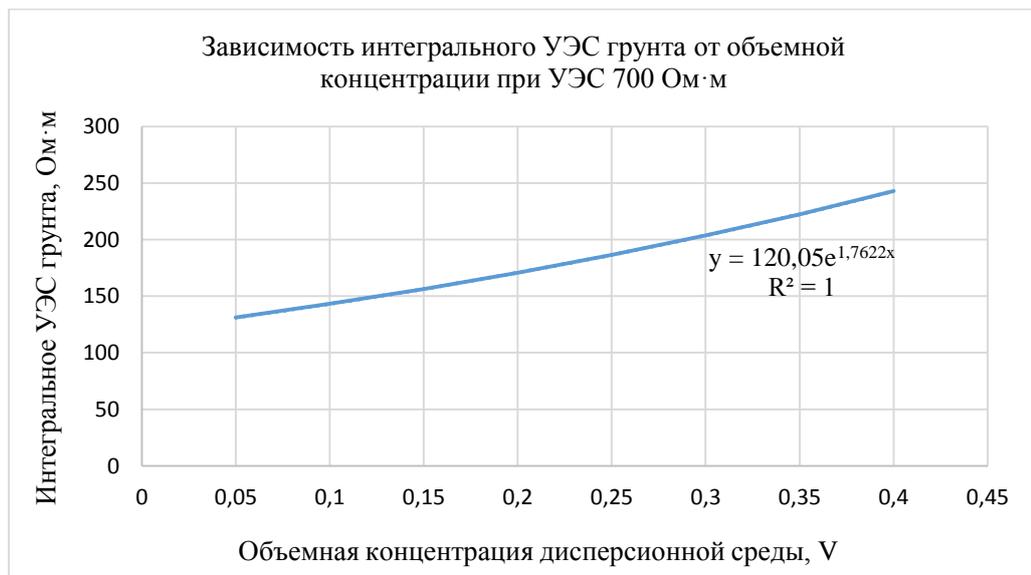


Рисунок 2.19 – График зависимости интегрального удельного электрического сопротивления грунта от объемной концентрации при УЭС первой (примесный грунт) среды 700 Ом·м

Построим графики для различных значений удельного электрического сопротивления первой (примесный грунт) среды (100÷700) от объемной концентрации при УЭС второй (основной грунт) среды 160 Ом·м.

Для удельного электрического сопротивления первой (примесный грунт) среды 100 Ом·м график изображен на рисунке 2.20.

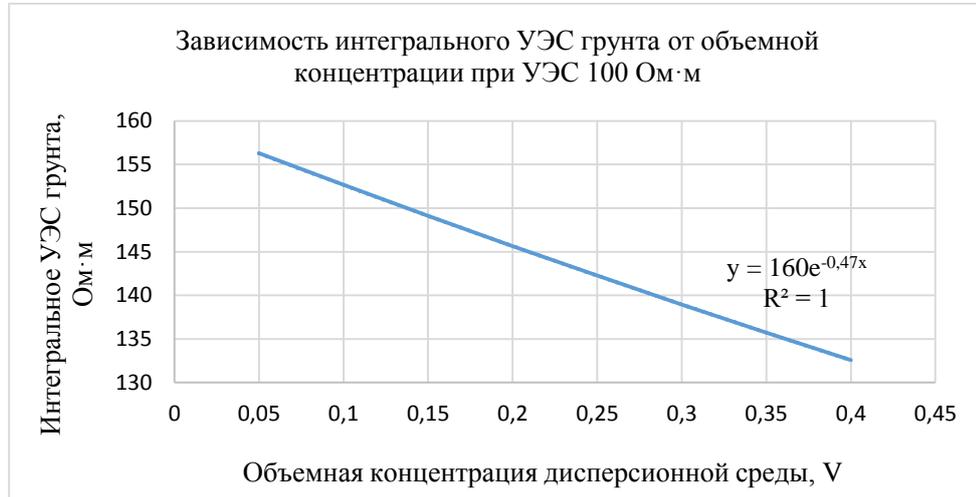


Рисунок 2.20 – График зависимости интегрального удельного электрического сопротивления грунта от объемной концентрации при УЭС первой (примесный грунт) среды 100 Ом·м

Для удельного электрического сопротивления первой (примесный грунт) среды 200 Ом·м график изображен на рисунке 2.21.

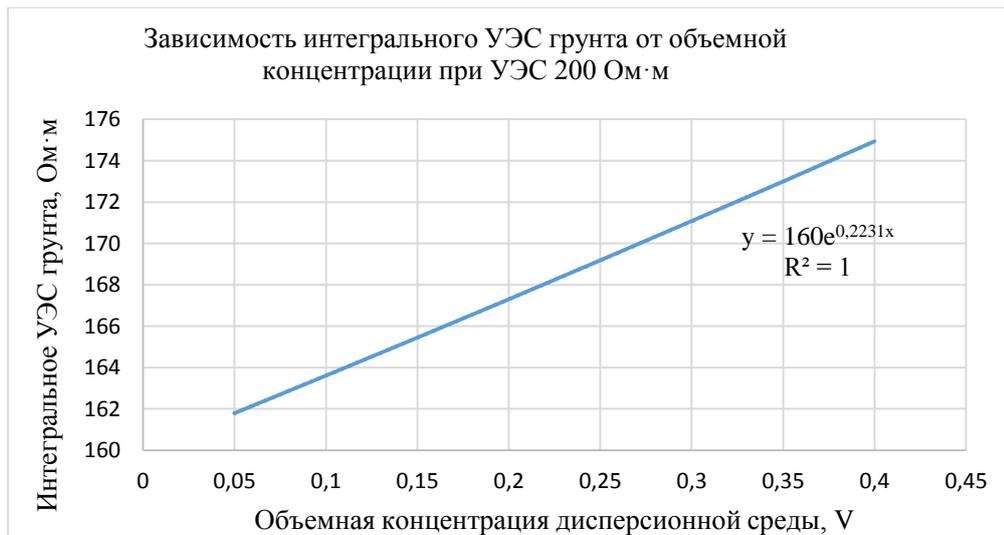


Рисунок 2.21 – График зависимости интегрального удельного электрического сопротивления грунта от объемной концентрации при УЭС первой (примесный грунт) среды 200 Ом·м

Для удельного электрического сопротивления первой (примесный грунт) среды 300 Ом·м график изображен на рисунке 2.22.

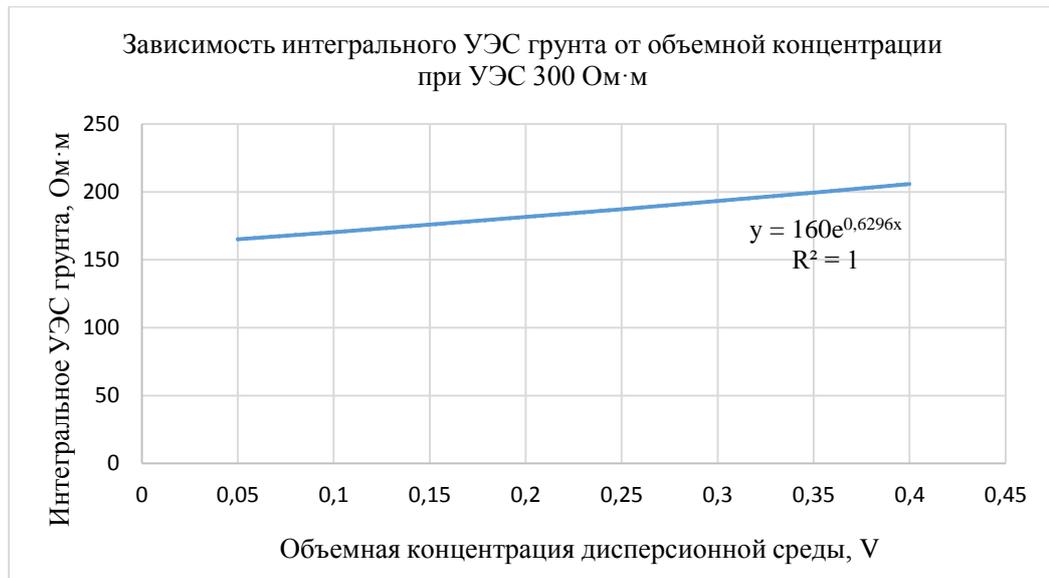


Рисунок 2.22 – График зависимости интегрального удельного электрического сопротивления грунта от объемной концентрации при УЭС первой (примесный грунт) среды 300 Ом·м

Для удельного электрического сопротивления первой (примесный грунт) среды 500 Ом·м график изображен на рисунке 2.23.

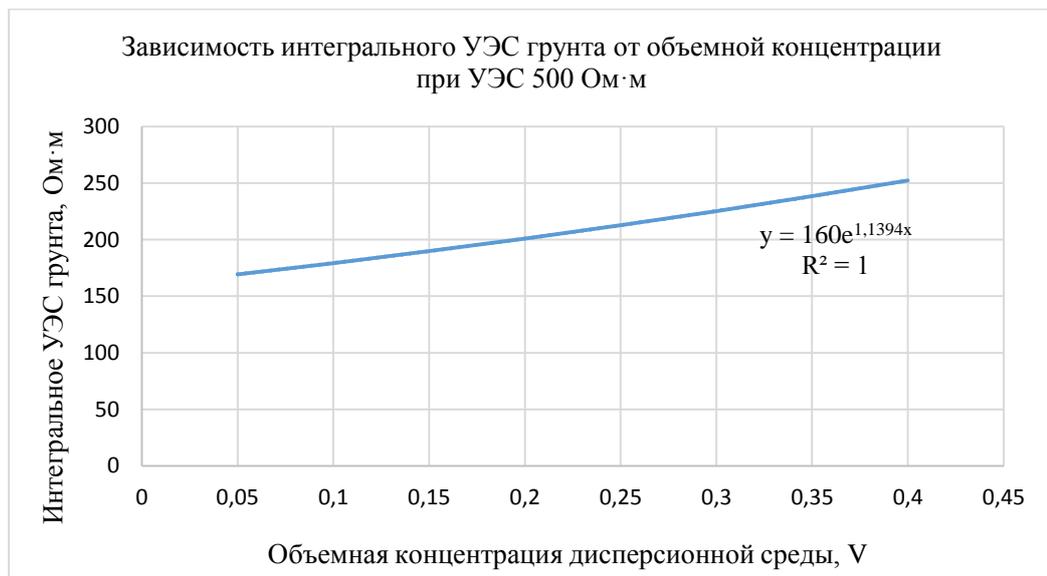


Рисунок 2.23 – График зависимости интегрального удельного электрического сопротивления грунта от объемной концентрации при УЭС первой (примесный грунт) среды 500 Ом·м

Для удельного электрического сопротивления первой (примесный грунт) среды 700 Ом·м график изображен на рисунке 2.24.

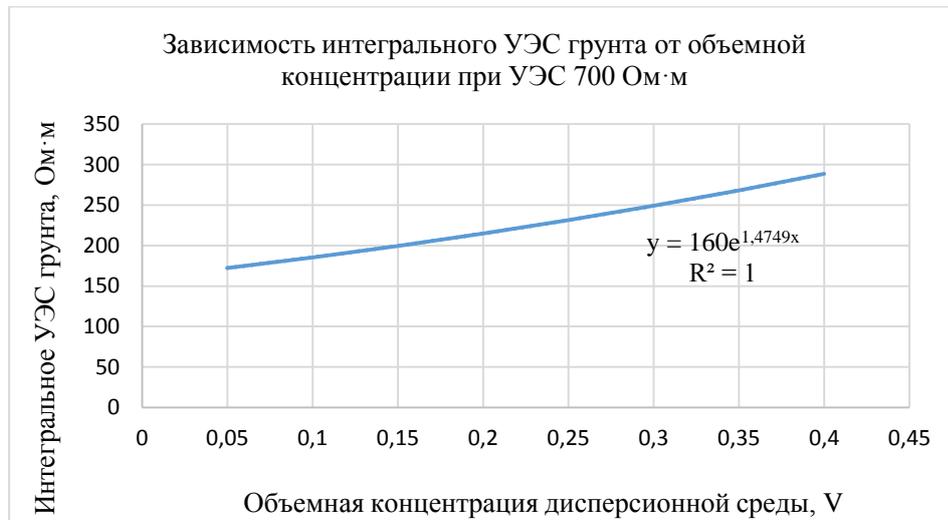


Рисунок 2.24 – График зависимости интегрального удельного электрического сопротивления грунта от объемной концентрации при УЭС первой (примесный грунт) среды 700 Ом·м

Построим графики для различных значений удельного электрического сопротивления первой (примесный грунт) среды 100÷700 при УЭС второй (основной грунт) среды 200 Ом·м.

Для удельного электрического сопротивления первой (примесный грунт) среды 100 Ом·м график изображен на рисунке 2.25.

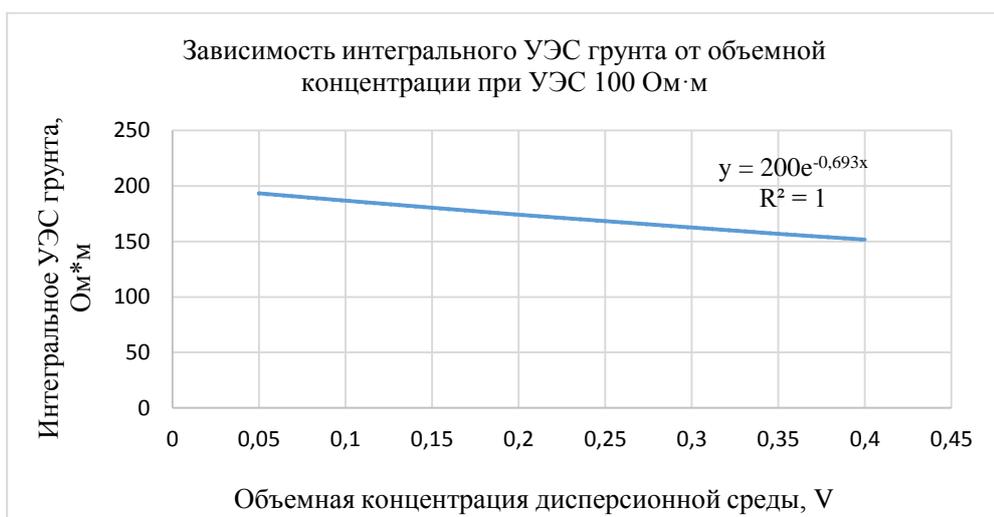


Рисунок 2.25 – График зависимости интегрального удельного электрического сопротивления грунта от объемной концентрации при УЭС первой (примесный грунт) среды 100 Ом·м

Для удельного электрического сопротивления первой (примесный грунт) среды 200 Ом·м график изображен на рисунке 2.26.

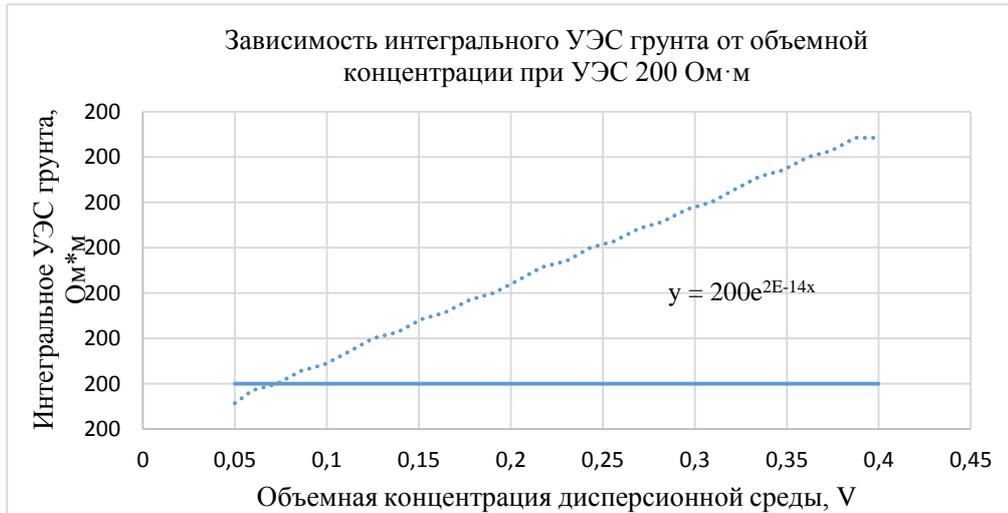


Рисунок 2.26 – График зависимости интегрального удельного электрического сопротивления грунта от объемной концентрации при УЭС первой (примесный грунт) среды 200 Ом·м

Для удельного электрического сопротивления первой (примесный грунт) среды 300 Ом·м график изображен на рисунке 2.27.

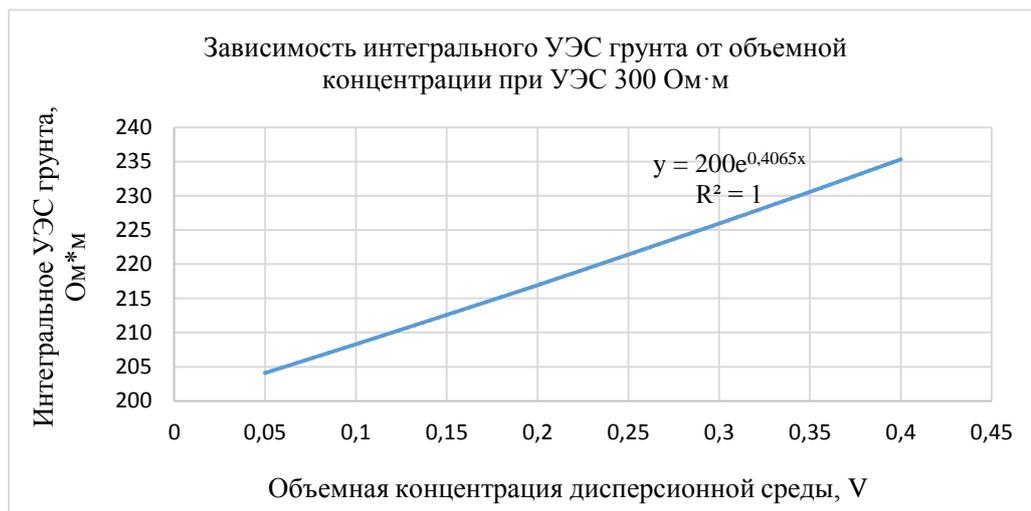


Рисунок 2.27 – График зависимости интегрального удельного электрического сопротивления грунта от объемной концентрации при УЭС первой (примесный грунт) среды 300 Ом·м

Для удельного электрического сопротивления первой (примесный грунт) среды 500 Ом·м график изображен на рисунке 2.28.

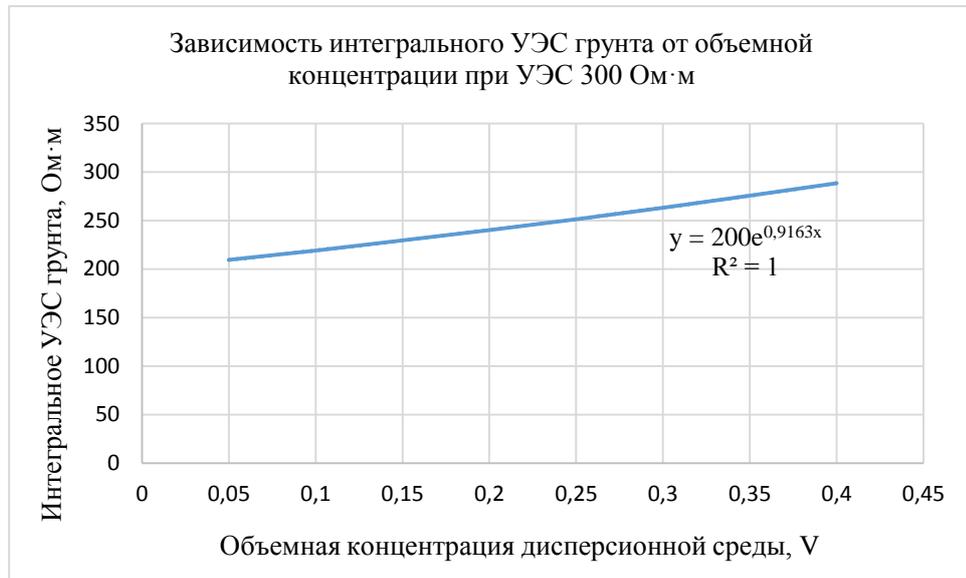


Рисунок 2.28 – График зависимости интегрального удельного электрического сопротивления грунта от объемной концентрации при УЭС первой (примесный грунт) среды 500 Ом·м

Для удельного электрического сопротивления первой (примесный грунт) среды 700 Ом·м график изображен на рисунке 2.29.

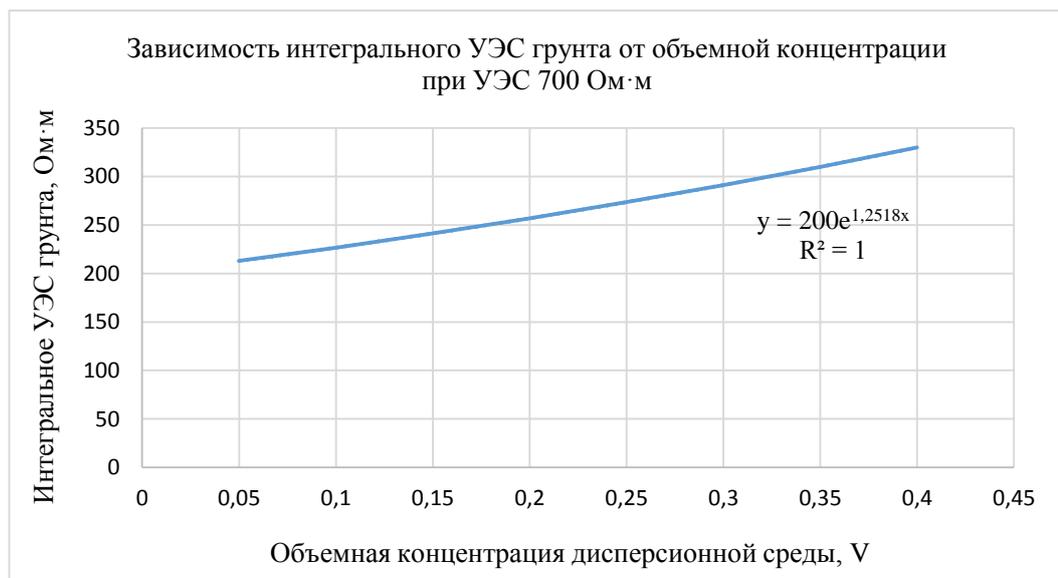


Рисунок 2.29 – График зависимости интегрального удельного электрического сопротивления грунта от объемной концентрации при УЭС первой (примесный грунт) среды 700 Ом·м

Построим трехмерный график для различных значений удельного электрического сопротивления первой (примесный грунт) среды ($100 \div 700$) Ом·м от объемной концентрации при УЭС второй (основной грунт) среды 40 Ом·м.

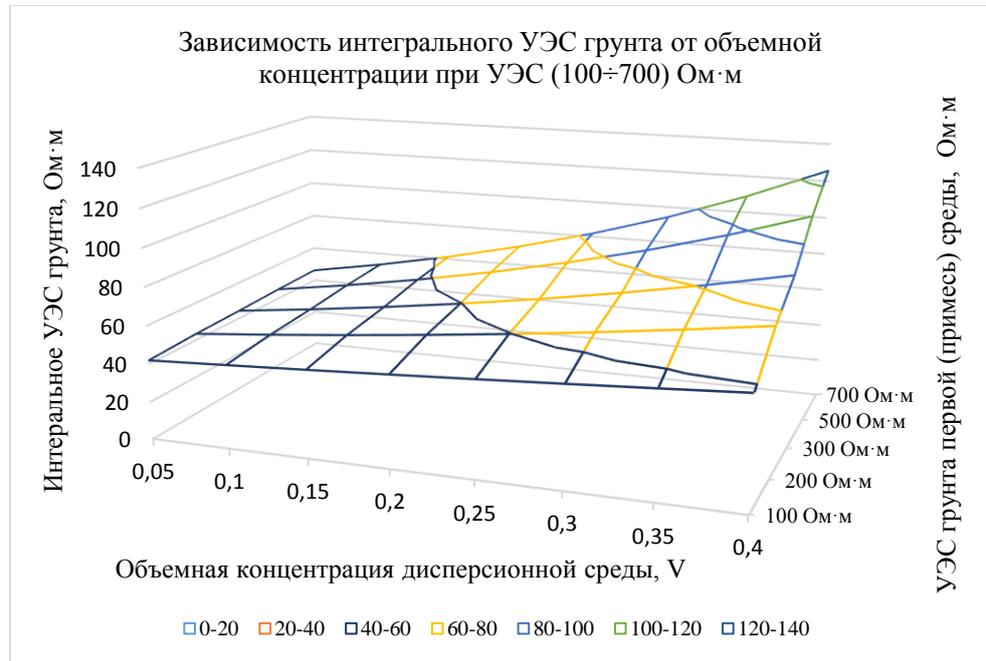


Рисунок 2.30 – Трехмерный график зависимости интегрального удельного электрического сопротивления первой (примесный грунт) среды ($100 \div 700$) Ом·м от объемной концентрации при УЭС второй (основной грунт) среды 40 Ом·м

Построим трехмерный график для различных значений удельного электрического сопротивления первой (примесный грунт) среды ($100 \div 700$) Ом·м от объемной концентрации при УЭС второй (основной грунт) среды 80 Ом·м.

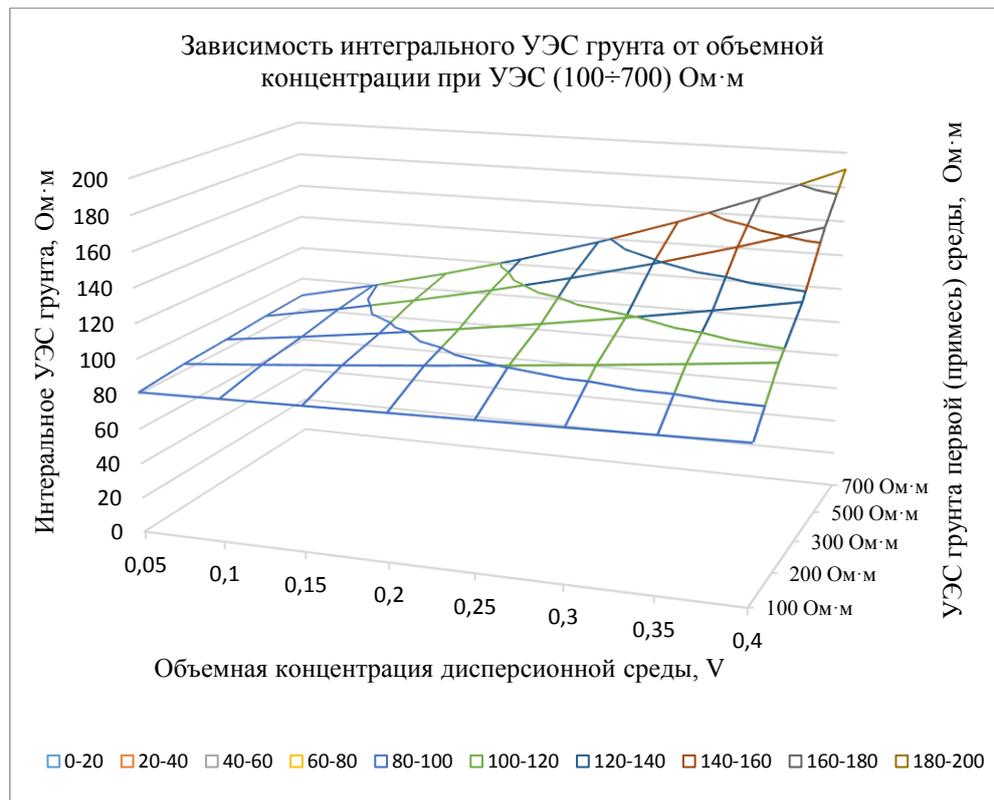


Рисунок 2.31 – Трехмерный график зависимости интегрального удельного электрического сопротивления первой (примесный грунт) среды (100÷700) Ом·м от объемной концентрации при УЭС второй (основной грунт) среды 80 Ом·м

Построим трехмерный график для различных значений удельного электрического сопротивления первой (примесный грунт) среды (100÷700) от объемной концентрации при УЭС второй (основной грунт) среды 120 Ом·м.

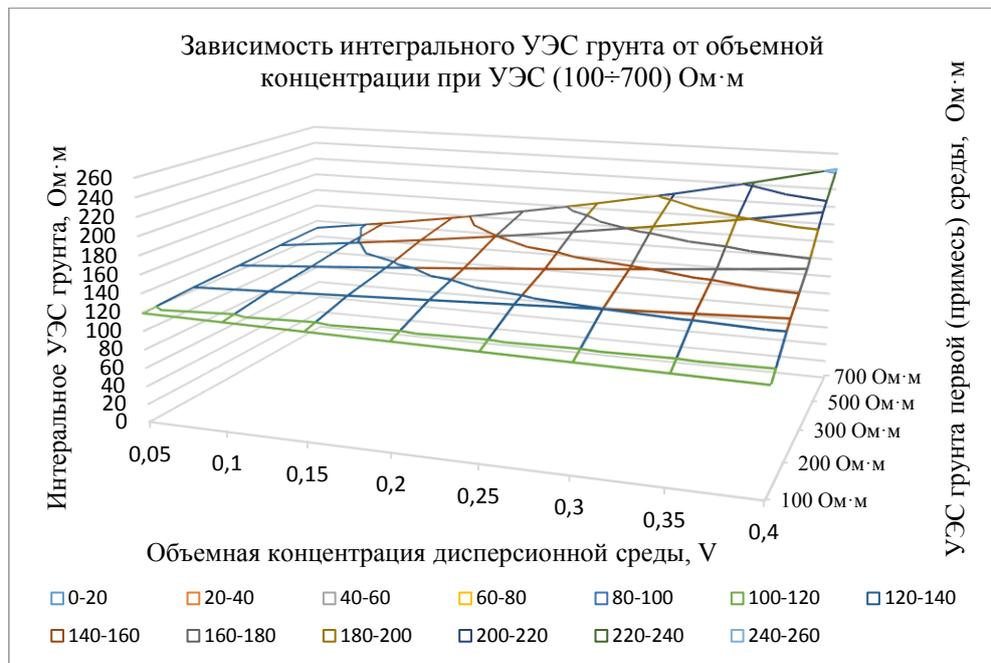


Рисунок 2.32 – Трехмерный график зависимости интегрального удельного электрического сопротивления первой (примесный грунт) среды (100÷700) Ом·м от объемной концентрации при УЭС второй (основной грунт) среды 120 Ом·м

Построим трехмерный график для различных значений удельного электрического сопротивления первой (примесный грунт) среды (100÷700) от объемной концентрации при УЭС второй (основной грунт) среды 160 Ом·м.

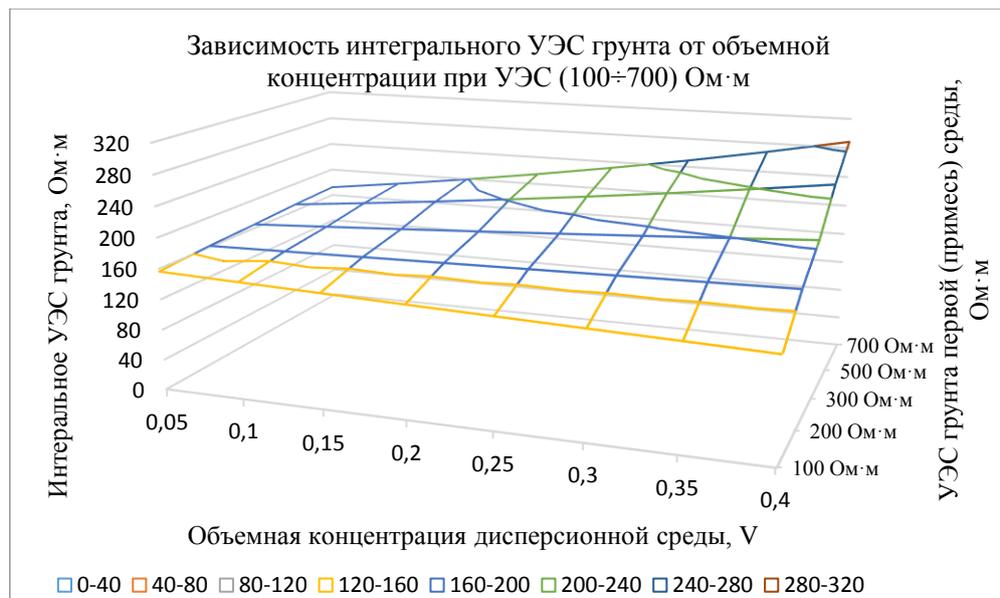


Рисунок 2.33 – Трехмерный график зависимости интегрального удельного электрического сопротивления первой (примесный грунт) среды (100÷700) Ом·м от объемной концентрации при УЭС второй (основной грунт) среды 160 Ом·м

Построим трехмерный график для различных значений удельного электрического сопротивления первой (примесный грунт) среды (100÷700) от объемной концентрации при УЭС второй (основной грунт) среды 200 Ом·м.

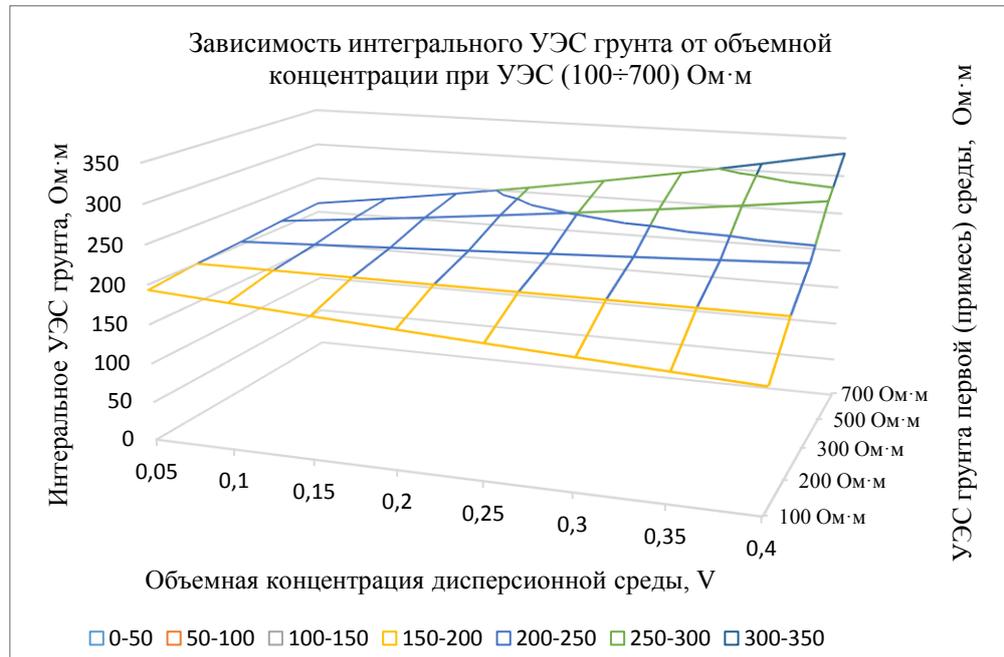


Рисунок 2.34 – Трехмерный график зависимости интегрального удельного электрического сопротивления первой (примесный грунт) среды (100÷700) Ом·м от объемной концентрации при УЭС второй (основной грунт) среды 200 Ом·м

Для выбранного диапазона практически значимых данных УЭС основной среды $R_{осн} \in (40 \div 200)$ Ом·м и примесной $R_{прим} \in (100 \div 700)$ Ом·м и объемной концентрации от 0 до 0,4 выполнялся поиск уравнений, описывающих зависимости между указанными параметрами. Результаты поиска уравнений представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Результаты поиска экспоненциальных уравнений регрессии

УЭС основной среды, $R_{осн}$, Ом·м	Удельное электрическое сопротивление примесной среды, $R_{прим}$, Ом·м				
	100	200	300	500	700
40	$y = 40e^{0,92x}$	$y = 40e^{1,61x}$	$y = 40e^{2,02x}$	$y = 40e^{2,53x}$	$y = 40e^{2,86x}$
80	$y = 80e^{0,22x}$	$y = 80e^{0,92x}$	$y = 80e^{1,32x}$	$y = 80e^{1,83x}$	$y = 80e^{2,17x}$
120	$y = 120,05e^{-0,18x}$	$y = 120,05e^{0,5x}$	$y = 120,05e^{0,92x}$	$y = 120,05e^{1,43x}$	$y = 120,05e^{1,76x}$
160	$y = 160e^{-0,47x}$	$y = 160e^{0,22x}$	$y = 160e^{0,63x}$	$y = 160e^{1,14x}$	$y = 160e^{1,48x}$
200	$y = 200e^{-0,69x}$	$y = 200e^{2E-14x}$	$y = 200e^{0,41x}$	$y = 200e^{0,92x}$	$y = 200e^{1,25x}$

Уравнения характеризуются общим видом уравнения для расчета интегрального сопротивления: $R_{\text{инт}} = R_{\text{осн}} \cdot e^{(N \cdot V)}$.

Было отмечено, что параметр N зависит от отношения сопротивления сред $\frac{R_{\text{прим}}}{R_{\text{осн}}}$ (отн. ед.), где $R_{\text{прим}}$ - УЭС примесной среды, Ом·м; $R_{\text{осн}}$ - УЭС основной среды, Ом·м.

Для установления зависимости между N и отношением сопротивления сред $\frac{R_{\text{прим}}}{R_{\text{осн}}}$ (отн. ед.) был построен график (рисунок 2.35).

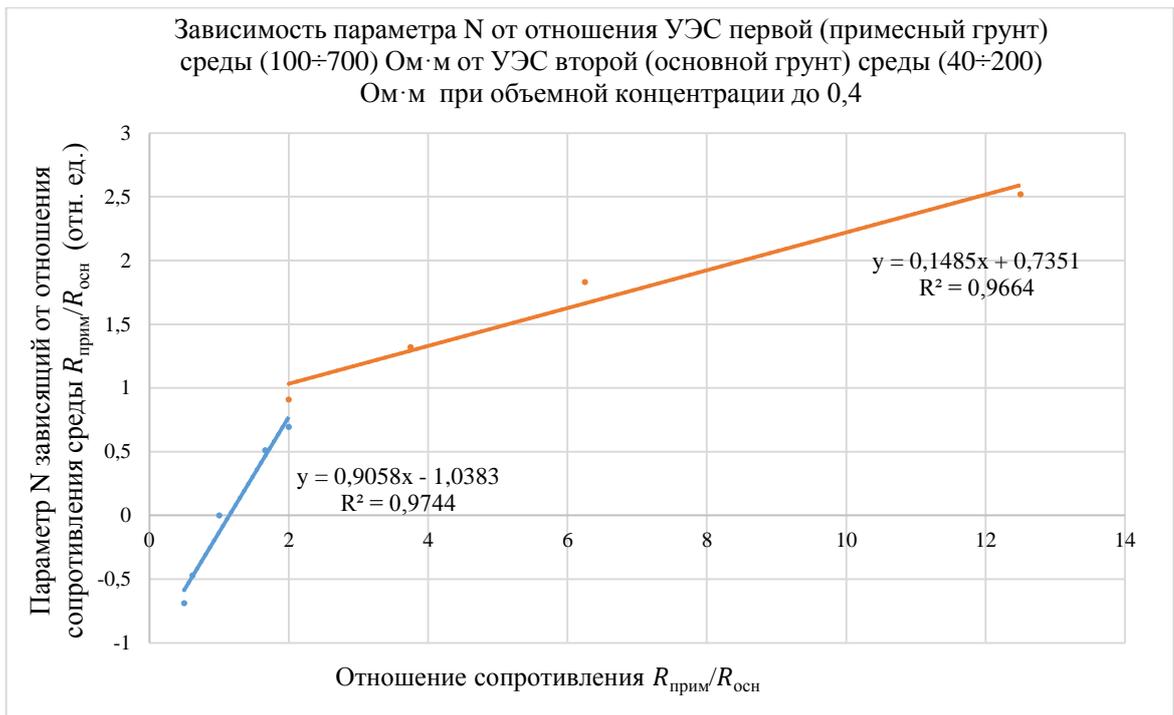


Рисунок 2.35 – Зависимость параметра N от отношения УЭС первой (примесный грунт) среды (100÷700) Ом·м от УЭС второй (основной грунт) среды (40÷200) Ом·м при объемной концентрации до 0,4

Зависимости N от отношения можно аппроксимировать кусочно-линейной функцией для разных отношений сопротивления сред $\frac{R_{\text{прим}}}{R_{\text{осн}}}$.

$$\begin{cases} R_{\text{инт}} = R_{\text{осн}} \cdot e^{(0,9 \frac{R_{\text{прим}}}{R_{\text{осн}}} - 1,04) \cdot V}, & \text{при } \frac{R_{\text{прим}}}{R_{\text{осн}}} \in [1,0; 2,0); \\ R_{\text{инт}} = R_{\text{осн}} \cdot e^{(0,15 \frac{R_{\text{прим}}}{R_{\text{осн}}} + 0,7) \cdot V}, & \text{при } \frac{R_{\text{прим}}}{R_{\text{осн}}} \in [2,0; 12,0]. \end{cases} \quad (2.11)$$

Таким образом получена система уравнений является математической моделью, позволяющей рассчитывать интегральное сопротивление среды при различных вариациях исходных данных, но только для указанных диапазонов основной среды $R_{осн} \in (40 \div 200)$ Ом·м и примесной среды $R_{прим} \in (100 \div 700)$ Ом·м. и V до 0,4.

2.3 Верификация математической модели

Произвели верификацию математической модели сравнив получаемые при помощи ее значения интегрального сопротивления среды по отношению к базовой формуле К. Лихтеннекера.

Исходные данные:

- примесная среда, $R_{прим}$, Ом·м - 100, 200, 300, 500, 700;
- основная среда, $R_{осн}$, Ом·м - 40, 80, 120, 160, 200;
- объемная концентрация первой (примесный грунт) среды во второй (основной грунт), V , (отн. ед.) – 0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3; 0,35; 0,4.

Таблица 2.4 –Примеры расчетов для заданных параметров

№ расчета	Исходные данные, Ом·м	$R_{инт}$ по формуле К. Лихтеннекера, Ом·м	$R_{инт}$ по математической модели, Ом·м	Отклонение, %
1	2	3	4	5
1	$R_{прим}=100;$ $R_{осн}=40;$ $V \in (0,05;0,4)$	41,87	42,21	-0,79
		43,83	44,54	-1,59
		45,89	46,99	-2,41
		48,04	49,59	-3,23
		50,29	52,33	-4,05
		52,65	55,22	-4,88
		55,12	58,27	-5,71
		57,70	61,49	-6,55
2	$R_{прим}=200;$ $R_{осн}=40;$ $V \in (0,05;0,4)$	43,35	43,01	0,79
		46,98	46,24	1,58
		50,92	49,72	2,36
		55,19	53,46	3,14
		59,81	57,48	3,91
		64,83	61,79	4,67
		70,26	66,45	5,43
		76,15	71,44	6,18

Продолжение таблицы 2.4

1	2	3	4	5
3	$R_{прим}=300;$ $R_{осн}=40;$ $V \in (0,05;0,4)$	44,24 48,93 54,12 59,85 66,20 73,21 80,97 89,55	43,82 48,01 52,60 57,62 63,13 69,16 75,76 83,00	0,95 1,88 2,81 3,73 4,64 5,54 6,43 7,31
4	$R_{прим}=500;$ $R_{осн}=40;$ $V \in (0,05;0,4)$	45,38 51,49 58,42 66,29 75,21 85,34 96,82 109,86	45,50 51,75 58,86 66,95 76,14 86,61 98,51 112,04	-0,25 -0,49 -0,74 -0,99 -1,24 -1,49 -1,74 -1,99
5	$R_{прим}=100;$ $R_{осн}=80;$ $V \in (0,05;0,4)$	80,90 81,81 82,72 83,65 84,59 85,54 86,50 87,47	80,34 80,68 81,03 81,37 81,72 82,07 82,42 82,77	0,69 1,37 2,05 2,73 3,39 4,06 4,72 5,38
6	$R_{прим}=200;$ $R_{осн}=80;$ $V \in (0,05;0,4)$	83,75 87,68 91,79 96,09 100,59 105,31 110,25 115,42	84,42 89,08 94,00 99,19 104,67 110,45 116,54 122,98	-0,80 -1,60 -2,41 -3,23 -4,05 -4,88 -5,71 -6,55
7	$R_{прим}=300;$ $R_{осн}=80;$ $V \in (0,05;0,4)$	85,47 91,30 97,54 104,21 111,33 118,93 127,06 135,74	85,21 90,77 96,68 102,98 109,69 116,84 124,45 132,56	0,30 0,59 0,88 1,18 1,47 1,76 2,05 2,34
8	$R_{прим}=500;$ $R_{осн}=80;$ $V \in (0,05;0,4)$	87,68 96,09 105,31 115,42 126,49 138,63 151,93 166,51	86,83 94,23 102,27 111,00 120,47 130,75 141,90 154,01	0,97 1,93 2,88 3,83 4,76 5,68 6,60 7,51

Продолжение таблицы 2.4

1	2	3	4	5
9	$R_{прим}=700;$ $R_{осн}=80;$ $V \in (0,05;0,4)$	89,16 99,38 110,76 123,45 137,59 153,35 170,92 190,50	88,47 97,83 108,19 119,64 132,31 146,32 161,81 178,94	0,78 1,55 2,32 3,08 3,84 4,59 5,33 6,07
10	$R_{прим}=100;$ $R_{осн}=120;$ $V \in (0,05;0,4)$	122,79 125,65 128,57 131,56 134,62 137,76 140,96 144,24	123,10 126,29 129,56 132,91 136,35 139,87 143,49 147,20	0,25 0,51 0,76 1,01 1,26 1,51 1,76 2,01
11	$R_{прим}=200;$ $R_{осн}=120;$ $V \in (0,05;0,4)$	123,10 126,29 129,56 132,91 136,35 139,87 143,49 147,20	122,79 125,65 128,57 131,56 134,62 137,76 140,96 144,24	0,25 0,51 0,76 1,01 1,26 1,51 1,76 2,01
12	$R_{прим}=300;$ $R_{осн}=120;$ $V \in (0,05;0,4)$	125,63 131,51 137,68 144,13 150,89 157,97 165,37 173,12	126,63 133,62 141,00 148,78 157,00 165,67 174,82 184,47	-0,80 -1,60 -2,41 -3,23 -4,05 -4,88 -5,71 -6,55
13	$R_{прим}=500;$ $R_{осн}=120;$ $V \in (0,05;0,4)$	128,88 138,41 148,64 159,64 171,45 184,13 197,75 212,37	128,22 137,00 146,39 156,41 167,12 178,57 190,80 203,87	0,51 1,02 1,52 2,02 2,52 3,02 3,51 4,00
14	$R_{прим}=700;$ $R_{осн}=120;$ $V \in (0,05;0,4)$	131,06 143,14 156,34 170,75 186,49 203,68 222,46 242,97	129,83 140,47 151,98 164,43 177,90 192,48 208,25 225,31	0,94 1,87 2,79 3,70 4,61 5,50 6,39 7,27

Продолжение таблицы 2.4

1	2	3	4	5
15	$R_{прим}=100;$ $R_{осн}=160;$ $V \in (0,05;0,4)$	156,28	156,23	0,04
		152,65	152,54	0,07
		149,11	148,94	0,11
		145,65	145,43	0,15
		142,26	142,00	0,19
		138,96	138,65	0,22
		135,73	135,38	0,26
		132,58	132,18	0,30
16	$R_{прим}=200;$ $R_{осн}=160;$ $V \in (0,05;0,4)$	161,80	160,68	0,69
		163,61	161,37	1,37
		165,45	162,05	2,05
		167,30	162,74	2,73
		169,18	163,44	3,39
		171,08	164,13	4,06
		173,00	164,83	4,72
		174,94	165,53	5,38
17	$R_{прим}=300;$ $R_{осн}=160;$ $V \in (0,05;0,4)$	165,11	165,26	-0,09
		170,38	170,70	-0,19
		175,82	176,32	-0,28
		181,43	182,12	-0,38
		187,23	188,11	-0,47
		193,21	194,30	-0,57
		199,37	200,70	-0,66
		205,74	207,30	-0,76
18	$R_{прим}=500;$ $R_{осн}=160;$ $V \in (0,05;0,4)$	169,38	169,63	-0,15
		179,31	179,84	-0,29
		189,82	190,66	-0,44
		200,95	202,13	-0,59
		212,73	214,30	-0,74
		225,20	227,19	-0,88
		238,41	240,86	-1,03
		252,38	255,36	-1,18
19	$R_{прим}=700;$ $R_{осн}=160;$ $V \in (0,05;0,4)$	172,25	171,23	0,60
		185,45	183,24	1,19
		199,65	196,10	1,78
		214,94	209,86	2,36
		231,40	224,58	2,95
		249,12	240,34	3,53
		268,20	257,20	4,10
		288,74	275,25	4,67
20	$R_{прим}=100;$ $R_{осн}=200;$ $V \in (0,05;0,4)$	193,19	194,19	-0,52
		186,61	188,54	-1,04
		180,25	183,06	-1,56
		174,11	177,74	-2,08
		168,18	172,57	-2,61
		162,45	167,56	-3,14
		156,92	162,69	-3,68
		151,57	157,96	-4,21

Продолжение таблицы 2.4

1	2	3	4	5
21	$R_{\text{прим}}=200;$ $R_{\text{осн}}=200;$ $V \in (0,05;0,4)$	200	198,60	0,70
		200	197,22	1,39
		200	195,84	2,08
		200	194,48	2,76
		200	193,12	3,44
		200	191,77	4,11
		200	190,44	4,78
		200	189,11	5,45
22	$R_{\text{прим}}=300;$ $R_{\text{осн}}=200;$ $V \in (0,05;0,4)$	204,10	203,12	0,48
		208,28	206,30	0,95
		212,54	209,52	1,42
		216,89	212,79	1,89
		221,34	216,12	2,36
		225,87	219,49	2,82
		230,50	222,92	3,29
		235,22	226,40	3,75
23	$R_{\text{прим}}=500;$ $R_{\text{осн}}=200;$ $V \in (0,05;0,4)$	209,38	211,04	-0,80
		219,19	222,70	-1,60
		229,47	235,00	-2,41
		240,22	247,97	-3,23
		251,49	261,67	-4,05
		263,28	276,11	-4,88
		275,62	291,36	-5,71
		288,54	307,45	-6,55
24	$R_{\text{прим}}=700;$ $R_{\text{осн}}=200;$ $V \in (0,05;0,4)$	212,93	212,63	0,14
		226,69	226,06	0,28
		241,35	240,34	0,42
		256,95	255,52	0,55
		273,56	271,66	0,69
		291,24	288,82	0,83
		310,07	307,07	0,97
		330,11	326,46	1,10

По результатам верификации получено, что отклонение между данными математической модели и базовой формулы К. Лихтенеккера составляет не более чем 7%. Для уравнения $R_{\text{инт}} = R_{\text{осн}} \cdot e^{(0,15 \frac{R_{\text{прим}}}{R_{\text{осн}}} + 0,7) \cdot V}$, при $\frac{R_{\text{прим}}}{R_{\text{осн}}} \in [2,0; 12,0]$ составляет не более 7% и для уравнения $R_{\text{инт}} = R_{\text{осн}} \cdot e^{(0,9 \frac{R_{\text{прим}}}{R_{\text{осн}}} - 1,04) \cdot V}$, при $\frac{R_{\text{прим}}}{R_{\text{осн}}} \in [1,0; 2,0]$ составляет не более 5%.

Полученные данные свидетельствуют о соответствии требованиям практических задач при проектировании объектов с неоднородным по

сопротивлению грунтом и доказывает адекватность модели в принятых диапазонах значений исходных данных [110, 111, 112, 113].

2.4 Выводы по главе 2

1. Выполнен анализ существующих моделей расчета интегральных физических показателей гетерогенной среды, содержащей сферические включения. Предложено использовать формулу К. Лихтенеккера, которая работает для обратных УЭС величин, т.е. для удельной электрической проводимости двухкомпонентных или многокомпонентных сред.

2. Спланирован и проведен эксперимент по фактическому определению УЭС гетерогенной среды, который показал, что наблюдается ошибка порядка 30% между расчетным значением средней величины УЭС и фактически измеренным сопротивлением всего объема грунта. Отклонения между измеренным значениям полученным по формуле К. Лихтенеккера на 37% больше величины, полученной простым расчетом среднего значения и менее чем на 5% отличается от данных измерения, что является удовлетворительным для практики результатом. На основании чего сделан вывод, что формула К. Лихтенеккера применима для расчета УЭС в условиях неоднородности грунта.

3. Построены графики зависимости интегрального удельного электрического сопротивления первой (примесь) среды от объемной концентрации до 0,4 при УЭС второй (основная) среды, полученные при помощи формулы К. Лихтенеккера, которые были аппроксимированы общей зависимостью вида уравнения для расчета интегрального сопротивления $R_{инт} = R_{осн} \cdot e^{(N \cdot V)}$, где $R_{осн}$ - УЭС основной среды, N – параметр зависящий от отношения сопротивления сред $\frac{R_{прим}}{R_{осн}}$ (отн. ед.).

4. Методом кусочно-линейной аппроксимацией получена математическая модель, которая работает при удовлетворении следующих критериев: основная среда $R_{осн} \in (40 \div 200)$ Ом·м, примесная среда $R_{прим} \in (100 \div 700)$ Ом·м. и объемная

концентрация первой (примесный грунт) среды во второй (основной грунт) $V \in (0,05;0,4)$ отн. ед.:

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

5. 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.

ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ГРУНТОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НА ПАРАМЕТРЫ ТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ЭКРАНИРОВАНИЯ КАТОДНОГО ТОКА

3.1 Проведение экспериментальных исследования в лабораторных условиях влияния грунтовых характеристик на параметры токораспределения в системе электрохимической защиты подземных трубопроводов промышленных площадок

Одним из параметров, учитываемых при проектировании средств электрохимической защиты (ЭХЗ) трубопроводов и оборудования промышленных площадок и определяющим характер и условия защиты от коррозии, является удельное электрическое сопротивление грунта $\rho_{гр}$, $[\rho_{гр}] = \text{Ом} \cdot \text{м}$, значения которого используются для решения следующих, важных с точки зрения обеспечения эффективной защиты от коррозии задач:

- оценка коррозионной агрессивности грунта по отношению к стали;
- выбор необходимого типа и параметров анодного заземления установки катодной защиты;
- определение критериев эффективности электрохимической защиты подземных трубопроводов;
- расчет сопротивления элементов и контуров заземления, определение количества заземляющих электродов на стадии проектирования.

Как правило, для этих целей проводят измерения в нескольких характерных точках на территории промышленной площадки и для дальнейших расчетов используют усредненное значение. При этом не учитывается тот факт, что на территории промышленных площадок может наблюдаться неоднородность грунтовых характеристик как по площади, так и по глубине, что может влиять на

условия эксплуатации подземных трубопроводов и анодных заземлений катодной защиты. Кроме того, на территории компрессорных, нефтеперекачивающих, газораспределительных станций и других площадных объектов расположено энергоиспользующее оборудование, требующее наличия устройства системы защитного заземления, элементы которой могут находиться в электрической цепи с катоднозащищаемыми трубопроводами, и, как следствие, оказывать негативное влияние на эффективность защиты от коррозии, проявляющееся в падении защитного потенциала трубопровода по абсолютной величине [1]. Стоит также отметить, что в процессе эксплуатации систем защитного заземления используют различные способы обработки грунта с целью уменьшения электрического сопротивления заземлителей [90], что в совокупности с проблемой экранирования катодного тока приводит к снижению надежности и срока службы анодных заземлений, повышению коэффициента загрузки преобразователей станций катодной защиты и невозможности обеспечения эффективной противокоррозионной защиты трубопроводов.

Таким образом, можно сделать вывод, что оценка—влияния грунтовых характеристик на параметры токораспределения в условиях экранирования катодного тока с целью разработки методики определения нормативных грунтовых условий для обеспечения нормативных параметров противокоррозионной защиты трубопроводов промышленных площадок является актуальной научно-технической задачей, решение которой позволит обеспечить электрохимическую защиту от коррозии технологических трубопроводов и оборудования.

Необходимо провести исследование о влиянии неоднородности грунтовых характеристик при наличии защитных заземлений, выполненных из различных материалов, на функционирование катодной защиты подземного трубопровода с учетом изменения типа и материала анодного и защитного заземлений и удельного электрического сопротивления грунта в местах их установки.

Задачей данного этапа исследования является оценка степени влияния неоднородности удельного электрического сопротивления грунта ρ_r на уровень защищенности $U_{Т-з}$ подземного трубопровода от коррозии, для чего выполнен

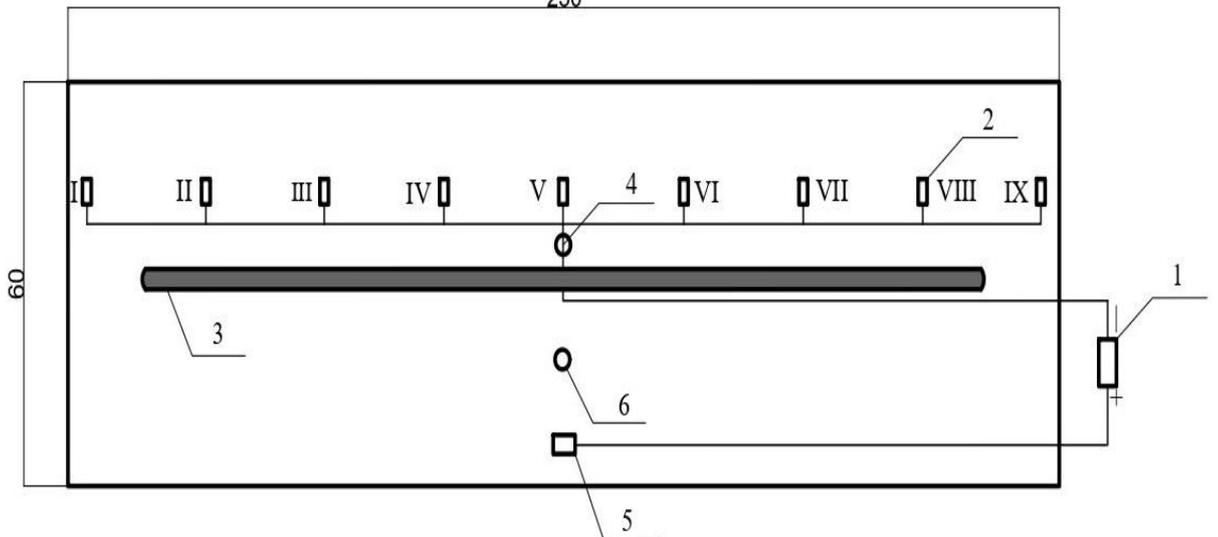
комплекс измерений разности потенциалов «труба-земля» и последующая обработка полученных результатов.

Для проведения измерений был разработан стенд, схема которого представлена на рисунке 3.1.

Стенд представляет собой емкость (250 см × 60 см × 60 см), заполненную увлажненным песчаным грунтом. В емкость помещен предварительно изолированный полимерной лентой участок трубопровода ($L=200$ см; $D_n=2,5$ см; $\delta = 0,2$ см). Марка стали участка трубопровода – 09Г2С.

В эксперименте проводится исследование с качественной оценкой параметров. Исследуется влияние двух качественных факторов таких, как неоднородность удельного электрического сопротивления грунта и материала заземляющего электрода, электрически связанного с катоднозащищаемым сооружением и оказывающего негативное влияние на уровень защищенности подземного трубопровода от коррозии их совместного влияния на величину защитного потенциала в условиях экранирования катодного тока защитными заземлениями с учетом неоднородности грунтовых характеристик [36]. Для качественной оценки параметров теория подобия в данном эксперименте не применяется.

Имитация катодной защиты осуществляется путем подключения источника питания постоянного тока и анодного заземления, представляющего собой стальную пластину $S=210$ см². Расстояние между трубопроводом и анодным заземлением 17 см. В ходе экспериментального исследования использовались два вида анодного заземления - пластины 21×10 см., выполненные из стали марки 09Г2С и токопроводящего эластомера соответственно.



- 1 – источник постоянного тока; 2 – медносульфатный электрод сравнения;
 3 – участок трубопровода; 4 – мультиметр; 5 – анодное заземление;
 6 – защитный заземлитель

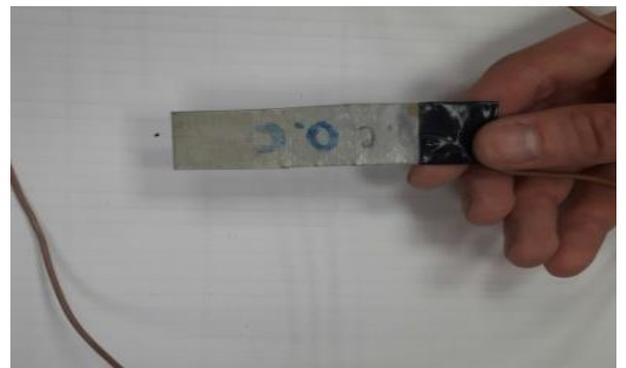
Рисунок 3.1 – Схема экспериментального стенда

В качестве анодного заземления использовалась пластина, выполненная из стали марки 09Г2С размерами 10×21 см.

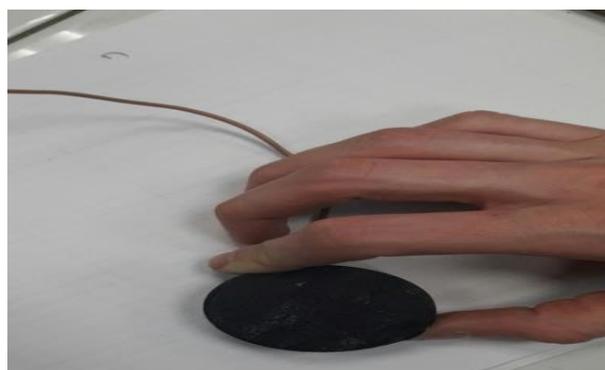
В качестве защитных заземлений использовались специальные имитаторы, выполненные из различных материалов:



а) Сталь ($\rho_{ст}=13 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$)



б) Оцинкованная сталь
 ($\rho_{ос}=13,8 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$)

в) Медь ($\rho_{\text{медь}}=1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$)

г) Эластомерный заземлитель

Рисунок 3.2 – Имитаторы защитных заземлений

Площади поверхности защитных заземлений составляют $S_{зз}=16,6 \text{ см}^2$.

При выполнении экспериментальных работ используются приборы и оборудование, перечень которых представлен в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Приборы и оборудование, используемые для проведения лабораторных исследований

Поз.	Наименование	Технические характеристики
1	Прибор для измерения поляризационного потенциала - вольтметр универсальный В7-78/1	$U_{\text{пост}}=100 \text{ мВ} \dots 1000 \text{ В}$ $U_{\text{перем}}=100 \text{ мВ} \dots 750 \text{ В}$ $I_{\text{пост}}=10 \text{ мА} \dots 3 \text{ А}$ $I_{\text{перем}}=1 \text{ А} \dots 3 \text{ А}$
2	Медносульфатный электрод сравнения	-
3	Источник постоянного тока	$U_{\text{вых}}: 0 \text{ В} - 30 \text{ В}$ $I_{\text{вых}}: 1 \text{ мА} - 2 \text{ А}$
4	Измеритель сопротивления ИС-10 в комплекте со стальными стержнями (4 шт. $L=150 \text{ мм}$)	$R: 10 - 100 \text{ Ом}$

1) Измеритель сопротивления ИС-10 (рисунок 3.3) с диапазонами измерений от 10 до 100 Ом с разрешающей способностью 0,1 Ом, комплект кабелей и зажимов типа «крокодил».



Рисунок 3.3 – Измеритель сопротивления ИС-10

Прибор формирует измерительный стабилизированный импульсный ток переменной полярности, частотой 128 Гц, амплитудное значение силы тока не более 260 мА, максимальное амплитудное значение выходного напряжения без нагрузки не более 42 В.

2) Измерительные электроды (стальные стержни $L = 150$ мм).

3) Вольтметр универсальный цифровой для измерения потенциала любого типа В7-78/1 (рисунок 3.4).



Рисунок 3.4 – Вольтметр универсальный В7-78/1



Рисунок 3.5 – Медносульфатный электрод сравнения

Характеристики прибора, используемого для измерения поляризационного потенциала представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Характеристики универсального вольтметра типа В7-78/1

Параметр	Предел измерений	Разрешающая способность	Основная погрешность измерения, %+ед. разрешающей способности
1	2	3	4
Постоянное напряжение	100 мВ/ 1/ 10 / 100/ 1000 В	0,1/ 1/ 10/100 мкВ/1 мВ	$\pm(0,004\dots0,008)\%$
Переменное напряжение	100 мВ/ 1/ 10/ 100/ 750 В	0,1/ 1/ 10/100 мкВ/1 мВ	$\pm(0,09\%)$
Сила постоянного тока	10/ 100 мА/ 1/ 3 А	10 нА/100 нА/ 1/10 мкА	$\pm(0,05\dots0,14)\%$
Сила переменного тока	1/ 3 А	1/ 10 мкА	$\pm(0,15\dots1,16)\%$
Диапазон измерений (частота)	40 Гц...300 кГц		

4) Электрод сравнения медносульфатный длительного действия, представленный на рисунке 3.5. Электрод заполнен водным насыщенным раствором медного купороса. Концентрация медного купороса составляет 24,2 грамма на 100 мл дистиллированной воды.

Измерение удельного электрического сопротивления грунта проводят по симметричной четырехэлектродной схеме (рисунок 3.6) измерителем сопротивления ИС-10. Измерительные электроды А, В, М, N размещаются на одной параллельной или перпендикулярной оси трубопровода линии [36].

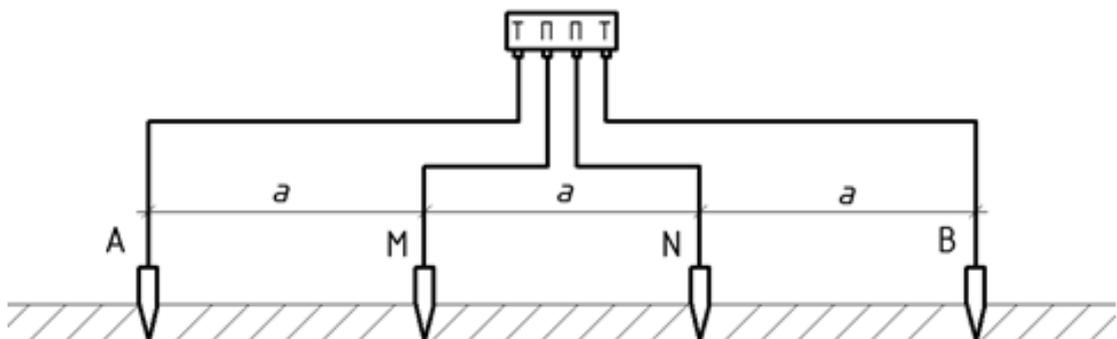


Рисунок 3.6 – Четырехэлектродная схема проведения измерения удельного электрического сопротивления грунта

Для проведения измерений необходимо наличие:

- ровной грунтовой площадки, не имеющей посторонних предметов, вызывающих помехи и влияющих на показания измерительных приборов;
- участка трубопровода, расположенного в грунте;
- имитаторов заземляющих электродов из следующих материалов: сталь, оцинкованная сталь, медь, эластомер;
- различных видов анодных заземлений (точечные и протяженные имитаторы из стали и эластомерного материала) и действующей установки, имитирующей работу станции катодной защиты, обеспечивающей защитный потенциал на участке подземного трубопровода в соответствии с требованиями [27].

Экспериментальное исследование выполнялось в соответствии с разработанной методикой с учетом результатов планирования эксперимента в несколько этапов, последовательность и содержание которых представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Этапы проведения экспериментального исследования

Содержание работ	Дополнительные сведения
1	2
Подготовительный этап	
Подготовка необходимого оборудования и измерительных приборов	В соответствии с таблицей 3.1.
Сборка экспериментального стенда	В соответствии с рисунком 3.1.
I этап	
Измерение разности потенциалов «труба-земля» при отсутствии влияния защитных заземлений и без учета неоднородности грунтовых характеристик	Анодное заземление №1 – стальная пластина, сталь марки 09Г2С – 21x10 см; Анодное заземление №2 – эластомерная пластина – 21x10 см; Удельное электрическое сопротивление грунта $\rho_{гр}=100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; Выходное напряжение СКЗ $U=1 \text{ В}$; Выходная сила тока СКЗ $I=0,0016 \text{ А}$.

Продолжение таблицы 3.3

1	2
II этап	
Измерение разности потенциалов «труба-земля» при наличии влияния защитных заземлений и без учета неоднородности грунтовых характеристик	Анодное заземление №1, 2 (см. I этап); Защитное заземление №1 – стальная пластина - 8x0,1x2,1 см; Защитное заземление №2 – пластина из оцинкованной стали - 8x0,1x2,1 см; Защитное заземление №3 – медная пластина - 8x0,1x2,1 см; Защитное заземление №4 – эластомерная пластина - 4,5x1,5 см; Удельное электрическое сопротивление грунта $\rho_{гр}=100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; Выходное напряжение СКЗ $U=1 \text{ В}$; Выходная сила тока СКЗ $I=0,0016 \text{ А}$.
III этап	
Измерение разности потенциалов «труба-земля» при наличии влияния защитных заземлений и с учетом неоднородности грунтовых характеристик в месте установки защитного заземления	Анодное заземление №1, 2 (см. I этап); Защитное заземление №1, 2, 3, 4 (см. II этап); Удельное электрическое сопротивление грунта $\rho_{гр}=100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; Выходное напряжение СКЗ $U=1 \text{ В}$; Выходная сила тока СКЗ $I=0,0016 \text{ А}$; 1) Удельное электрическое сопротивление грунта в месте установки защитного заземления $\rho_{гр1(ЗЗ)}=100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; Удельное электрическое сопротивление грунта в месте установки анодного заземления $\rho_{гр1(АЗ)}=100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; 2) Удельное электрическое сопротивление грунта в месте установки защитного заземления $\rho_{гр2(ЗЗ)}=0,22 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; Удельное электрическое сопротивление грунта в месте установки анодного заземления $\rho_{гр2(АЗ)}=100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$;
Измерение разности потенциалов «труба-земля» при наличии влияния защитных заземлений и с учетом неоднородности грунтовых характеристик в местах установки анодного и защитного заземления	Анодное заземление №1, 2, 3 (см. I этап); Защитное заземление №1, 2, 3, 4 (см. II этап); Удельное электрическое сопротивление грунта $\rho_{гр}=100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; Выходное напряжение СКЗ $U=1 \text{ В}$; Выходная сила тока СКЗ $I=0,0016 \text{ А}$.

Продолжение таблицы 3.3

1	2
	1) Удельное электрическое сопротивление грунта в месте установки защитного заземления $\rho_{гр1(ЗЗ)}=0,22 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; Удельное электрическое сопротивление грунта в месте установки анодного заземления $\rho_{гр1(АЗ)}=2,6 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; 2) Удельное электрическое сопротивление грунта в месте установки защитного заземления $\rho_{гр2(ЗЗ)}=2,6 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; Удельное электрическое сопротивление грунта в месте установки анодного заземления $\rho_{гр2(АЗ)}=2,6 \text{ Ом}\cdot\text{м}$;
Измерение разности потенциалов «труба-земля» при наличии влияния защитных заземлений и с учетом неоднородности грунтовых характеристик в месте установки анодного заземления	Анодное заземление №1, 2 (см. I этап); Защитное заземление №1, 2, 3, 4 (см. II этап); Удельное электрическое сопротивление грунта $\rho_{гр}=100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; Удельное электрическое сопротивление грунта в месте установки анодного заземления $\rho_{гр1(АЗ)}=2,6 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; Выходное напряжение СКЗ $U=1 \text{ В}$; Выходная сила тока СКЗ $I=0,0016 \text{ А}$.
Заключительный	
Обработка результатов экспериментального исследования	Визуализация результатов путем построения графиков распределения потенциалов по точкам измерения для различных вариантов в соответствии с этапами I-V с использованием пакета приложений Microsoft Office.

Удельное электрическое сопротивление грунта определяется по формуле:

$$\rho_{уд} = 2\pi \cdot d \cdot R, \quad (3.3)$$

где R – сопротивление грунта по показанию прибора, Ом;

d – расстояние между электродами, м.

$$\rho_{уд} = 2 \cdot 3,14 \cdot 0,56 \cdot 28,4 = 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$$

Для измерения разности потенциалов «труба-земля» путем последовательного перемещения медносульфатного электрода сравнения по точкам I, II, III, IV, V, VI, VII, VIII, IX вдоль рассматриваемого участка трубопровода (расстояние между точками составляет 300 мм) используется вольтметр В7-78/1.

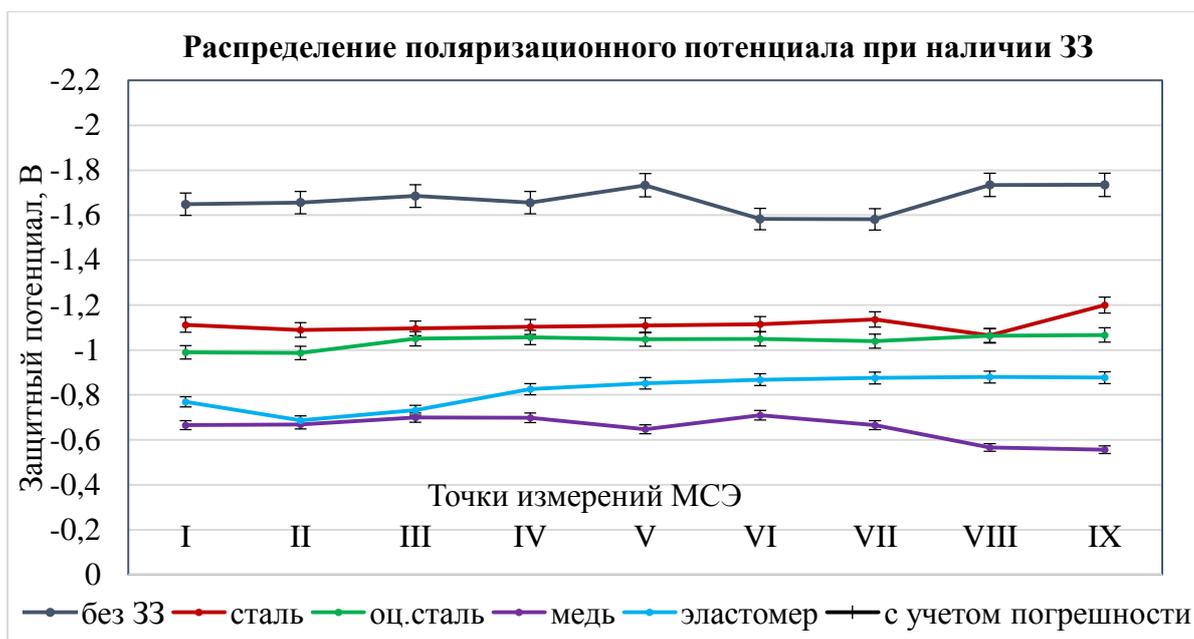
На первом этапе проведена оценка распределения разности потенциалов «труба – земля» путем измерения с использованием мультиметра при перемещениях медносульфатного электрода сравнения последовательно по точкам I-IX, расположенным вдоль рассматриваемого участка трубопровода на расстоянии 30 см друг от друга. В качестве анодного заземления последовательно подключались элементы в виде стальной пластины и эластомерной пластины. Среднее значение поляризационного потенциала в точке дренажа (точка V на рисунке 3.7 а) составило $U_{Т-З} = -1,75$ В.

На втором этапе проводилась оценка влияния наличия различных имитаторов вертикальных заземляющих электродов из черной стали, оцинкованной стали, меди и эластомерного материала соответственно, располагаемых поочередно между трубопроводом и анодным заземлением, на распределение поляризационного потенциала вдоль рассматриваемого участка модели трубопровода.

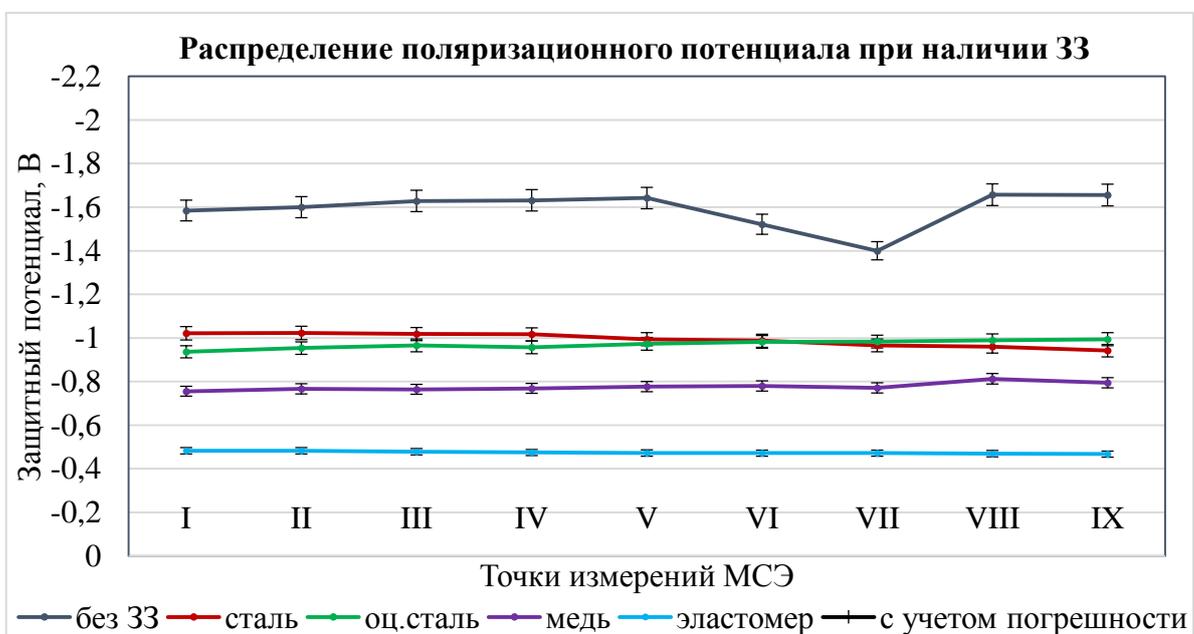
Поскольку в проведенных ранее лабораторных исследованиях [36] влияния защитных заземлений на параметры токораспределения в системе ЭХЗ было установлено, что наиболее негативный эффект на уровень защищенности трубопровода исходя из значений защитного потенциала оказывают элементы защитного заземления, расположенные между трубопроводом и анодным заземлением [27], то для проведения настоящего этапа исследования также была выбрана аналогичная координата расположения защитного заземления. Для определения средней величины экранирующего влияния защитное заземление было установлено на равноудаленном расстоянии от катоднозащищаемого трубопровода и анодного заземления.

Результаты проведения измерений разности потенциалов «труба – земля», а также изменения данной величины при наличии защитного заземления, позволяют заключить, что наиболее существенное влияние на изменение величины потенциала оказывают заземлители, выполненные из меди и эластомерного материала, что приводит к несоответствию уровня защищенности трубопровода

требованиям [27]. Данные выводы совпадают с результатами исследований, выполненных ранее [34, 35, 36].

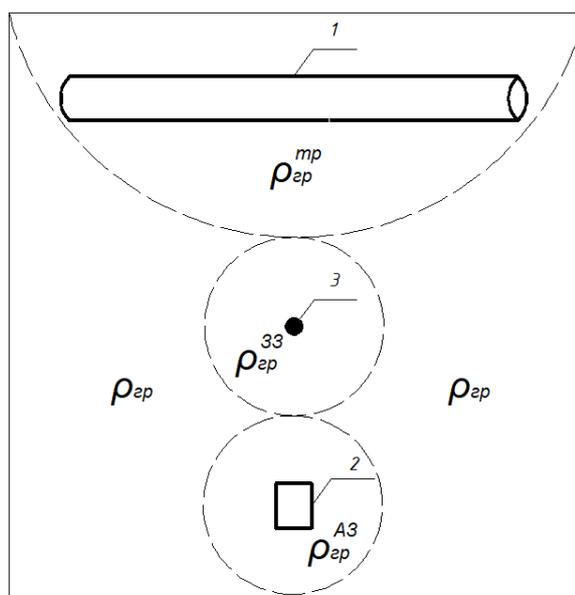


а) Условия эксперимента: удельное сопротивление грунта, $\rho_{гр} = \text{const} = 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ (анодное заземление – стальная пластина); точки I-IX – точки измерений МСЭ; ЗЗ – защитное заземление (сталь, оц.сталь, медь, эластомер)



б) Условия эксперимента: удельное сопротивление грунта, $\rho_{гр} = \text{const} = 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ (анодное заземление – эластомер); точки I-IX – точки измерений МСЭ; ЗЗ – защитное заземление (сталь, оц.сталь, медь, эластомер)

Рисунок 3.7 – Распределение защитного потенциала трубопровода



1 – катоднозащищаемый трубопровод; 2 – анодное заземление;

3 – заземляющий электрод

Рисунок 3.8 – Схема, поясняющая причину возникновения неоднородности грунтовых характеристик на территории промышленной площадки

Пусть имеется подземный участок трубопровода 1, защита которого от коррозии обеспечивается работой станции катодной защиты (на рисунке не показана) и анодного заземления 2. Вблизи катоднозащищаемого трубопровода расположен заземляющий электрод 3, электрически соединенный с системой катодной защиты.

При выполнении комплексного коррозионного обследования трубопроводов и оборудования промышленной площадки установлено, что удельное электрическое сопротивление грунта, измеренное в произвольной точке вблизи рассматриваемого участка трубопровода, составляет $\rho_{гр}=100$ Ом·м, что свидетельствует о низкой коррозионной активности грунта и не требует применения каких-либо компенсирующих мероприятий. Однако, при выполнении измерений не учитывался тот факт, что удельное электрическое сопротивление грунта в локальных точках (вблизи трубопровода, а также в местах установки заземляющего электрода и анодного заземления) может значительно отличаться от измеренного значения по причине неравномерного сопротивления грунта по всей

площади стенда, отсюда неравномерная линия распределения защитного потенциала.

Пусть удельное электрическое сопротивление грунта вблизи трубопровода составляет $\rho_{\text{гр}}^{\text{тр}}$, Ом·м, в месте расположения анодного заземления $\rho_{\text{гр}}^{\text{АЗ}}$, Ом·м, в месте установки заземляющего электрода $\rho_{\text{гр}}^{\text{ЗЗ}}$, Ом·м, тогда необходимо определить, как влияет различное сочетание указанных параметров грунта на изменение величины поляризационного потенциала на рассматриваемом участке трубопровода.

В соответствии с планом экспериментального исследования (таблица 3.3) на данном этапе необходимо произвести обработку грунта в местах установки заземляющего электрода и анодного заземления таким образом, чтобы обеспечить наиболее достоверное соответствие с возможными реальными условиями на территории промышленной площадки, а именно снизить величину удельного электрического сопротивления грунта до минимального значения с целью уменьшения сопротивления заземляющего электрода или анодного заземления. В практике распространена укладка около трубчатого заземлителя соли слоями так, как показано на рисунке 3.9 [20, 66].

Обработка грунта проводилась последовательно с использованием соли и коксовой засыпки в соответствии с рисунком 3.9. Была обработана зона радиусом 6 см вокруг рассматриваемого элемента глубиной обработки 10 см (слоев по 2 см).

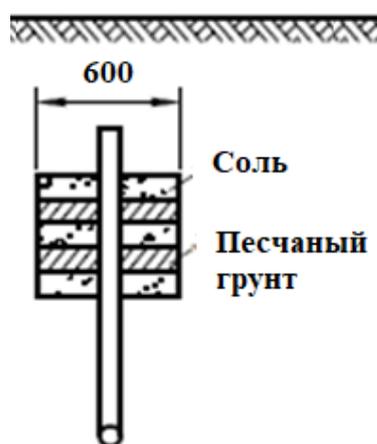
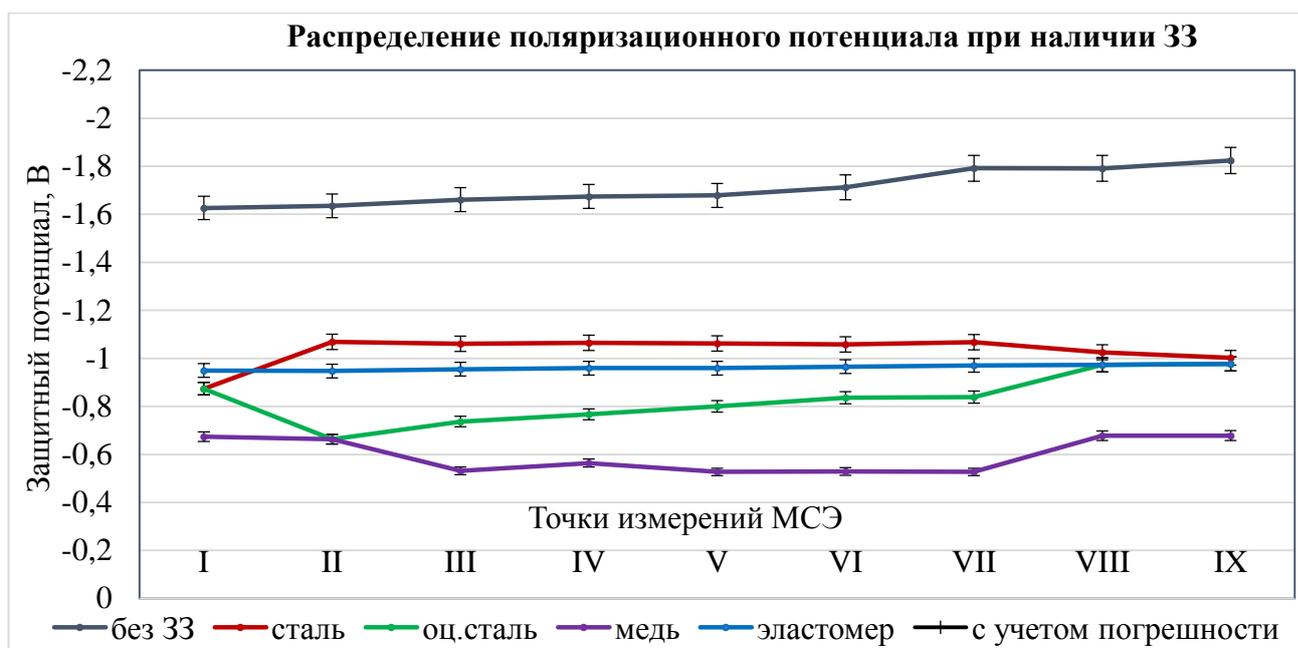


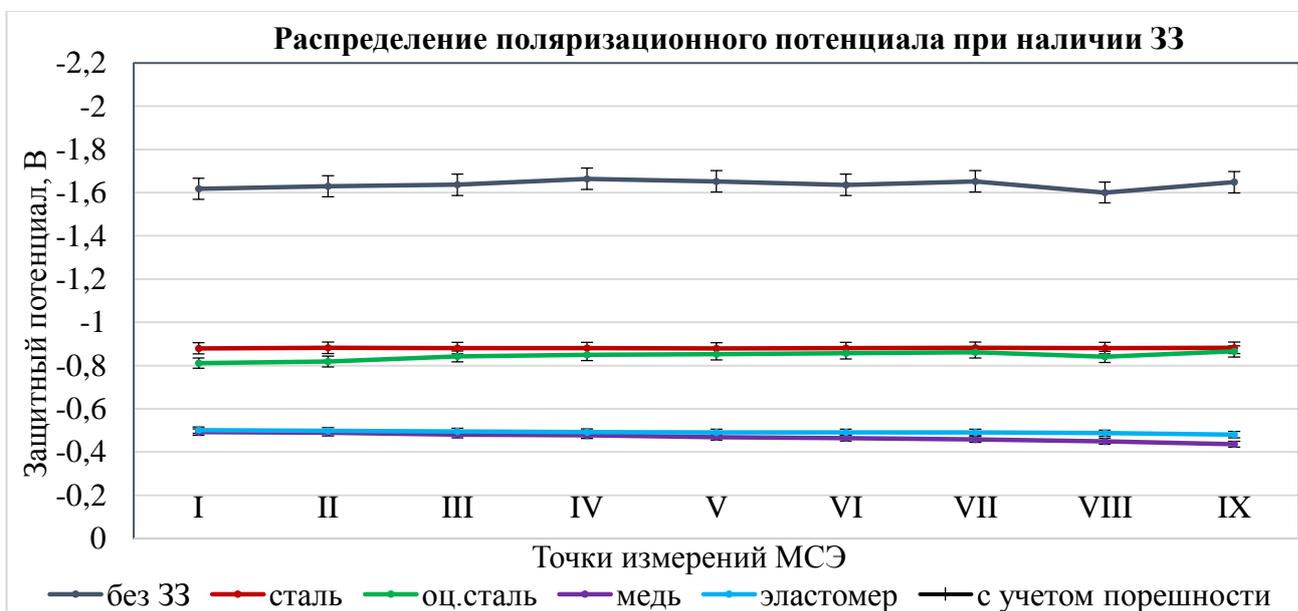
Рисунок 3.9 – Схема укладки слоев соли и песчаного грунта вокруг заземлителя

Некоторые результаты измерений защитного потенциала вдоль рассматриваемого участка трубопровода для случая с анодным заземлением в составе системы катодной защиты в виде пластины из черной стали, а также при последовательном подключении в электрическую цепь имитаторов защитного заземления в виде заземляющих электродов из черной стали, оцинкованной стали, меди, эластомера соответственно представлены на рисунке 3.10, где показаны значения защитного потенциала при трех вариантах неоднородности удельного электрического сопротивления грунта. Из полученных данных можно сделать вывод, что при обработке грунта вокруг оцинкованного заземляющего электрода с целью уменьшения его удельного электрического сопротивления его негативное влияние на распределение защитного тока в системе ЭХЗ резко увеличивается, что противоречит общепринятым рекомендациям использования элементов из оцинкованных влияний на территории промышленной площадки с целью сведения к минимуму явления экранирования катодного тока.

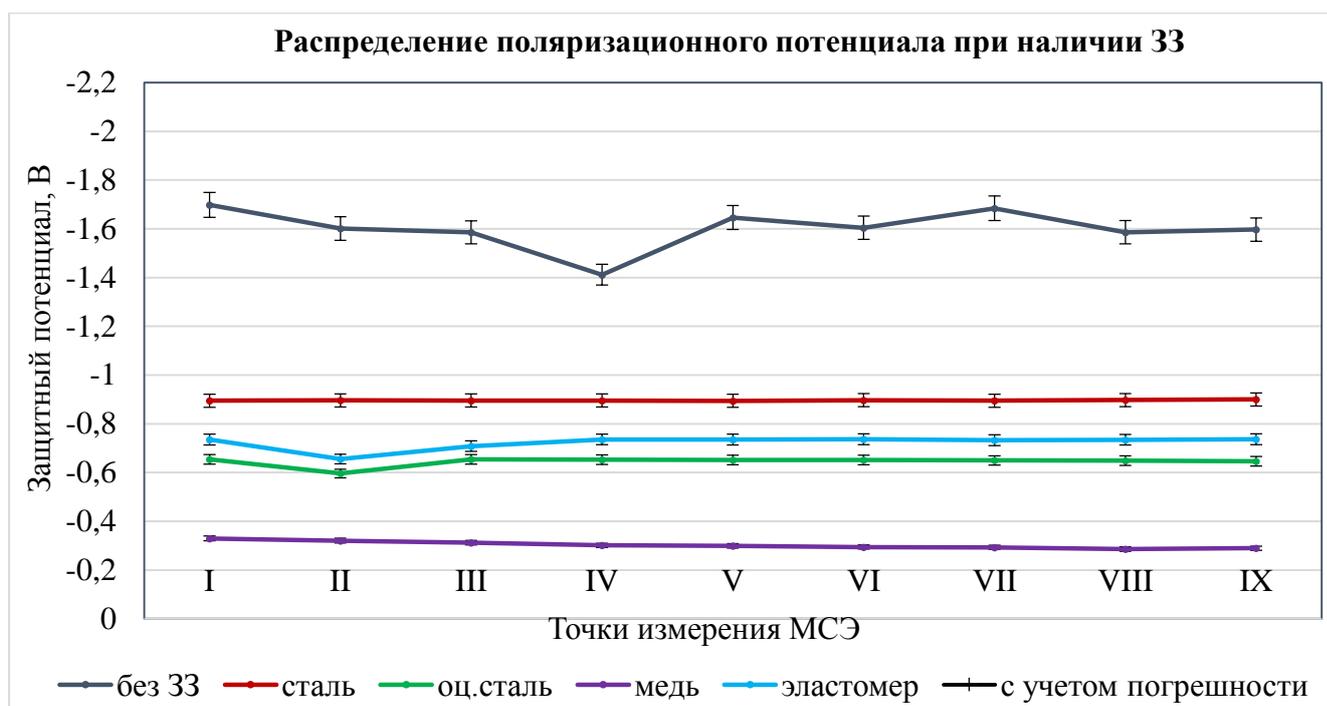
Исходя из полученных результатов измерений защитного потенциала в случае значительного снижения удельного сопротивления грунта в месте установки заземляющего электрода установлено, что использование в контурах заземления эластомерного материала может способствовать предотвращению или минимизации экранирующего влияния объектов, не включенных в систему катодной защиты с подключенным анодными заземлениями из черной стали (рисунки 3.10 а и 3.10 в).



- а) Условия эксперимента: удельное сопротивление грунта, $\rho_{гр} = 0,22 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ (защитное заземление (ЗЗ) в соли), удельное сопротивление грунта, $\rho_{гр} = \text{const} = 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ (анодное заземление – стальная пластина); точки I-IX – точки измерений МСЭ; ЗЗ – защитное заземление (сталь, оцинкованная сталь, медь, эластомер)



- б) Условия эксперимента: удельное сопротивление грунта, $\rho_{гр} = 2,6 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ (анодное заземление (АЗ) в коксе), удельное сопротивление грунта, $\rho_{гр} = \text{const} = 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ (защитное заземление (ЗЗ) – стальная пластина); точки I-IX – точки измерений МСЭ; ЗЗ – защитное заземление (сталь, оцинкованная сталь, медь, эластомер)



в) Условия эксперимента: удельное сопротивление грунта, $\rho_{гр} = 2,6 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ (анодное заземление (АЗ) – стальная пластина в коксе), удельное сопротивление грунта, $\rho_{гр} = 2,6 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ (защитное заземление (ЗЗ) – стальная пластина в соли); точки I-IX – точки измерений МСЭ; ЗЗ – защитное заземление (сталь, оцинкованная сталь, медь, эластомер)

Рисунок 3.10 – Распределение защитного потенциала трубопровода при трех вариантах неоднородности удельного электрического сопротивления грунта

Таким образом, можно сформулировать некоторые предварительные рекомендации по применению в системе защитного заземления элементов из эластомерных материалов с целью снижения их негативного влияния на систему катодной защиты со стальными анодными заземлениями на участках наиболее разветвленных протяженных систем промышленных площадок в контурах защитных заземлений устройств грозозащиты и защиты от высоких напряжений и статического электричества любых промышленных объектов (за исключением пожароопасных и взрывоопасных зон), а также частичное (точечное) использование эластомерных заземляющих электродов в коррозионно-агрессивных и высокоомных грунтах.

Необходимо отметить, что с целью сохранения заземляющих эластомерных электродов в работоспособном состоянии на протяжении всего срока эксплуатации необходимо соблюдать требование по их установке в грунтах с содержанием водорастворимых солей до 4 г/кг при рН от 4 до 9 либо предусматривать при проектировании системы защитного заземления эластомерных электродов в специализированной оболочке по согласованию с изготовителем.

На основании результатов измерений поляризационного потенциала, выполненных на третьем этапе экспериментального исследования, были получены значения снижения величины защитного потенциала по абсолютной величине ΔU_{m-3} , В, следующим образом:

$$\Delta U_{T-3} = |U_{T-3}| - |U_{T-3}^{\rho_{gp}}|, \quad (3.4)$$

где U_{T-3} - величина поляризационного потенциала в условиях однородности удельного электрического сопротивления грунта при отсутствии влияния на систему ЭХЗ заземляющих элементов, В;

$U_{T-3}^{\rho_{gp}}$ - величина поляризационного потенциала при заданных значениях удельного электрического сопротивления грунта в условиях влияния на систему ЭХЗ заземляющих элементов, В.

В качестве исходного значения поляризационного потенциала в условиях однородности грунтовых характеристик ($\rho_{gp} = 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) при отсутствии влияния защитных заземлений принимаем $U_{T-3} \approx -1,67 \text{ В}$, что является допустимым исходя из нормируемых требований.

В таблице 3.5 приведены результаты расчета значений снижения поляризационного потенциала, красным цветом отмечены случаи, при которых величины защитного потенциала не соответствует требованиям [27] к минимально допустимым значениям для данных условий.

Таблица 3.5 - Некоторые результаты измерений защитного потенциала (точка V в соответствии с рисунком 3.10 при наличии влияния заземляющих электродов заземлений и с учетом неоднородности грунтовых характеристик в местах установки анодного и защитного заземления)

		Грунтовые характеристики				
		Зона	Удельное электрическое сопротивление грунта $\rho_{гр}$, Ом·м			
Материал анодного заземления	Материал заземляющего электрода	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 $\Delta U_{m-з}$, 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	

Отметим, что влияние медных и эластомерных заземляющих электродов в большинстве случаев оказывает негативное влияние и приводит к резкому снижению защитных потенциалов по абсолютной величине (исключением являются случаи установки эластомерных заземляющих электродов в условиях высокой коррозионной активности, как было отмечено выше). В условиях неоднородности грунтовых характеристик при 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 эластомерного материала) приводит к снижению уровня защищенности от коррозии подземного трубопровода по причине падения

защитного потенциала до значений, не соответствующих нормативным требованиям, что может повлечь за собой дополнительные расходы, связанные с необходимостью наладки или реконструкции системы ЭХЗ трубопроводов и оборудования промышленных площадок.

3.2 Анализ влияния доминирующих факторов на защищенность подземных технологических трубопроводов от коррозии в условиях неоднородности грунтовых характеристик

Дисперсионный анализ применяют для изучения влияния качественных признаков на количественную переменную. Сущность дисперсионного анализа состоит в выделении и оценке отдельных независимых факторов, вызывающих изменчивость. С этой целью производят разложение общей дисперсии наблюдаемой частичной совокупности, вызванной всеми источниками изменчивости, в общей совокупности. Для проверки значимости этих составляющих оценок дисперсии их сравнивают с общей дисперсией в общей совокупности (по критерию Фишера) [12, 13, 25].

При двухфакторном анализе исследуется влияние двух качественных факторов A и B на отклик X . В этом случае дисперсионный анализ основывается на результатах эксперимента, проводимого на различных уровнях каждого из факторов. Предполагается, что взаимосвязь между факторами отсутствует.

В работе приведены результаты анализа данных, полученных в ходе экспериментального исследования изменения разности потенциалов «труба-земля» в зависимости от влияния таких факторов, как неоднородность удельного электрического сопротивления грунта и материала заземляющего электрода, электрически связанного с катоднозащищаемым сооружением и оказывающего негативное влияние на уровень защищенности подземного трубопровода от коррозии.

Результаты проведения измерений разности потенциалов «труба – земля», а также изменения данной величины при наличии защитного заземления позволяют

заклучить, что наличие медных и эластомерных заземляющих электродов в большинстве случаев оказывает негативное влияние и приводит к резкому снижению защитных потенциалов по абсолютной величине (исключением являются случаи установки эластомерных заземляющих электродов в условиях высокой коррозионной активности). В условиях неоднородности грунтовых характеристик наблюдается снижение уровня защищенности от коррозии подземного трубопровода по причине падения защитного потенциала до значений, не соответствующих нормативным требованиям, что может повлечь за собой дополнительные расходы, связанные с необходимостью наладки или реконструкции системы ЭХЗ трубопроводов и оборудования промышленных площадок.

Однако полученные результаты измерений и предварительные результаты их анализа не позволяют дать достоверную оценку с использованием классических подходов ввиду того, что часть необходимых данных может отсутствовать. Например, в реальных условиях эксплуатации технологических трубопроводов площадных объектов зачастую невозможно провести детальное описание всех параметров (например, дать оценку характеристикам грунтов по причине недостаточного количества точек измерений или отсутствия специального оборудования), из-за несоответствия расположения и характеристик элементов системы защитного заземления проектным данным или отсутствия соответствующей документации и т. д. В подобных обстоятельствах для решения задачи по оценке влияния различных факторов на процесс используется непараметрический дисперсионный анализ.

Цель анализа данных лабораторного исследования – оценка влияния различных факторов и их совместного влияния на величину защитного потенциала в условиях экранирования катодного тока защитными заземлениями с учетом неоднородности грунтовых характеристик.

Задачи исследования:

1. Выполнить анализ влияния материала анодного заземления и материала заземляющего электрода, электрически соединенного с системой катодной защиты

подземного трубопровода, а также совместного влияния данных факторов на величину поляризационного потенциала;

2. Оценить степень влияния заземляющих электродов, имеющих электрическую связь с системой катодной защиты подземного трубопровода, на величину поляризационного потенциала в условиях неоднородности грунтовых характеристик;

3. Сформулировать требования к предоставляемым для анализа результатам электрометрических обследований технологических трубопроводов промышленных площадок в объеме, позволяющем выполнять достоверную оценку степени влияния опасных факторов на уровень защищенности от коррозии.

Для решения *первой поставленной задачи* определим факторы, влияющие на исследуемый количественный признак – защитный потенциал подземного трубопровода:

– фактор А – материал анодного заземления: А1 – сталь; А2 – токопроводящий эластомер;

– фактор В – материал заземляющего электрода: В1 – сталь; В2 – оцинкованная сталь; В3 – медь; В4 – токопроводящий эластомер.

При проведении анализа в качестве исследуемого признака принимаем величину защитного потенциала, т. е. каждому сочетанию рассматриваемых факторов соответствует измеренное значение поляризационного потенциала. Результаты эксперимента с повторными опытами представлены в таблице 3.6.

Имеется таблица дисперсионного анализа с m уровнями фактора А ($i = 1, 2, \dots, m$) и k уровнями фактора В ($j = 1, 2, \dots, k$), т. е. таблица имеет m строк и k столбцов. Пусть n_{ij} – число наблюдений в ячейке, расположенной на пересечении j -й строки и i -го столбца.

Таблица 3.6 – Результаты измерений поляризационных потенциалов $U_{m-з}$, В, используемые для оценки влияния материала анодного заземления катодной защиты и материала заземляющих электродов

Материал анодного заземления	Материал заземляющего электрода			
	Сталь (B1)	Оцинкованная сталь (B2)	Медь (B3)	Токопроводящий эластомер (B4)
Сталь (A1)	-1,108	-1,048	-0,647	-0,852
	-1,109	-1,048	-0,647	-0,852
	-1,109	-1,048	-0,647	-0,852
	-1,11	-1,048	-0,647	-0,853
	-1,11	-1,048	-0,648	-0,853
Токопроводящий эластомер (A2)	-0,994	-0,972	-0,776	-0,472
	-0,994	-0,972	-0,776	-0,473
	-0,994	-0,974	-0,777	-0,473
	-0,994	-0,975	-0,777	-0,472
	-0,994	-0,976	-0,776	-0,472

Для решения поставленной задачи выбран уровень доверительной вероятности $P=0,95$. Необходимо отметить, что значение уровня доверительной вероятности P для анализа данных, полученных в условиях эксплуатации реальных промышленных объектов, принимается, как правило, меньше указанного значения, поскольку, например, оценка грунтовых характеристик носит условный характер, а отнесение грунтов к тем или иным типам зачастую зависит от погодных условий, времени года, компетентности специалиста, проводящего измерения, а также от способа проведения измерений. Кроме того, имеет место изменение типа грунта по глубине. Определенную долю погрешности содержат также результаты измерений поляризационного потенциала [90]. В случае анализа данных рассматриваемого экспериментального исследования исключены перечисленные погрешности, влияющие на результаты измерений.

Для проведения анализа используем данные таблицы, последовательно выделяя пары оцениваемых факторов для всех возможных вариантов их одновременного взаимодействия [78].

Этап I. Формулирование гипотез [11]

Требуется проверить на уровне значимости $\alpha=0,05$ гипотезы:

- $H_0(A)$ — отсутствие влияния фактора A на величину отклика (значение поляризационного потенциала);
- $H_0(B)$ — отсутствие влияния фактора B на величину отклика (значение поляризационного потенциала);
- взаимосвязь между факторами A и B отсутствует.

Этап II. Расчет данных [11]

- 1) Расчет средних значений по каждому уровню факторов A и B ;
- 2) Определение суммы квадратов отклонений под влиянием m уровней фактора A , k уровней фактора B , взаимодействия A и B , а также остаточной суммы квадратов;
- 3) Оценка дисперсии уровней факторов A , B и их взаимодействия, а также оценка дисперсии ошибки.

Результаты расчетов приведены в таблице 2.

Этап III. Анализ результатов

Предварительные выводы о влиянии и взаимовлиянии рассматриваемых факторов можно заключить на основании графического представления данных на диаграмме (рисунок 3.11).

По оси абсцисс отложены уровни фактора A , по оси ординат отложены средние значения защитного потенциала, которые сгруппированы по четырем уровням фактора B .

Поскольку на рисунке 3.11 имеет место пересечение уровней фактора B , это позволяет заключить, что наблюдается взаимодействие рассматриваемых факторов, которое необходимо учитывать в ходе дисперсионного анализа данных.

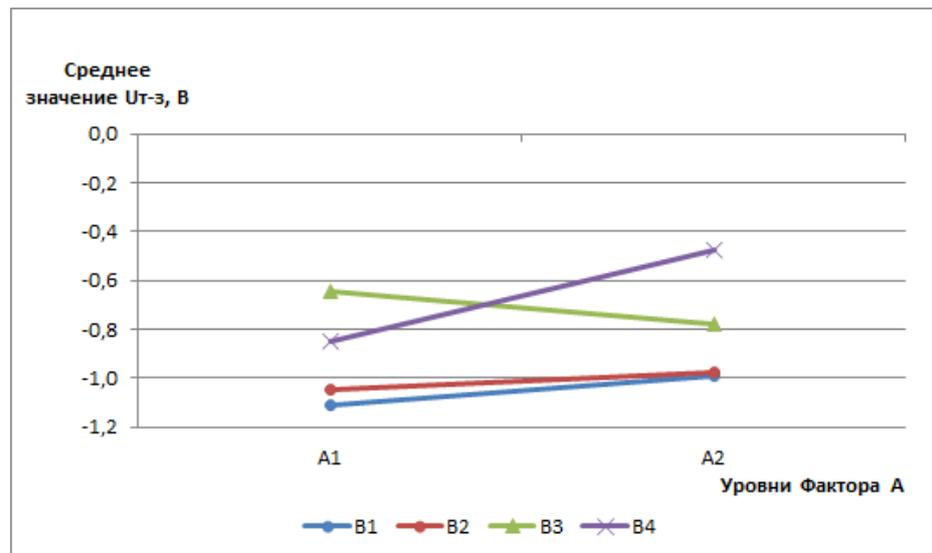


Рисунок 3.11 – Данные, используемые для оценки влияния материала анодного заземления катодной защиты (фактор А) и материала заземляющих электродов (фактор В)

Определим число степеней свободы для каждого фактора.

- фактор А: $\nu_A = m - 1 = 2 - 1 = 1$ (m - количество уровней фактора А);
- фактор В: $\nu_B = k - 1 = 4 - 1 = 3$ (k - количество уровней фактора В);
- взаимодействие факторов А и В: $\nu_{AB} = (m - 1) \cdot (k - 1) = (2 - 1) \cdot (4 - 1) = 3$;
- ошибка внутри группы: $\nu_{ош} = m \cdot k \cdot (n - 1) = 2 \cdot 4 \cdot (5 - 1) = 32$ (n - количество измерений в каждой группе).

Для оценки влияния фактора А на величину защитного потенциала найдем табличное значение F-критерия Фишера [23, 43] со степенями свободы $\nu_A = 1$ и $\nu_{ош} = 32$, $F_{табл} = 4,15$.

Для оценки влияния фактора В на величину защитного потенциала найдем табличное значение F-критерия Фишера [23, 43] со степенями свободы $\nu_B = 3$ и $\nu_{ош} = 32$, $F_{табл} = 2,9$.

Для оценки взаимного влияния факторов А и В на величину защитного потенциала найдем табличное значение F-критерия Фишера [23, 43] со степенями свободы $\nu_{AB} = 3$ и $\nu_{ош} = 32$, $F_{табл} = 2,9$.

Результаты дисперсионного анализа представлены в таблице 3.7.

Если фактическое отношение Фишера больше критического отношения Фишера, то следует отклонить нулевую гипотезу с уровнем значимости α . Это означает, что фактор существенно влияет на данные: имеется зависимость их изменения от влияния фактора с вероятностью $P = 1 - \alpha$. Кроме того, Р-значение ниже заданного уровня значимости α , тогда нулевая гипотеза отвергается.

Таблица 3.7 – Результаты дисперсионного анализа влияния материала анодного заземления и материала заземляющего электрода на поляризационный потенциал

Источник вариации	Сумма квадратов отклонений	Число степеней свободы	Дисперсия	Фактическое значение отношения Фишера	Р-значение	Критическое значение отношения Фишера
Фактор А	0,12	1	0,12	193776	≈ 0	4,15
Фактор В	1,20	3	0,40	642600,8	≈ 0	2,9
Взаимодействие А и В	0,33	3	0,11	175233,7	≈ 0	2,9
Ошибка внутри группы	$2 \cdot 10^{-5}$	32	$6,25 \cdot 10^{-7}$			

Т. к. фактическое значение отношения Фишера больше критического для всех рассматриваемых факторов, а также для их взаимодействия, по результатам дисперсионного анализа можно заключить, что величина защитного потенциала зависит от материала анодного заземления, входящего в состав установки катодной защиты, и материала заземляющего электрода, электрически соединенного с системой катодной защиты трубопровода. Кроме того, влияние вышеперечисленных факторов имеет взаимную связь.

В рамках решения *второй задачи* определим факторы, влияющие на исследуемый количественный признак – защитный потенциал подземного трубопровода:

– фактор А – грунтовые характеристики: А1 – удельное электрическое сопротивление грунта в месте установки защитного заземления $\rho_{гр1(ЗЗ)} = 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; удельное электрическое сопротивление грунта в месте установки анодного заземления $\rho_{гр1(АЗ)} = 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; А2 – удельное электрическое сопротивление грунта в месте установки защитного заземления $\rho_{гр2(ЗЗ)} = 0,22 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; удельное электрическое сопротивление грунта в месте установки анодного заземления $\rho_{гр2(АЗ)} = 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; А3 – удельное электрическое сопротивление грунта в месте установки защитного заземления $\rho_{гр3(ЗЗ)} = 0,22 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; удельное электрическое сопротивление грунта в месте установки анодного заземления $\rho_{гр3(АЗ)} = 2,6 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; А4 – удельное электрическое сопротивление грунта в месте установки защитного заземления $\rho_{гр4(АЗ)} = 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; удельное электрическое сопротивление грунта в месте установки анодного заземления $\rho_{гр4(АЗ)} = 2,6 \text{ Ом}\cdot\text{м}$;

– фактор В – материал заземляющего электрода: В1 – сталь; В2 – оцинкованная сталь; В3 – медь; В4 – токопроводящий эластомер.

При проведении анализа в качестве исследуемого признака принимаем величину защитного потенциала, т. е. каждому сочетанию рассматриваемых факторов соответствует измеренное значение поляризационного потенциала. Результаты эксперимента с использованием в качестве анодного заземления пластины из черной стали с повторными опытами (пять измерений защитного потенциала в каждой точке) представлены в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Результаты измерений потенциалов $U_{m-з}$, В, используемые для оценки влияния параметров грунта и материала заземляющих электродов (материал анодного заземления - сталь)

Параметры грунта	Материал заземляющего электрода			
	Сталь (В1)	Оцинкованная сталь (В2)	Медь (В3)	Токопроводящий эластомер (В4)
1	2	3	4	5
$\rho_{гр1(ЗЗ)} = 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$;	-1,108	-1,061	-0,894	-0,879
	-1,109	-1,06	-0,894	-0,88

Продолжение таблицы 3.8

1	2	3	4	5
$\rho_{гр1(A3)} = 100 \text{ Ом} \cdot \text{м} (A1)$	-1,109	-1,062	-0,895	-0,878
	-1,11	-1,063	-0,894	-0,878
	-1,11	-1,062	-0,895	-0,879
$\rho_{гр2(33)} = 0,22 \text{ Ом} \cdot \text{м};$ $\rho_{гр2(A3)} = 100 \text{ Ом} \cdot \text{м} (A2)$	-1,048	-0,959	-0,651	-0,85
	-1,048	-0,96	-0,651	-0,851
	-1,048	-0,961	-0,65	-0,852
	-1,048	-0,96	-0,651	-0,853
	-1,048	-0,961	-0,652	-0,854
$\rho_{гр3(33)} = 0,22 \text{ Ом} \cdot \text{м};$ $\rho_{гр3(A3)} = 2,6 \text{ Ом} \cdot \text{м} (A3)$	-0,647	-0,526	-0,3	-0,467
	-0,647	-0,527	-0,299	-0,468
	-0,647	-0,525	-0,298	-0,469
	-0,647	-0,528	-0,299	-0,47
	-0,648	-0,529	-0,298	-0,47
$\rho_{гр4(A3)} = 100 \text{ Ом} \cdot \text{м};$ $\rho_{гр4(A3)} = 2,6 \text{ Ом} \cdot \text{м} (A4)$	-0,852	-0,96	-0,735	-0,49
	-0,852	-0,959	-0,736	-0,489
	-0,852	-0,958	-0,735	-0,491
	-0,853	-0,959	-0,736	-0,49
	-0,853	-0,96	-0,734	-0,491

На основании характера графического представления данных на диаграмме (рисунок 3.12) можно сделать вывод, что наблюдается взаимодействие рассматриваемых факторов, которое необходимо учитывать в ходе дальнейшего дисперсионного анализа данных.

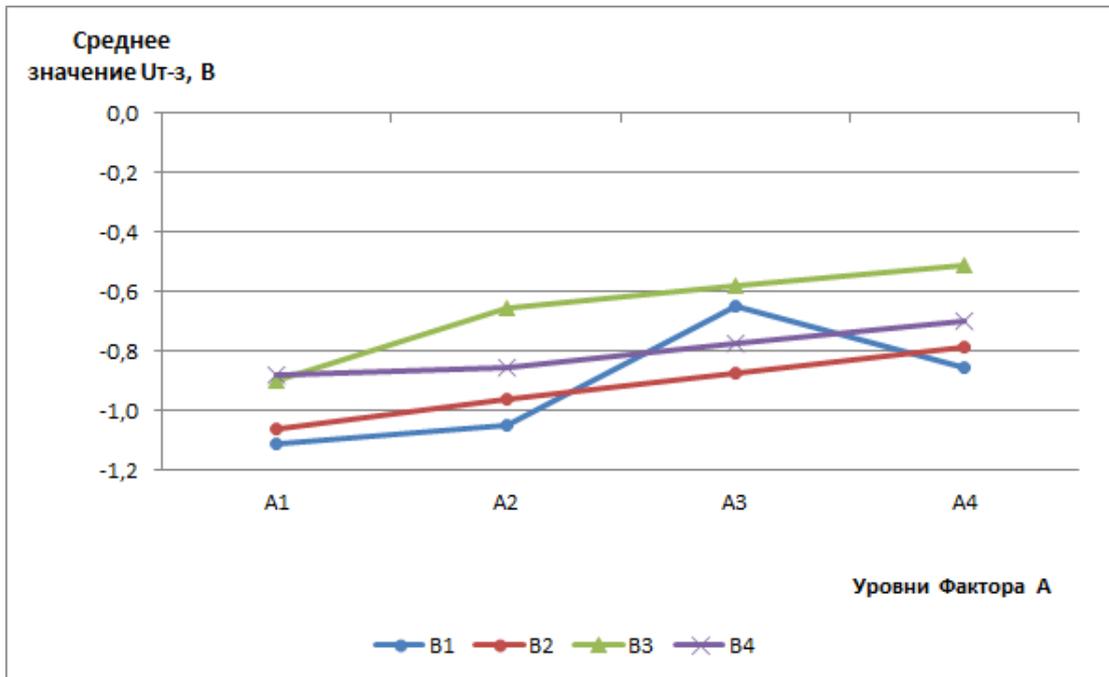


Рисунок 3.12 – Данные, используемые для оценки влияния неоднородности параметров грунта (фактор А) и материала заземляющих электродов (фактор В) на изменение защитного потенциала трубопровода (материал анодного заземления - черная сталь)

Анализ данных также выполняется в три этапа: формулирование гипотез, расчет данных, анализ результатов.

Определим число степеней свободы для каждого фактора.

- фактор А: $\nu_A = m - 1 = 4 - 1 = 3$ (m - количество уровней фактора А);
- фактор В: $\nu_B = k - 1 = 4 - 1 = 3$ (k - количество уровней фактора В);
- взаимодействие факторов А и В: $\nu_{AB} = (m - 1) \cdot (k - 1) = (4 - 1) \cdot (4 - 1) = 9$;
- ошибка внутри группы: $\nu_{ош} = m \cdot k \cdot (n - 1) = 4 \cdot 4 \cdot (5 - 1) = 64$ (n - количество измерений в каждой группе).

Результаты анализа представлены в таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Результаты дисперсионного анализа влияния параметров грунта и материала заземляющего электрода на поляризационный потенциал (материал анодного заземления - черная сталь)

Источник вариации	Сумма квадратов отклонений	Число степеней свободы	Дисперсия	Фактическое значение отношения Фишера	P-значение	Критическое значение отношения Фишера
Фактор А	2,78	3	0,93	1045319	≈0	2,75
Фактор В	1,14	3	0,38	429807,3	≈0	2,75
Взаимодействие А и В	0,42	9	0,047	52828,43	≈0	2,03
Ошибка внутри группы	$5,7 \cdot 10^{-5}$	64	$8,9 \cdot 10^{-7}$			

В рамках *третьей поставленной задачи* аналогичным образом выполнен анализ результатов лабораторного исследования, при проведении которого в качестве анодного заземления катодной установки использовался электрод из токопроводящего эластомера. Предварительные результаты влияния параметров грунта и материала заземляющего электрода на среднее значение защитного потенциала выполнены графическим способом (рисунок 3.13). Поскольку наблюдается пересечение уровней фактора В, в ходе дальнейшего дисперсионного анализа необходимо оба рассматриваемых фактора, а также оценить уровень их взаимодействия.

Результаты дисперсионного анализа представлены в таблице 3.10. Т.к. фактическое значение отношения Фишера больше критического для всех рассматриваемых факторов, а также для их взаимодействия, следовательно, величина защитного потенциала подземного трубопровода зависит от характеристик грунта (в т.ч. от неоднородности удельного электрического сопротивления грунта в местах установки элементов защитного заземления и анодного заземления катодной защиты) и материала элементов защитного

заземления. Кроме того, существенно взаимодействие параметров грунта и материала элементов защитного заземления.

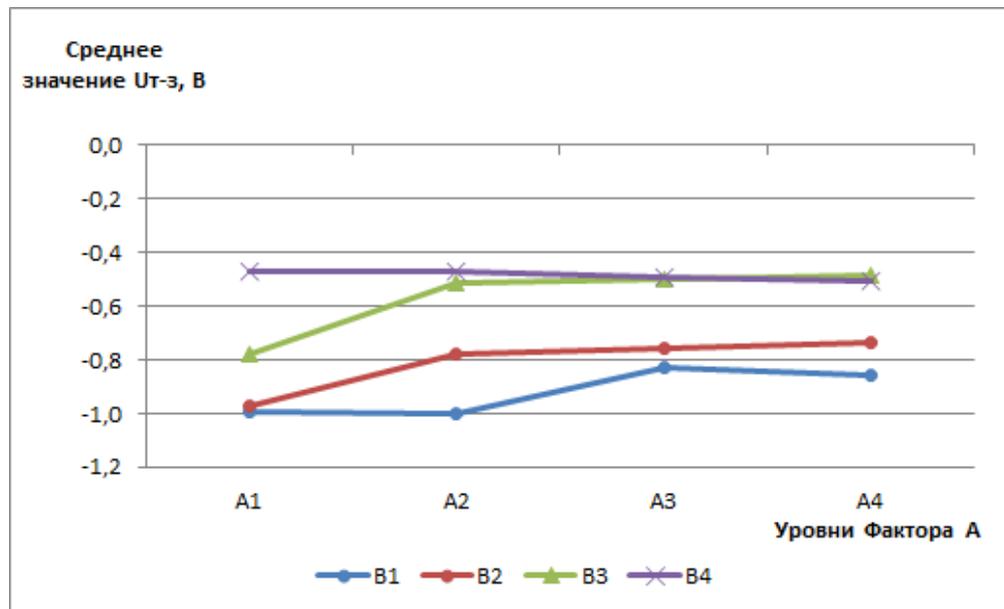


Рисунок 3.13 – Данные, используемых для оценки влияния неоднородности грунтовых характеристик (фактор А) и материала заземляющих электродов (фактор В) на изменение защитного потенциала трубопровода (материал анодного заземления - токопроводящий эластомер)

Таблица 3.10 – Результаты дисперсионного анализа влияния параметров грунта и материала заземляющего электрода на поляризационный потенциал (материал анодного заземления – токопроводящий эластомер)

Источник вариации	Сумма квадратов отклонений	Число степеней свободы	Дисперсия	Фактическое значение отношения Фишера	P-значение	Критическое значение отношения Фишера
Фактор А	0,37	3	0,12	96843,58	≈ 0	2,75
Фактор В	2,59	3	0,86	671106,6	≈ 0	2,75
Взаимодействие А и В	0,43	9	0,05	36936,4	≈ 0	2,03
Ошибка внутри группы	$8,2 \cdot 10^{-5}$	64	$1,3 \cdot 10^{-7}$			

Таким образом, необходимо отметить, что влияние доминирующих факторов, а именно материала анодного заземления, входящего в состав установок катодной защиты трубопроводов, и материала заземляющих электродов, электрически связанных с катоднозащищаемыми сооружениями, оказывают существенное влияние на уровень защищенности трубопроводов от коррозии, что выражается в изменении величины потенциала. Кроме того, дисперсионный анализ результатов экспериментального исследования показал, что наблюдается взаимное влияние указанных факторов, что необходимо учитывать при проектировании систем ЭХЗ технологических трубопроводов и оборудования площадных объектах, а также предусматривать соответствующие мероприятия в рамках эксплуатации, компенсирующие негативное влияние на величину защитного потенциала сооружений, вызываемое наличием электрической связи со смежными системами в условиях неоднородности грунтовых характеристик [108].

Для своевременной и достоверной оценки степени влияния опасных факторов, под действием которых величина защитного потенциала смещается за пределы, нормируемые ГОСТ Р 51164-98 [27], необходимо сформулировать требования к данным, предоставляемым для анализа с целью выбора профилактических и компенсирующих мероприятий:

- полученные в ходе электрометрических обследования трубопроводов и оборудования ПП значения поляризационного потенциала должны варьироваться по протяженности участка и по глубине заложения трубопровода [78];

- количество измерений защитного потенциала в каждой точке должно быть определено исходя из требований к обеспечению достоверности полученных данных;

- на территории ПП необходимо актуализировать соответствие типа и количества элементов системы защитного заземления и молниезащиты проектным данным либо установить фактическое положение указанных элементов и мест их электрического соединения с катоднозащищаемыми сооружениями путем проведения дополнительных обследований;

- в ходе определения физико-химических свойств грунта ПП необходимо выполнять измерения УЭС грунта не только вблизи катоднозащищаемых

коммуникаций, но и дополнить программу обследований локальными измерениями УЭС грунта вблизи элементов защитного заземления и молниезащиты [6, 58, 59, 60, 66, 69, 72, 91, 92].

Вопросом выявления значимых факторов, влияющих на распределение защитного потенциала сооружений на площадке, были посвящены научные исследования многих ученых. В работах Р. В. Агинеи, И. В. Глотова, Ю. В. Александрова, В. Н. Юшманова в качестве основных факторов рассмотрены: тип изоляции, наличие дефектов покрытий, переходное сопротивление изоляции трубопровода и УЭС грунта. В исследованиях Глотова И. В., помимо вышеперечисленных факторов, отмечено влияние работы экранов защитного тока и анодов. В работе Е. В. Исуповой доминирующими факторами определены защитные заземления, выполненные из различных материалов, с учетом изменения типа и материала анодного заземления и УЭС грунта в местах их установки. Настоящее диссертационное исследование дополняет результаты ранее проведенных изысканий за счет определения значимости фактора взаимного влияния материала анодного заземления, входящего в состав установок катодной защиты трубопроводов, и материала заземляющих электродов, электрически связанных с катоднозащищаемыми сооружениями в условиях неоднородности грунтовых характеристик.

3.3 Выводы по главе 3

1. Показано, что значения удельного электрического сопротивления грунта, определяемые в ходе комплексных коррозионных обследований систем ЭХЗ промышленных площадок с целью оценки его коррозионной активности, не соответствует реальным условиям, в которых функционируют различные элементы системы катодной защиты и защитного заземления по причине неоднородности грунтовых характеристик, являющейся следствием технической мелиорации грунтов.

2. Установлено, что при использовании в качестве анодного заземления эластомерной пластины негативное влияние заземляющих электродов несколько

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 (до 70% от первоначального защитного потенциала).

3. Выявлены условия, при которых использование оцинкованных элементов в качестве заземляющих электродов противоречит общепринятым рекомендациям по их использованию с целью снижения экранирующего влияния элементов смежных систем на процесс токораспределения в системе катодной защиты трубопроводов ПП, а именно в случаях обработки грунта вокруг оцинкованного заземляющего электрода с целью уменьшения его удельного электрического сопротивления его негативное влияние на распределение защитного тока в системе ЭХЗ резко увеличивается.

4. Предложены рекомендации по предотвращению или минимизации экранирующего влияния объектов, не входящих в систему катодной защиты, путем использования в контурах заземления элементов из эластомерного материала в местах значительного снижения удельного сопротивления грунта.

5. Определены доминирующие факторы, оказывающие влияние на изменение защитного потенциала на территории ПП: 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.

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

7. Сформулированы требования к предоставляемым для анализа результатам электрометрических обследований технологических трубопроводов ПП в объеме, позволяющем выполнять достоверную оценку степени влияния опасных факторов на уровень защищенности от коррозии.

ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГРУНТОВЫХ УСЛОВИЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТРЕБУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОТИВОКОРРОЗИОННОЙ ЗАЩИТЫ ТРУБОПРОВОДОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЛОЩАДОК

4.1 Анализ подходов к оценке грунтовых условий при проектировании средств электрохимической защиты газонефтепроводов

Основными документами, устанавливающими общие требования к защите от коррозии объектов магистрального транспорта нефти и газа, являются [26, 27, 82].

Электрохимическая защита должна обеспечивать в течение всего срока эксплуатации непрерывную по времени катодную поляризацию трубопровода на всем его протяжении (и на всей его поверхности) таким образом, чтобы значения разности потенциалов на трубопроводе были (по абсолютной величине) не меньше минимального и не больше максимального значений.

В соответствии с нормативно-технической документацией [6, 15, 16, 18, 26, 86, 87] проектирование электрохимической защиты площадных объектов КС, НПС, ГРС и т.д. осуществляется по следующему алгоритму (рисунок 4.1).

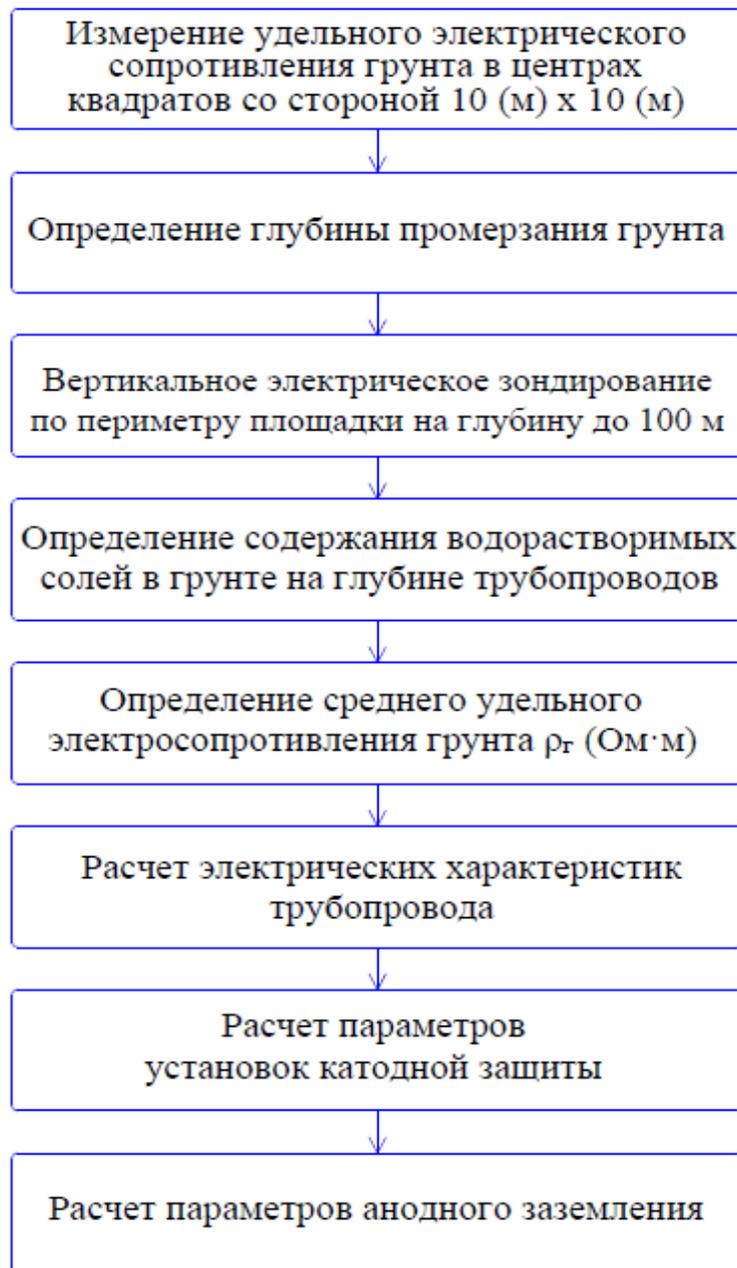


Рисунок 4.1 – Алгоритм проектирования электрохимической защиты площадных объектов КС, НПС, ГРС

Проанализируем основные этапы проектирования электрохимической защиты площадных объектов нефтегазопроводов.

1) Измерение УЭС грунта в центрах квадратов 10 (м) × 10 (м) со стороной, равной 10 м.

УЭС грунта определяют для оценки степени его агрессивности, выбора мест заложения анодных заземлителей, а также для расчета анодных и защитных заземлений при проектировании площадных объектов. Согласно [3, 5, 86, 87],

измерение УЭС грунта выполняется по четырехточечному методу без отбора проб с использованием потенциометра ЭП - 1М или измерителей заземления МС-08 (М-416), а также GEONM C, M5032, METRATER, TERCA 2 или аналогичных приборов зарубежных фирм. Глубина установки электродов должна быть не более $1/20$ расстояния между ними.

При проектировании ЭХЗ трубопроводов промышленных площадок результаты измерений УЭС грунта обрабатывают с целью определения координат области с минимальным значением УЭС грунта, используемой для расположения анодных заземлений и протекторов [84].

2) Определение глубины промерзания грунта.

Глубину промерзания грунта определяют для оценки глубины заложения подземных трубопроводов, элементов систем защитного заземления и ЭХЗ, а также разработки мероприятий, исключающих возможность возникновения и развития в промерзающих грунтах процессов морозного пучения и растрескивания, которые могут привести к недопустимым деформациям.

3) Вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ) по периметру площадки на глубину до 100 м (по три ВЭЗ на каждой стороне площадки согласно [55, 86, 87]).

Метод ВЭЗ основан на многократном измерении удельного сопротивления грунта на различной глубине при различных расстояниях между электродами.

4) Определение содержания водорастворимых солей в грунте на глубине заложения трубопроводов.

Определение содержания водорастворимых солей в грунте на глубине укладки газопровода с шагом 1 км проводится на стадии проведения изысканий для проектирования трубопроводов и системы ЭХЗ.

5) Расчет электрических характеристик трубопровода и параметров системы ЭХЗ.

Расчет параметров ЭХЗ трубопроводов производится в соответствии с [84, 86], при этом при определении переходного сопротивления трубопровода $R_{п}$, Ом·м² используется величина среднего УЭС грунта $\rho_{гр}$, Ом·м, по формуле:

$$\rho_{\text{гр}} = \frac{(\sum l_i)^2}{\left(\sum_{i=1}^n \frac{l_i}{\sqrt{\rho_{zi}}}\right)^2}, \quad (4.1)$$

где l_i - длина i -го участка с УЭС грунта ρ_{zi} , м;

n - количество участков с УЭС грунта ρ_{zi} .

Исходя из результатов оценки УЭС грунта и наличия свободной площади производят выбор типа анодного заземления и определяют место его размещения (как правило, в зоне наименьшего УЭС грунта).

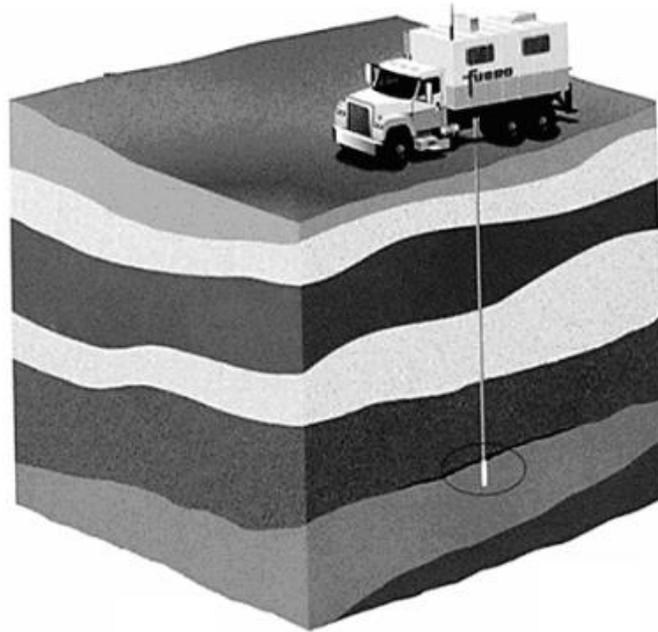
Такой подход характеризуется рядом недостатков:

1) В действующих нормативных документах не представлен выбор методов измерений указанных параметров, не обозначена область их применения, отсутствует информация о рекомендуемых к использованию приборах и средствах измерений, не приведены рекомендации по времени проведения измерений и требования к точности получаемых результатов.

2) Отсутствуют рекомендации по оценке необходимости ВЭЗ, выбору количества ВЭЗ и определению оптимальной глубины зондирования. Процесс ВЭЗ сопровождается значительными материальными и трудовыми затратами, требует привлечения специализированного оборудования (например, как показано на рисунке 4.2) и квалифицированного персонала. Установка для определения свойств грунта методом зондирования (рисунок), как правило, включает: зонд (со штангами и каналами связи); механизм вдавливания (извлечения) зонда; опорное устройство, соответствующее дизайну установки (масса установки, анкера и т. п.); измерительно-регистрирующую аппаратуру.

На стадии проведения инженерно-геологических изысканий подобные установки используются для установления изменения геологического строения по глубине, то есть выявления глубины залегания и мощности грунтов, отличающихся по литологическому составу, свойствам и состоянию (плотности, прочности, деформационным свойствам, консистенции и однородности). На начальных этапах изысканий мероприятия по ВЭЗ грунта совмещают с выполнением буровых работ,

отбором образцов грунта с последующим лабораторным определением их состава, состояния и свойств [24].



1 – вдавливаемый пробоотборник грунтовых вод; 2 – вдавливаемый пробоотборник грунта; 3 – вдавливаемый пьезометр; 4 – универсальный конусный пенетrometer, снабжённый лазером, пьезометрами измерителем электрической проводимости

Рисунок 4.2 – Общий вид самоходной пенетрационной установки (конструкция компании «Фугро», Нидерланды)

В связи с этим, следует оценивать обоснованность дополнительного ВЭЗ на стадии проектирования системы ЭХЗ, и только в случае установленной необходимости определить минимальное количество ВЭЗ, которое будет зависеть от инженерно-геологических условий площадки, её размеров и типа анодных заземлений, используемых в системе ЭХЗ.

3) Измерение УЭС грунта четырехэлектродным методом в квадратной сетке 10 (м) × 10 (м) является трудоемким процессом, а на достоверность результатов измерений могут оказывать влияние следующие факторы:

- состав грунта;

- температура (грунта и окружающего воздуха);
- расстояние между измерительными электродами;
- глубина расположения измерительных электродов.

Более достоверным является метод определения УЭС грунта методом отбора проб, однако существует ряд ограничений данного метода (например, необходимо обеспечить соответствующие условия хранения при транспортировке проб до лаборатории).

4) В действующих методиках отсутствуют рекомендации по отбору результатов для выполнения расчетных задач, связанных с оценкой электрических характеристик трубопроводов и параметров ЭХЗ. Как правило, в расчет принимается УЭС исключительно верхнего слоя грунта, причем зачастую – среднее значение из полученных на территории площадки. Усредненное значение УЭС грунта может существенно снижать достоверность определяемых в ходе проектирования расчетных параметров систем и оборудования, что снижает эффективность и долговечность их функционирования. По факту грунт на объекте может состоять из нескольких слоев, обладающих различными уровнями плотности, разными показателями УЭС, что, в свою очередь, влияет на проектирование и подбор элементов защитного заземления и системы ЭХЗ. В связи с этим возникает необходимость изучения карты геологического разреза грунтов на объекте, и при проектировании системы ЭХЗ принимать во внимание такие важные свойства грунтов как слоистость и пористость, а также особенности климатической зоны.

Например, в южной части Пермского края отклонения этих сопротивлений от фактических значений составляют от 6 до 20%, если при расчете сопротивлений заземлителей пренебречь учётом слоистости и характеристик грунтов и использовать упрощённые методики расчета. В северной части региона эти отклонения значительно выше (40-87%), поэтому подобное пренебрежение становится недопустимым, поскольку приводит к недостаточной степени достоверности расчетов [9].

При проектировании необходимо учитывать неоднородность грунтовых характеристик, обусловленную влиянием температуры на проводимость грунта. При этом пользоваться результатами единичных, точечных измерений, неактуальными данными инженерно-геологических изысканий, а также справочными данными нельзя, т.к. это может привести к выбору ошибочных проектных решений. В реальных условиях промышленной площадки параметры грунта отличаются от принятых в теоретических расчетах по следующим причинам:

1) Величина УЭС грунта уменьшается с глубиной: грунт становится более плотным и более влажным, на глубине свыше пяти метров часто находятся водоносные слои;

2) В процессе эксплуатации подземных сооружений необходимо учитывать тот факт, что со временем происходит выщелачивание почвы, т. е. в окружающем грунте увеличивается концентрация электролита;

3) Вследствие реализации мероприятий по технической мелиорации почвы (например, локальная обработка грунта с целью повышения эффективности функционирования системы защитного заземления электрооборудования) может возникнуть неоднородность грунтовых характеристик, причем разница величины УЭС грунта на разных участках площадки может достигать сотни Ом·м [103].

Таким образом, действующая методика оценки грунтовых условий (в частности, УЭС грунта) на территории промышленных площадок не позволяет определить такую локальную неоднородность грунтовых параметров при проектировании системы ЭХЗ трубопроводов и оборудования.

В связи с этим, разработка алгоритма, позволяющего определить необходимость проведения измерений, обосновать выбор координат и количества измерений в зависимости от условий рассматриваемого объекта, является необходимым шагом для достижения поставленной цели настоящего исследования.

4.2 Совершенствование методики оценки неоднородности грунтовых условий при проектировании средств электрохимической защиты газонефтепроводов

Параметры некоторых элементов систем, обеспечивающих функционирование трубопроводов и оборудования промышленных площадок, зависит от удельного сопротивления грунта, которое определяет качество грунта, в частности его электрической проводимости.

Предлагаемая методика, представленная в виде алгоритма принятия решений и выбора соответствующих действий и мероприятий по установлению факта и оценке степени неоднородности грунтовых характеристик (рисунок 4.3), может быть условно разделена на три группы мероприятий.

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

На стадии проектирования системы ЭХЗ трубопроводов и оборудования промышленных площадок целесообразно в первую очередь проанализировать материал, полученный в ходе проведения инженерно-геологических изысканий, выполненных с целью изучения инженерно-геологических условий района (площадки, участка, трассы) проектируемого объекта. В ходе таких изысканий, как правило, выполняются различные виды работ и комплексных исследований в соответствии с п. 5.1 [74, 76]. Особое внимание при анализе имеющихся данных необходимо уделить результатам геофизических исследований, гидрогеологических исследований (при распространении подземных вод), полевых и лабораторных исследований грунтов. В общем случае оценка неоднородности грунтовых параметров на территории промышленной площадки требует бурения скважин, проходки шурфов, статического и динамического зондирования, с определением характеристик грунтов в полевых и лабораторных условиях.

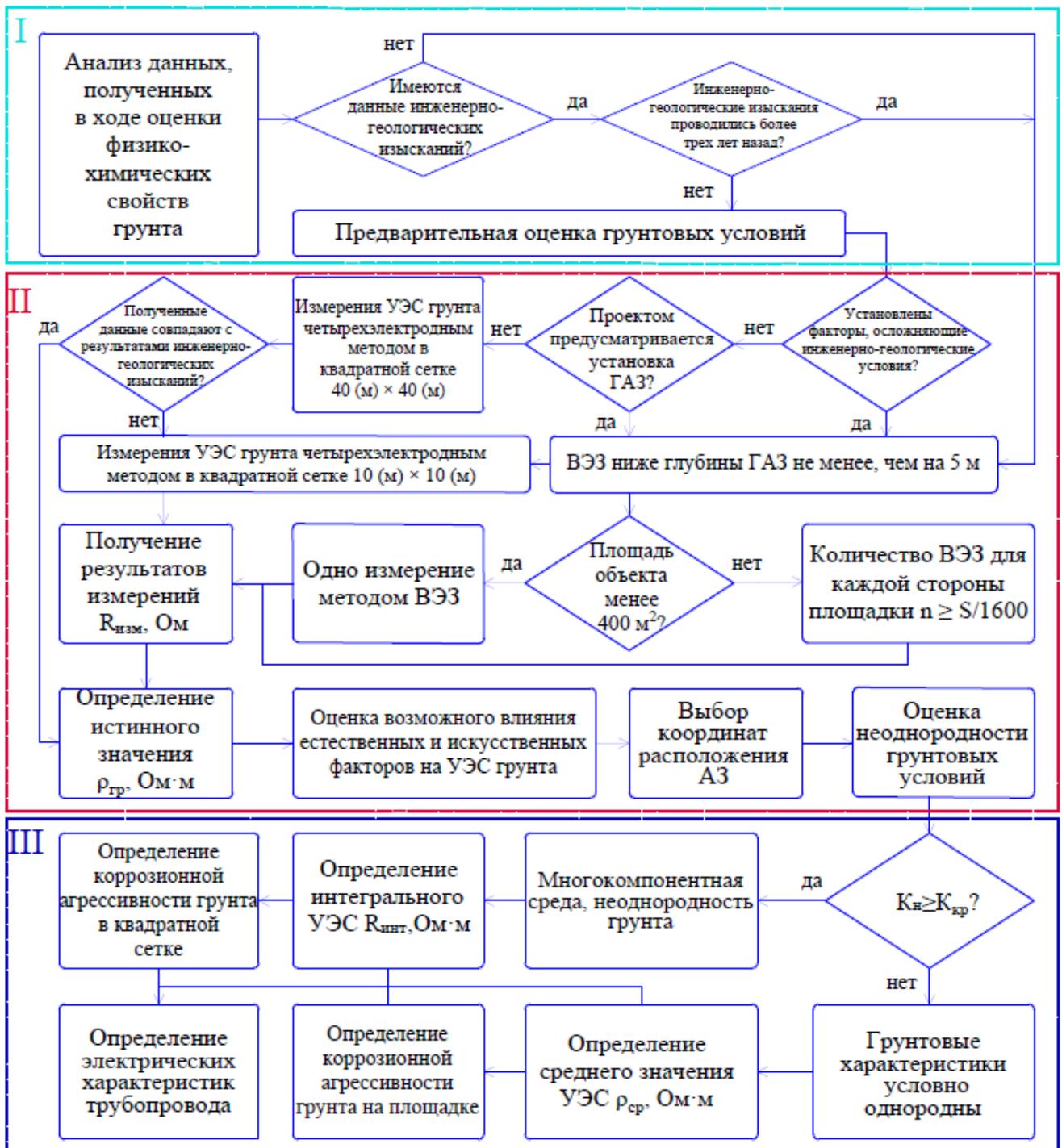


Рисунок 4.3 – Алгоритм методики оценки неоднородности грунтовых условий при проектировании средств электрохимической защиты газонефтепроводов

Как было отмечено, величина УЭС грунта используется главным образом для определения коррозионной активности грунтов, и для получения этих данных на территории проектируемого площадного объекта применяют различные виды каротажа и методы электроразведки (например, электропрофилирование, вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ)). При этом в приложении Е [74,

76] рекомендованы следующие объемы выполнения работ: расстояние между профилями 50-100 м, шаг по профилю 25-50 м. Для определения состава и физико-химических свойств грунтов рекомендуются наблюдения в отдельных точках с поверхности, в скважинах и шурфах, однако нет требований к количеству и местам размещения точек для выполнения зондирования.

Рекомендации по выбору схем размещения и глубины точек зондирования, объемов и глубин зондирования исходят обычно из сложившейся практики совмещения буровых скважин и точек зондирования.

Для любых видов оснований параметры разведочной сети определяются задачами инженерно-геологической съёмки выбранного масштаба и увязываются с общим количеством точек наблюдения и горных выработок по таблице 6.1 [74, 76]. В общем случае рекомендуется не менее шести точек зондирования для каждого геоморфологического элемента.

Как правило, данные инженерно-геологических изысканий независимо от времени и способа их получения позволяют однозначно судить о том, являются ли рассматриваемые грунтовые условия однородными или есть необходимость в оценке степени их неоднородности.

По результатам анализа данных инженерно-геологических изысканий можно выделить наличие или отсутствие влияния факторы, осложняющие инженерно-геологические условия (т.к. потенциально создающих условия для возможного влияния неоднородности грунтовых характеристик на результаты последующих измерений, процессов проектирования и эксплуатации подземных сооружений).

К таким факторам относятся:

- использование на строительной площадке насыпного грунта;
- наличие подземных вод;
- вечномёрзлые грунты и др.

II. Проведение измерений и обработка полученных данных

В случае если объем имеющейся информации, полученной в ходе инженерно-геологических изысканий, является недостаточным или не позволяет выполнить достоверную оценку степени неоднородности грунтовых характеристик

по площади и по глубине (например, если согласно п. 5.2 [74, 76] результаты инженерно-геологических изысканий утратили актуальность в связи с давностью их получения, т.к. от окончания выполнения изысканий до начала проектирования прошло более 2-3 лет), то рекомендуется проведение дополнительных мероприятий по организации и выполнению измерений УЭС грунта четырехэлектродным методом в квадратной сетке 10 (м) × 10 (м), а также путем ВЭЗ, причем количество зондирований определяется следующим образом:

- на небольшой площадке ($S < 400 \text{ м}^2$) выполняется одно ВЭЗ. При этом центр зондирования должен находиться в центре или вблизи центра будущего ГАЗ;
- на больших площадках ($S > 400 \text{ м}^2$), на которых могут иметь место некоторая неоднородность по удельному сопротивлению верхнего слоя (r_1) и изменение толщины этого слоя h_1 , число зондирований должно быть больше. При площади контура S до 2000 м^2 минимальное число зондирований:

$$n \geq S/400,$$

соответственно, количество ВЭЗ для каждой стороны площадки:

$$n \geq S/1600.$$

Уточненные значения параметров r_1 и h_1 грунта на больших площадках находятся по формулам:

$$\rho = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \rho_{1i}, \quad (4.2)$$

$$h = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_{1i}. \quad (4.3)$$

Истинное значение УЭС по результатам измерения четырехэлектродным методом на глубине, равной расстоянию между электродами определяется по формуле:

$$\rho_{гр} = 2 \cdot \pi \cdot d \cdot R_{изм}, \quad (4.4)$$

где d – расстояние между измерительными электродами, м;

$R_{изм}$ – измеренное сопротивление заземления, Ом;

π – математическая константа.

III. Оценка грунтовых условий

Для получения представления о возможных изменениях электропроводности грунта в различных точках промышленной площадки в процессе эксплуатации объекта необходимо дополнительно учитывать воздействие естественных и искусственных факторов на изменение величины УЭС грунта (рисунок 4.4).

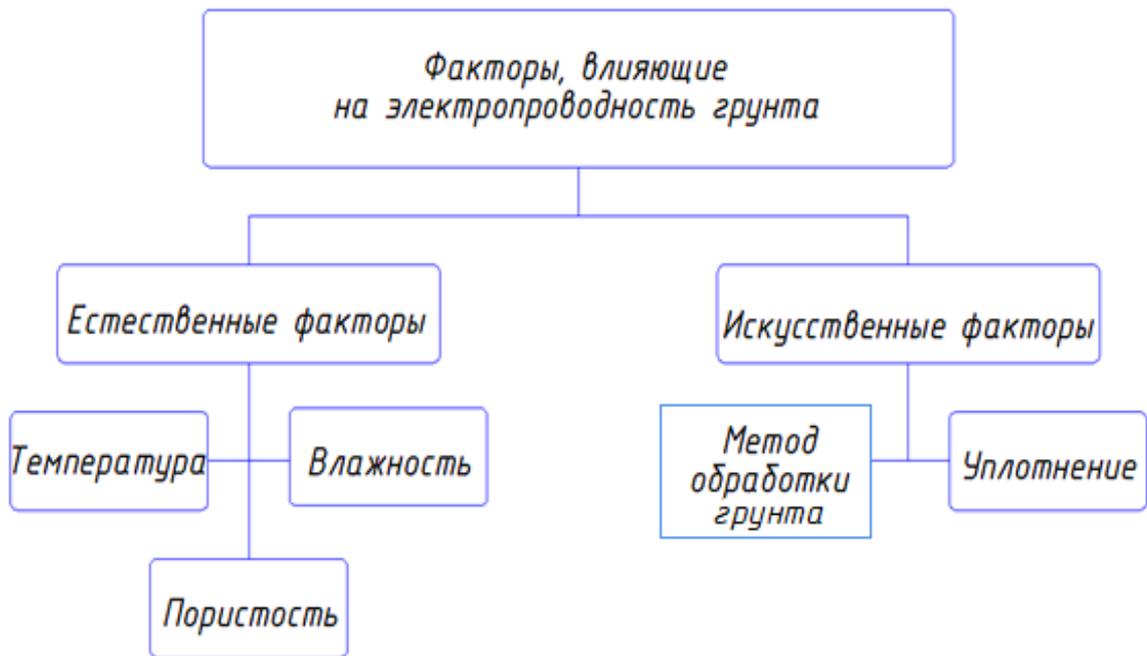


Рисунок 4.4 – Классификация факторов, влияющих на электропроводность грунта III

Для получения более достоверных данных об электропроводности грунта в различных точках промышленной площадки, а также для получения представления об изменении удельного электрического сопротивления грунта с целью получения его минимально возможного значения необходимо дополнительно учитывать воздействие факторов, которые предлагается разделить на две группы:

1) Естественные:

– пористость, которая обуславливает способность горных пород вмещать жидкость или газ. Однако пористость не является достаточной характеристикой состояния грунта, поэтому при расчетах применяют коэффициент пористости –

показатель плотности грунта, который показывает соотношение объема пор образца к объему, занимаемому его твёрдыми частицами.

– влажность - грунты в сухом состоянии обладают большим удельным сопротивлением, т.е. практически ток не проводят. Основным проводником тока в грунте – то его жидкая часть, т.е. почвенный раствор. Степень влажности грунта, или коэффициент водонасыщенности — это отношение естественной влажности грунта к влажности при полном заполнении пор водой.

– температура - УЭС грунта значительно возрастает при уменьшении его температуры.

2) Искусственные:

– метод обработки. Существует три метода специальной обработки грунта: насыщение грунта легкорастворимыми солями, замена части грунта материалом с повышенной проводимостью, введение в грунт слабо-растворимых в воде соединений.

Введение в грунт легкорастворимых солей позволяет снизить температуру его замерзания, предотвращая понижение его проводимости в условиях низких температур, что, в свою очередь, снижает показатели сезонных коэффициентов изменения сопротивления заземления.

Замена объема грунта проводящим материалом с повышенной проводимостью, в частности используются глиняные или бентонитовые суспензии.

В результате применения слабо-растворимых в воде электропроводящих веществ, после обработки грунта создаётся проводящая зона, нерастворимая в воде и сохраняющая свои свойства значительный период времени.

– уплотнение - повышение электропроводности зависит от увеличения давления.

Исходя из результатов оценки УЭС грунта и наличия свободной площади производят выбор типа анодного заземления и определяют место его размещения (как правило, в зоне наименьшего УЭС грунта).

Далее выполняют вычисление электрических характеристик трубопровода. Расчет параметров величин электрохимической защиты производится в соответствии с [84].

На заключительном этапе производят выбор типа анодного заземления. Выбор типа анодного заземления осуществляют с учетом следующих факторов:

- силы тока катодной установки;
- свойства грунта в месте размещения заземления (удельное сопротивление грунта, глубина промерзания);
- расположения защищаемого объекта и других подземных металлических сооружений по отношению к анодному заземлению.

Конкретное место монтажа и тип анодного заземления определяют исходя из удельного сопротивления грунта, результатов вертикального электрозондирования, топографических особенностей местности, условий землеотвода и удобства подъезда. Для протяженных кабельных анодов (в том числе на основе эластомерных материалов) условия применения определяют в соответствии с рекомендациями организации – изготовителя.

Выбор типа АЗ производят исходя из удельного электрического сопротивления грунта и наличия свободной площади:

- в грунтах с удельным электрическим сопротивлением не более 50 Ом·м следует применять сосредоточенные и распределенные подповерхностные АЗ с использованием малорастворимых электродов. Эти заземления следует устанавливать на глубину до 10 м и ниже глубины сезонного промерзания. Размещение подповерхностных заземлений следует проектировать преимущественно на некультивируемых землях;
- при отсутствии свободной площади и наличии на глубине пластов с удельным сопротивлением в два раза меньшим, чем поверхностные грунты (по данным вертикального электрического зондирования), необходимо использовать глубинные анодные заземления (ГАЗ). Глубинные заземления устанавливают специально пробуренные скважины;

– в скальных и многолетнемерзлых грунтах применяются глубинные анодные заземления. В целях снижения затрат на строительные-монтажные работы и дальнейшую эксплуатацию заземлений в этих грунтах следует применять протяженные АЗ, укладываемые в траншею вместе с трубопроводом на максимальном расстоянии от его поверхности.

В системе ЭХЗ промышленных площадок как правило используется АЗ комбинированного типа (сосредоточенные или распределенные подповерхностные АЗ и глубинные анодные заземления (ГАЗ)). При этом для проектирования системы ЭХЗ в случае использования ГАЗ достаточно данных ВЭЗ на 5 м ниже проектируемой глубины его погружения.

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 .**

Порядок расчета:

1. Определение среднего УЭС грунта, Ом·м, по формуле (4.1).
2. Определение K_n , Ом·м – коэффициента неоднородности грунтовых характеристик

$$K_n = \sqrt{\frac{\sum(\rho_i - \rho_{cp})^2}{n(n-1)}}, \quad (4.5)$$

где ρ_{cp} – среднее значение УЭС грунта, Ом·м;

ρ_i – значение УЭС грунта, полученное при проведении i измерений, Ом·м;

n – общее количество участков / интервалов, на которых проводились измерения удельного электрического сопротивления грунта.

3. Сравнение с критериальным значением:

– $0 < K_n < 10$ – однокомпонентная среда, грунтовые характеристики условно однородны;

– $K_n > 10$ – многокомпонентная среда, необходимо учитывать неоднородность грунтовых характеристик.

Если грунт можно считать однокомпонентной средой, то для дальнейших расчетов, необходимых при проектировании системы ЭХЗ трубопроводов и оборудования, целесообразно пользоваться общепринятой методикой определения среднего значения УЭС грунта по формуле (4.1). В случае, если по результатам расчета коэффициента неоднородности грунтовых характеристик грунт условно можно считать многокомпонентной средой, то грунт необходимо рассматривать как гетерогенную структуру и расчет интегрального УЭС грунта выполняют на основании системы уравнений для указанных диапазонов основной среды $R_{осн} \in (40 \div 200)$ Ом·м, примесной среды $R_{прим} \in (100 \div 700)$ Ом·м и объемной концентрации первой (примесь) среды во второй (основная) $V \in (0,05; 0,4)$ отн. ед [29, 46, 83], которые используются в соответствующих областях и случаях в зависимости от вида неоднородности, а также в зависимости от расположения гетерогенных компонентов [71, 97, 110, 111, 112, 113].

Предположительно для задачи исследования, заключающейся в определении не обобщенного, а интегрального удельного электрического сопротивления грунта, обладающего некоторой неоднородностью его компонентов, наиболее достоверные результаты можно ожидать при использовании формул для статистических смесей с неоднородными компонентами [31].

Пример.

На площадке незначительно развиты процессы заболачивания, обусловленные затрудненным поверхностным стоком и слабой фильтрацией.

В результате анализа пространственной изменчивости частных показателей свойств грунтов, с учетом литологических особенностей на площадке выделены все 19 инженерно-геологических элементов.

Почвенно-растительный слой мощностью 0,2-0,3 м развит на площадке практически повсеместно, отсутствуя лишь на заболоченных участках и участках, занятых маломощными насыпными грунтами (ИГЭ 1б) отвалов канав.

На основании выполненных изысканий в районе размещения площадки КС, НС и трасс внеплощадочных сооружений, в зависимости от состава и состояния грунтов, выделено 20 инженерно-геологических элементов.

К современным образованиям относятся:

Техногенные образования (tIV)

ИГЭ 1а - насыпные грунты. Представлены грунтами дорожного полотна пересекаемой трассами внеплощадочных коммуникаций автодороги. В составе этих грунтов представлены дресвяно-щебнистый грунт, песок разнозернистый и перелопаченные нижележащие глины. Максимальная мощность – 1,0 м.

ИГЭ 1б - насыпные грунты. Представлены перелопаченными грунтами отвалов, образованных при строительстве мелиоративных сооружений, редко с включениями битого кирпича. Мощность отвалов колеблется от 0,3 до 1,6 м.

Биогенные отложения (bIV).

ИГЭ 1 – торф коричневый слабо разложившийся, влажный и насыщенный водой. Залегает в виде локальных пятен, его мощность не превышает 0,8 м.

Среднечетвертичные отложения представлены озерно-аллювиальными отложениями (IaIIс), среди которых выделены следующие ИГЭ:

ИГЭ 3 – Суглинок легкий пылеватый, темно-коричневый, тугопластичный, слабозаторфованный. Содержит частые линзовидные прослои торфа. Залегает с поверхности прерывистым слоем мощностью 0,9 м.

ИГЭ 4 – Суглинок легкий пылеватый, темно-коричневый, мягкопластичный с примесью органических веществ. Имеет локальное распространение, его мощность колеблется от 0,3 до 1,2 м.

ИГЭ 6а – Глина ленточная, легкая, коричневая и коричневатая-серая, мягкопластичная, с тонкими прослойками пылеватых песков, насыщенных водой, с примесью органических веществ.

ИГЭ 6б – Глина ленточная, легкая, коричневая и коричневато-серая, тугопластичная, с тонкими прослойками пылеватых песков, насыщенных водой, с примесью органических веществ.

ИГЭ 6в – Глина ленточная, легкая, коричневая и коричневато-серая, полутвердая, с тонкими прослойками пылеватых песков, насыщенных водой, с примесью органических веществ.

Ленточные глины ИГЭ 6б, 6в распространены практически повсеместно в виде крупных прослоев мощностью до 6,5 м, часто выходящих на поверхность. Характеризуется тонкой слоистостью, изменчивостью состава слоев, что ведет к разбросу физических свойств грунта в результате его неоднородности. Также ленточные глины обладают выраженными тиксотропными свойствами - при нарушении естественного залегания и (или) при приложении динамической нагрузки приобретают текучепластичную и текучую консистенцию, что значительно снижает их несущую способность.

ИГЭ 7а – Супесь пылеватая серовато-коричневая, пластичная, с тонкими прослойками песка пылеватого влажного и насыщенного водой.

ИГЭ 7б – Супесь серовато-коричневая, твердая, с тонкими прослойками песка пылеватого влажного и насыщенного водой.

По отношению к глинам и суглинкам имеют подчиненное значение, залегая на разных глубинах в виде прослоев и крупных линз мощностью от 0,5 до 1,0 м.

Супеси ИГЭ 7а и 7б также обладают тиксотропными свойствами, но выраженными в меньшей степени, чем в ленточных глинах.

ИГЭ 7в – Песок пылеватый, серо-коричневый, средней плотности, насыщенный водой. Залегает в толще супесей, суглинков и глин в виде отдельных линз протяженностью до 10-15 м и мощностью до 2,5 м.

Озерно-аллювиальные суглинки, преобладающие в геологическом разрезе, характеризуются большой изменчивостью гранулометрического состава и консистенции, в результате чего среди них выделяются следующие инженерно-геологические элементы (слои):

ИГЭ 8а – Суглинок тяжелый, реже легкий, пылеватый, коричневый, твердый, с частыми тонкими прослойками пылеватого песка влажного и насыщенного водой.

ИГЭ 8б – Суглинок легкий и тяжелый пылеватый, коричневый, полутвердый, с частыми тонкими прослойками пылеватого песка влажного и насыщенного водой. Имеет практически повсеместное распространение, слагая основную часть геологического разреза на данном участке изысканий.

ИГЭ 8в – Суглинок легкий пылеватый, коричневый, тугопластичный, реже мягкопластичный, с частыми тонкими прослойками пылеватого песка влажного и насыщенного водой. Также имеет локальное распространение.

Нижнечетвертичные отложения представлены ледниково-морскими суглинками, редко- супесями (gmIsz). Среди них выделяются следующие ИГЭ:

ИГЭ 8г - Суглинок легкий и тяжелый, пылеватый, коричневый, твердый с гравием и галькой до 10%, с единичными валунами.

ИГЭ 8д - Суглинок легкий, пылеватый, светло-коричневый полутвердый с гравием и галькой до 10%, с единичными валунами.

ИГЭ 8е – Супесь пылеватая, темно-коричневая, пластичная.

ИГЭ 8ж – Супесь пылеватая, твердая.

Дочетвертичные породы верхнего девона (D3uh2):

ИГЭ 9 – Глина голубая и серая, твердая, тонкослоистая с прослоями песчаников, алевролитов, аргиллитов, известняков, местами аргиллитоподобная.

ИГЭ 10 – Песчаник серый, очень низкой прочности, сильно выветрелый до состояния песка пылеватого.

На отдельных участках площадки отмечаются заболоченные участки в виде отдельных пятен незначительной протяженности. Мощность торфа, выделенного в ИГЭ 1, не превышает 1,0 м.

Также с поверхности локально развиты слабозаторфованные суглинки ИГЭ 3 и суглинки с примесью органических веществ ИГЭ 4. Их мощность колеблется от 0,3 до 0,9 м.

Практически повсеместно на площадке распространены среднечетвертичные озерно-аллювиальные отложения, представленные ленточными глинами тугопластичной и полутвердой консистенции (ИГЭ 6б, и 6в), залегающие, как правило, с поверхности до глубин (2,0÷9,0) м. Их мощность колеблется от 1,0 до 8,5 м. Абсолютные отметки подошвы ленточных глин колеблются от 120,6 до 127,7 м.

Под ленточными глинами прерывистым слоем залегают супеси пластичные и твердые (ИГЭ 7а и 7б), суглинки твердой, полутвердой и тугопластичной консистенции (ИГЭ 8а, 8б и 8в), а также пески пылеватые (ИГЭ 7в). Мощность супесей колеблется от 0,6 до 7,4 м, суглинков от 0,6 до 2,7 м, песков пылеватых от 0,7 до 3,4 м.

На абсолютных отметках 119,8 – 124,4 м толща озерно-аллювиальных отложений подстилается ледниково-морскими отложениями нижнечетвертичного возраста, представленными суглинками твердыми и полутвердыми (ИГЭ 8г и 8д) и супесями пластичными и твердыми (ИГЭ 8е и 8ж). Ледниково-морские отложения залегают на волнистой поверхности коренных верхнедевонских пород в виде отдельных прослоев и линз мощностью от 0,5 до 5,7 м.

В основании геологического разреза на глубинах от 7,8 м до 14,1 м залегают верхнедевонские отложения, представленные глинами твердой консистенции, часто аргиллитоподобными, с прослоями песчаников и алевролитов (ИГЭ 9) и песчаниками, сильно выветрелыми до состояния песка (ИГЭ 10). Максимальная вскрытая мощность коренных пород составляет 5,8 м. Абсолютные отметки кровли девонских отложений колеблются от 115,5 до 121,1 м.

Подземные воды встречены всеми скважинами. Водоносный горизонт приурочен к пылеватым пескам и супесям с прослоями песков озерно-аллювиального генезиса и имеет установившийся уровень в интервале глубин 2,5-6,5 м (на абсолютных отметках от 124,0 до 125,7 м). Расчетный уровень подземных вод будет располагаться на 0,92 м выше замеренного при изысканиях. Оба уровня показаны на инженерно-геологических разрезах.

В связи с тем, что район находится в зоне избыточного увлажнения, в периоды сильных дождей и весеннего снеготаяния в условиях нарушенного и необеспеченного поверхностного стока, на заболоченных участках, сложенных суглинками и супесями, на глубине (0,0÷0,5) м будет развиваться верховодка.

Нормативная глубина промерзания, рассчитанная по данным метеостанции, для суглинков и глин составляет 27 см, для супесей и песков пылеватых – 187 см.

По относительной деформации пучения мягкопластичные глины ИГЭ 6а относятся к сильнопучинистым, тугопластичные глины ИГЭ 6б – к среднепучинистым, полутвердые глины ИГЭ 6в и суглинки 8б – к слабопучинистым разновидностям грунтов. Твердые супеси ИГЭ 7б и суглинки ИГЭ 8а являются практически непучинистыми.

Измерение значений УЭС осуществлялось в полевых условиях измерителем сопротивления MRU-101. Результаты приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Результаты измерений значений УЭС

Место измерения	Значение УЭС грунта, Ом·м	Длина участка
T1	11	170
T2	85	230
T3	51	150
T4	32	250
T5	15	100
T6	74	300
T7	93	210
T8	13	190

Ознакомившись с данными измерениями, мы видим, что значения в некоторых квадратах очень сильно разнятся, на основании чего мы можем сделать вывод о том, что грунт на территории обладает высокой неоднородностью и соответственно рассчитывать среднее значение УЭС по общепринятой формуле неверно, это будет существенно влиять на параметры, рассчитанные при проектировании средств ЭХЗ.

Рассчитаем среднее значение УЭС грунта по существующей формуле (1.2):

$$\rho_{\text{cp}} = \frac{1600^2}{\left(\frac{170}{\sqrt{11}} + \frac{230}{\sqrt{85}} + \frac{150}{\sqrt{51}} + \frac{250}{\sqrt{32}} + \frac{100}{\sqrt{15}} + \frac{300}{\sqrt{74}} + \frac{210}{\sqrt{93}} + \frac{190}{\sqrt{13}}\right)^2} = 33,7 \text{ (Ом} \cdot \text{м)}$$

Однако, исходя из разницы среднего и максимального/минимального удельного электрического сопротивления грунта, очевидно, что обобщенное среднее значение не отражает реальных грунтовых условий на объекте, не позволяет выполнить оценку коррозионной активности грунта и может существенно снижать достоверность определяемых в ходе проектирования расчетных параметров систем и оборудования, что негативным образом влияет эффективность и долговечность их функционирования.

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 , определяемый по формуле

$$K_n = \sqrt{\frac{\sum(\rho_i - \rho_{\text{cp}})^2}{n(n-1)}}, \quad (4.6)$$

где ρ_{cp} – среднее значение УЭС грунта, Ом·м;
 значение УЭС грунта, полученное при проведении измерений,
 ρ_i – Ом·м;
 количество участков/интервалов, на которых наблюдается
 общее количество участков/интервалов, на которых
 n – проводились измерения удельного электрического
 сопротивления грунта.

Вычислим данный коэффициент для нашей площадки:

$$K_n = \sqrt{\frac{(11 - 33,7)^2 + (85 - 33,7)^2 + (51 - 33,7)^2 + (32 - 33,7)^2 + (15 - 33,7)^2 + (74 - 33,7)^2 + (93 - 33,7)^2 + (13 - 33,7)^2}{8(8 - 1)}} = 12,9 \text{ (Ом} \cdot \text{м)}$$

Полученное значение позволяет судить о степени неоднородности грунтовых характеристик:

– $0 < K_n < 10$ – однокомпонентная среда, грунтовые характеристики условно однородны. При дальнейшей оценке коррозионной агрессивности грунта и проектировании системы ЭХЗ трубопроводов и оборудования целесообразно пользоваться общепринятой методикой определения среднего значения УЭС грунта по формуле (4.1);

– $K_n > 10$ – многокомпонентная среда, необходимо учитывать неоднородность грунтовых характеристик. Коррозионную агрессивность грунтов необходимо оценивать для каждого квадрата в той разметке, в которой проводились измерения УЭС грунта четырехэлектродным методом. Для дальнейшего проектирования системы ЭХЗ и расчета электрических характеристик трубопровода предлагается использовать следующую формулу определения среднего значения УЭС грунта.

Рассчитаем интегральное удельное электросопротивление для указанного примера на основании системы уравнений при различных соотношениях УЭС сред, $R_{\text{инт}}$, Ом·м:

$$\begin{cases} R_{\text{инт}} = R_{\text{осн}} \cdot e^{(0,9 \frac{R_{\text{прим}}}{R_{\text{осн}}} - 1,04) \cdot V}, & \text{при } \frac{R_{\text{прим}}}{R_{\text{осн}}} \in [1 \dots 2,0); \\ R_{\text{инт}} = R_{\text{осн}} \cdot e^{(0,15 \frac{R_{\text{прим}}}{R_{\text{осн}}} + 0,7) \cdot V}, & \text{при } \frac{R_{\text{прим}}}{R_{\text{осн}}} \in [2,0 \dots 12]. \end{cases} \quad (4.7)$$

где $R_{\text{осн}}$ – удельное электрическое сопротивление второй (основной) среды,

$R_{\text{осн}} \in (40 \div 200)$ Ом·м;

$R_{\text{прим}}$ – удельное электрическое сопротивление первой (примесной)

среды, $R_{\text{прим}} \in (100 \div 700)$ Ом·м;

V – объемная концентрация первой (примесный грунт) среды во второй (основной грунт), $V \in (0,05; 0,4)$ отн. ед.

Полученные значение УЭС грунта на территории промышленной площадки анализируются с целью оценки условий, в которых будет проводиться дальнейшая

эксплуатация подземных трубопроводов. Главным образом, такой анализ необходим для более достоверного определения степени коррозионной агрессивности грунтов по отношению к углеродистой стали подземных металлических сооружений [84, 86, 109], что позволяет повысить эффективность противокоррозионной защиты в следующих направлениях:

- выбор типа глубинных анодных заземлений (АЗ) и оптимальной с точки зрения коррозионной активности грунта зоны его размещения на территории промышленной площадки в грунтах с наименьшим УЭС;
- уточнение данных расчета и прогнозирование изменения во времени переходного сопротивления трубопровода;
- дифференцированный выбор типа и конструкции антикоррозионного защитного покрытия на участках подземных трубопроводов, подверженных влиянию коррозионной агрессивности грунта в различной степени;
- выбор и оценка целесообразности реализации дополнительных мероприятий по минимизации влияния неоднородности грунтовых характеристик на параметры токораспределения в системе ЭХЗ промышленных площадок.

Таким образом, предлагаемые расчеты по определению величины УЭС грунта в разработанной методике оценки неоднородности грунтовых условий при проектировании средств электрохимической защиты газонефтепроводов к дополнительной нагрузке и расходам при проектировании систем ЭХЗ не приведут. Данные измерения закладываются при расчете стоимости инженерных изысканий согласно п. 8.3.4 [86] и п. 7.3.4 [87].

4.3 Разработка рекомендаций, ограничивающих негативное влияние, обусловленное неоднородностью грунтовых условий на территории промышленной площадки, на параметры ЭХЗ газонефтепроводов

В состав комплекса инженерно-геофизических работ и электрометрических исследований для проектируемых газонефтепроводов включаются следующие основные виды работ:

- выбор мест размещения установок ЭХЗ;
- инструментальная или визуальная съемка на местности площадок для размещения элементов установок электрохимической защиты;
- измерения удельного электрического сопротивления грунтов на территории объекта;
- геофизические исследования (в том числе, при необходимости, вертикальное электрическое зондирование) на площадках размещения анодных заземлений;
- определение наличия и параметров блуждающих токов в земле на площадке проектируемого объекта;
- обследование источника блуждающих токов;
- выбор источников электроснабжения установок ЭХЗ;
- сбор статистических данных о коррозионных повреждениях на соседних стальных подземных нефтепроводах.

Если по результатам электрометрического обследования подземных трубопроводов промышленной площадки выявлено несоответствие значений защитных потенциалов нормативным, необходимо разработать комплекс мероприятий, которые включают в себя:

- ремонт или дополнительную установку глубинных или протяженных анодных заземлений;
- замену станций катодной защиты или увеличение их мощности;
- мероприятия по реализации отдельной защиты коммуникаций площадных объектов (в частности, применение вставок электроизолирующих);
- мероприятия по ремонту контура защитных заземлений электрооборудования с применением оцинкованных материалов [16, 18].

Однако в случае, если по результатам оценки степени неоднородности грунтов на территории объекта установлено, что наиболее вероятной причиной несоответствия защитных потенциалов требуемым значениям является многокомпонентность среды, в которой эксплуатируются подземные газонефтепроводы и оборудование, требуется разработка мероприятий по

ликвидации или снижению негативного влияния локальных зон повышенной коррозионной опасности на эффективность противокоррозионной защиты. Данные мероприятия можно разделить на три группы:

1. Техническая мелиорация грунта;
2. Реконструкция или корректировка координат расположения элементов защитных заземлений;
3. Реконструкция или корректировка координат расположения анодных заземлителей, входящих в состав установок катодной защиты.

Мероприятия первой группы предполагают реализацию одного или совокупности нескольких методов: уплотнение, замораживание, тепловое воздействие, оттаивание и закрепление. Как было показано в главе 1, необходимо учитывать возможное влияние методов технической мелиорации на характеристики грунтов, а именно: температуру, влажность, минерализацию, пористость, проницаемость и коррозионную активность. Выбор способа (или способов) технической мелиорации зависит главным образом от степени коррозионной активности исходного грунта на территории объекта, площади зон повышенной коррозионной опасности и экономической целесообразности применения.

Вторая группа мероприятий по переносу или изменению конструкции элементов защитного заземления связана в первую очередь с возможной обработкой грунта вокруг заземлителей в процессе эксплуатации систем и оборудования промышленных площадок [39, 109]. В главе 1 отмечено, что с целью повышения эффективности работы системы защитного заземления энергоиспользующего оборудования наиболее вероятной является реализация способа обработки грунта вокруг заземляющих электродов солевым раствором или солью с целью улучшения растекания тока. При этом негативное влияние на токораспределение в системе ЭХЗ трубопроводов и оборудования усиливается многократно с учетом не только отсутствия электрического разделения систем защитного заземления и катодной защиты газонефтепроводов, но и повышения степени коррозионной активности грунта в зоне расположения защитных

заземлений ввиду его дополнительной обработки с целью уменьшения величины удельного электрического сопротивления.

Третья группа мероприятий, реализуемых путем изменения координат расположения, типа и количества анодных заземлителей, входящих в состав установок катодной защиты, предполагает вынос анодного заземления за пределы территории промышленной площадки (в случае использования глубинного анодного заземления), замену точечных вертикальных анодных заземлений на протяженное горизонтальное анодное заземление, увеличение количества вертикальных анодных заземлителей. Однако реализация данных способов наиболее целесообразна на стадии проектирования и сооружения систем и оборудования промышленных площадок. С целью снижения негативного влияния неоднородности грунтовых характеристик на токораспределение в системе катодной защиты на стадии эксплуатации предлагается к реализации следующий способ выполнения анодного заземления [40, 55, 109].

Выполняют анализ гидрогеологических характеристик грунта вдоль защищаемого сооружения. Методом наклонно-направленного либо горизонтально-направленного бурения бурят скважину, которая на участке действия анодного заземления параллельна защищаемому сооружению и проходит ниже уровня грунтовых вод и уровня промерзания грунта. Оба конца скважины выходят на дневную поверхность.

Измеряют величину потенциала «сооружение-земля» относительно медно-сульфатного электрода сравнения.

Разбивают участок выполнения анодного заземления на интервалы, характеризующиеся различным защитным потенциалом. Выбирают интервал, в котором значение потенциала «сооружение-земля» снижено (по абсолютной величине) по причине экранирования тока катодной защиты элементами системы защитного заземления, электрически связанными с катоднозащищаемым сооружением.

В пробуренной скважине на данном интервале устанавливают конструкцию из двух полуобечеек, соединенных между собой посредством сварки, причем

материал полуобечаяек выбирают таким образом, чтобы удельное электрическое сопротивление материала полуобечайки, расположенной со стороны зоны размещения защитного заземления, экранирующего ток катодной защиты, было больше величины удельного электрического сопротивления материала второй полуобечайки.

Конструкцию из двух полуобечаяек, сваренных между собой, соединяют с трубами из токопроводящего композита, внутрь при помощи троса протягивают защитные электроды и закачивают электропроводящий раствор (рисунок 4.5).

Пример

На территории газораспределительной станции расположен узел учета расхода газа, оборудование которого заземлено с использованием вертикальных заземляющих электродов длиной 1500 мм, установленных в грунт и соединенных заземляющей шиной, подключенной к общему контуру защитного заземления промышленной площадки. По результатам электрометрического обследования системы катодной защиты подземных технологических трубопроводов и оборудования установлено, что в зоне установки заземляющих электродов наблюдается локальное снижение величины защитного потенциала, что указывает на опасность возникновения и развития коррозии подземных трубопроводов по причине натекания катодного тока на элементы защитного заземления. С целью приведения поляризационного потенциала к нормируемому значению в соответствии с [27] требуется вдоль рассматриваемого участка требуется установить протяженный анодный заземлитель.

По проектной документации определяют глубину заложения трубопровода, тип и характеристики грунтов, уровень грунтовых вод.

Для установки протяженного анодного заземления выбирают трубы, изготовленные из токопроводящего композита с удельным электрическим сопротивлением, равным 5000 и 10000 Ом·м. Из двух полуобечаяек, вырезанных из данных труб, путем сварного соединения по продольным швам собирают конструкцию, устанавливаемую в зоне натекания катодного тока на защитное заземление. Соединяют конструкцию из двух полуобечаяек и с трубами из

токопроводящего композита. При помощи оборудования для наклонно-направленного бурения бурят скважину диаметром 168 мм, которая проходит на глубине заложения нижней образующей трубопровода. В скважину протягивают конструкцию из труб внешним диаметром 120 мм из токопроводящего композиционного материала, поворачивая его таким образом, чтобы полуобечайка с удельным электрическим сопротивлением токопроводящего композита равным 10000 Ом·м располагалась со стороны участка, на котором расположена зона, характеризующаясь пониженным значением удельного электрического сопротивления грунта. В трубу из токопроводящего композита протаскивают протяженный гибкий анод типа ПВЕК по ТУ 3435-005-97598003-2011 длиной 1000 м с кабелями, выходящими на дневную поверхность из обоих концов скважины, и подключают их к станции катодной защиты.

Включают станцию катодной защиты и регулируют силу тока на выходе станции таким образом, чтобы разность потенциалов «сооружение-земля» находилась в пределах диапазона, соответствующего [55]. Устанавливают, что при силе тока на выходе станции катодной защиты равной 0,12 А разность потенциалов «сооружение-земля» соответствует нормируемым значениям [55].

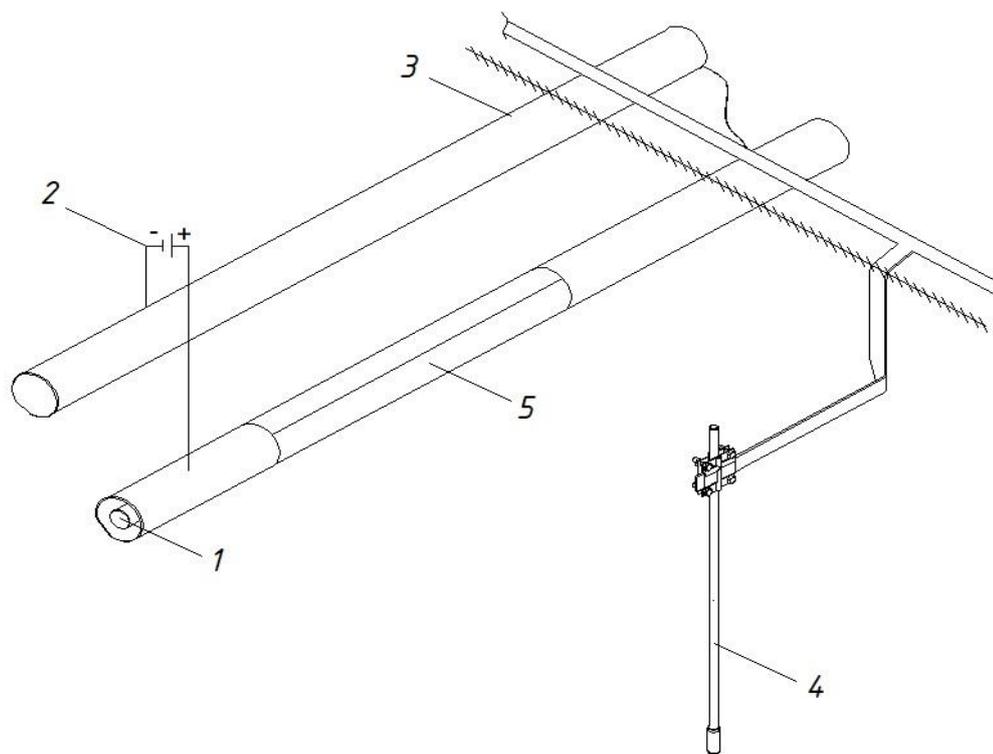


Рисунок 4.5 – Схема установки протяженного анодного заземления

4.4 Выводы по главе 4

1. Разработан алгоритм определения расчетного значения удельного электрического сопротивления грунта, позволяющий учитывать на стадии проектирования системы ЭХЗ газонефтепроводов и оборудования воздействие факторов, которые предлагается разделить на две группы: естественные (сезон, влажность грунта, температура грунта и трубопроводов, пористость грунта) и искусственные (метод обработки грунта, уплотнение грунта).

2. Разработан и обоснован новый критерий грунтовых характеристик K_n – коэффициент неоднородности грунтовых условий, определяющий необходимость проведения дополнительных изысканий на территории объекта и учета скорректированного среднего значения удельного электрического сопротивления грунта при проектировании систем ЭХЗ газонефтепроводов и оборудования.

3. Разработана методика оценки удельного электрического сопротивления грунта в ходе инженерно-геологических изысканий на площадке предполагаемого сооружения, результаты которых рекомендовано использовать при определении расчетного значения удельного электрического сопротивления грунта и оценки степени неоднородности грунтовых характеристик при проектировании систем ЭХЗ газонефтепроводов и оборудования.

4. Предложены рекомендации по минимизации неоднородности грунтовых условий на стадии проектирования систем ЭХЗ целью устранения негативного влияния на параметры токораспределения в системе ЭХЗ газонефтепроводов и смежных систем.

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. Для обеспечения ЭХЗ 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».

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АЗ	– анодное заземление;
АО	– Акционерное общество;
ВСТО	– Восточная Сибирь - Тихий океан;
ВЭЗ	– вертикальное электрическое зондирование;
ГАЗ	– глубинное анодное заземление;
ГКС	– газокompрессорная станция;
ГРС	– газораспределительная станция;
ЗЗ	– защитное заземление;
ЗУ	– заземление электроустановок;
ИГЭ	– инженерно-геологический элемент;
ИС	– измеритель сопротивления;
КС	– компрессорная станция;
ЛПУ	– линейное производственное управление;
МАГ	– минеральный активатор грунта;
МГ	– магистральный газопровод;
МТ	– магистральный трубопровод;
НПС	– нефтеперекачивающая станция;
ОАО	– Открытое акционерное общество;
ООО	– Общество с ограниченной ответственностью;
ПАВ	– поверхностно-активные вещества;
ПАО	– Публичное акционерное общество;
ПП	– промышленная площадка;
СКЗ	– станция катодной защиты;
УЭС	– удельное электрическое сопротивление;
ЭХЗ	– электрохимическая защита.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Агиней, Р. В. Актуальные вопросы защиты от коррозии длительно эксплуатируемых магистральных газонефтепроводов / Р. В. Агиней, Ю. В. Александров. – Санкт-Петербург : Недра, 2012. – 394 с.
2. Агиней, Р. В. Исследование влияния защитных заземлений электроустановок на эффективность электрохимической защиты подземных трубопроводов на территории промышленных площадок / Р. В. Агиней, Е. В. Исупова // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2017. – № 3 (61). – С. 16-20.
3. Александров, О. Ю. Защита подземных трубопроводов от вредного влияния геомагнитно-индуцированных блуждающих токов / О. Ю Александров // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2017. – № 5. – С. 48-54.
4. Александров, Ю. В. Коррозия газонефтепроводов. Электрохимические методы защиты. – Санкт-Петербург : Недра, 2012. – 394 с.
5. Александров, Ю. В. Эффективность противокоррозионной защиты сложноразветвленных газопроводов промышленных площадок КС / Ю. В. Александров, И. В. Глотов, Р. В. Агиней, А. С. Кузьбожев // Газовая промышленность. – 2010. – № 2. – С. 52-54.
6. Ананьев, В. П. Специальная инженерная геология : учебник / В. П. Ананьев, А. Д. Потапов, Н. А. Филькин. – Москва : ИНФРА – М, 2021. – 263 с.
7. Бабин, Л. А., Быков Л. И., Рафиков С. К. Искусственное улучшение грунтов в практике трубопроводного строительства / Л. А. Бабин, Л. И. Быков, С. К. Рафиков. – Москва : Недра, 1990. – 153 с. : ил.
8. Бородавкин, П. П. Механика грунтов в трубопроводном строительстве. – Москва : Недра, 1986. – 224 с.
9. Веденеева, Л. М. Исследование влияния основных свойств грунта на сопротивление заземляющих устройств / Л. М. Веденеева, А.В. Чудинов // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2017. – Т.16. – № 1. – С. 89-100.

10. Винокурцев, Г. Г. Защита от коррозии подземных трубопроводов и сооружений: Учеб. пособие / Г. Г. Винокурцев, В. В. Первунин, В. А. Крупин, А. Г. Винокурцев. – Ростов н/Д: Рост. гос. строит. ун-т, 2003. – 124 с.: ил.
11. Волков, Б. Г. Справочник по защите подземных металлических сооружений от коррозии / Б. Г. Волков, Н. И. Тесов, В. В. Шувалов. – Ленинград: Недра, 1975. – 224 с.
12. Волкова, И. И. Вероятностные методы исследования зависимостей в нефтяной и газовой промышленности: учебное пособие / И. И. Волкова, Е. В. Пластинина, О. М. Прудникова и др. – Ухта: УГТУ, 2014. – 135 с.
13. Волкова, И. И. Математические методы анализа информации / И. И. Волкова, М. С. Хозяинова. – Ухта : УГТУ, 2017. – 52 с.
14. Воронин, И. В. Изоляционные покрытия подземных трубопроводов / И. В. Воронин, Б. Н. Курепин, Л. П. Скугорова. – Москва : ВНИИОЭНГ, 1985.
15. ВРД 39-1.8-055-2002 Типовые технические требования на проектирование КС, ДКС и КС ПХГ. – Москва : ОАО «Газпром», 2002. – 92 с.
16. ВРД КТК 73-02-2013 Регламент по организации работ по контролю, техническому обслуживанию и ремонту средств электрохимической защиты нефтепровода КТК. – Москва : КТК, 2013. – 46 с.
17. ВСН 009-88. Строительство магистральных и промысловых трубопроводов. Средства установки электрохимической защиты. - Москва : Миннефтегазстрой, 1990. – 76 с.
18. ВСН 39-1.8-008-2002. Указания по проектированию вставок электроизолирующих на магистральных и промысловых трубопроводах. – Москва : ОАО «Газпром» – ДАО «Оргэнергогаз», 2002. – 6 с.
19. Гидротехнические сооружения / Г. В. Железняков, Ю. А. Ибадзе, П.О. Иванов и др. Под общ. Ред. Б. П. Нецриги. – Москва : Стройиздат, 1983. – 543 с.
20. Глотов, И. В. Оптимизация режимов работы электрохимической защиты в условиях промышленных площадок / И. В. Глотов, Р. В. Агинея // Сборник научных трудов: материалы IX международной молодежной научной конференции

(19-21 марта 2008 г.): в 3 ч.; ч. 2; под ред. Н.Д. Цхадая. – Ухта: УГТУ, 2008. – С. 179-181.

21. Глотов, И. В. Экспериментальное определение математических моделей для оптимизации защиты подземных нефтегазопроводов несколькими катодными станциями / И. В. Глотов, Р. В. Агинеи, В. Н. Юшманов // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2009. – № 8 – С. 18-22.

22. Глотов, И. В. Повышение эффективности противокоррозионной защиты подземных нефтегазопроводов в условиях промышленных площадок : дис. ... канд. техн. наук : 25.00.19 / Глотов Иван Владимирович. – Ухта, 2009. – 164 с. : ил.

23. Глотов, И. В. Эффективность противокоррозионной защиты сложноразветвленных газопроводов промышленных площадок КС / Ю. В. Александров, И. В. Глотов, Р. В. Агинеи и др. // Газовая промышленность. – 2010. – № 2. – С. 52-54.

24. ГМТ-7Л1.2013-АГНКС-16-002-ТОС. Технологическое описание строительства. Том 2. – ООО «ИПИГАЗ», 2014. – 135 с.

25. Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие для вузов / В. Е. Гмурман. – 9-е изд., стер. – Москва : Высш. шк., 2003. – 479 с.

26. ГОСТ 9.602-2016. Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии. – Москва, 2017. – 110 с.

27. ГОСТ Р 51164-98. Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии. – Москва : Стандартинформ, 1998. – 45 с.

28. ГОСТ Р 55989-2014. Магистральные газопроводы. Нормы проектирования на давление свыше 10 МПа. Основные требования / Введ. 01.12.14. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 106 с.

29. ГОСТ Р 58330.2-2018. Мелиорация. Виды мелиоративных мероприятий и работ. – Москва : Стандартинформ, 2019. – 28 с.

30. Грибанов, А. Заземление в высокоомных грунтах / А. Грибанов // Neftegaz.ru. – 2017. – № 3. – С. 48-50.

31. Дульнев, Г. Н. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. / Г. Н. Дульнев, Е. П. Заричняк – Ленинград : Изд-во Энергия, 1974. – С. 10-33.

32. Дюповкин, Н. И. Синергетические процессы в магнитных жидкостях // 18-я Международная плесская научная конференция по нанодисперсным магнитным жидкостям. – Иваново: ИГЭУ им. В.И. Ленина, 2018. – С. 72-76.

33. Защита металлических сооружений от подземной коррозии: Справочник / И. В. Стрижевский, А. М. Знневич, К. К. Никольский и др. – Москва : Недра, 1982. – 293 с.

34. Исупова, Е. В. Анализ средств и методов обеспечения эффективной электрохимической защиты нефтегазопроводов на территории промышленных площадок // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2017. – № 5. – С. 55-63.

35. Исупова Е. В. Повышение эффективности защиты от коррозии подземных нефтегазопроводов на территории промышленных площадок: автореф. дис. канд. техн. наук: 25.00.19. – Ухта, 2018. – 24 с.

36. Исупова, Е. В. Повышение эффективности защиты от коррозии подземных нефтегазопроводов на территории промышленных площадок : 25.00.19 : дис. ... канд. техн. наук / Исупова Екатерина Владимировна. – Ухта, 2019. – 166 с.

37. Исупова, Е.В. Влияние контуров защитных заземлений энергоустановок на показатели эффективности электрохимической защиты нефтегазопроводов от коррозии / Исупова Е.В., Агиней Р.В. // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2017. – № 5. – С. 28-33.

38. 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.

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

40. 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.

41. Корзинин, В. Ю. Использование протяженных анодных заземлителей для электрохимической защиты нефтепроводов от коррозии / В. Ю. Корзинин // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2012. – № 4 (8). – С. 92-98.

42. Коротяев, А. Г. Влияние контуров защитных заземлений на уровень защищенности и ресурс системы электрохимзащиты площадных объектов / А. Г. Коротяев // Коррозия территории «НЕФТЕГАЗ». – 2016. – № 3 (35). – С. 60-62.

43. Кримчеева Г. Г. Противокоррозионная защита : Учебное пособие / Г. Г. Кримчеева, Е. Л. Полубоярцев. – Ухта : Изд-во Ухтинского государственного технического университета, 2014. – 62 с.

44. Кримчеева Г. Г. Электрохимическая защита трубопроводов от коррозии : Методические указания / Г. Г. Кримчеева, Е. Л. Полубоярцев. - Ухта : Изд-во Ухтинского государственного технического университета, 2014. – 56 с. : ил. - б.ц.

45. Кучерявая И. Н. Подходы к моделированию электрического поля в полиэтиленовой изоляции с микровключениями // Праці ІЕД НАНУ. – 2016. – № 44. – С. 115-122.

46. Мищенко, Н. Ф. Химическое укрепление грунтов в аэродромном и дорожном строительстве / Н. Ф. Мищенко, Н. И. Серов, Л. А. Макаров и др. – Москва : Транспорт, 1967. – 212 с.

47. Мустафин, Ф. М. Область применения гидрофобизированных грунтов на объектах трубопроводного транспорта // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2003. – № 3. – С. 83-90.

48. Мустафин, Ф. М. Повышение надёжности эксплуатации нефтепроводов при обсыпке гидрофобизированным грунтом // Нефтяное хозяйство. – 2003. – № 9. – С. 51-59.

49. Мустафин Ф. М. Способы прокладки трубопроводов с применением обсыпки специально обработанными грунтами / Ф. М. Мустафин // Нефтегазовое дело. – 2003. – № 1 (2003).

50. Мустафин, Ф. М. Использование гидрофобизированных грунтов при строительстве и ремонте объектов трубопроводного транспорта : дис. ... д-ра техн. наук : 25.00.19. / Мустафин Фаниль Мухаметович. – Уфа, 2003. – 398 с. : ил.

51. Налимов, В. В. Теория эксперимента / В. В. Налимов. - Москва : Наука, 1971. – 208 с.

52. Никулин, С. А. Основы проектирования электрохимической защиты от коррозии подземных и подводных объектов транспорта нефти и газа : Учебное пособие / С. А. Никулин, Ю. В. Александров, О. Ю. Александров, Р. В. Агинеи / под ред. д.т.н., профессора Агинеи Р.В. – Санкт-Петербург : Недра, 2016. – 198 с.

53. Новосёлов, В. Ф. Типовые расчёты противокоррозионной защиты металлических сооружений нефтегазопроводов и нефтебаз / В. Ф. Новосёлов, А. А. Коршак, В. Н. Димитров. – Уфа: Изд-во УНИ, 1985. – 100 с.

54. ОНТП 51-1-85. Общесоюзные нормы технологического проектирования. Магистральные трубопроводы. Часть 1. Газопроводы. – ВНИПИТрансгаз – ООО «ВНИИГАЗ» – «ЮжНИИгипрогаз», 1986. – 95 с.

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

56. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). – 7-е изд. – Москва : Ростехнадзор, 2010. – 411 с.

57. Прохоров, А. А. Опыт проектирования защиты от коррозии подземных трубопроводов на площадках НПС / А. А. Прохоров, В. В. Радченко, Р. А. Жуков // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. Том 7. – 2017. – № 1. – С. 82-86

58. Р Газпром 2-6.2-676-2012. Методика и порядок расчёта систем молниезащиты объектов ОАО «Газпром». – Москва : ОАО «Газпром» – ОАО «Газпром промгаз», 2012. – 48 с.

59. Р Газпром 9.4-006-2009. Защита от коррозии. Инструкция по электрометрическому обследованию подземных технологических трубопроводов компрессорных станций. – Москва : ООО «Газпром экспо», 2010. – 29 с.

60. Р Газпром 9.4-006-2009. Защита от коррозии. Инструкция по электрометрическому обследованию подземных технологических трубопроводов компрессорных станций. – Москва : ООО «Газпром экспо», 2010. – 29 с.

61. РД 34.21.122-87. Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений. – Москва : Гос. научно-исследовательский энергетический институт им. Г.М.Кржижановского, 1987. – 31 с.

62. РД-91.020.00-КТН-234-10. Нормы проектирования электрохимической защиты магистральных трубопроводов и сооружений НПС. – Москва : ОАО «АК «Транснефть», 2010. – 71с.

63. РД-91.020.00-КТН-259-10. Нормы и правила проектирования заземляющих устройств магистральных нефтепроводов и нефтепродуктопроводов организаций системы ОАО «АК «Транснефть». – Москва : АК «Транс-нефть», 2010. – 158 с.

64. Ржаницын, Б. А. Химическое закрепление грунтов в строительстве / Б. А. Ржаницын. – Москва: Стройиздат, 1986. – 264 с.

65. Руденская, И. М. Органические вяжущие для дорожного строительства / И. М. Руденская, А. В. Руденская. – Москва : Транспорт, 1984. – 229 с.

66. Руководство по проектированию, строительству и эксплуатации заземлений в установках проводной связи и радиотрансляционных узлов / М-во

связи СССР. Гл. упр. междунар. телефонной связи. – [Перераб. изд.]. – Москва : Связь, 1971. – 88 с. : черт.

67. Руководство по проектированию и защите от коррозии подземных металлических сооружений связи / М-во связи СССР, Гл. упр. линейн.-каб. и радиорелейн. сооружений связи [и др.]. – Москва : Связь, 1978. – 215 с. : ил.

68. Северинова, Л. Н. Оптимизация электрохимзащиты подземных магистральных трубопроводов / Л. Н. Северинова, А. Н. Колотовский // Нефтяное хозяйство. – 2009. – № 6. – С. 2-6.

69. Секачѳв, А. Ф. Очистка технологических ёмкостей систем трубопроводного транспорта от нефтешламов с использованием СВЧ нагрева : дис. ... канд. техн. наук : 2.8.5. / Секачѳв Андрей Федорович. – Омск, 2022. – 139 с. : ил.

70. Селина, Л. А. Проектирование средств электрохимзащиты на СМГ «Бованенково-Ухта». Итоги строительства и пусконаладочных работ / Л. А. Селина, И. Г. Телетьен // Коррозия территории «НЕФТЕГАЗ». – 2016. – № 3 (25). – С. 76-79.

71. 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.

72. Слуцкий А.И. Старение полиэтиленовых изоляционных лент в натуральных условиях / А.И. Слуцкий // Строительство объектов нефтяной и газовой промышленности. – 1979. – № 15. – 15 с.

73. СН 25-74. Инструкция по применению грунтов, укрепленных вяжущими материалами, для устройства оснований и покрытий автомобильных дорог аэродромов. – Москва : Госстрой СССР, 1974.

74. СНиП РК 4.04-06-2002. Электротехнические устройства. – Введен 2003-01-20. – Алматы : ЗАО «Тяжпромэлектропроект», 2002. – 57 с.

75. Соколович, В. Е. Химическое закрепление грунтов / В. Е. Соколович. – Москва : Стройиздат, 1980. – 119 с.

76. СП 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Введ. 01.03.1998 – Москва: Стандартиформ, 1998. – 42 с.

77. СП 36.13330.2012. «Магистральные трубопроводы». – Москва : АО «ВНИИСТ», 2012. – 90 с.

78. Спиридович, Е. А. Повышение надежности магистральных газопроводов в условиях коррозионного растрескивания под напряжением : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 25.00.19. / Спиридович Евгений Апполинарьевич. – Москва, 2014. – 49 с.

79. СТО Газпром 2-1.11-170-2007. Инструкция по устройству молниезащиты зданий сооружений и коммуникаций ОАО «Газпром». – Москва : ОАО «Газпром» – ООО «ВНИИГАЗ», 2007. – 121 с.

80. СТО Газпром 2-1.11-172-2007. Методика по проведению экспертизы основных производственных объектов ОАО «Газпром» на соответствие нормативным требованиям электромагнитной совместимости. – Москва : ООО «Газпром ВНИИГАЗ», 2008. – 58 с.

81. СТО Газпром 2-1.11-290-2009. Положение по обеспечению электромагнитной совместимости. – Москва : ОАО «Газпром» – ООО «Газпромэнергодиагностика», 2009. – 20 с.

82. СТО Газпром 2-3.5-051-2006. Нормы технологического проектирования магистральных газопроводов. – Москва : ОАО «Газпром» – ООО «ВНИИГАЗ» – ОАО «ВНИИГАЗ», 2006. – 296 с.

83. СТО Газпром 2-6.2-654-2012. Проектная документация на строительство и реконструкцию производственных объектов ОАО «Газпром». Руководство по разработке раздела «Электромагнитная совместимость» / Введ. 24-07-2013 – Москва : ООО «Энергодиагностика» – ОАО «Газпром», 2014. – 48 с.

84. СТО Газпром 9.0-001-2009. Защита от коррозии. Основные положения / ООО «Газпром ВНИИГАЗ». – Москва : ООО «Газпром экспо», 2009. – 19 с.

85. СТО Газпром 9.2-002-2019. Электрохимическая защита от коррозии. Основные требования : стандарт организации : издание официальное : взамен СТО Газпром 9.2-002-2009 : дата введения 2019-02-15 / ПАО «Газпром» ; ООО «Научно-

исследовательский институт природных газов и газовых технологий – Газпром ВНИИГАЗ». – Санкт-Петербург : Газпром экспо, 2019. – IV, 22 с.

86. СТО Газпром 9.2-003-2009. Защита от коррозии. Проектирование электрохимической защиты подземных сооружений / ООО «Газпром ВНИИГАЗ». – Москва : ООО «Газпром экспо», 2009. – 48 с.

87. СТО Газпром 9.2-003-2020. Защита от коррозии / ООО «Газпром ВНИИГАЗ». – Санкт-Петербург : ООО «Газпром экспо», – VI, 63 с.

88. СТО Газпром 9.4-013-2011. Контроль состояния и оценка эффективности защитных покрытий подземных газонефтепроводов / ООО «Газпром ВНИИГАЗ». – Москва : ООО «Газпром экспо», 2012. – 21 с.

89. Телетьен, И. Г. Особенности построения системы электрохимической защиты при наличии заземленных сооружений / И. Г. Телетьен, Н. Ю. Патрышев // Коррозия территории «НЕФТЕГАЗ». – 2014. – № 1 (27). – С. 76-77.

90. Техническая мелиорация пород / Под ред. С. Д. Воронкевича. – Москва : Изд-во МГУ, 1981. – 342 с.

91. Технические указания по проектированию, строительству и эксплуатации кабельных линий связи в районах вечной мерзлоты. – Москва, 1981. – 37 с.

92. Ткаченко, В.Н. Электрохимическая защита трубопроводных сетей [Текст] / В. Н. Ткаченко. – Учебное пособие, 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Стройиздат, 2004. – 320с.

93. Тянь, А. А. Вычисление обобщенной проводимости гетерогенных систем по характеристикам их структуры и фазового состава / А. А. Тянь, Ф. А. Усманов // Журнал технической физики. – 1972. – Т. 42. – №9. – С.1974-1981.

94. Унифицированные проектные решения по электрохимической защите подземных коммуникаций. УПР. ЭХЗ-02-2013. Типовые схемы электрохимической защиты от коррозии. – Москва : ОАО «Газпром», 2013 – 46 с.

95. Фатрахманов, Ф. К. Концепция и пути оптимизации катодной защиты коммуникаций промплощадок / Ф. К. Фатрахманов // Современные проблемы трубопроводного транспорта газа. – Москва : ВНИИГАЗ, 1998. – С. 408-411.

96. Фатрахманов, Ф. К. Опыт оптимизации катодной защиты сложных коммуникаций промплощадок / Ф. К. Фатрахманов // Материалы международного научно-технического семинара по проблемам защиты от коррозии подземных сооружений РАО «Газпром». – Москва : ИРЦ Газпром, 1996. – С 39-45.

97. 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 «Севергеоэкотех-2022» : Ухта : УГТУ, 2022. – С. 385-391.

98. Фуркин, А. В. Совершенствование методик идентификации и оценки опасности блуждающих токов, воздействующих на магистральные нефтегазопроводы: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 25.00.19 / Алексей Владимирович Фуркин. – Ухта, 2012. – 26 с.

99. Цхадая, Н. Д. Способ снижения затрат электроэнергии на защиту подземных металлоконструкций / Н. Д. Цхадая, С. В. Крючков, А. Е. Жуйков и др. // Известия Коми научного центра УРО РАН. – Сыктывкар: КНЦ УРО РАН. – 2014. – № 4 (20). – С. 91-93.

100. Чаповский, Е. Г. Лабораторные работы по грунтоведению и механике грунтов / Е. Г. Чаповский. – Москва : Недра, 1975. – 304 с.

101. Чэнь, Ц. Совершенствование пассивной системы защиты трубопроводов от коррозии : дис. ... канд. техн. наук : 25.00.19 / Чэнь Цюнь. – Уфа, 2017. – 149 с. : ил.

102. Шутенко, Л. Н. Механика грунтов, основания и фундаменты : учебник / Л. Н. Шутенко, А. Г. Рудь, О. В. Кичаева и др.; под. ред. Л. Н. Шутенко; Харьков. нац. ун-т гор. хоз-ва им. А. Н. Бекетова. – Харьков : ХНУГХ им. А. Н. Бекетова, 2015. – 501 с.

103. Эдвабник, В. Г. Теория обобщенной проводимости : монография / В. Г. Эдвабник. – Новосибирск : Наука, 2019. – 212 с.

104. Яблучанский, А.И. Применение протяженных гибких анодов в системах ЭХЗ КС // Материалы отраслевого совещания по проблемам защиты от коррозии (Барнаул, 21-26 апреля 2008 г.). – Москва : ИРЦ Газпром, 2008. – С. 88-100.

105. 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.

106. 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.

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

108. 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.

109. 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.

110. 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. Агинец // Наука и техника в газовой промышленности. – 2022. – № 3 (91). – С. 65-78.

111. 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.

112. Яворская, Е. Е. Создание математической модели для расчета интегрального удельного электрического сопротивления грунта / Е. Е. Яворская, Е. В. Исупова, Р. В. Агинец // «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.

113. 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. Агинец // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2024. – № 1-2. – С. 82-88.

114. Ягубов, З. Х. Оптимизационные методы контроля и управления объектами с рассредоточенными элементами: монография / З. Х. Ягубов. – Ухта : УГТУ, 2014. – 132 с.

115. Cret, R. Numerical computation of dielectric permittivity of mixtures / R. Cret, L. Cret. // Journal of Optoelectronics and Advanced Materials. – 2004. – Vol. 6, No. 3. – P. 1045–1048.

116. Dong, L. Compatibility analysis of regional CP system and electrical grounding system in oil & gas stations / L. Dong, W. Cui, Y. Yang, X. Wang, F. Gu // CORROSION 2017. – OnePetro : NACE International, 2017.

117. European standard EN 12954. Cathodic protection of buried or immersed metallic structures. General principles and application for pipelines, 2001. – 31 c.

118. European standard EN 14505. Cathodic protection of complex structures, 2005. – 24 c.

119. Ghesquiere, J. D. Cathodic protection and zinc grounding in industrial plant construction / J. D. Ghesquiere // CORROSION 1961. – № 17 (3) – P. 149-153.

120. Gummow, R. A. Cathodic protection current requirements for electrical grounding materials / R. A. Gummow // CORROSION 2004. – New Orleans, TX : NACE International, 2004.

121. Gus'kov, S. S. Theoretical Assessment of the Electrical Contact Effect of the Pipeline with the Groundings of Electrical Equipment on the Cathodic Current Distribution in the Underground Pipeline. TERRITORIJA NEFTEGAS = OIL AND GAS TERRITORY/ S. S. Gus'kov, R.V. Aginey, E. V. Isupova. – 2017. – № 12. – P. 54-58.

122. Humedahl, G. Real-time monitoring affects cathodic protection / G. Humedahl // Materials performance. – 2006. – № 6. – P. 16-19.

123. Husock, B. The effect of electrical grounding systems on underground corrosion and cathodic protection / B. Husock // Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Part II: Applications and Industry. – Cleveland : IEEE, 1960.

124. Kirkpatrick, E. L. Copper grounding systems have a negative effect on cathodic protection in production facilities / E. L. Kirkpatrick, M. Shamim / E. L. Kirkpatrick // CORROSION 2000. – San Antonio, TX : NACE International, 2000.

125. Kirkpatrick, E. L. Effects of electrical grounding on corrosion / E. L. Kirkpatrick // CORROSION 79. – Houston, TX : NACE International, 1979.

126. Kirkpatrick, E. L. Report of cathodic protection and grounding study on oil and gas production facilities in Pakistan / E. L. Kirkpatrick // ELK Engineering Associates, 1997.

127. Kirkpatrick, E. L. The conflict between copper grounding systems and cathodic protection systems / E. L. Kirkpatrick // Cathodic and anodic protection. Materials performance. – 2002. – P. 22-39.

128. Kirkpatrick, E. L. Copper grounding and cathodic protection in nuclear facilities / E. L. Kirkpatrick // CORROSION 2011. – Houston, TX : NACE International, 2011.

129. Mitolo, M. Interactions between cathodically protected pipelines and grounding systems / M. Mitolo, A. Pettinger // Industry Applications IEEE Transactions. – 2016. – vol. 52 – P. 3694-3698.

130. Russell, W. B. Safe electrical isolation of cathodically protected pipe / W. B. Russell // Pipeline & gas industry. – 1997. – № 6 – P. 35-37.

131. Trimble, W. L. The conflicts and solutions to complying with the grounding revisions of the 2005 National electrical code® for cathodically protected facilities / W. L. Trimble, E. E. Guidry // Petroleum and Chemical Industry Technical Conference, 2007. – Calgary : IEEE, 2007.

132. Годовой отчет о деятельности федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2021 году : gosnadzor.ru : [сайт]. – 2023. – URL:

https://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/%D0%93%D0%BE%D0%B4%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B9%20%D0%BE%D1%82%D1%87%D0%B5%D1%82%20%D0%B7%D0%B0%202021%20%D0%B3..pdf (дата обращения: 20.02.2023). –

Текст : электронный.

133. Программа инновационного развития ПАО «Транснефть» на период 2022-2026 годы. Паспорт : transneft.ru : [сайт]. – 2023. – URL:

https://www.transneft.ru/development/perspective/innovations/programma-innovatsionnogo-razvitiya/pasport_pir_2022-2026.pdf (дата обращения: 20.02.2023) –

Текст : электронный.

134. Паспорт программы инновационного развития ПАО «Газпром» до 2025 года : gazprom.ru : [сайт]. – 2023. – URL:

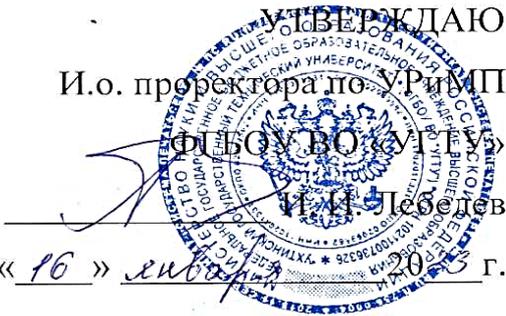
<https://www.gazprom.ru/f/posts/97/653302/prir-passport-2018-2025.pdf>

(дата

обращения: 20.02.2023) – Текст : электронный.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

И.о. проректора по УРМП
 ФГБОУ ВО «Ухтинский
 государственный технический университет»
 И.И. Лебедев
 « 16 » января 2023 г.



Акт
 о внедрении в учебный процесс
 результатов диссертационного исследования, выполненного
 Яворской Еленой Евгеньевной на тему
**«ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ
 ГАЗОНЕФТЕПРОВОДОВ В УСЛОВИЯХ НЕОДНОРОДНОСТИ
 ГРУНТОВ НА ТЕРРИТОРИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЛОЩАДОК»**

Настоящим актом подтверждается факт введения с 01.09.2022 результатов, полученных в ходе выполнения диссертационного исследования, в образовательный процесс, реализуемый ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный технический университет» по направлению подготовки 21.03.01 «Нефтегазовое дело» (уровень бакалавриата), 21.05.06 «Нефтегазовые техника и технологии» (уровень специалиста) и 21.04.01 «Нефтегазовое дело» (уровень магистратура) в рамках дисциплин «Защита объектов транспорта нефти и газа от коррозии» и «Пусконаладочные работы при сооружении систем ЭХЗ».

Методика проведения экспериментальных лабораторных исследований используется при проведении лабораторных работ: «Исследование влияния грунтовых характеристик на параметры токораспределения в системе электрохимической защиты подземных трубопроводов», «Оценка коррозионной опасности грунта по отношению к стали», «Выбор необходимого типа и параметров анодного заземления установки катодной защиты» и «Определение критериев эффективности электрохимической защиты подземных трубопроводов». В рамках практических занятий решаются задачи по определению интегральной величины удельного электрического сопротивления грунта и оценке коэффициента неоднородности грунтовых характеристик.

Декан НГФ



Н. П. Демченко

Начальник ОЛАиМООД



И. О. Ведерникова

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

УТВЕРЖДАЮ



Акт

внедрения научных результатов, полученных Яворской Е.Е. при выполнении диссертационного исследования на тему
«ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ ГАЗОНЕФТЕПРОВОДОВ В УСЛОВИЯХ НЕОДНОРОДНОСТИ ГРУНТОВ НА ТЕРРИТОРИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЛОЩАДОК»

Комиссия в составе:

- 1) Главный инженер
- 2) Начальник службы защиты трубопроводов от коррозии

В.В. Ефремов

Г.П. Иванов

удостоверяет, что научные результаты, полученные Яворской Еленой Евгеньевной, а именно методика определения оптимальных грунтовых условий для обеспечения требуемых параметров противокоррозионной защиты трубопроводов промышленных площадок и рекомендации по повышению эффективности противокоррозионной защиты трубопроводов промышленных площадок на стадии проектирования, ввода в эксплуатацию и эксплуатации, была использована в процессе проведения комплексных электрометрических обследований защитного потенциала «труба-земля» на подземных трубопроводах промышленных площадок: 124 км Газопровода Вуктыл-Ухта 1-я нитка: 126,0 от 67 – 193 км (инв. № 038474).

Использование методики в результате проведенных электроизмерений защитного потенциала на подземных трубопроводах промплощадок при эксплуатации позволило повысить эффективность противокоррозионной защиты в следующих направлениях: выбор типа глубинного анодного заземления и оптимальной с точки зрения коррозионной активности грунта зоны его размещения на территории промплощадок в грунтах с наименьшим удельным электрическим сопротивлением; уточнение данных расчета и прогнозирование изменения во времени переходного сопротивления трубопровода; дифференцированный выбор типа и конструкции антикоррозионного защитного покрытия на участках подземных трубопроводов, подверженных влиянию коррозионной агрессивности грунта в различной степени; выбор и оценка целесообразности реализации дополнительных мероприятий по минимизации влияния неоднородности грунтовых характеристик на параметры токораспределения в системе ЭХЗ промышленных площадок.

Помимо этого, предложены рекомендации и способ выполнения анодного заземления, ограничивающие негативное влияние, обусловленное неоднородностью грунтовых условий на территории промышленных площадок, на параметры ЭХЗ газонефтепроводов и смежных систем.

Главный инженер

Начальник службы защиты
трубопроводов от коррозии

В.В. Ефремов

Г.П. Иванов



УТВЕРЖДАЮ

Директор ООО «Фирма
«Севертехдиагностика»

С. Л. Казаковцев

« 6 »

02

2023 г.

Акт

внедрения научных результатов, полученных Яворской Е.Е. при выполнении
диссертационного исследования на тему
**«ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ
ГАЗОНЕФТЕПРОВОДОВ В УСЛОВИЯХ НЕОДНОРОДНОСТИ
ГРУНТОВ НА ТЕРРИТОРИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЛОЩАДОК»**

Комиссия в составе:

- 1) Руководитель группы ПКЗ Курилов Александр Сергеевич
- 2) Начальник лаборатории НК Зубков Андрей Александрович

удостоверяет, что научные результаты, полученные Яворской Еленой Евгеньевной, а именно методика определения оптимальных грунтовых условий для обеспечения требуемых параметров противокоррозионной защиты трубопроводов промышленных площадок и рекомендации по повышению эффективности противокоррозионной защиты трубопроводов промышленных площадок на стадии проектирования, ввода в эксплуатацию и эксплуатации, была использована в процессе проведения комплексных электрометрических обследований защитного потенциала «труба-земля» на подземных трубопроводах промышленных площадок НПС «Ухта-1», НПС «Микунь», НПС «Урдома».

Использование методики в результате проведенных электроизмерений защитного потенциала на подземных трубопроводах промплощадок при эксплуатации позволило повысить эффективность противокоррозионной защиты в следующих направлениях: выбор типа глубинного анодного заземления и оптимальной с точки зрения коррозионной активности грунта зоны его размещения на территории промплощадок в грунтах с наименьшим удельным электрическим сопротивлением; уточнение данных расчета и прогнозирование изменения во времени переходного сопротивления трубопровода; дифференцированный выбор типа и конструкции антикоррозионного защитного покрытия на участках подземных трубопроводов, подверженных влиянию коррозионной агрессивности грунта в различной степени; выбор и оценка целесообразности реализации дополнительных мероприятий по минимизации влияния неоднородности грунтовых характеристик на параметры токораспределения в системе ЭХЗ промышленных площадок.

Помимо этого, предложены рекомендации и способ выполнения анодного заземления, ограничивающие негативное влияние, обусловленное неоднородностью грунтовых условий на территории промышленных площадок, на параметры ЭХЗ газонефтепроводов и смежных систем.

Руководитель группы ПКЗ

Курилов Александр Сергеевич

Начальник лаборатории НК

Зубков Андрей Александрович

УТВЕРЖДАЮ
 Главный инженер
 АО «Транснефть-Север»



И. Ф. Хузиахметов

« 20 » 06



Акт

внедрения научных результатов, полученных Яворской Е.Е. при выполнении диссертационного исследования на тему

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

Комиссия в составе:

- 1) Заместителя главного энергетика АО «Транснефть - Север» П.В. Трусова;
- 2) Заместителя начальника отдела эксплуатации АО «Транснефть - Север»

И.С. Филиппова;

3) Начальника технического отдела АО «Транснефть - Север» В.В. Ильина, удостоверяет, что научные результаты, полученные Яворской Еленой Евгеньевной, а именно методика определения оптимальных грунтовых условий для обеспечения требуемых параметров противокоррозионной защиты трубопроводов промышленных площадок и рекомендации по повышению эффективности противокоррозионной защиты трубопроводов промышленных площадок на стадии проектирования, ввода в эксплуатацию и эксплуатации, подлежит использованию в процессе проведения комплексных электрометрических обследований защитного потенциала «труба-земля» на подземных трубопроводах промышленных площадок АО «Транснефть-Север».

Использование данной методики в результате проведения электроизмерений защитного потенциала на подземных трубопроводах промплощадок при эксплуатации позволит повысить эффективность противокоррозионной защиты в следующих направлениях: выбор типа глубинного анодного заземления и оптимальной с точки зрения коррозионной активности грунта зоны его размещения на территории промплощадок в грунтах с наименьшим удельным электрическим сопротивлением; уточнение данных расчета и прогнозирование изменения во времени переходного сопротивления трубопровода; дифференцированный выбор типа и конструкции антикоррозионного защитного покрытия на участках подземных трубопроводов, подверженных влиянию коррозионной агрессивности грунта в различной степени; выбор и оценка целесообразности реализации дополнительных мероприятий по минимизации влияния неоднородности грунтовых характеристик на параметры токораспределения в системе ЭХЗ промышленных площадок.

Помимо этого, автором предложены рекомендации и способ выполнения анодного заземления, ограничивающие негативное влияние, обусловленное неоднородностью грунтовых условий на территории промышленных площадок, на параметры ЭХЗ газонефтепроводов и смежных систем.

Заместитель главного энергетика АО «Транснефть - Север»  П.В. Трусов

Заместитель начальника отдела эксплуатации

АО «Транснефть - Север»

Начальник технического отдела АО «Транснефть - Север» 

И.С. Филиппов

В.В. Ильин

ПРИЛОЖЕНИЕ В

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11) **2 751 713**⁽¹³⁾ **С1**(51) МПК
C23F 13/00 (2006.01)ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
C23F 13/00 (2021.02)

(21)(22) Заявка: 2020139836, 02.12.2020

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
02.12.2020

Дата регистрации:
16.07.2021

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 02.12.2020

(45) Опубликовано: 16.07.2021 Бюл. № 20

Адрес для переписки:
603950, г. Нижний Новгород, ГСП-926, ул.
Алексеевская, 26, АО "Гипрогазцентр"

(72) Автор(ы):
Агиней Руслан Викторович (RU),
Исупова Екатерина Владимировна (RU),
Савченков Сергей Викторович (RU),
Яворская Елена Евгеньевна (RU)

(73) Патентообладатель(и):
Акционерное общество "Гипрогазцентр" (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: RU 2695101 C1, 19.07.2019. RU
2521927 C1, 10.07.2014. RU 2427668 C1,
27.08.2011. RU 2407824 C1, 27.12.2010. RU
2540259 C1, 10.02.2015.

(54) СПОСОБ ВЫПОЛНЕНИЯ АНОДНОГО ЗАЗЕМЛЕНИЯ

(57) Реферат:

Изобретение относится к области электрохимической защиты подземных сооружений от грунтовой коррозии. Бурят скважину, которая на участке действия анодного заземления параллельна защищаемому сооружению и проходит ниже уровня грунтовых вод и уровня промерзания грунта. Измеряют величину потенциала сооружения - земля относительно медно-сульфатного электрода сравнения. Разбивают участок выполнения анодного заземления на интервалы, характеризуемые различным защитным потенциалом. Определяют интервалы влияния защитных заземлений и заземлений молниезащиты на параметры натекания катодного тока на защищаемое сооружение, на которых значение потенциала сооружения - земля снижено по абсолютной величине по причине экранирования тока катодной защиты элементами системы защитного заземления,

электрически связанными с катоднозащищаемым сооружением. В пробуренной скважине на данном интервале устанавливают трубы, выполненные в виде двух соединенных полуобечеек из материалов различного электрического сопротивления, при этом при установке труб поворачивают трубу таким образом, чтобы полуобечайка из материала с более высоким электрическим сопротивлением была обращена к защитному заземлению. Конструкцию из двух полуобечеек, сваренных между собой, соединяют с трубами из токопроводящего материала, внутрь при помощи троса протягивают защитные электроды и закачивают электропроводящий раствор. Технический результат - повышение срока службы анодного заземления при наличии негативного влияния элементов системы защитного заземления и молниезащиты на параметры токораспределения в системе катодной защиты. 1 ил., 1 пр.

RU 2 751 713 C 1

RU 2 751 713 C 1