

На правах рукописи



ИСУПОВА ЕКАТЕРИНА ВЛАДИМИРОВНА

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАЩИТЫ
ОТ КОРРОЗИИ ПОДЗЕМНЫХ НЕФТЕГАЗОПРОВОДОВ
НА ТЕРРИТОРИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ
ПЛОЩАДОК

Специальность 25.00.19 – Строительство и эксплуатация
нефтегазопроводов, баз и хранилищ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ухта – 2018

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

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

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой транспорта
углеводородных ресурсов
ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный
институт»,
Земенков Юрий Дмитриевич

кандидат технических наук,
инженер 1 категории отдела проектирования
систем ЭХЗ Нижегородского филиала
ООО «Газпром проектирование»,
Никулин Сергей Александрович

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский
горный университет»

Защита состоится 21 июня 2018 г. в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.291.02 в Ухтинском государственном техническом университете по адресу: 169300, г. Ухта, Республика Коми, ул. Первомайская, д. 13.

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

Автореферат разослан 18 мая 2018 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук



Д. А. Борейко

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Эффективность защиты от коррозии подземных трубопроводов является одним из основных факторов, определяющих надежность и долговечность эксплуатации нефтегазопроводных систем.

В соответствии с действующими нормативными требованиями все стальные подземные нефтегазопроводы защищаются средствами электрохимической защиты. В частности, для трубопроводов, расположенных на территории промышленных площадок насосных, компрессорных и других станций, такая защита может обеспечиваться несколькими катодными установками, анодные заземления которых расположены по периметру объекта.

Однако конфигурация трубопроводных систем и оборудования промышленных площадок представляет собой сложную, взаимосвязанную систему, электрически соединенную посредством грунта. Некоторые электроды этой системы (защитные заземления электрооборудования, свайный фундамент, стальная арматура и пр.) могут являться ее катодными элементами, что вызывает экранирование натекания защитных токов и влечет за собой многократный рост потребления электроэнергии катодной защитой. Практика показывает, что до 90-95% защитного тока натекает на защитные заземления, что на порядок снижает работоспособность и срок службы анодных заземлений, а также приводит к тому, что даже в случае выполнения требований по обеспечению требуемой степени защищенности трубопроводов по величине потенциала «труба – земля», 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 в среднесрочной перспективе при частичном уменьшении величины переходного сопротивления изоляции трубопроводов.

Степень разработанности темы исследования. Существенный вклад в обеспечение противокоррозионной защиты подземных трубопроводов, в т.ч. работающих на территории промышленных площадок, внесли многие отечественные и зарубежные ученые и исследователи, среди которых: Р. В. Агинеи, И. В. Глотов, А. Г. Коротяев, Л. А. Селина, И. Г. Телетьен, Ф.К. Фатрахманов, В. Н. Юшманов, А. Gummow, В. R. Husock, E. L. Kirkpatrick и др. В частности, в диссертации Глотова И.В. приводится методика регулирования средств электрохимзащиты трубопроводов промышленных площадок, однако её применение в условиях экранирования катодного тока контурами защитных заземлений не представляется возможным.

В СП 36.13330.2012 и ГОСТ Р 51164-98 имеются требования о недопущении негативного влияния систем молниезащиты и защитных заземлений электрооборудования, однако рекомендации по проектированию, проведению пусконаладочных работ и последующей эксплуатации, устраняющие эффект экранирования тока катодной защиты в полной мере не разработаны.

Таким образом, разработка методик и технологий обеспечения эффективной защиты от коррозии нефтегазопроводов, работающих в условиях высокой плотности размещения гальванически связанного технологического оборудования, является актуальной проблемой нефтегазовой отрасли и требует дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

Цель работы – повышение эффективности противокоррозионной защиты трубопроводов, расположенных на территории промышленных площадок, путем внедрения научно-обоснованных технико-технологических решений в области проектирования, сооружения и эксплуатации систем противокоррозионной защиты нефтегазопроводов.

Задачи исследования:

1. Проведение исследования влияния системы защитного заземления, электрически соединенной с трубопроводом, на изменение параметров катодной защиты путем математического моделирования процесса токораспределения в системе противокоррозионной защиты трубопровода.

2. Разработка стенда и методики проведения экспериментальных исследований по оценке экранирующего эффекта от точечного защитного заземления.

3. Исследование изменения экранирующего эффекта в зависимости от материала защитного заземления, геометрических параметров его расположения относительно защищаемого сооружения и анодного заземления.

4. Совершенствование устройства для разделения контуров защитного заземления и катоднозащищаемых объектов, проведение лабораторных и опытно-промышленных испытаний образцов устройства на действующих площадочных объектах.

5. Разработка практических рекомендаций по повышению эффективности противокоррозионной защиты трубопроводов промышленных площадок на стадии проектирования, ввода в эксплуатацию и эксплуатации.

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

Научная новизна:

1. Введен критерий для оценки степени влияния контуров защитного заземления на параметры ЭХЗ трубопроводов - коэффициент экранирования тока катодной защиты, равный отношению разности значений потенциалов «труба – земля» при отсутствии и при наличии влияния защитных заземлений и наложенного потенциала «труба – земля» при отсутствии влияния защитных заземлений.

2. Разработана математическая модель распределения тока катодной защиты подземных трубопроводов, учитывающая влияние защитных заземлений в условиях промышленных площадок, позволяющая осуществлять выбор оптимальных параметров систем катодной защиты и мест установки защитных заземлений на проектируемых объектах, а также определение параметров и мест установки устройств для гальванической развязки между трубопроводом и защитными заземлениями.

3. Разработан алгоритм выбора мероприятий по минимизации и устранению негативного влияния контуров защитного заземления и молниезащиты,

учитывающий основные параметры, характеризующие экранирование тока катодной защиты трубопроводов на территории промышленных площадок.

Положения, выносимые на защиту.

1. Реализация при проектировании и эксплуатации нефтегазопроводов разработанного алгоритма управления параметрами электрохимической противокоррозионной защиты в условиях влияния защитных заземлений и заземлений молниезащиты позволяет с учетом местоположения контура защитного заземления относительно трубопровода и анода, материала электродов и гальванической развязки между электрическими цепями обеспечить оптимальный уровень защиты от коррозии подземных трубопроводов промышленных площадок. При этом обеспечивается минимизация потребляемой станциями катодной защиты электроэнергии и повышение срока службы анодных заземлителей (в отдельных случаях на порядок и более), снижается опасность выхода из строя преобразователей защиты и создается необходимый резерв запаса преобразователей по току и мощности.

2. Применение при проектировании новых и реконструируемых трубопроводов разработанного и научно-обоснованного технического решения, представленного устройством, служащим для гальванической развязки электрических цепей анодных и защитных заземлений, позволяет исключить негативное влияние защитных заземлений и обеспечить требуемую величину защитного потенциала на трубопроводах. Тип и количество полупроводниковых диодов в устройстве выбирают в соответствии с разработанной методикой в зависимости от величины и условий натекания тока, материала электродов заземлений и других параметров.

Методология и методы исследования. При выполнении диссертационного исследования применялся комплексный подход, включающий научный анализ, планирование и проведение экспериментальных исследований, измерение, сравнение, абстрагирование, индукцию, методы статистической обработки результатов измерений.

Степень достоверности и апробация результатов. Основные научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в работе, базируются на экспериментальных данных, полученных с применением современных методов исследований, имитационного моделирования с использованием современной измерительной техники, научно-исследовательского оборудования и компьютерного обеспечения.

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на VIII научно-практической конференции молодых работников ООО «Газпром трансгаз Ухта» (г. Ухта, 05-09 декабря 2016 г.), международной конференции «Рассохинские чтения» (г. Ухта, 2017-2018 гг.), конференции «Трубопроводный транспорт. Теория и практика - 2017» (г. Москва, 7-8 февраля 2017 г.), Международной научно-практической конференции обучающихся, аспирантов и ученых «Опыт, актуальные проблемы и перспективы развития нефтегазового комплекса» (г. Нижневартовск, 20 апреля 2017 г.), XVIII международной молодежной научной конференции «СЕВЕРГЕОЭКОТЕХ-2017» (г. Ухта, 12-14 апреля 2017 г.), XII международной учебно-научно-практической конференции «Трубопроводный транспорт – 2017» (г. Уфа, 24-25 мая 2017 г.), IV научно-практической конференции молодых специалистов АО «Гипрогазцентр» (г. Нижний

Новгород, 22-23 августа 2017 г.), видеосовещании ООО «Газпром трансгаз Ухта» и АО «Гипрогазцентр» «Вопросы повышения эффективности противокоррозионной защиты объектов ПАО «Газпром» (г. Ухта, 30 августа 2017 г.), XII Всероссийской конференции молодых ученых, специалистов и студентов «Новые технологии в газовой промышленности» (г. Москва, 24-27 октября 2017 г.), X научно-практической конференции молодых специалистов ОМК им. С. З. Афонина (27-29 ноября 2017 г.), VII научно-практической конференции молодых работников Сосногорского ЛПУМГ филиала ООО «Газпром трансгаз Ухта» (29 ноября - 1 декабря 2017 г.), VII научно-практической конференции молодых работников Инженерно-технического центра филиала ООО «Газпром трансгаз Ухта» (5-8 декабря 2017 г.), Международной конференции «Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса» (г. Москва, 12-14 февраля 2018 г.), межрегиональных вебинарах «Актуальные вопросы нефтегазотранспортной отрасли (г. Ухта, 2016-2018 гг.).

Результаты диссертационного исследования внедрены в учебный процесс обучающихся по направлениям подготовки 21.03.01 и 21.04.01 Нефтегазовое дело в рамках дисциплин «Электрохимические методы защиты» и «Пусконаладочные работы при сооружении систем ЭХЗ».

Разработанный алгоритм выбора мероприятий по повышению эффективности защиты от коррозии подземных трубопроводов в условиях экранирования катодного тока защитными заземлениями электрооборудования на стадиях проектирования, проведения пусконаладочных работ и эксплуатации систем ЭХЗ промышленных площадок был использован при проектировании компрессорной станции «Дивенская» в рамках проекта «Развитие газотранспортных мощностей ЕСГ Северо-Западного региона, участок «Грязовец - КС Славянская».

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

Доказано, что одной из причин снижения эффективности ЭХЗ трубопроводов промышленных площадок, проявляющейся в несоответствии значений потенциала «труба – земля» установленным требованиям, является экранирование токов катодной защиты контурами защитных заземлений.

Получены уравнения для расчета внешнего электрического поля, действующего на участок трубопровода, подключенный к произвольному количеству станций катодной защиты и имеющий электрический контакт с произвольным количеством защитных заземлений электроустановок.

Установлена зависимость величины КЭТКЗ от материала и расположения защитного заземления относительно защищаемого сооружения и анодного заземления, а также угловой пространственной ориентации защитного заземления относительно защищаемого сооружения и анодного заземления.

Проведена систематизация основных направлений по минимизации негативного влияния на распределение параметров ЭХЗ трубопроводов, работающих в условиях взаимовлияния с контурами защитных заземлений промышленных площадок.

Практическая значимость работы определяется тем, что:

Разработано программное обеспечение «PPE Modeller», позволяющее производить расчет распределения силы тока в трубопроводе и разности потенциалов между трубопроводом и грунтом при наличии подключенных к

трубопроводу станций катодной защиты и электрического контакта между трубопроводом и защитными заземлениями электроустановок.

Разработана конструкция устройства для разделения контуров катодной защиты и контуров защитных заземлений, позволяющего обеспечить уменьшение величины катодного тока, натекающего на защитные заземления.

Приведены результаты испытаний разработанного устройства, свидетельствующие о повышении абсолютной величины защитного потенциала на трубопроводах промышленных площадок при установке устройства в разрыв цепи защитного заземления.

Представлены результаты внедрения на стадии проектирования системы ЭХЗ трубопроводов КС «Дивенская» разработанного алгоритма выбора мероприятий, позволяющих обеспечить требуемые параметры противокоррозионной защиты трубопроводов.

Сведения о публикациях автора: по теме диссертации опубликовано 13 печатных работ, из них 6 - в ведущих рецензируемых изданиях, включенных в перечень ВАК Минобрнауки РФ.

Структура и объем работы: диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, содержит 167 страниц с учетом приложений. Текст включает 55 рисунков, 34 таблиц, список литературы из 104 наименований.

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач исследования, изучении отечественных и зарубежных достижений в соответствующей области науки, проведении теоретических и экспериментальных исследований, анализе полученных результатов, их апробации, подготовке публикаций по выполненной работе.

Содержание работы

Во введении охарактеризовано состояние вопроса в мировой практике по выбранной теме исследований, освещены проблемы эффективной противокоррозионной защиты трубопроводов, обозначены направление и актуальность исследований.

В первой главе «Анализ средств и методов обеспечения эффективности защиты от коррозии трубопроводов на территории промышленных площадок» показано, что при наличии сложноразветвленной системы подземных металлических коммуникаций, контуров защитных заземлений и заземлений молниезащиты могут наблюдаться непроектные смещения защитного потенциала трубопроводов в положительную или отрицательную область.

Для обеспечения полноты защиты трубопроводов от коррозии на практике реализуют различные мероприятия (или их комплекс) (рис.1).

Защитное заземление выполняется преднамеренным электрическим соединением металлических не токоведущих частей электроустановок с «землей» или её эквивалентом. В качестве основных заземляющих устройств используются естественные или искусственные заземлители. Для заземления электроустановок различных назначений и различных напряжений, территориально приближенных друг к другу, используются общие заземляющие контуры.

Учитывая разветвленность трубопроводных систем площадных объектов, а также большое количество электрооборудования, подлежащего заземлению, совокупность элементов представляет собой сложное сооружение, в котором

внешние электроды (заземлители, свайный фундамент, стальная арматура и пр.) зачастую являются катодными элементами рассматриваемой системы.

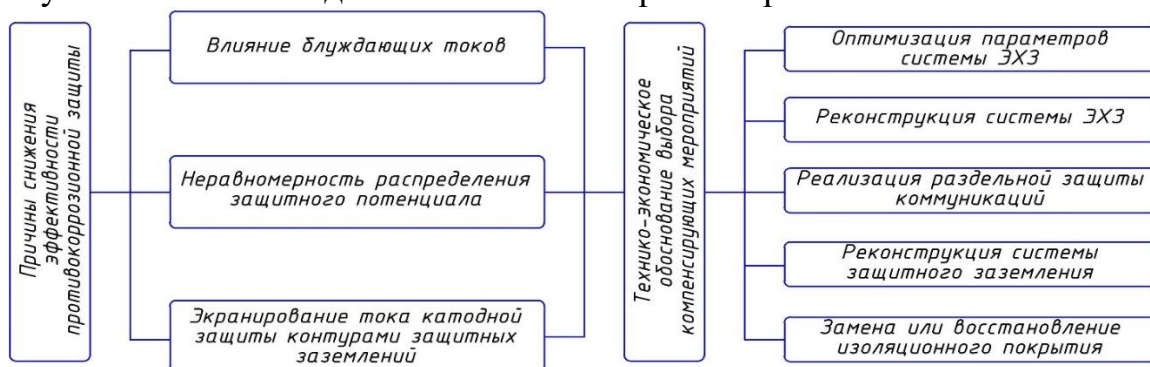


Рисунок 1 –Классификация причин снижения эффективности ЭХЗ трубопроводов и способов их ликвидации

Эффект экранирования тока катодной защиты контурами защитных заземлений, вызывающий увеличение потребления электроэнергии установками катодной защиты и сокращение ресурса анодных заземлителей, поясняется рисунком 2.

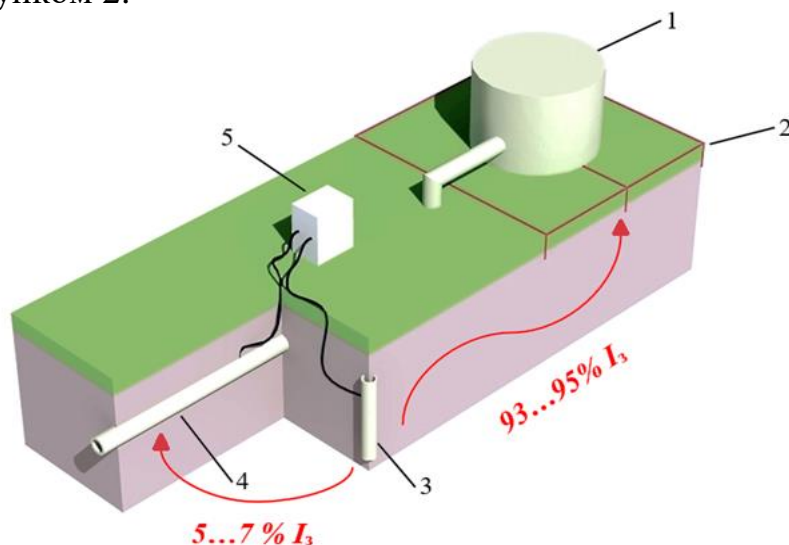


Рисунок 2 – Схема распространения катодного тока при наличии защитных заземлений электроустановок

В штатном режиме функционирования станции катодной защиты 5 катодный ток I_z в полном объеме расходуется на защиту трубопровода 4 от коррозии. Однако при наличии гальванической связи между катоднозащищаемым трубопроводом и заземляемым оборудованием (в данном случае, резервуаром 1), большая часть катодного тока натекает на контур защитного заземления 2, который выражается в появлении незащищенных зон трубопровода и, как следствие, нерациональном расходе электроэнергии и уносе материала анодного заземления 3.

Примером такого негативного влияния могут служить результаты электрометрических обследований трубопроводов на территории компрессорных станциях «Писаревская», «Усинская» и «Чикшинская», при которых была выявлена недозащита на отдельных участках, что потребовало установки дополнительных анодов и точек дренажа.

В ряде работ отмечено, что данная проблема носит систематический характер как в российской, так и зарубежной практике при вводе в эксплуатацию компрессорных, газораспределительных и нефтеперекачивающих станций.

Анализ методов повышения эффективности защиты от коррозии трубопроводов на территории промышленных площадок, позволил разработать классификацию, изображенную на рис. 3.

Радикальным способом устранения негативного влияния защитных заземлений является применение устройств, предназначенных для гальванического разделения контуров катодной защиты и защитных заземлений. Такие устройства могут быть выполнены на поляризационных ячейках, полупроводниковых элементах, например, диодах или варисторах. Однако существующие разработки имеют ряд недостатков, наличие которых позволяет сделать вывод о необходимости совершенствования таких устройств.

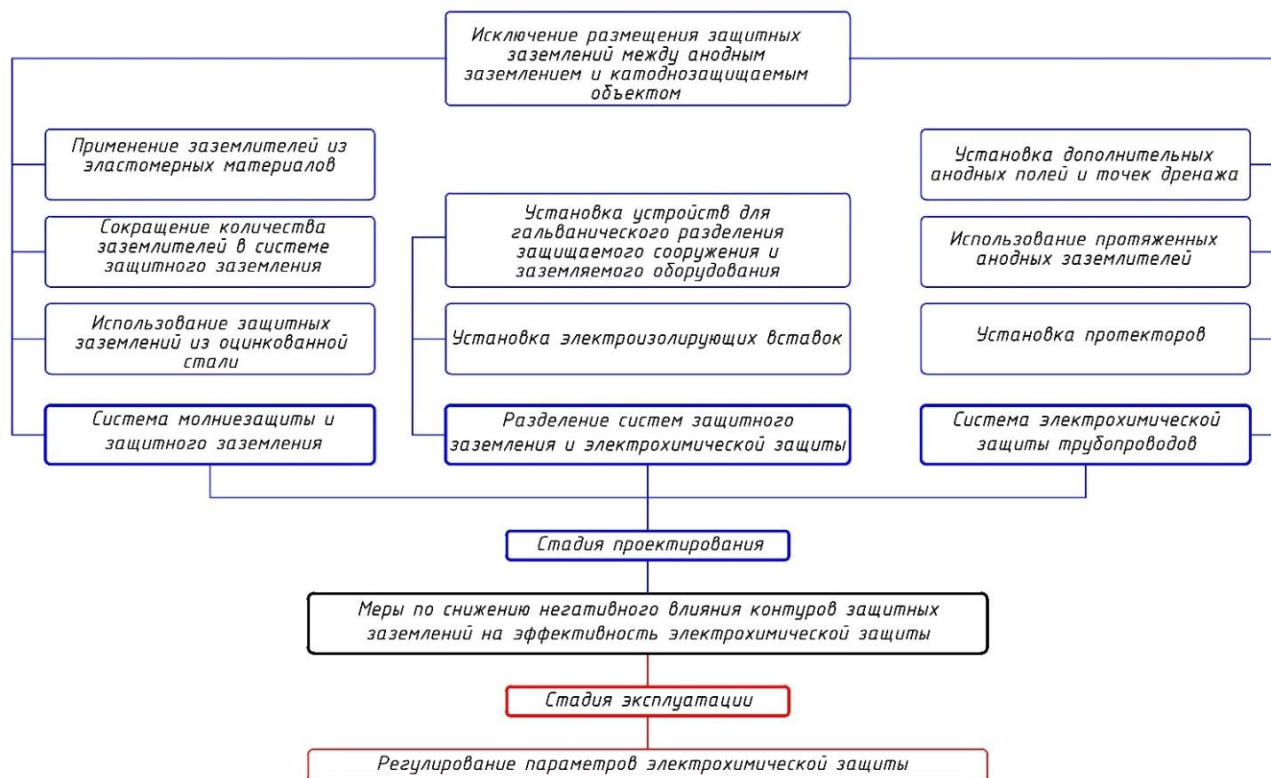


Рисунок 3 – Классификация мероприятий, направленных на снижение экранирования токов катодной защиты контурами защитных заземлений

Таким образом, для выработки единых системных подходов при проектировании и эксплуатации средств электрохимической защиты трубопроводов в условиях промышленных площадок необходимо совершенствование принципов проектирования средств электрохимической защиты трубопроводов, а также разработка методики проведения пуска, опробования и оптимизации работы установок катодной защиты трубопроводов с учетом влияния контуров защитных заземлений.

Во второй главе «Математическое моделирование электрического поля катодной защиты при взаимном влиянии анодных и защитных заземлений на территории промышленной площадки» решена задача определения проекции вектора напряженности внешнего электрического поля на ось элементарного участка трубопровода $E(l)$. Точечными источниками внешнего электрического поля являются анодные заземления установок катодной защиты и защитные заземления электроустановок, имеющих электрический контакт с

трубопроводом. Изменение разности потенциалов между трубопроводом и грунтом на элементарном участке длиной dl определяется как:

$$\frac{dU(I)}{dl} + Z(I)I(I) = E(I), \quad (1)$$

где $\frac{dU(I)}{dl}$ - разность потенциалов «труба – земля» на элементарном участке длиной dl , В; $Z(I)$ - продольное сопротивление на единицу длины трубопровода, Ом/м; $I(I)$ - сила тока, протекающего по трубопроводу, А; $E(I)$ - проекция вектора напряженности внешнего электрического поля на ось l , В/м.

Изменение силы тока на элементарном участке длиной dl за счет омической утечки тока через изоляцию пропорционально разности потенциалов между трубопроводом и грунтом:

$$\frac{dI(I)}{dl} = -Y(I)U(I), \quad (2)$$

где $Y(I)$ – проводимость изоляции на единицу длины трубопровода, См/м.

Потенциалы $U_{cp}(l)$, В и $U_{cp}(l + dl)$, В, создаваемые источником тока соответственно в начале и конце рассматриваемого элементарного участка трубопровода, определяются следующими соотношениями

$$U_{rp}(l) = I_0 \frac{\rho_{rp}}{2\pi r_1}, \quad U_{rp}(l + dl) = I_0 \frac{\rho_{rp}}{2\pi r_2} \quad (3)$$

Проекция $E(l)$ вектора напряженности электрического поля нескольких источников тока на ось l определяется с учетом (3)

$$E(I) = \frac{1}{dl} \frac{\rho_{rp}}{2\pi} \sum_{p=1}^m I_{0p} \left(\frac{1}{r_{1p}} - \frac{1}{r_{2p}} \right). \quad (4)$$

где p – номер источника тока, $p = 1, 2, \dots, m$; m – количество источников тока, ед.; I_{0p} – сила тока, протекающего через источник с индексом p , А; r_{1p} и r_{2p} – расстояния от источника с индексом p до соответственно начала и конца рассматриваемого элементарного участка трубопровода, м.

Рассмотрен участок трубопровода, разделенный на n элементарных участков (рисунок 4). Точки, расположенные на границах элементарных участков, названы узловыми точками (узлами) i , $i = 0, 1, \dots, n$, соответственно последний элементарный участок имеет индекс $i = n - 1$. Автором введены следующие обозначения: h_i – длина i -го элементарного участка, м; l_i – линейная координата i -й точки, м; I_i – сила тока трубопроводе в i -й точке, А; U_i – разность потенциалов между трубопроводом и грунтом в середине i -го участка, В; Z_i , Y_i , E_i – соответственно, продольное сопротивление трубопровода единичной длины, проводимость изоляционного покрытия на единицу длины, проекция вектора напряженности внешнего электрического поля на ось l на элементарном участке с координатами от $l_i - h_{i-1} / 2$ до $l_i + h_i / 2$ (при $i = 1, 2, \dots, n - 1$).

Конечно-разностные аналоги уравнений (1) и (2) для узла с индексом i , лежащим в диапазоне от 1 до $n - 1$, могут быть записаны в следующем виде:

$$2 \frac{U_i - U_{i-1}}{h_i + h_{i-1}} + Z_i I_i = E_i; \quad \frac{I_{i+1} - I_i}{h_i} = -Y_i U_i \quad (5)$$

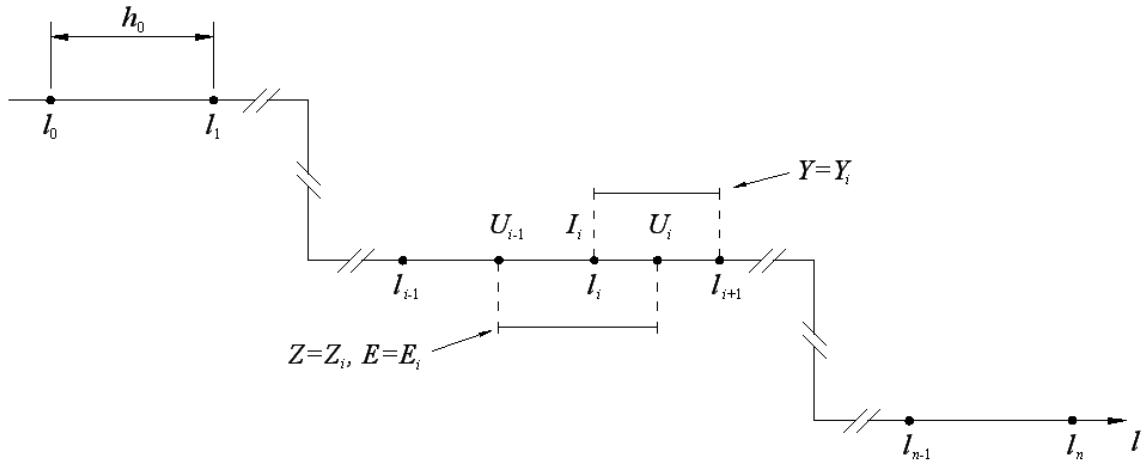


Рисунок 4 – Элементарные участки и узловые точки

Выразив величины U_i и U_{i-1} через I_i , I_{i-1} и I_{i+1} на основании (5), получено:

$$U_i = -\frac{I_{i+1} - I_i}{h_i Y_i}; \quad U_{i-1} = -\frac{I_i - I_{i-1}}{h_{i-1} Y_{i-1}} \quad (6)$$

С учетом 5 и 6 получено следующее уравнение

$$\frac{2}{h_i + h_{i-1}} \left(\frac{I_i - I_{i-1}}{h_{i-1} Y_{i-1}} - \frac{I_{i+1} - I_i}{h_i Y_i} \right) + Z_i I_i = E_i. \quad (7)$$

Пусть на элементарный участок с индексом j подводится электрический ток I_{0j} (такая ситуация имеет место для элементарных участков, подключенных к станции катодной защиты). Для элементарного участка с индексом j уравнение (5) принимает следующий вид:

$$\frac{I_{j+1} - I_j}{h_j} = -Y_j U_j + \frac{I_{0j}}{h_j}. \quad (8)$$

Тогда для узлов с индексами j и $j + 1$ можно записать:

$$\frac{2}{h_j + h_{j-1}} \left(\frac{I_j - I_{j-1}}{h_{j-1} Y_{j-1}} - \frac{I_{j+1} - I_j}{h_j Y_j} \right) + Z_j I_j = E_j - \frac{2}{h_j + h_{j-1}} \frac{I_{0j}}{h_j Y_j}, \quad (9)$$

$$\frac{2}{h_{j+1} + h_j} \left(\frac{I_{j+1} - I_j}{h_j Y_j} - \frac{I_{j+2} - I_{j+1}}{h_{j+1} Y_{j+1}} \right) + Z_{j+1} I_{j+1} = E_{j+1} + \frac{2}{h_{j+1} + h_j} \frac{I_{0j}}{h_j Y_j}. \quad (10)$$

Величина I_{0j} считается известной (эта величина представляет собой силу тока станции катодной защиты).

Элементарный участок с индексом k имеет электрическое соединение с защитным заземлением. Поэтому изменение силы тока на k -ом участке происходит также за счет утечки тока через защитное заземление.

Величину U_k можно выразить через I_k и I_{k+1} :

$$U_k = -\frac{I_{k+1} - I_k}{h_k Y_k + R_{0k}^{-1}}. \quad (11)$$

Сила тока I_{0k} , протекающего через защитное заземление, определяется следующим образом:

$$I_{0k} = \frac{U_k}{R_{0k}}. \quad (12)$$

Значения силы тока в узлах могут быть определены путем решения системы линейных уравнений, представленной в матричном виде:

$$AI=B, \quad (13)$$

где A – матрица коэффициентов (размерность $n + 1 \times n + 1$); B – вектор правой части (размерность $n + 1$); I – вектор неизвестных значений силы тока в узлах (размерность $n + 1$).

$$A = \begin{pmatrix} a_{00} & a_{01} & \dots & a_{0n} \\ a_{10} & a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n0} & a_{n1} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \dots \\ b_n \end{pmatrix}, \quad I = \begin{pmatrix} I_0 \\ I_1 \\ \dots \\ I_n \end{pmatrix}. \quad (14)$$

Коэффициенты a_{ij} и b_i определяются в соответствии с уравнениями (7, 9, 10, 11, 12). При известных значениях силы тока в узлах значения разности потенциалов между трубопроводом и грунтом в середине элементарных участков определяются в соответствии с уравнениями вида (6).

Предложенная математическая модель позволяет производить расчет распределения силы тока в трубопроводе и разности потенциалов между трубопроводом и грунтом при наличии подключенных к трубопроводу станций катодной защиты и электрического контакта между трубопроводом и защитными заземлениями электроустановок. Исходными данными для расчетов служат электрические параметры трубопровода, координаты расположения трубопровода, анодных заземлений, защитных заземлений электроустановок, точек дренажа и подключения защитных заземлений, сила тока станций катодной защиты, сопротивления растеканию защитных заземлений, удельное сопротивление грунта.

Для реализации представленной модели разработано программное обеспечение (ПО) «PPEModeller» (рисунок 5).

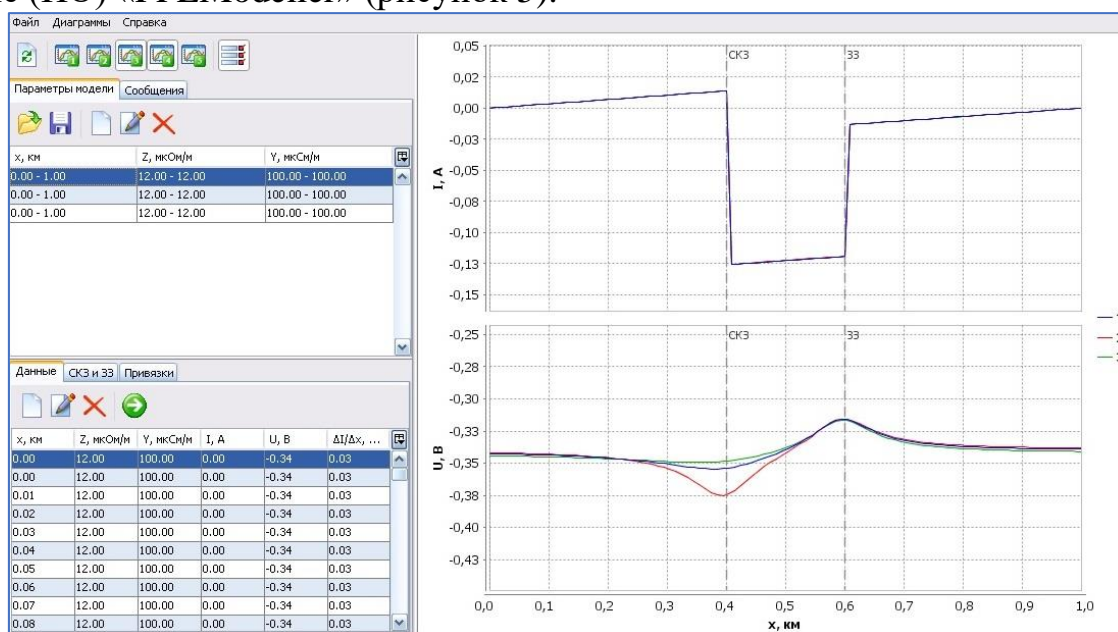


Рисунок 5 – Главное окно программного обеспечения для моделирования эффекта экранирования тока катодной защиты контурами защитных заземлений

При помощи ПО рассмотрены пример расчета влияния защитного заземления на распределения вдоль трубопровода силы тока катодной защиты и разности потенциалов между трубопроводом и грунтом. Для участка трубопровода с наружным диаметром 530 мм и толщиной стенки 8 мм подключение защитного

заземления с сопротивлением растеканию 3 Ом приводит к снижению абсолютного значения разности потенциалов между трубопроводом и грунтом на 0,26 В. Для возвращения разности потенциалов к прежнему уровню необходимо увеличить силу тока станции катодной защиты более чем в 4 раза (с 0,034 А до 0,14 А). Так, при уменьшении расстояния между защитным заземлением и трубопроводом с 50 м до 10 м значения разности потенциалов между трубопроводом и грунтом вдали от точки подключения защитного заземления увеличиваются по абсолютной величине на 0,12 В, а при увеличении сопротивления растеканию тока защитного заземления с 3 Ом до 10 Ом разность потенциалов между трубопроводом и грунтом при неизменной силе тока станции катодной защиты увеличивается по абсолютной величине на 0,37 В.

В третьей главе «Лабораторные исследования влияния защитных заземлений электроустановок на эффективность электрохимической защиты подземных трубопроводов промышленных площадок» разработан экспериментальный стенд в виде емкости (50 см × 50 см), заполненной увлажненным песчаным грунтом (рис. 6). В емкость помещался предварительно изолированный полимерной лентой участок трубопровода ($L=480$ мм; $D_n=22$ мм; $\delta = 2,7$ мм). Имитация катодной защиты осуществлялась путем подключения к трубопроводу источника питания постоянного тока (Б5-49) и анодного заземления, представляющего собой стальную пластину $S_{A3}=38,4$ см². Расстояние между трубопроводом и анодным заземлением 400 мм. В качестве имитаторов защитных заземлений использовались образцы из цинка, меди и алюминия, площадь поверхности каждого из которых составляет $S_{зз}=12,8$ см².

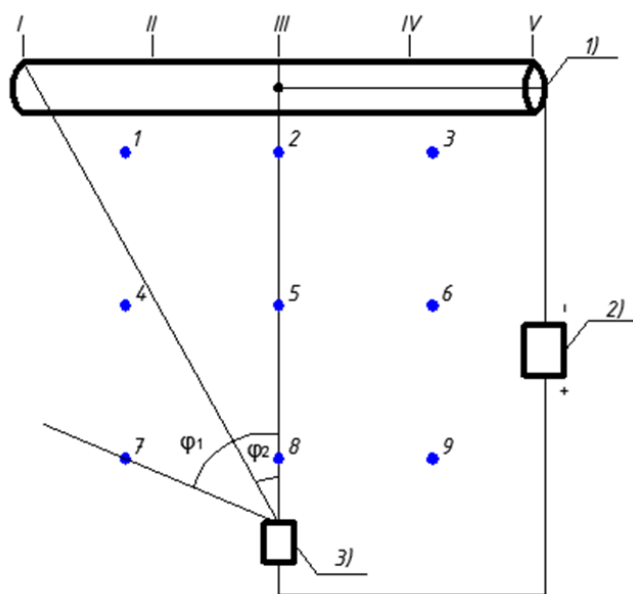


Рисунок 6 - Схема экспериментального стенда: 1) модель участка трубопровода; 2) источник постоянного тока; 3) анодное заземление. Точки 1–9 — места установки защитных заземлений. Точки I–IV — места установки хлорсеребряного электрода сравнения

Экспериментальные работы проводились в три этапа.

На первом этапе проведено исследование распределения разности потенциалов «труба-земля» путем перемещения хлорсеребряного электрода сравнения последовательно по точкам I, II, III, IV, V, расположенным вдоль рассматриваемого участка трубопровода на расстоянии 80 мм друг от друга: точка I: $\Delta U_{T-3}=-1,562$ В; точка II: $\Delta U_{T-3}=-1,563$ В; точка III: $\Delta U_{T-3}=-1,564$ В; точка IV: $\Delta U_{T-3}=-1,555$ В; точка V: $\Delta U_{T-3}=-1,553$ В.

На втором этапе проводилось исследование влияния наличия имитатора защитного заземления (цинкового, алюминиевого или магниевое), последовательно располагаемого по точкам 1...9 на участке между трубопроводом и анодным заземлением, на величину потенциала «труба-земля» в пяти точках, расположенных вдоль рассматриваемого участка модели трубопровода. 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 «труба-земля» оказывают заземления, расположенные вблизи подземного трубопровода. Соответственно, чем ближе защитное заземление к анодному заземлению, тем менее выражено экранирующее влияние. Кроме того, установлено, что наличие защитных заземлений, выполненных из меди, значительно смещают потенциал «труба-земля» в положительную область, что приводит к несоответствию уровня защищенности требованиям ГОСТ Р 51164-98.

С целью оценки негативного влияния защитных заземлений электроустановок на уровень защищенности подземных трубопроводов от коррозии введено понятие, отражающее степень влияния защитных заземлений и заземлений молниезащиты на эффективность катодной защиты подземных трубопроводов — коэффициент экранирования тока катодной защиты (КЭТКЗ). Последовательность расчета КЭТКЗ:

1. Измерение естественного потенциала сооружения U_e , В.
2. Измерение разности потенциалов «труба – земля» при отсутствии в зоне действия катодной защиты экранирующих элементов $U_{T-З}$, В.
3. Измерение разности потенциалов «труба – земля» при наличии в зоне действия катодной защиты экранирующих элементов $U_{T-З}^{33}$, В.
4. Определение разности значений потенциалов «труба – земля» при отсутствии и при наличии защитных заземлений:

$$\Delta U = U_{T-З} - U_{T-З}^{33}, \text{ В.} \quad (15)$$

5. Определение наложенного потенциала «труба – земля» при отсутствии защитных заземлений:

$$U^0 = U_{T-З} - U_e, \text{ В.} \quad (16)$$

6. Определение КЭТКЗ:

$$K_{э} = \frac{|\Delta U|}{U^0}. \quad (17)$$

Для оценки величины КЭТКЗ необходимо руководствоваться величиной допустимой разности значений потенциалов «труба – земля» при отсутствии и при наличии защитных заземлений, исходя из требований ГОСТ Р 51164-98:

$$\Delta U_{\text{доп}} = U_{T-З} - U_{T-З}^{\text{min}}, \quad (18)$$

где $\Delta U_{T-З}$ – разность потенциалов «труба – земля» при отсутствии в зоне действия катодной защиты экранирующих элементов, В;

$U_{T-З}^{\text{min}}$ – минимальный защитный потенциал в соответствии с требованиями ГОСТ Р 51164-98, В.

Тогда, условие допустимости такой величины экранирования:

$$\frac{\Delta U_{\text{доп}}}{U^0} \geq K_{\text{э}}. \quad (19)$$

Для определения зависимости величины КЭТКЗ от степени удаленности защитного заземления от трубопровода и анодного заземления найдем величину $\Delta\varphi$ — разность углов φ_1 и φ_2 , определяющую угловую пространственную ориентацию точек установки защитных заземлений на стенде (см. рис. 6).

Графически зависимость КЭТКЗ от угловой пространственной ориентации защитного заземления представлена на рисунке 7, где красной горизонтальной линией отмечена область допустимых значений КЭТКЗ исходя из условия (19).

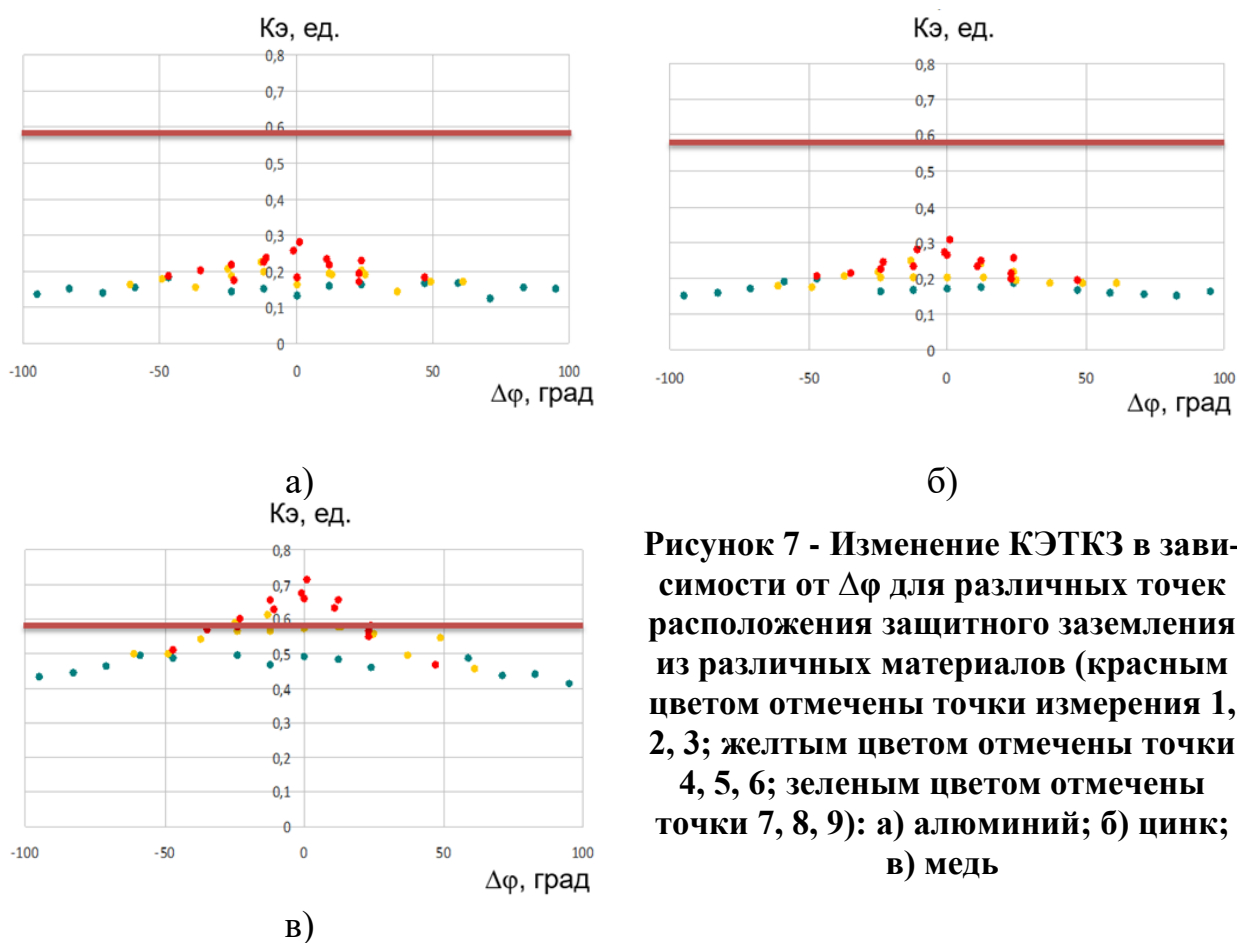


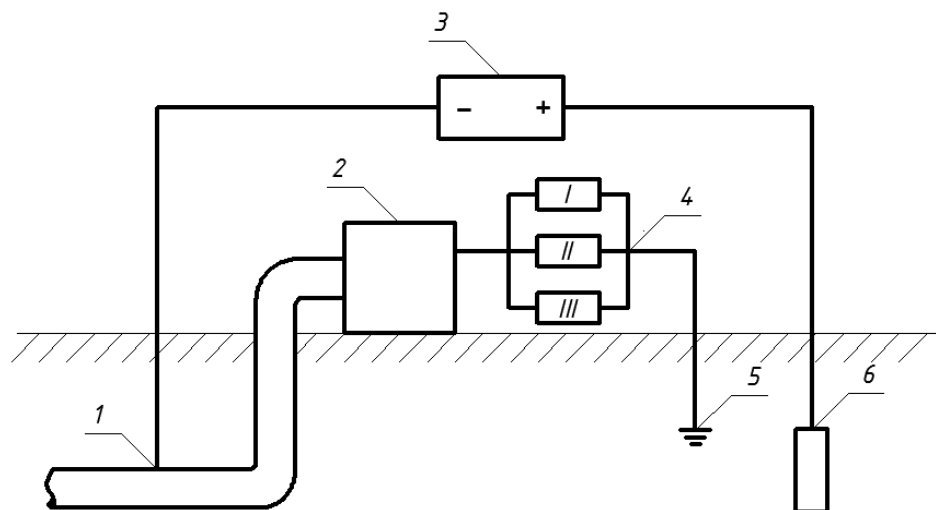
Рисунок 7 - Изменение КЭТКЗ в зависимости от $\Delta\varphi$ для различных точек расположения защитного заземления из различных материалов (красным цветом отмечены точки измерения 1, 2, 3; желтым цветом отмечены точки 4, 5, 6; зеленым цветом отмечены точки 7, 8, 9): а) алюминий; б) цинк; в) медь

На третьем этапе экспериментального исследования были проведены измерения силы тока, натекающего на защитные заземления от системы катодной защиты трубопровода. Установлено, что с увеличением расстояния между защищаемым трубопроводом и защитным заземлением увеличивается сила тока, натекающего на защитное заземление, что обуславливает нерациональное потребление электроэнергии и повышенный расход металла анодных заземлений.

В результате совместного анализа данных обнаружена корреляционная связь между максимальными значениями КЭТКЗ и соответствующими им значениями силы тока, что требует учета при разработке и реализации технических мероприятий, направленных на исключение негативного влияния контуров защитных заземлений энергоиспользующих установок на защиту от коррозии трубопроводов промышленных площадок.

В четвертой главе «Разработка, изготовление и испытание опытного образца устройства для гальванического разделения систем защитного заземления и катоднозащищаемых объектов на территории промышленных площадок» сформулированы основные требования, которым должно соответствовать разрабатываемое устройство, включая технические параметры, требования к конструктивным элементам и материалам, используемым при изготовлении устройства, требования безопасности при эксплуатации.

Схема подключения устройства в цепь защитного заземления показана на рисунке 8.



1 – катоднозащищаемое сооружение (трубопровод), 2 - оборудование, подлежащим заземлению; 3 – станция катодной защиты; 4 – разработанное устройство для разделения контуров катодной защиты и контуров защитных заземлений и молниезащиты; 5 – защитное заземление; 6 - анод

Рисунок 8 – Схема подключения устройства в цепь защитного заземления

Устройство состоит из трех блоков (на рис. 8 показаны римскими цифрами):

Блок I. Блок силовых диодов, включенных встречно-параллельно, обеспечивающий требуемое падение напряжения между защищаемым сооружением и защитным заземлением (порядка 1-5 Вольт). Если на сооружении появляется напряжение переменного или постоянного тока свыше 1-5 Вольт, ток, протекающий через диоды и через защитное заземление, резко возрастает, что не допускает появления опасного для жизни и здоровья персонала напряжения на защищаемом сооружении. Применение диодов, позволило обеспечить требуемые характеристик, в т.ч. пропускать через устройство переменный или пульсирующий ток, а также постоянный ток произвольной полярности, а также изменять падение напряжения на устройстве путем изменения количества включенных последовательно диодов. В зависимости от материала защитного заземления и близости его расположения к анодному заземлению выбирают требуемое минимальное падение напряжение на устройстве, которое может быть обусловлено типом и количеством диодов, включенных последовательно.

Блок II. Блок варисторов или ограничителей от перенапряжений, срабатывающий при существенной разности потенциалов, способной повредить диоды блока I, например, при ударе молнии.

Блок Ш. Блок индикации, состоящий из светодиодных сигнализаторов, позволяющий оценивать состояние и режим работы устройства.

Для исследования работоспособности разработанного устройства были изготовлены лабораторные и промышленный образцы (рис. 9).

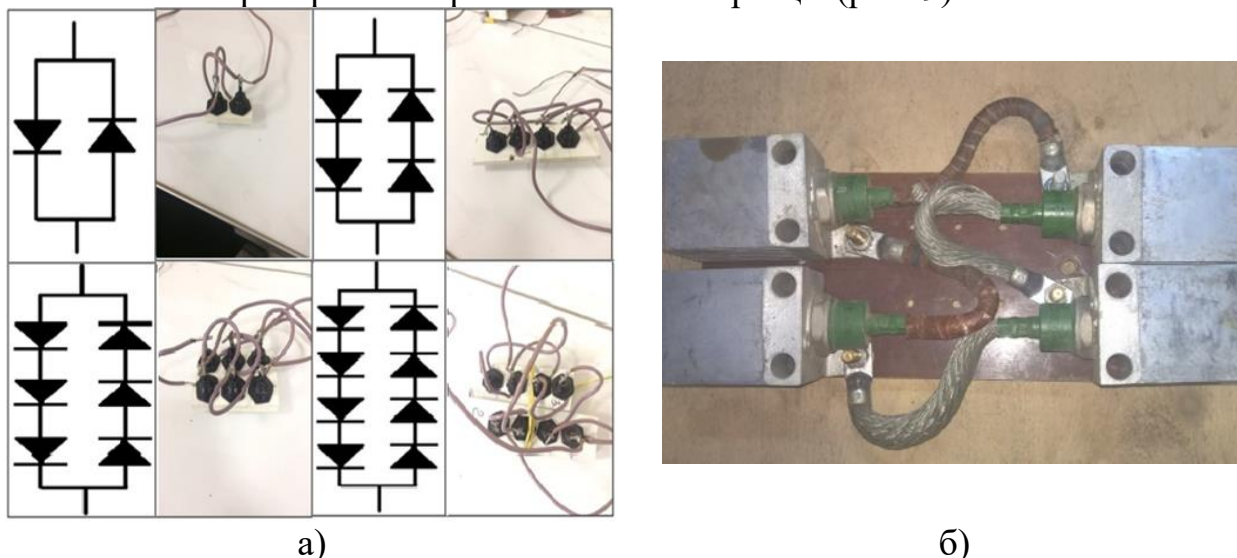


Рисунок 9 – Внешний вид 2-х, 4-х, 6-ти, 8-ми диодных лабораторных а) и промышленного б) образцов устройства

Результаты лабораторных испытаний, выполненных в соответствии с разработанной методикой, позволяют заключить, что путем увеличения числа диодов в диодной сборке устройства можно добиться повышения абсолютного значения потенциала «труба – земля» до нормируемого значения и снизить величину силы тока, натекающего на защитное заземление, имеющее электрическую связь с катоднозащищаемым сооружением. Однако стоит отметить, что разность потенциалов по модулю остается ниже, чем при отсутствии гальванической связи катоднозащищаемого сооружения и защитного заземления (рис. 10).

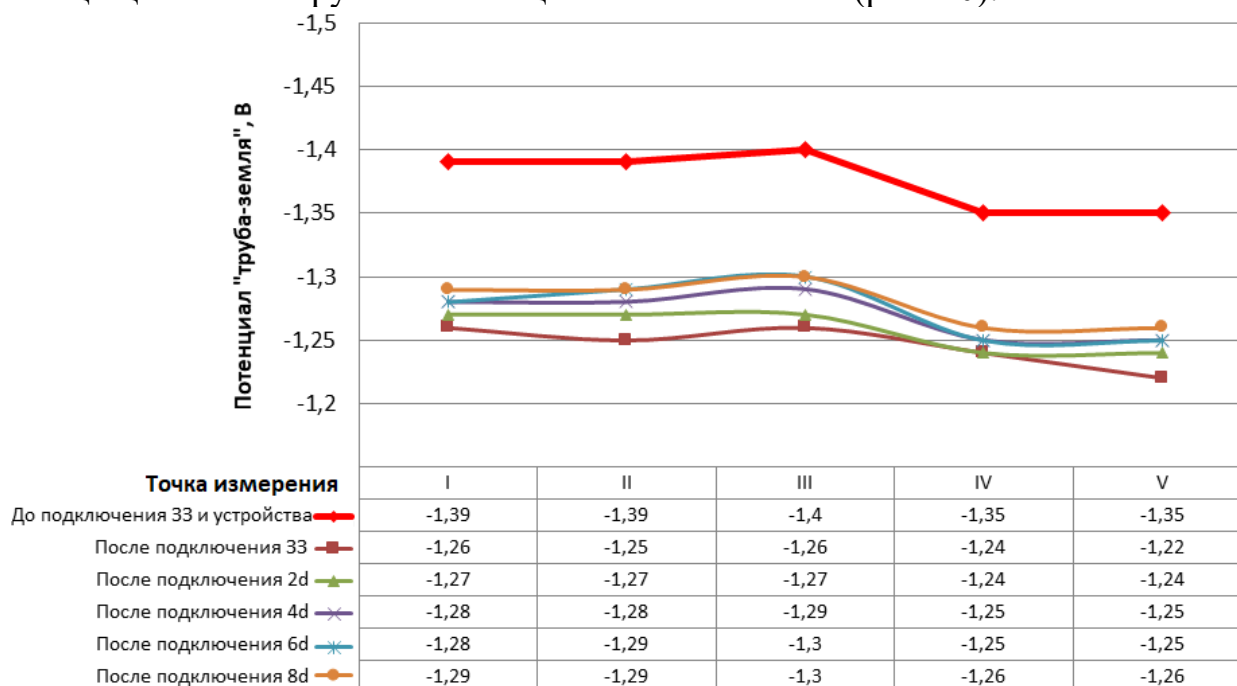


Рисунок 10 – Графики распределения величины потенциала «труба – земля» при установке устройств для гальванической развязки в разрыв цепи защитного заземления, выполненного из оцинкованной стали

Действующими объектами внедрения разработанного устройства стали территория газораспределительной станции Арзамасского ЛПУМГ и площадка кранового узла, входящего в состав линейной части СМГ «Бованенково-Ухта».

При проведении испытания устройства на территории площадки газораспределительной станции установлено, что подключение устройства в разрыв цепи защитного заземления в точках 16 и 17 позволило добиться увеличения абсолютного значения потенциала «труба – земля» на 0,14 В (рис. 11).

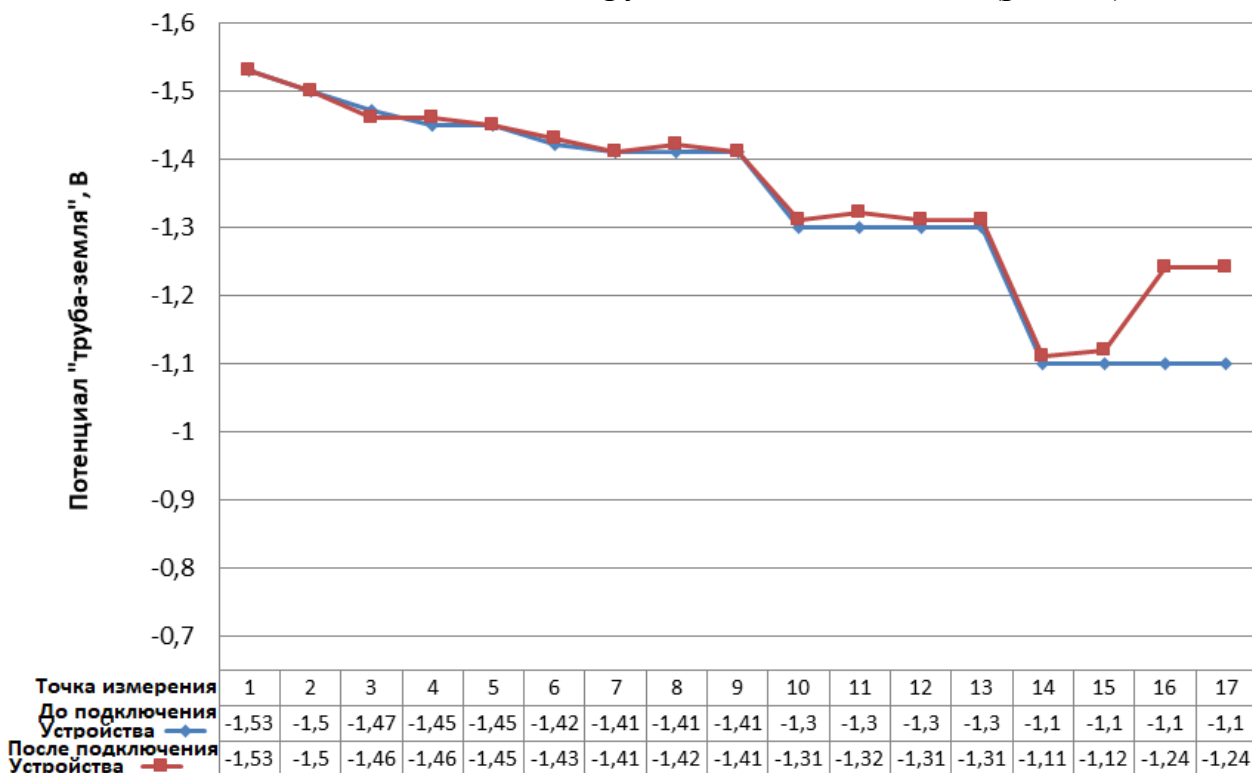
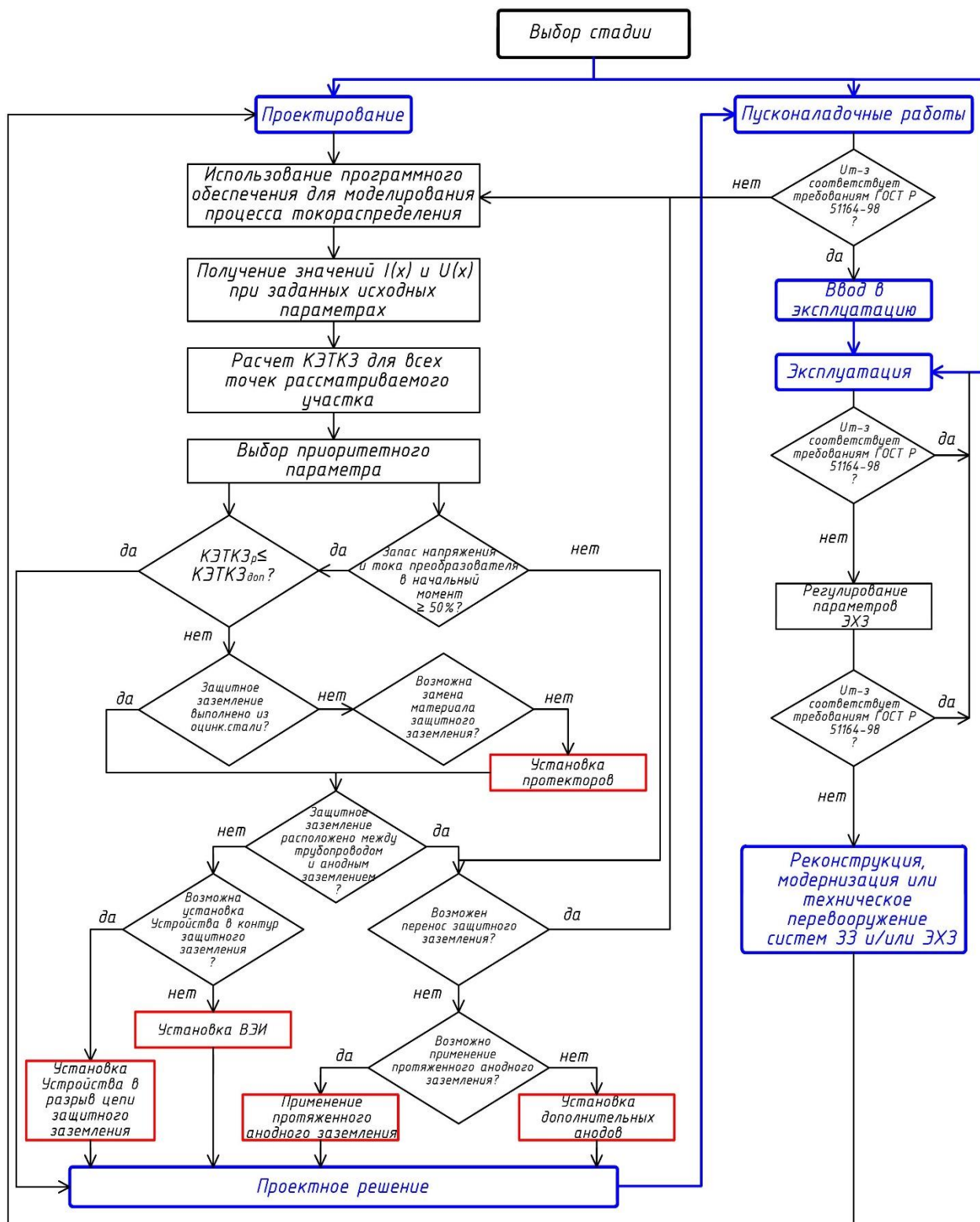


Рисунок 11 – Графики распределения величины потенциала «труба – земля» при отсутствии/наличии устройств для гальванической развязки в разрыве цепи защитного заземления на территории ГРС (точки 16 и 17 соответствует месту установки устройства)

Результаты испытаний устройства на территории кранового узла позволяют сделать вывод, что подключение устройства позволяет добиться нормализации степени защиты от коррозии, при этом сила тока, натекающего на защитное заземление, снижается более чем в 5 раз (с 0,36 А до 0,07 А).

В обоих случаях в результате установки устройства для гальванической развязки в цепь защитного заземления в точке выявленного снижения потенциала «труба – земля» по абсолютной величине зафиксировано уменьшение экранирующего влияния контура защитного заземления, причем при увеличении количества диодов в диодной сборке устройства происходит снижение величины КЭТКЗ.

В пятой главе «Разработка рекомендаций по снижению негативного влияния защитных заземлений электроустановок на эффективность электрохимической защиты трубопроводов промышленных площадок» описаны рекомендации и подходы, разработанные для применения при проектировании, вводе в эксплуатацию и эксплуатации нефтегазопроводов промышленных площадок (рис. 12).



**Рисунок 12 – Алгоритм выбора мероприятия по снижению экранирующего влияния, оказываемого контурами защитного заземления на распространение ка-
тодного тока**

На стадии проектирования системы ЭХЗ трубопроводов промышленных площадок рекомендуется использовать программное обеспечение, позволяющее проводить расчет и визуализацию зависимостей от линейной координаты

силы тока в трубопроводе $I(x)$ и разности потенциалов между трубопроводом и грунтом $U(x)$.

В случае, если результаты расчетов указывают на необходимость решения проблемы негативного влияния контуров защитного заземления на систему ЭХЗ трубопроводов, необходимо выделить наиболее приоритетный параметр, определяющий дальнейший план реализации мероприятий по повышению эффективности ЭХЗ трубопроводов: КЭТКЗ, отражающий эффективность ЭХЗ трубопроводов исходя из величины защитного потенциала в рассматриваемых точках, или сила тока, натекающего на защитное заземление, влияющая на загрузку преобразователей СКЗ по току и мощности.

Определяющим признаком, позволяющим идентифицировать влияние контуров защитного заземления *на стадии эксплуатации*, является наличие падения напряжения в разрыве цепи защитного заземления, которое можно выявить при проведении электрометрического обследования промышленной площадки путем разъединения контура защитного заземления. В случае, если реализация мероприятий по регулированию выходных параметров системы ЭХЗ трубопроводов не позволяет достичь оптимального уровня защищенности от коррозии, необходимо выполнить реконструкцию системы ЭХЗ и/или реконструкцию системы защитного заземления промышленной площадки.

Использование алгоритма выбора мероприятий по снижению экранирующего влияния при проектировании компрессорной станции «Дивенская» в рамках проекта «Развитие газотранспортных мощностей ЕСГ Северо-Западного региона, участок «Грязовец - КС Славянская» позволило выбрать оптимальное с точки зрения повышения эффективности противокоррозионной защиты подземных технологических трубопроводов решение, состоящее в определении координат расположения СКЗ и координат расположения контура защитного заземления и обеспечивающее ограничение экранирования катодного тока системой защитного заземления.

Если в качестве компенсирующего мероприятия на стадии проектирования системы ЭХЗ принято решение об установке устройства для гальванической развязки, то необходим выбор требуемых параметров устройства (рис. 13) в зависимости от:

- типа системы защитного заземления (замкнутый горизонтальный заземлитель, замкнутый горизонтальный заземлитель с подключенными точечными заземляющими электродами, точечные заземляющие электроды);
- материала защитного заземления (черная сталь, оцинкованная сталь, медь);
- типа и количества точечных электродов заземления.

На стадии пусконаладочных работ или на стадии эксплуатации системы ЭХЗ площадных объектов вопрос выбора типа устройств и мест их установки решается на основании результатов электрометрических обследований и измерения величины падения напряжения в разрыве цепи защитного заземления.

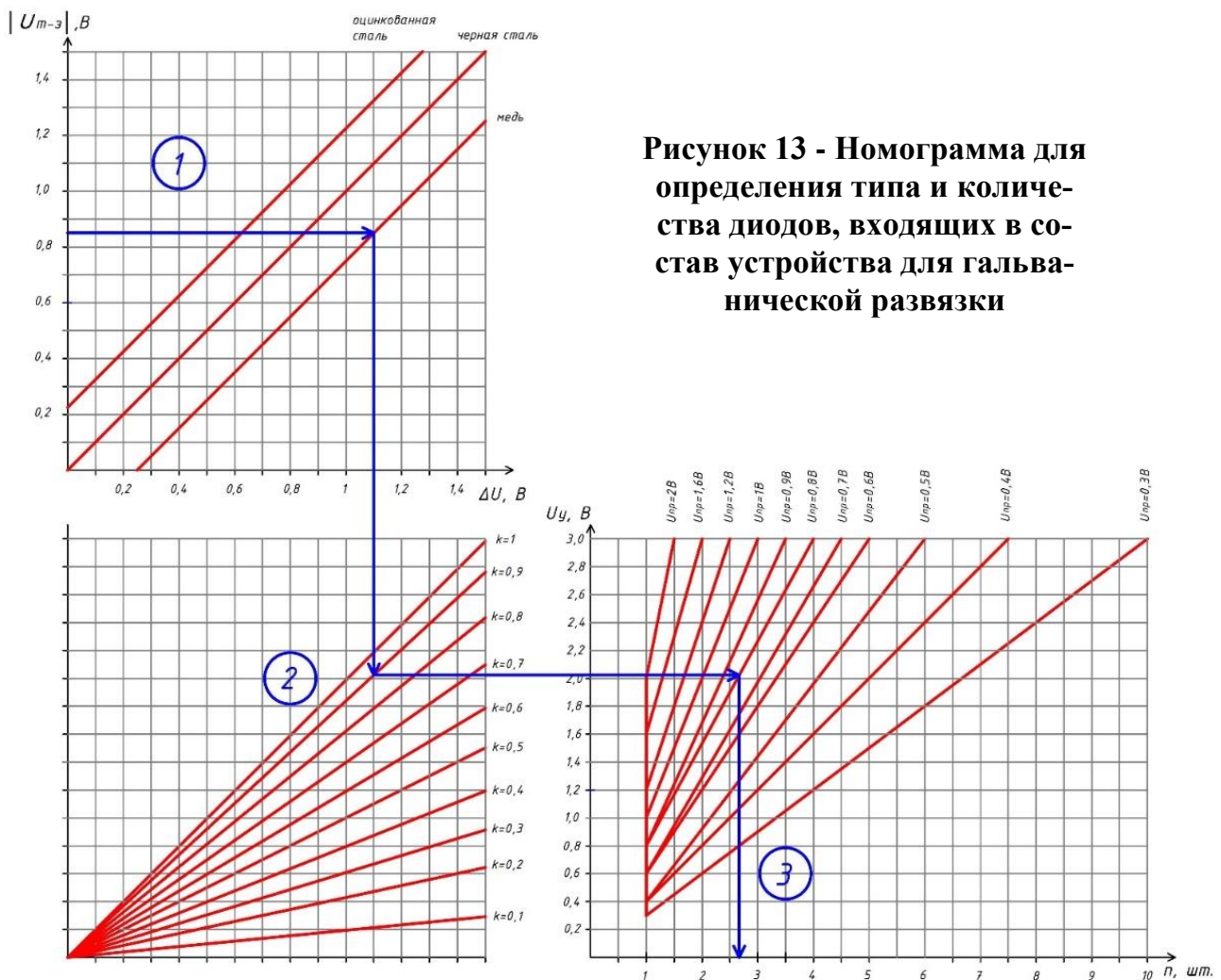


Рисунок 13 - Номограмма для определения типа и количества диодов, входящих в состав устройства для гальванической развязки

Основные выводы:

1. Установлено, что при проведении пусконаладочных работ и эксплуатации средств ЭХЗ трубопроводов промышленных площадок в большинстве случаев наблюдается снижение эффективности противокоррозионной защиты, что связано несоответствием величины защитного потенциала требованиям НТД, что, в свою очередь, приводит к увеличению потребления электроэнергии на электрохимическую защиту, уменьшению срока службы анодных заземлителей, а также повышению риска выхода из строя преобразователей станций катодной защиты и отсутствию запаса преобразователей по току и мощности.

2. На основании результатов математического моделирования получены уравнения для расчета внешнего электрического поля, действующего на участок трубопровода, подключенный к произвольному количеству СКЗ и имеющий электрический контакт с произвольным количеством защитных заземлений. Разработано программное обеспечение, позволяющее производить расчет распределения силы тока в трубопроводе и разности потенциалов между трубопроводом и грунтом с учетом имеющегося гальванического соединения катоднозащищаемого сооружения с контуром защитного заземления.

3. На основании разработанной методики проведено экспериментальное исследование явления экранирования катодного тока точечным заземляющим электродом. Для оценки эффективности ЭХЗ трубопроводов предложен усовершенствованный критерий - коэффициент экранирования тока катодной

защиты (КЭТКЗ) и формула для его определения. В результате анализа полученных экспериментальных данных установлена зависимость КЭТКЗ от материала и координаты расположения защитного заземления относительно катоднозащищаемого сооружения и анодного заземления.

4. Разработана конструкция устройства для разделения контуров защитного заземления и катоднозащищаемых объектов, позволяющего обеспечить уменьшение величины тока, натекающего на защитные заземления. Предложена номограмма для выбора характеристик предлагаемого устройства в зависимости от величины и условий натекания тока, материала электродов заземлений и других параметров.

5. Проведены испытания прототипов устройства для гальванического разделения катоднозащищаемых объектов и контуров защитного заземления в лабораторных условиях и на действующих промышленных площадках газораспределительной станции и кранового узла. Установлено, что путем увеличения числа диодов в диодной сборке устройства можно добиться повышения абсолютного значения потенциала «труба – земля» и снизить величину силы тока, натекающего на защитное заземление, имеющее электрическую связь с катоднозащищаемым сооружением.

6. Разработан алгоритм выбора мероприятий по повышению эффективности защиты от коррозии подземных трубопроводов в условиях экранирования катодного тока защитными заземлениями электрооборудования на стадиях проектирования, проведения пусконаладочных работ и эксплуатации систем ЭХЗ промышленных площадок. Алгоритм выбора мероприятий по снижению экранирующего влияния был использован при проектировании компрессорной станции «Дивенская» в рамках проекта «Развитие газотранспортных мощностей ЕСГ Северо-Западного региона, участок «Грязовец - КС Славянская».

**Основные положения диссертации опубликованы
в следующих работах:**

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ:

1. Агинея Р. В., Исупова Е. В. Исследование влияния защитных заземлений электроустановок на эффективность электрохимической защиты подземных трубопроводов на территории промышленных площадок // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2017. – №3 (61). – С.16-20.

2. 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.

3. Исупова Е. В., Агинея Р. В. Влияние контуров защитных заземлений энергоустановок на показатели эффективности электрохимической защиты нефтегазопроводов от коррозии // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2017. – № 5. – С. 23- 28.

4. Gus'kov S.S., Aginey R.V., Isupova E.V. 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. – 2017. - №12. – P. 54-58.

5. Исупова Е. В., Гуськов С. С., Агинея Р. В. Математическая модель распределения тока катодной защиты подземных трубопроводов при наличии

защитных заземлений в условиях промышленных площадок // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2018. – № 1 (65). – С. 18-22.

6. Исупова Е. В., Агинея Р. В., Воробьев А. Н. Разработка и испытание опытного образца устройства для гальванического разделения систем защитного заземления и катоднозащищаемых объектов на территории промышленных площадок // Газовая промышленность. – 2018. – №2 (764). – С. 20-28.

Статьи в научно-технических сборниках и других изданиях:

7. Исупова Е. В. Совершенствование принципов проектирования систем противокоррозионной защиты трубопроводов на территории промышленных площадок // VIII научно-практическая конференция молодых работников ООО «Газпром трансгаз Ухта» (05-09 декабря 2016 г.) – Ухта : ООО «Газпром трансгаз Ухта», 2016. – С.18.

8. Исупова Е. В. Результаты лабораторных исследований влияния защитных заземлений электроустановок на показатели коррозионной защищенности нефтегазопроводов в условиях промышленных площадок // Международный семинар «Рассохинские чтения» (2-3 февраля 2017 г.) : в 2 ч. ; ч.1. – Ухта : УГТУ, 2017. – С.202-207.

9. Исупова Е. В., Савченко Д. С., Целищев Р. Н. Влияние контуров защитных заземлений энергоустановок на показатели эффективности электрохимической защиты нефтегазопроводов от коррозии // XII Международная учебно-научно-практическая конференция «Трубопроводный транспорт-2017» (24-25 мая 2017 г.). – Уфа : УГТНУ, 2017. – С.97-99.

10. Исупова Е. В. Экспериментальная оценка показателей эффективности противокоррозионной защиты трубопроводов, работающих на территории промышленных площадок // Международная научно-практическая конференция обучающихся, аспирантов и ученых «Опыт, актуальные проблемы и перспективы развития нефтегазового комплекса» (20 апреля 2017 г.). – Нижневартовск : ТИУ, 2017. – С.253-258.

11. Исупова Е. В. Повышение эффективности электрохимической защиты газопроводов промышленных площадок в условиях экранирования катодного тока // XII Всероссийская конференция молодых ученых, специалистов и студентов «Новые технологии в газовой промышленности» (24-27 октября 2017 г.). – Москва : РГУ НиГ (НИУ) им. И.М.Губкина, 2017. – С.146.

12. Целищев Р. Н., Савченко Д. С., Исупова Е. В. Опытные промышленные и лабораторные испытания устройства для гальванического разделения катоднозащищаемых объектов и контуров защитного заземления // X научно-практическая конференция молодых специалистов ОМК им. С. З. Афонина (27-29 ноября 2017 г.). – Выкса : АО «ВМЗ», 2017. – С. 138-139.

13. Исупова Е. В. Математическое моделирование электрического поля катодной защиты трубопроводов промышленных площадок с учетом экранирующего влияния защитных заземлений // XII Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России» (12-14 февраля 2018 г.). – Москва : РГУ НиГ (НИУ) им. И. М.Губкина, 2018. – С.142.

