

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НЕФТЯНОЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

КИРЕЕВ ДАМИР МУНИРОВИЧ

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ
РАЗВЕТВЛЕННОЙ СЕТИ ПОДЗЕМНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ТРУБОПРОВОДОВ**

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Специальность 05.26.03 – Пожарная и промышленная безопасность
(нефтегазовая отрасль)

Научные руководители:

доктор технических наук профессор

И.Г. Абдуллин

кандидат технических наук доцент

С.Н. Давыдов

Уфа 2002

	С
ВВЕДЕНИЕ. ПОСТАНОВКА ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ	4
ИССЛЕДОВАНИЯ	
1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ АВАРИЙНЫХ ОТКАЗОВ ТРУБОПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ	7
1.1 Особенности сооружения и эксплуатации внутризаводских трубопроводных систем	11
1.1.1 Водопроводные сети	12
1.1.2 Тепловые сети	14
1.1.3 Газовые сети	20
1.2 Основные закономерности коррозионных процессов и методы защиты от коррозии городских трубопроводных систем	23
2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ	36
2.1 Методика коррозионных изысканий	36
2.2 Методика электрохимических исследований коррозионного поведения материала сильфонного компенсатора тепловых перемещений	37
2.3 Методика проведения малоцикловых коррозионных испытаний	40
2.4 Методика определения эффективности активатора протекторной защиты	43
2.5 Методика микроструктурных исследований	49
3. ВЫБОР КРИТЕРИЕВ ОЧЕРЕДНОСТИ И МЕТОДОВ ЗАЩИТЫ ОТ КОРРОЗИИ РАЗВЕТВЛЕННОЙ СЕТИ ПОДЗЕМНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТРУБОПРОВОДОВ	50
4. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ОТВАЛА ГОРНО-РУДНОГО КОМБИНАТА В КАЧЕСТВЕ ОСНОВЫ	76

АКТИВАТОРА ПРИ ПРОТЕКТОРНОЙ ЗАЩИТЕ ПОДЗЕМНЫХ
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТРУБОПРОВОДОВ ОТ КОРРОЗИИ

5. АНАЛИЗ ВОЗМОЖНЫХ ВИДОВ КОРРОЗИОННО-МЕХАНИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ СИЛЬФОННЫХ КОМПЕНСАТОРОВ ТЕПЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ИЗ СТАЛЕЙ ТИПА 18-10 (18-9) ТЕПЛОПРОВОДОВ КАНАЛЬНОЙ ПРОКЛАДКИ	88
ВЫВОДЫ	107
ЛИТЕРАТУРА	108
ПРИЛОЖЕНИЕ	119

Введение

Современные предприятия нефтегазовой отрасли представляют собой сложные комплексы, эффективность работы которых во многом определяется безопасностью эксплуатации технологических трубопроводных систем, зависящей от их эксплуатационной надежности и долговечности. К группе представительных объектов такой категории следует отнести водоводы, теплопроводы, газопроводы, гибкие металлорукова и компенсаторы, которые согласно Федеральному закону от 21 июля 1997 г. № 116-ФЗ "О промышленной безопасности опасных производственных объектов" отнесены к опасным производственным объектам. Последние в силу своего функционального назначения в условиях эксплуатации подвергаются одновременному воздействию статических и циклически изменяющихся силовых факторов (внутренних и внешних), коррозионных внешних (грунтовых) и внутренних (транспортируемых) сред. Сложность условий работы подземных технологических трубопроводных систем, наряду с их большой протяженностью и густотой разветвлённых сетей, усугубляется наличием большого количества запорной и регулирующей арматуры, сочленениями труб различного диаметра, трассировкой трубопроводов под проезжими частями автомобильных дорог и пешеходными переходами, что создает дополнительные трудности при проведении ремонтно-восстановительных работ. Существенным так же является наличие в некоторых случаях близко расположенных к исследуемым объектам рельсовых путей электрифицированного транспорта с сопутствующими полями блуждающих токов.

Несмотря на развитие методов и средств обеспечения промышленной безопасности объектов нефтегазового комплекса и достигнутые при этом успехи, количество аварий и инцидентов на трубопроводных системах и связанные с ними экологические проблемы техногенного характера сохраняются на высоком уровне. Это свидетельствует о необходимости дальнейшего их совершен-

ствования, в том числе в части антикоррозионной защиты трубопроводов.

Ситуация на сегодняшний день такова, что значительная часть трубопроводных систем (до 50 – 65 %) исчерпала установленный ресурс и вступает в период интенсификации потока отказов. При этом следует отметить, что одной из основных причин высокой аварийности технологических трубопроводных систем являются коррозионные повреждения (по литературным данным до 30 % от общего количества аварий). Проблема усугубляется еще и тем, что по условиям эксплуатации трубопровод, как правило, воспринимает одновременное воздействие механических нагрузок (деформаций) и коррозионно-активных сред. Такое совместное воздействие может вызвать ускоренное коррозионно-механическое разрушение трубопроводов в виде общей механохимической коррозии, коррозионного растрескивания, коррозионной усталости и др., которое значительно интенсифицируется под влиянием полей блуждающих токов.

В связи с изложенным проблема обеспечения безопасной эксплуатации технологических трубопроводных систем во многом становится проблемой повышения их коррозионной стойкости и коррозионно-механической прочности, совершенствования методов защиты от коррозии и является, на взгляд автора, актуальной и требует разработки превентивных методов и средств ее повышения.

Несмотря на достигнутые успехи в деле повышения промышленной безопасности и повышения долговечности разветвленных технологических трубопроводных систем на основе совершенствовании их коррозионной стойкости и коррозионно-механической прочности, некоторые вопросы остаются открытыми и решаются в данном диссертационном исследовании.

Таким образом, целью работы является разработка методов и средств обеспечения долговечности и безопасной эксплуатации технологических трубопроводов на основе повышения их коррозионной стойкости, коррозионно-механической прочности и эффективности активных методов электрохимической защиты от коррозии

Поставленная цель в диссертационном исследовании достигается путем решения следующих основных задач:

1. На основе анализа статистики и природы аварийных отказов разветвленных сетей технологических трубопроводов в условиях подземной коррозии разработать критерии опасности их эксплуатации для установления очередности проведения противокоррозионных мероприятий с обоснованным выбором методов и средств, направленных на повышение их долговечности и промышленной безопасности.

2. В целях обеспечения безопасной эксплуатации электрозащищенных трубопроводных систем и других подземных металлоконструкций исследовать возможность применения минералосодержащих компонентов отвала горно-рудного комбината в качестве активирующей составляющей материала протектора для повышения эффективности протекторной защиты.

3. В целях обеспечения безопасной эксплуатации. сильфонных компенсаторов тепловых и монтажных перемещений технологических трубопроводов, эксплуатирующихся в условиях воздействия циклических нагрузок и коррозионно-активных сред, в том числе в поле блуждающих токов, выявить преобладающие причины их разрушений и разработать рекомендации по повышению их долговечности.

Решение задач диссертационной работы осуществлялось в рамках государственных и хоздоговорных научно-исследовательских работ совместно с предприятиями «Уфаводоканал», «Подземметаллзащита» АО «Газ-Сервис», УАП «Гидравлика» и «Башкирэнерго».

1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ АВАРИЙНЫХ ОТКАЗОВ ТРУБОПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ

Россия является одной из крупнейших держав в мире располагающей разветвленной сетью трубопроводных систем по которым транспортируется сырье, обеспечивающая надежную работу объектов нефтегазового комплекса.

Так общая протяженность водопроводных сетей составляет около 270 тыс. км., в настоящее время находится в эксплуатации примерно 20 тыс. км. магистральных теплопроводов. Кроме того, имеется большая сеть газопроводов составляющая порядка 150 тыс. км, обеспечивающих непрерывный технологический процесс производства в нефтехимической и нефтегазовой промышленности [76, 115].

Промышленная безопасность объектов нефтегазового комплекса в значительной степени определяется безаварийной работой технологических трубопроводных систем к числу которых относятся теплопроводы, газопроводы и теплопроводы, имеющие наиболее разветвленную сеть. Данные трубопроводные системы согласно Федеральному закону от 21 июля 1997 г. № 116-ФЗ "О промышленной безопасности опасных производственных объектов" отнесены к опасным производственным объектам. Все они представляют сложные инженерные сооружения, которые работают в тяжелых условиях комплексного воздействия механических нагрузок, температуры перекачиваемой и окружающей среды. Обеспечение высокой надежности трубопроводов является главной задачей как в процессе их строительства и монтажа, так и в процессе их эксплуатации.

Проблема промышленной безопасности усугубляется резким старением основного металлофонда и моральным износом, совершенно недостаточной степенью возобновляемости и реновации. Только по данным Башкирского управления Госгортехнадзора России на предприятиях нефтяной и газовой промышленности из 24047 км промысловых трубопроводов 44.6 % находятся в

эксплуатации более 15 лет. Этим обусловлено большое ежегодное количество порывов трубопроводов (в 1998 г. – 2259). На объектах котлонадзора, по этим же данным, более половина трубопроводов пара и горячей воды имеют наработку свыше паркового ресурса. Та же тенденция наблюдается на объектах газоснабжения. Износ основных фондов предприятий газоснабжения достаточно высокий, что отрицательно сказалось на обеспечении безаварийной работы. Изношенность газопроводов на ОАО «Газ-сервис» составляет - 31 %, по предприятиям тепловых сетей - 45 % [92, 115].

Так по данным Госгортехнадзора России распределение аварийности на магистральных трубопроводах за 1992 – 2000 гг. составило 493. Основными причинами явились:

- 34,7% - внешние физические воздействия на трубопроводы (в основном землеройной и гусеничной техникой);
- 24,7% - нарушение норм и правил производства работ при строительстве, отступление от проектных решений;
- 23,5% - коррозионные повреждения труб, запорной и регулирующей арматуры;
- 12,4% - нарушение технических условий при изготовлении труб и оборудования;
- 4,7% - ошибочные действия эксплуатационного и ремонтного персонала [76].

Как видно из статистики, одной из основных причин высокой аварийности магистральных трубопроводных систем является коррозионные повреждения.

Наибольшие потери от коррозии несут топливно-энергетический комплекс(ТЭК) - 20 %, сельское хозяйство – 20 %, химия и нефтехимия - 15 %., металлообработка – 5 %, прочие – 30 % [92].

В настоящее время вопросам электрохимической защиты от коррозии подземных металлических сооружений уделяется все более возрастающее внимание. Однако практика показывает, что количество аварийных отказов по при-

чине коррозионных разрушений стальных подземных трубопроводов не уменьшается и, зачастую, возрастает, несмотря на значительный объём противокоррозионных мероприятий.

Об этом свидетельствуют также данные аварийности на трубопроводах системы нефтесбора ТПП «Когалымнефтегаз» [48].

Таблица 1.1

Аварийность на трубопроводах системы нефтесбора ТПП «Когалымнефтегаз» (данные 1996-1997гг.)

Показатель	Значения
Количество аварий	161
в том числе из-за коррозии, шт.	146
Замазучено территории, кв. м	7471
Потери нефти от простоя, т	12583
Количество разлитой нефти,	54
Затраты на ликвидацию аварии, млн. руб.	815
Экологический ущерб, млн. руб.	2208
Общая сумма ущерба, млн. руб.	6508

Например, в г. Уфе в период с 1990 по 1994 годы по причине коррозии было зафиксировано около 654 аварий водоводов, протяжённость которых составляет около 41801 м, в период с 1976 по 1989 годы произошло 156 коррозионных отказов теплопроводов, причём более половины (98) из этих отказов пришлось на период с 1986 по 1989 годы [79].

Одним из основных видов аварийных отказов трубопроводных систем, как показывает анализ, является подземная коррозия. Коррозионный отказ ведёт не только к потере труб на повреждённом участке, к затратам на ремонтно-восстановительные работы, к потере транспортируемого продукта, но и к значительно большим потерям, связанным с перебоями в снабжении промышленных предприятий и населённых пунктов газом, теплом, водой и т.д. [5, 8, 9, 14,

24 42, и др.].

Сложность и своеобразие протекания коррозии подземных металлических трубопроводов обусловлены особыми условиями подземной среды, где взаимодействуют атмосфера, биосфера, литосфера и гидросфера. Подземные трубопроводы подвержены воздействию большого числа изменяющихся химических, физических и биологических факторов. Совокупность воздействия этих переменных факторов и определяет коррозионное воздействие среды на подземные металлические сооружения. Сложность взаимодействия этих переменных во времени факторов приводит к тому, что тот или иной из них при различных сочетаниях с другими может не только действовать с различной интенсивностью, но и даже изменять направление действия, т.е. в одном случае может ускорить, а в другом - затормозить коррозионный процесс. Поэтому во многих случаях интенсивность и характер процесса подземной коррозии не постоянны во времени.

Интенсивную коррозию подземных металлических сооружений могут вызвать блуждающие токи, источниками которых являются электрифицированные железные дороги, городской трамвай, метрополитен, линии электропередачи и др. На трубопроводы иногда натекает ток силой в сотни ампер, а стекать он может при изолированном трубопроводе лишь с мест повреждений изоляции, поэтому плотности стекающих токов в отдельных случаях могут быть очень велики. Коррозионные процессы, вызываемые блуждающими токами, накладываются на процессы, обусловленные почвенной коррозией. Совпадение анодных зон коррозионных пар и блуждающих токов ведет к усилению коррозии. Потенциал подземного сооружения зависит от соотношения интенсивностей почвенной коррозии и коррозии, вызываемой блуждающими токами, и взаимного расположения анодных и катодных зон этих двух процессов [42, 44, 60, 62, 70, 106, 110, 112].

В настоящее время всё большее внимание уделяется проблеме обеспечения технической и экологической безопасности потенциально опасных конст-

рукций в связи с их старением и коррозией [4, 45, 79, 92]. К числу этих конструкций можно отнести технологические трубопроводные системы, поскольку их отказ может явиться причиной транспортных аварий и несчастных случаев.

Замечено, что наиболее высокой аварийностью обладают водопроводные сети, далее идут тепловые сети, наименьшей аварийностью обладают газовые.

Одной из причин коррозионных отказов трубопроводных систем является преждевременный выход из строя различных конструктивных элементов, таких как задвижки, вентили, компенсаторы тепловых перемещений и др., несмотря на то, что в эксплуатацию вводятся всё более совершенные конструкции этих элементов. Примером может послужить преждевременный аварийный отказ в г. Уфе двух компенсаторов для тепловых сетей типа ЕАЛР. 302645.012 разработанных УАП «Гидравлика» в коррозионно-стойком исполнении.

Таким образом, несмотря на достигнутые успехи в деле повышения надежности и долговечности безопасной эксплуатации разветвленных трубопроводных систем на объектах НГК, большинство проблем остаются открытыми.

1.2 Особенности сооружения и эксплуатации внутризаводских трубопроводных систем.

Основными способами прокладки внутризаводских трубопроводных сетей является наземная и подземная. Такой тип прокладки в основном диктуется соображениями благоустройства. Наземная прокладка предусматривается главным образом на территории промышленных и бытовых предприятий. Подземная прокладка в внутризаводских условиях связана со значительными трудностями, в особенности в тех случаях, когда сооружение трубопровода должно осуществляться в условиях существующей застройки.

Вскрытие и восстановление дорожных покрытий создает трудности при строительстве и в процессе эксплуатации трубопроводов. Устройство траншейных прокладок неизбежно нарушает ритм движений транспорта. Кроме того, в

ряде промышленных объектах городов и поселках сам характер расположения технологического оборудования, производственных помещений, весьма осложняет размещение и ремонт подземных трубопроводов. Но наибольшие трудности для строительства и эксплуатации трубопроводов создаются насыщенностью подземными инженерными сетями, зачастую расположенными бесплано-во и хаотично.

Подземные прокладки трубопроводов в современных городах на промышленных объектах разделяются на - газопроводы - кольцевые, тупиковые и смешенные; водопроводы - магистральные и распределительные; теплопроводы - канальной и бесканальной прокладки, горячей воды и паровые; нефтепроводы; пневмопроводы и вакуумопроводы; промышленные трубопроводы различного назначения; воздухопроводы;

Наиболее часто встречающаяся наибольшая глубина заложения подземных трубопроводных сетей в РФ следующая (м) [9, 24, 61, 97]:

Водопровод	1,2-1,4
Распределительный водопровод	1,8
Теплопровод	1,0-1,10
Газопровод	0,8-1,5

1.2.1 Водопроводные сети

Водоснабжение – совокупность мероприятий по обеспечению водой различных её потребителей (населения, промышленных предприятий, транспорта) в необходимых количествах и требуемого качества [43].

Комплекс инженерных сооружений, осуществляющих задачи водоснабжения, называется системой водоснабжения или водопроводом.

Системы водоснабжения в зависимости от вида водопотребления различают хозяйственно-питьевые (или хозяйственные), производственные и противопожарные. Для одновременного удовлетворения различных нужд эти систе-

мы могут объединяться.

Наружные трубопроводы систем водоснабжения подразделяются на водоводы, магистральные и распределительные сети. По водоводам вода поступает от водозаборных сооружений к очистным и далее – к магистральным сетям, от которых распределительные сети отводят воду через центральные пункты или домовые вводы непосредственно к потребителям.

Водопроводную сеть располагают на территории промышленных объектах в проездах прямолинейно, параллельно линиям застройки. Глубина прокладки должна исключать возможность замерзания воды в зимний период и нагревания её в летнее время. Минимальная глубина заложения водопроводных сетей принимается на 0,3-0,5 м больше, считая от низа трубы, расчетной глубины промерзания грунта [85].

В настоящее время водопроводная сеть состоит из магистральных и разводящих трубопроводов, колодцев с отключающими устройствами, водозаборных колонок, пожарных кранов и других сетевых устройств.

Водопроводную сеть прокладывают по кольцевой (замкнутой) или тупиковой (разветвлённой) схеме.

Кольцевая сеть состоит из системы смежных замкнутых контуров с боковыми ответвлениями. При временном выходе из строя одной из водопроводных линий снабжение водой остальных потребителей не прекращается.

Тупиковая сеть представляет собой магистральную линию с боковыми ответвлениями, предназначенными для питания отдельных потребителей. Тупиковые сети применяют, если допускается перерыв в подаче воды на производственные нужды, на время ликвидации аварии, а также если вода подаётся на хозяйственно-питьевые нужды по трубам диаметром не более 100 мм или на противопожарные нужды при длине линии не более 200 м.

Для наружных водопроводных сетей применяют напорные железобетонные и асбестоцементные, полиэтиленовые, чугунные и стальные трубы. Чугунные трубы для промышленного водоснабжения применяются раструбные,

стальные - электросварные прямошовные и спирально-шовные. Соединение стальных труб производится в основном сваркой.

Водоводы и сети в основном укладывают в земле (подземная прокладка); допускается и надземная прокладка, отдельно в туннелях или совместно с другими подземными коммуникациями [12]. Глубина заложения водоводов и водопроводных сетей зависит от глубины промерзания грунта в месте прокладки, внешних нагрузок от транспорта, условий пересечения с подземными сооружениями и коммуникациями и других причин [61].

На поворотах трубопроводов, если усилия от внутреннего давления не могут быть полностью восприняты стыками труб, устанавливают упоры.

Для переходов трубопроводов под железными и автомобильными дорогами устраивают футляры, кроме того, трубопроводы можно прокладывать в туннелях или использовать для этого эстакады и путепроводы.

На водоводах и водопроводных сетях устанавливают: задвижки - для отключения распределительных сетей от магистральных и разделения водопроводных сетей на отдельные ремонтные участки; клапаны - для впуска и вантузы - для выпуска воздуха из трубопровода; выпуски - для сброса воды при ремонте сети и промывке трубопровода перед сдачей его в эксплуатацию; обратные клапаны или другие автоматические устройства, отключающие сеть при аварийном режиме; аппаратуру, регулирующую давление в сети; водозаборные колонки и пожарные гидранты. Трубопроводная арматура, как правило, размещается в колодцах.

1.2.2 Тепловые сети

Теплоснабжение - снабжение теплом с помощью теплоносителя (горячей воды или пара) систем отопления, горячего водоснабжения, вентиляции жилых, общественных и промышленных зданий и технологических потребителей. Теплоснабжение зданий различного назначения осуществляется по тепловым се-

тям, которые соединяют источник тепловой энергии с её потребителями: жилыми, общественными и производственными зданиями [8].

Тепловые сети на промышленных объектах представляют собой сложные инженерные сооружения, которые являются составной частью системы централизованного теплоснабжения и предназначены для транспорта тепловой энергии от источников теплоты к потребителям. В тепловых сетях в качестве теплоносителя используется вода или пар. В РФ для централизованного теплоснабжения, преимущественно используется вода с температурой, в большинстве случаев, превышающая 100 °С [8, 24, 97]. Это в основном и определяет особенности конструкции теплопроводов.

В отличие от других трубопроводов тепловые сети имеют, как правило, две трубы (подающая теплоноситель и обратная - возвращающая отработанную воду к источнику теплоснабжения), хотя встречаются системы из трех и более труб - при наличии самостоятельной системы горячего водоснабжения, паропроводов и конденсатопроводов.

Теплосеть, в отличие от других инженерных сооружений, самая крупногабаритная: ширина ее достигает 7 метров.

По характеру потребителей тепловые сети подразделяются на промышленные, коммунальные и смешанные.

По конфигурации тепловые сети бывают тупиковые и кольцевые.

Системы тепловых сетей могут быть открытыми, если производится непосредственный водоразбор из теплопроводов, и закрытыми, если непосредственного водоразбора из тепловых сетей нет и, таким образом, в сетях циркулирует постоянное количество воды.

В зависимости от длины и диаметра трубопроводов, а также количества передаваемой по ним тепловой энергии тепловые сети подразделяются на:

- магистральные - от источника теплоты до микрорайона (квартала) или до предприятия;

- распределительные - от магистральных сетей до сетей к отдельным зда-

ниям; при расположении распределительных сетей внутри квартала эти сети называются внутриквартальными или разводящими сетями;

- сети к отдельным зданиям - ответвления от распределительных или магистральных сетей до узлов присоединения местных систем потребителей теплоты или до индивидуальных тепловых пунктов зданий; эти ответвления называются также вводами [24].

Наружные тепловые сети состоят: из трубопроводов; тепловой изоляции и антикоррозионной защиты трубопроводов; трубопроводной запорно-регулирующей и измерительной арматуры; линейного оборудования; компенсаторов; дренажных устройств; строительных конструкций, ограждающих трубопровод; сооружений на тепловых сетях.

Для трубопроводов наружных тепловых сетей (теплопроводов) используют стальные бесшовные или электросварные (прямошовные или со спиральным швом) трубы.

В качестве тепловой изоляции применяют минеральную вату и изделия из неё, перлитобетонные и пенопластовые полуцилиндры, литые армопенобетонные и битумоперлитные покрытия. Эти материалы обладают низкой теплопроводностью, достаточной прочностью и долговечностью, малой гигроскопичностью. Конструктивно тепловая изоляция может быть мастичной, формовочной (штучной, сегментной), засыпной (набивной), обёрточной и литой [8, 24, 85].

Дренажные устройства предназначены для искусственного осушения грунта в месте укладки тепловых сетей, понижения уровня грунтовых вод и защиты от их проникновения в каналы тепловых сетей и далее к теплопроводам. При незначительном притоке воды и низком уровне грунтовых вод достаточно уложить под основание канала для дренажа слой крупнозернистого песка или гравия. В тех случаях, когда уровень грунтовых вод высокий, под основание канала укладывают слой песка или гравия, а также дренажные трубы (керамические или асбестоцементные диаметром не менее 150 мм), располагаемые параллельно каналу с одной или двух его сторон и с одинаковым уклоном на

всём протяжении от места сбора грунтовых вод до места сброса их в ливнесток.

Строительные ограждающие конструкции - каналы, коллекторы, тоннели, футляры - защищают теплопроводы от внешних разрушительных воздействий: поверхностных и грунтовых вод, нагрузки от собственного веса трубопроводов и оборудования, давления грунта, силы пучения грунтов и других влияний в зависимости от внешних условий. Кроме того, строительные конструкции предохраняют изоляцию, линейное оборудование от преждевременного разрушения.

Тепловые сети на промышленных объектах прокладывают в специально отведённых для строительства инженерных сооружений полосах, параллельно линиям улиц, дорог и проездов, вне проезжей части и полосы зелёных насаждений.

Для тепловых сетей в основном предусматривается подземная прокладка, реже - надземная (на территориях предприятий, вне пределов города, при высоком уровне грунтовых вод, в районах вечной мерзлоты и в других случаях, когда подземная прокладка невозможна или нецелесообразна).

Подземная прокладка теплопроводов производится в траншеях или бестраншейно. При прокладке тепловых сетей в траншеях теплопроводы укладывают в каналах – специальных строительных конструкциях, ограждающих трубопроводы, или бесканально. Каналы могут быть проходными или непроходными. В зависимости от принятой конструкции подземной прокладки (в непроходных или проходных каналах, коллекторах) допускается прокладывать теплопроводы вместе с другими инженерными сетями. В местах, где прокладка трубопроводов с разрытием траншей затруднена или невозможна (при пересечении железнодорожных и трамвайных путей, дорог с усовершенствованным покрытием и интенсивным движением транспорта), производят бестраншейную прокладку тепловых сетей. В этом случае производят щитовую проходку, прокалывают или продавливают трубы, называемые футлярами или кожухами, в которых в дальнейшем монтируют трубопроводы [43, 79].

Стальные трубы под действием температуры теплоносителя деформиру-

ются: с увеличением нагрева – удлиняются, при падении температуры – укорачиваются. Так, удлинение трубопровода из углеродистой стали на участке длиной 1 метр составляет 1,2 -1,3 мм на каждые 100 °С [8].

Для защиты трубопровода от разрушительных сил, возникающих при изменении температуры, его конструктивно выполняют так, чтобы он имел возможность свободно удлиняться при нагреве и укорачиваться при охлаждении без перенапряжения в металле труб.

Способность трубопровода к деформации под действием тепловых удлинений в пределах допустимых напряжений в металле труб называется компенсацией тепловых удлинений. Если трубопровод способен компенсировать тепловые удлинения за счет своей геометрической формы и упругих свойств металла без специальных устройств, встраиваемых в трубопровод, такая его способность называется самокомпенсация. Самокомпенсация осуществляется благодаря поворотам и изгибам трубопровода. Для этого отдельные участки трубопровода, закрепленные в двух неподвижных опорах, должны иметь несколько взаимно перпендикулярных плеч по возможности одинаковой длины. Расположенное между двумя плечами колено (плавный поворот трубопровода под углом) компенсирует часть удлинения благодаря своей эластичности, а оставшаяся часть компенсируется упругими свойствами металла прямого участка за коленом.

При защите трубопровода от перенапряжений при нагреве на участке между двумя неподвижными опорами делают так называемую холодную растяжку трубопровода, т.е. металл трубопровода (в холодном состоянии) растягивают в пределах его упругих свойств. Напряжение в металле от растяжения выравниваются и поглощаются напряжениями сжатия, которые возникают в нем при удлинении закрепленного участка трубопровода (в горячем состоянии) [66, 87].

Когда нет возможности использовать самокомпенсацию трубопровода или её недостаточно, в трубопровод вваривают специальные устройства – компен-

саторы.

Применяют три основных типа компенсаторов: линзовые, сальниковые и гнутые из труб.

Сальниковые компенсаторы относятся к осевым компенсаторам скользящего типа. Он представляет собой трубу, вставленную в фасонный патрубок большего диаметра. Зазор, оставшийся между внутренним диаметром патрубка и наружным диаметром трубы, заполняют сальниковой набивкой и затягивают на болтах гнудбуксой. При тепловом удлинении трубопровода труба входит в патрубок и тем самым предотвращает возникновение опасных напряжений.

Сальниковые компенсаторы применяют преимущественно в теплофикационных сетях, когда по условиям компоновки нельзя поставить компенсаторы других конструкций.

Гнутый компенсатор обладает большой компенсирующей способностью и надежен в эксплуатации. Недостатком такого компенсатора является его значительные размер – вылет до 7 метров, длина до 11 метров.

Гнутые компенсаторы бывают 3-х типов: лирообразные, омегообразные и П-образные.

Лирообразные и омегообразные компенсаторы, хотя и обладают большей компенсирующей способностью, из-за сложности изготовления применяются редко. Компенсаторы П-образного типа, выполненные из гнутых труб, применяют для любых параметров пара и воды. Их компенсирующая способность зависит от радиуса изгиба отводов и ширины вылета: чем больше радиус изгиба и ширина вылета, тем больше компенсирующая способность компенсатора. П-образные компенсаторы, изготовленные из секторных отводов, можно применять только для трубопроводов с наружным диаметром свыше 465 мм.

Линзовый компенсатор состоит из ряда последовательно включенных в трубопроводов волн. Компенсирующая способность каждой волны незначительна (7 - 10 мм). Общая компенсирующая способность линзового компенсатора, состоящего из 3-х линз, не превышает 20 - 30 мм. Внутри компенсатора

часто устанавливают дополнительную рубашку, чтобы предупредить выгибание компенсатора в сторону от оси трубопровода и обеспечить симметричность работы каждой волны.

Линзовые компенсаторы применяют редко (при давлениях среды в трубопроводе не выше 0,7 МПа для больших диаметров труб) и только в тех случаях, когда по размерам нельзя разместить другой тип компенсатора [24, 26 27].

В последнее время широкое распространение получили компенсаторы выполненные из коррозионно-стойкой аустенитной хромоникелевой стали типа 18-10 (18-9). Примером может послужить разработанный УАП «Гидравлика» для тепловых сетей сильфонный компенсатор, позволяющий компенсировать осевые перемещения до 250 мм при рабочем давлении транспортирующей среды до 1,6 МПа. По сравнению с традиционными (сальниковыми) разработанный сильфонный компенсатор допускает значительный перекося осей и не параллельность торцов соединительных трубопроводов, не требует постоянного обслуживания и текущего ремонта, позволяет значительно увеличить расстояние между неподвижными опорами подземных канальных теплопроводов. Это делает весьма перспективным его широкое применение в качестве компенсатора тепловых перемещений теплопроводов, особенно при их подземной канальной прокладке в условиях больших городов.

1.2.3 Газовые сети

Газоснабжение – организованная подача и распределение газового топлива для нужд народного хозяйства. В качестве газового топлива используют горючие газы – эффективный и дешёвый вид топлива. Для газоснабжения городов, посёлков и промышленных предприятий используют преимущественно природные газы [9].

Для систем газоснабжения промышленных объектов установлены следующие категории давления газа в газопроводах, МПа: низкое - до 0,005; среднее - более 0,005 до 0,3; высокое - более 0,3 до 1,2. Для газоснабжения об-

ществленных зданий и бытовых потребителей используют газ низкого давления, а для газоснабжения многих промышленных предприятий - газ среднего и высокого давления.

В зависимости от максимального рабочего давления газопроводы подразделяются на газопроводы низкого, среднего и высокого давления.

К основным сооружениям на газопроводах относят: газорегуляторные пункты (ГРП) и установки (ГРУ), газораспределительные станции (ГРС), конденсатосборники, колодцы, коверы.

ГРП, ГРУ и ГРС предназначены для снижения давления газа в системах газоснабжения и поддержания его на заданных уровнях регуляторами давления.

ГРП размещают в отдельно стоящих зданиях, пристройках к зданиям, на несгораемом покрытии промышленных зданий или в шкафах, устанавливаемых на несгораемой стене газифицируемого здания или на отдельно стоящей несгораемой опоре.

ГРУ размещают в газифицируемых зданиях, в которых находятся агрегаты, потребляющие газ. Газ от ГРУ к потребителям, расположенным в других отдельно стоящих зданиях, не подаётся.

ГРС - более мощные сооружения, чем ГРП и ГРУ, с большой пропускной способностью газа. Оборудование ГРС рассчитано на максимально возможное давление в магистральном газопроводе. Кроме того, газ в ГРС очищается в фильтрах, одорируется, а в некоторых ГРС и подогревается.

Конденсатосборники предназначены для сбора и последующего удаления из газопровода конденсата, а также для удаления воды, попавшей в него при строительстве, промывках и пр. Конденсатосборники монтируют в нижних точках газопровода. Жидкость из газопровода попадает в конденсатосборник самотёком.

Колодцы, строящиеся из бетона, железобетона и кирпича, сооружают на подземных газопроводах в местах установки задвижек и компенсаторов.

Ковер представляет собой небольшой металлический колпак конусообразной или цилиндрической формы с крышкой, защищающей от механических повреждений верхнюю часть контрольных и дренажных трубок конденсатосборников, гидрозатворов, контрольно-измерительных проводников. Коверы изготавливают литыми чугунами или сварными стальными.

Промышленная наружная сеть газопроводов состоит из:

- магистральных газопроводов, идущих от газораспределительной станции ГРС до головных газорегуляторных пунктов ГРП;
- распределительных трубопроводов, в которые входят газопроводы от ГРП до вводов в здания и производственных объектов ;
- вводов в здания и производственные объекты

В зависимости от расположения, распределительные газопроводы называются уличными, внутриквартальными, дворовыми, межцеховыми..

Газоснабжение промышленных объектов включает в себя все категории давления газа. Производственный объект опоясывает кольцо газопровода высокого давления, ближе к центру расположено кольцо газопровода среднего давления и третье кольцо – газопровод низкого давления. Кольца соединяются газопроводами, на которых расположены ГРП и ГРУ.

Распределительные трубопроводы могут быть кольцевые, тупиковые и смешанные (кольцевые и тупиковые).

Для строительства газопроводов используют преимущественно стальные (бесшовные, сварные прямошовные и спирально-шовные), а также неметаллические – пластмассовые (полиэтиленовые и винилпластовые) трубы. Рассматривается возможность сооружения внутризаводских газопроводов из пластмассовых труб. Зарубежный и отечественный опыт подтверждает эту концепцию [9, 11, 99, 69, 106].

Стальные трубы соединяют сваркой. Задвижки, краны и другую арматуру присоединяют к газопроводам на фланцах.

В местах установки кранов, пробок и муфт на конденсатосборниках и гид-

розатворах при подземной прокладке и присоединении контрольно-измерительных приборов допускается резьбовое соединение.

Газопроводы строят подземные и надземные. Подземная прокладка наружных газопроводов независимо от назначения и давления предусматривается по улицам и дорогам; надземная допускается на территории промышленных предприятий, а также внутри цехов.

Минимальная глубина заложения газопроводов в местах с усовершенствованным покрытием (асфальтобетонным, бетонным и др.) составляет не менее 0,8 м, а на участках без усовершенствованного покрытия – не менее 0,9 м. Глубина заложения газопроводов может быть уменьшена до 0,6 м, если над газопроводом нет движения транспорта [9, 14, 22].

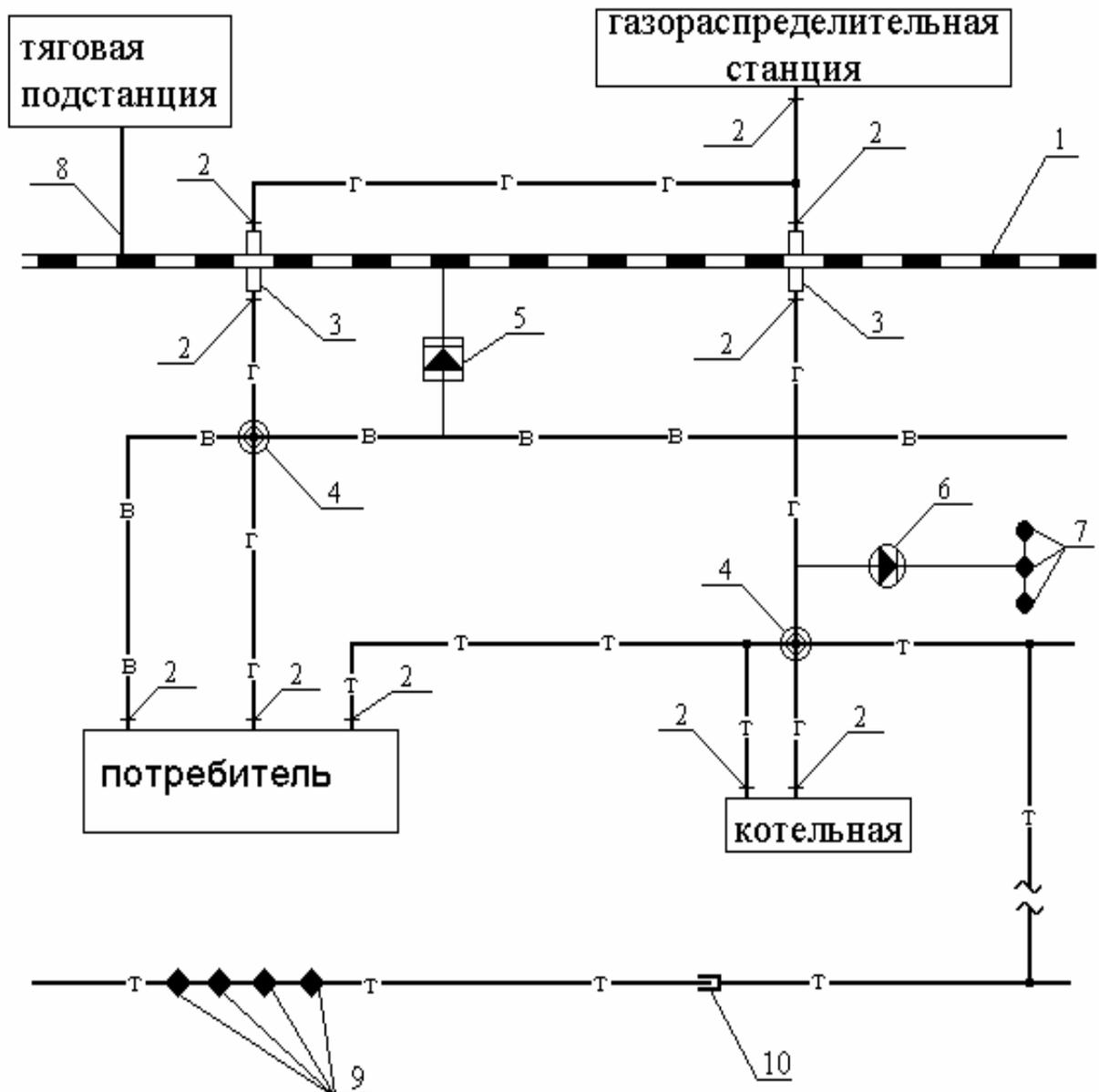
Газопроводы прокладываются на строго определённом расстоянии от других инженерных сооружений и коммуникаций. Если по местным условиям прокладки (или при технической необходимости) на отдельных участках требуется уменьшить это расстояние, то предусматриваются дополнительные мероприятия по повышению надёжности эксплуатации газопровода и безопасности промышленных объектов и подземных коммуникаций (установка футляров на газопровод, 100 % проверка сварных стыков физическими методами контроля и пр.).

1.3 Основные закономерности коррозионных процессов и методы защиты от коррозии городских трубопроводных систем

Особенности эксплуатации и защиты от наружной коррозии трубопроводов крупных городов обусловлены многими факторами. К ним относятся большая протяженность трубопроводов, густая разветвленная сеть, сочленённость труб различного диаметра, наличие большого количества запорной и регулирующей арматуры, расположение большого количества трубопроводов под проезжей частью автомобильных дорог и пешеходных переходов, труднодос-

тупность для замены и ремонта поврежденных участков трубопроводов, наличие рельсовых путей электрифицированного транспорта, а так же сложноразветвленное расположение других подземных коммуникаций сопутствующих и пересекающих трубопровод (водопроводов, теплопроводов, газопроводов, кабелей электропередач и средств связи) имеющих собственные системы защиты от коррозии. На рис. 1.1 показан пример расположения трубопроводов на промышленном объекте.

Подземные металлические трубопроводы являются дорогостоящими конструкциями, срок эксплуатации которых в основном зависит от их коррозионной стойкости. Опасность коррозионного разрушения наружной поверхности подземных металлических трубопроводов обусловлена действием почвенной коррозии и электрокоррозии - коррозии, вызванной действием блуждающих токов. В случаях их одновременного влияния скорость коррозии ПМС резко



- | | |
|-------------------------------|--|
| 1 – железная дорога; | 6 – станция катодной защиты; |
| 2 – изолирующий фланец; | 7 – анодные заземлители; |
| 3 – стальной футляр; | 8 – контактный провод; |
| 4 – перемычка трубопроводов; | 9 – протекторы; |
| 5 – станция дренажной защиты; | 10 – компенсатор тепловых перемещений; |
| В- водопровод; Т-теплопровод; | Г-газопровод |

Рис. 1.1 . Пример разветвлённой сети подземных коммуникаций

(иногда в десятки раз) возрастает достигая аномальной, как правило, на огра-

ниченных участках. В этом случае коррозионное разрушение носит четко выраженный язвенный характер.

Грунт, содержащий растворённые в воде химические реагенты, обладает ионной электропроводностью. Это делает его коррозионно-активным электролитом по отношению к металлическим конструкциям. В большинстве случаев, за исключением сухих грунтов, подземная коррозия металлов протекает по электрохимическому механизму [44, 60, 70, 110, 112].

Наиболее характерным катодным процессом при грунтовой коррозии является кислородная деполяризация. В сильноокислых грунтах может наблюдаться водородная деполяризация, но, как правило, в большинстве грунтов она не встречается [31].

Коррозия железа в нейтральных водных средах протекает с кислородной деполяризацией. При этом катодным процессом является процесс ионизации кислорода по реакции



а анодным – процесс ионизации железа по реакции



В водных средах при $\text{pH} > 5.5$ образуется труднорастворимый гидрат закиса железа белого цвета $[\text{Fe}(\text{OH})_2]$, далее гидрат окиси железа бурого цвета $[\text{Fe}(\text{OH})_3]$ и при дальнейшем превращении этих продуктов – сложные гидратированные окислы $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{nH}_2\text{O}$ – ржавчину.

Поскольку образование ржавчины на поверхности железа или углеродистой стали есть процесс взаимодействия ионизированного железа с водой терминологически в дисциплине «Водоснабжение» слой ржавчины принято называть коррозионными отложениями.

Для железа характерно длительное разблагораживание его потенциала в водной среде (сдвиг его в сторону отрицательных значений), которое объясняется разрушением защитной окисной пленки, существовавшей на железе до его погружения в воду, и процессом образования пленки труднорастворимых про-

дуктов коррозии, затрудняющей доступ кислорода к поверхности стали. В связи с этим коррозия железа в воде как правило является не равномерной, а местной (в виде язв, пятен), т.е. отдельные участки поверхности стали в большей степени подвержены коррозионному разрушению, чем другие.

Так как объем гидратированных продуктов коррозии значительно больше объема растворившегося металла, на месте растворения металла происходит накопление продуктов коррозии.

Ущерб от коррозии выражается также в уменьшении толщины стенок труб и снижении их прочности, возникновении сквозных проржавлений (свищей). Сквозные проржавления приводят к преждевременному выходу из строя труб, потерям перекачиваемого продукта, разрыву коммуникаций и подтоплению территорий.[14, 15]

На почвенную коррозию влияют следующие основные факторы, определяющие её скорость и характер разрушения металла:

- наличие влаги (образование электролита и возможность возникновения электрохимической коррозии). Увеличение влажности грунта облегчает протекание анодного процесса, но затрудняет катодный процесс – снижается аэрируемость металла. Снижение содержания влаги затрудняет отвод ионов металла. При отсутствии влаги нет электролита и нет электрохимической коррозии;

- воздухопроницаемость грунтов, зависящая от влажности, пористости, химического состава и т.д. С повышением воздухопроницаемости облегчается катодный процесс и ускоряется коррозионное разрушение металлов. Кроме того, наличие разной аэрации участков приводит к образованию гальванических пар;

- электрическая проводимость грунтов, которая зависит от влажности, состава, структуры грунта;

- кислотность грунта, ускоряющая коррозию металлов в результате дополнительной катодной деполяризации ионами водорода;

- разнородность грунтов по длине трубопровода, приводящая к образова-

нию макрокоррозионных пар и усилению коррозии металлов;

- температура грунта. При повышении температуры коррозия ускоряется и резко замедляется при замерзании грунтовой воды. Различие температур по длине трубопровода может привести к образованию термогальванических коррозионных пар.

В целом ряде случаев срок удовлетворительной работы стальных трубопроводов водоснабжения составляет 4-6 лет [61].

Однако интенсивность почвенной коррозии намного меньше, чем коррозия блуждающими токами.

Поскольку рельсовый путь не изолирован от грунта, то земля оказывается для блуждающих токов шунтирующим проводником, по которому протекает часть общего тока. Растекаясь в земле и встречая на своём пути металлические сооружения, удельное сопротивление которых значительно ниже удельного сопротивления земли, блуждающие токи натекают на них, стекая затем в зоне, близкой к отсасывающему пункту, и возвращаются через грунт в рельсы. Так как контактный провод подсоединён к плюсовой шине тяговой подстанции, а рельс – к отрицательной, то в местах выхода тока из рельса в землю на нём образуется анодная зона, и ток, стекая, разрушает подошву рельса и крепёжные костыли. В том месте, где блуждающие токи натекают на трубопровод, они вызывают его катодную поляризацию, а в местах стекания тока происходит анодная поляризация металла трубы, которая обуславливает коррозию трубы. Таким образом, в зонах действия блуждающих токов потенциал трубопровода смещается в анодных зонах в положительном направлении, в катодных – в отрицательном [14].

Процесс коррозии наружной поверхности водопроводов и газопроводов имеет общую специфику, поскольку способ их подземной прокладки в большинстве случаев одинаков.

На протяженных подземных металлических трубопроводах значение потенциала вдоль их длины меняется в результате физической неоднородности

металла и коррозионной среды.

Металлы имеют определённую структурную неоднородность. Наличие на металле деформированных участков, шероховатостей, царапин, повреждений обуславливают неоднородность поверхности [71, 75].

Грунты также характеризуются гетерогенностью строения и свойств в микромасштабе (наличие отдельных микроструктурных составляющих грунта, газовых пустот, влаги) и в макромасштабе (чередование грунтов с различными свойствами).

Неоднородность любого из этих факторов обусловит образование гетерогенных электродов, на поверхности которых имеются области преимущественно анодных и преимущественно катодных реакций.

Условия работы подземного теплопровода в значительной мере отличаются от других инженерных сетей. Все теплопроводы в силу наличия горячей воды переменной температуры связаны с постоянными перемещениями вдоль оси и испытывают температурные напряжения. Кроме того, подающий теплопровод большую часть года работает с температурой, считающейся наиболее опасной по коррозионным условиям (70-85 °С) [24].

Необходимость защиты теплоизоляционного покрытия от разрушения и обеспечение температурной компенсации труб приводит к значительному усложнению конструкции теплопроводов, прокладываемых вследствие этого полностью или частично в каналах, тоннелях или защитных оболочках. Вместе с тем наличие целого ряда конструктивных элементов, характерных для тепловых сетей, обуславливает возможность образования многочисленных локальных участков коррозионных разрушений, способствует усилению коррозии блуждающими токами. Например, вследствие различных потенциалов стали в грунте и бетоне могут возникать макрокоррозионные пары между трубопроводом и стальными элементами опорных конструкций или арматурой стенок канала, между отдельными участками трубопровод.

Конструктивные особенности тепловых сетей затрудняют, а в ряде случаев

полностью исключают применение ряда способов ЭХЗ, эффективно используемых на «холодных» ПМС [79, 93].

В подавляющем большинстве случаев наружная коррозия имеет характер отдельных, сравнительно небольших по площади очагов при наличии на остальных участках сплошной равномерной и сравнительно небольшой коррозии. В отсутствие опасных потенциалов блуждающих токов характер мест повреждений позволяет считать, что интенсивная местная коррозия незащищённой покрытиями поверхности трубы происходит вследствие периодически частого доступа влаги (точнее кислорода в ней). Этот процесс имеет место как в бесканальных прокладках, так и в канальных при затоплении их водой и особенно при заносе грязью. Трубопровод, полностью погружённый в воду, подвергается более медленной коррозии, нежели находящийся во влажной тепловой изоляции. Переменный нагрев теплопровода приводит к перемещению влаги в слое изоляции, увеличению доступа кислорода и, следовательно, интенсификации процесса коррозии. Повышение температуры теплоносителя от 20 до 75 °С приводит к увеличению скорости коррозии стали в контакте с минеральной ватой в 4-5 раз. С дальнейшим ростом температуры теплоносителя до 100 °С скорость коррозии резко снижается, что связано с подсушиванием контактного слоя тепловой изоляции и деаэрацией воды. Таким образом, наиболее желательным для замедления процессов наружной коррозии подземных теплопроводов был бы тепловой режим работы сетей с минимальной температурой в 95-100 °С [8].

Способы защиты подземных трубопроводов от почвенной коррозии включают рациональный выбор трассы прокладки трубопровода и использование пассивных и активных способов защиты. Пассивными способами защиты создают барьер, отделяющий защищаемую поверхность металла от грунта. Активными способами защиты создают такие условия на защищаемой поверхности металла, при которых подавляется или значительно замедляется процесс коррозионного разрушения трубы. К пассивным способам защиты относятся созда-

ние коллекторов, каналов, нанесение защитных покрытий и т.д., к активным - электрохимическая защита [46, 63, 99, 100, 101].

Для эффективной защиты подземных сооружений от коррозии блуждающими токами также необходим комплекс мероприятий, включающий пассивные и активные меры защиты. К первым относятся меры, проводимые ещё на стадии проектирования и строительства: выбор оптимальной трассы трубопровода, удаление подземных сооружений друг от друга и особенно от рельсовой сети электрифицированного транспорта, применение в местах их сближений и пересечения надёжной локальной изоляции, а также устройство специальных коллекторов. К активным методам защиты подземных сооружений от коррозии относятся электрохимическая защита путём катодной поляризации трубопровода [51].

Если рассматривать типы подземных трубопроводов с позиций надёжности, то несомненный приоритет получит совместная прокладка в городских коллекторах теплопроводов, водопроводов и кабельных линий. Общая стоимость сооружения городских коллекторов равна стоимости обычной прокладки кабелей и труб, причём стоимость теплопроводов обходится по цене прокладки в полупроходных каналах.

Одной из наиболее важных мер по защите подземных металлических сооружений от коррозии является нанесение на наружную поверхность трубопровода специальных изолирующих покрытий. Стальные трубопроводы, прокладываемые непосредственно в земле на территории производственных объектов и промышленных площадках, в зоне блуждающих токов, должны иметь весьма усиленные защитные покрытия независимо от коррозионной активности грунта. В зависимости от используемых материалов полимерные защитные покрытия могут быть мастичные (битумные или каменноугольные), экструдированные из расплава, оплаваемые на трубах из порошков, накатываемые на трубы из эмалей, из липких или наклеиваемых на трубу лент.

На стальных водопроводах, прокладываемых непосредственно в промыш-

ленных предприятиях, должны применяться защитные покрытия, соответствующие весьма усиленному типу следующего вида: битумно-полимерные, битумно-минеральные, полимерные, битумно-тальковые, битумно-асбестополимерные, а также покрытия на основе битумно-резиновых мастик, изготовленных на специализированных заводах [14, 46, 64, 85].

На стальные трубы водопроводов защитные покрытия наносятся в базовых условиях. Непосредственно на месте укладки труб защитные покрытия наносят лишь на мелкие фасонные части, сварные стыки и при исправлении незначительных повреждений защитного покрытия.

В качестве покрытий для подземных теплопроводов используются силикатные эмали марок 64/64 и 105Т, наносимые на трубы способом индукционного нагрева (слой шликера и два слоя эмали), а также температуроустойчивый изол – два слоя на холодной изольной мастике того же состава. Однако указанные два способа пассивной антикоррозионной защиты не могут быть признаны достаточными: изол по своей долговечности, эмаль – ввиду сложности работы на трассе.

Защита антикоррозионными покрытиями нужна и для большинства применяемых и разработанных бесканальных конструкций подземных теплопроводов, таких как прокладки в керамзитобитуме, керамзитобетоне и т.д. Несколько особняком стоят в этом ряду бесканальные прокладки в монолитном армопенобетоне и в засыпном асфальтите. В этих конструкциях теплоизоляционный слой может являться одновременно и антикоррозионным покрытием [8, 24].

Все строящиеся подземные стальные газопроводы и ёмкости для хранения сжиженного газа промышленных предприятий с целью защиты от коррозии наружной поверхности должны иметь защитные покрытия, соответствующие весьма усиленному типу. К числу таких покрытий относятся покрытия, изготавливаемые из рулонного материала на основе бутилкаучука, бутилнора-С.

Защитное покрытие из рулонного материала на основе бутилкаучука со-

стоит из мастики НБВ и бутилнора-С. Общая толщина покрытия должна быть не менее 1,6 мм [9].

Значительное уменьшение скорости наружной коррозии подземных металлических сооружений достигается при катодной поляризации металла. Данное явление широко используется при осуществлении электрохимической защиты от коррозии путём поляризации от внешнего источника тока или путём соединения с металлом (протектором), имеющим более отрицательный или более положительный потенциал, чем у защищаемого металла.

На основании многолетних натуральных и лабораторных исследований установлено, что для преобладающего большинства подземных трубопроводов (за исключением проходящих в кислых почвах, в почвах, заселённых сульфатвосстанавливающими бактериями и бактериями, продукты жизнедеятельности которых коррозионно активны, а также для горячих трубопроводов) достаточная защита углеродистых и низколегированных сталей обеспечивается при $-0,85$ В по насыщенному медно-сульфатному электроду сравнения (МСЭ). Этот потенциал и принят в качестве минимального защитного потенциала. Значение максимального защитного потенциала для стали с защитным покрытием для любых сред ограничено $-1,1$ В по МСЭ. Для стали без защитного покрытия он не ограничивается [22].

Катодную поляризацию подземных металлических сооружений следует осуществлять так, чтобы исключить вредное влияние её на соседние подземные металлические сооружения. Вредным влиянием катодной поляризации защищаемого сооружения на соседние металлические сооружения считается: уменьшение по абсолютной величине минимального или увеличение по абсолютной величине максимального защитного потенциала на соседних металлических сооружениях, имеющих катодную поляризацию; появление опасности электрохимической коррозии там, где ранее не требовалось защиты от неё. В случаях, когда при осуществлении катодной поляризации нельзя избежать вредного влияния её на соседние металлические сооружения, должна осущест-

вляться совместная защита этих сооружений или приниматься меры, устраняющие вредное влияние. Так, для обеспечения защиты от коррозии все совместно защищаемые подземные сооружения должны быть соединены между собой специальными электрическими перемычками (если отсутствуют технологические соединения) и защищаться общими для всех установками электрохимической защиты.

Обычно катодная защита используется вместе с изоляционными покрытиями, нанесёнными на наружную поверхность защищаемого сооружения. Поверхностное покрытие уменьшает необходимую плотность катодного тока на несколько порядков. Но по мере разрушения покрытия и оголения металла плотность катодного тока необходимо увеличивать. Качество наружного покрытия на защищаемой поверхности определяет интегральную площадь неизолированного металла, контактирующего с электролитом, и ток, который будет протекать через покрытие. Плотность тока, необходимого для катодной защиты подземных металлических трубопроводов, почти полностью зависит от качества покрытия; все прочие факторы имеют меньшее влияние.

В системах катодной защиты с наложенным током от внешнего источника часто используется постоянное (нерегулируемое по величине) напряжение, обеспечивающее сравнительно постоянный ток защиты. Однако при изменении начальных условий необходимый ток защиты может значительно изменяться, и конструкция может быть защищена или перезащищена в течение длительного времени. В этом случае целесообразно использовать автоматические катодные станции, поддерживающие на заданном уровне защитный поляризационный потенциал сооружения по отношению к электроду сравнения, что порой требует существенного изменения тока защиты.

Для защиты от коррозии подземных металлических сооружений применяются специальные катодные станции или преобразователи, представляющие собой источники постоянного тока с регулируемым или фиксированным выходным напряжением. Катодные станции, как правило, питаются от промыш-

ленной сети переменного тока напряжением 380/220/127/110 В. В случаях, когда нет источника питания переменным током, установку катодной защиты можно питать от аккумуляторов, ветро- или газогенераторов [64].

Анодные заземления, используемые при катодной защите, наиболее часто изготавливают в виде параллельно включённых горизонтально или вертикально расположенных анодов. В некоторых случаях устанавливают глубинные аноды (для защиты подземных коммуникаций городов, трубопроводов на территории промышленных площадок нефте-, газопроводов и нефтебаз, т.е. в условиях высокой плотности застройки). Материалами для анодов служат сталь (трубы, рельсы, прутки и т.д.), графит, ферросилиций и др.

Наиболее стойким материалом для анодов систем катодной защиты являются железокремниевые сплавы. Скорость анодного растворения железокремниевых сплавов составляет 0,1-0,25 кг/(А·год) при плотностях наложенного анодного тока до 0,8 А/дм² [47].

Электродренажная защита трубопроводов от электрокоррозии обеспечивается путём отвода блуждающих токов от сооружения к источнику этих токов. Дренаж осуществляется путём электрического соединения подземного сооружения через дренажное устройство с отрицательной шиной тяговой подстанции или с отсасывающим пунктом, либо с рельсами электрифицированного транспорта [94].

Электрические дренажи могут быть прямые, поляризованные и усиленные. Прямой электрический дренаж обладает двусторонней проводимостью, т.е. ток беспрепятственно протекает как с подземного сооружения в рельсовую сеть, так и в обратном направлении. Поляризованный дренаж отличается от прямого лишь тем, что он обеспечивает протекание тока по дренажному соединению только в одном направлении с трубопровода или с оболочек кабеля в рельсы. Усиленный дренаж – это катодная станция (выпрямитель) с той лишь разницей, что он подключается отрицательным полюсом к защищаемому сооружению, а положительным – к рельсам влияющей электрифицированной железной дороги

или трамвая.

Выбор типа дренажа – простого (прямого), поляризованного или усиленного основывается на синхронных измерениях разности потенциалов «сооружение-земля» и «сооружение-рельс».

Прямой электродренаж применяют только в тех случаях, когда исключена возможность стекания токов с рельсов (либо с отрицательной шины подстанции) в трубопровод.

Если потенциал защищаемого сооружения по отношению к рельсам или шине и к земле положительный или знакопеременный и если разность потенциалов «сооружение-рельс» больше разности потенциалов «сооружение-земля», применяют поляризованный электрический дренаж.

Усиленный электрический дренаж применяют при положительном или знакопеременном по отношению к земле потенциале сооружения (что обусловлено действием нескольких источников блуждающих токов), а также в случае, если применение усиленного дренажа экономически выгоднее, чем увеличение площади сечения дренажного кабеля.

В связи с изложенным проблема обеспечения безопасной эксплуатации технологических трубопроводных систем во многом становится проблемой повышения их коррозионной стойкости и коррозионно-механической прочности, совершенствования методов защиты от коррозии и является, на взгляд автора, актуальной, требует разработки превентивных методов и средств ее решение.

2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Решение комплексной задачи повышение эффективности безаварийной работы технического ресурса разветвленных подземных трубопроводных сетей различного назначения требует применения специальных и разнообразных методических подходов. Это связано с тем, что трубопроводы (водопроводы, газопроводы и теплотрассы) испытывают различные режимы эксплуатации и подвергаются соответственно различным видам коррозионного разрушения. Традиционно основным путем защиты от наружной (почвенной, грунтовой) коррозии трубопроводов в городских условиях является катодная защита, а для резервуаров НПЗ и сельских районах, особенно на большом удалении от источника электроэнергии др., преимущественно – протекторная. Трубопроводы городского водоснабжения защищаются от коррозии в основном путем использования катодной электродренажной защиты. В теплотрассах подземной канальной прокладки в основном используется защитное покрытие. В этих сетях наиболее коррозионно-чувствительными являются являются компенсаторы тепловых перемещений, которые в настоящее время изготавливаются в виде гибкой металлической оболочки из коррозионно-стойкой аустенитной хромоникелевой сталей типа 18-10. Они подвергаются специфическому воздействию паровоздушной среды, насыщенной хлор-ионами и могут быть подвержены так же как и водопроводы и газопроводы полю действия блуждающих токов, изменяющемуся по величине и знаку поляризации потенциала.

В этой связи для научного обоснования механизмов и закономерностей разрушения и устранению причин отказов таких объектов требуется применение различных методов коррозионных электрохимических, структурных и др. исследований, как стандартных и общепринятых, так и создание новых

оригинальных методик применительно к конкретному объекту исследований.

2.1 Методика коррозионных изысканий

В работе для определения поля потенциалов блуждающих токов и разработки способов защиты от коррозии трубопроводов различного назначения подземной и канальной прокладки применяли общепринятые [61, 78, 80, 82, 84 92-94] и стандартные [19 - 21] методики, заключающиеся в измерении разности потенциалов между «рельсами и землей», оценки степени опасности электрокоррозии в знакопеременных зонах, удельного сопротивления грунта по четырех точечной схеме и измерении разности потенциалов «подземное металлическое сооружение-земля».

2.2 Методика электрохимических исследований коррозионного поведения материала сильфонного компенсатора тепловых перемещений.

Исследование коррозионного поведения металла гибкой части сильфонных компенсаторов в условиях, имитирующих эксплуатационные, проводили с помощью общепринятого электрохимического метода поляризации [1, 10, 33, 36, 79, 80, 82]. Метод основан на определении скорости коррозии в единицах плотности тока, получаемых при снятии анодных и катодных поляризационных потенциостатических кривых. Исследования в температурном интервале 40...45 °С проводили в специально разработанной трехэлектродной электрохимической ячейке, имитирующая узкий зазор с затрудненным доступом кислорода воздуха, с целью создания условий, близким к условиям работы гофрированной части компенсатора с двух и более слойной оплеткой. Нагрев исследуемых образцов осуществляли в масляной бане, снабженной терморегулирующим устройством. Ячейка прижимного типа позволяет проводить электрохимические исследования в любой точки поверхности металлического образца площадью 0,5см². В качестве исследуемого электрода использовали сталь 12Х18Н10, в ка-

честве вспомогательного электрода - платиновая пластина или платиновый электрод ЭТПЛ-1МЗ. Потенциал измерялся относительно хлорсеребряного электрода сравнения ЭВЛ-1МЗ через капилляр Луггина, заполненного агар-агаром с 1н раствором КСl. В качестве модельной среды использовали 3% раствор NaCl (рис. 2.1).

Наложение определенной величины потенциала в анодную и катодную сторону от стационарного и последующую его линейную развертку осуществляли с помощью потенциостата EP-20A и вариатора PV3 (Германия) в потенциодинамическом режиме при скорости развертки потенциала 1 мВ/с.

Каждую поляризационную кривую снималась не менее шести раз, обработка полученных данных производили обработки общепринятыми методами. По полученным данным строились графики зависимости плотности анодного тока от величины потенциала $i=f(\varphi)$

где φ - наложенный поляризационный потенциал, мВ,

i – плотность возникающего тока коррозии, мА/см².

Расчёт скорости коррозии проводили по методу Штерна-Гири, широко используемого в коррозионных электрохимических исследованиях [11, 36, 80, 110].

Плотность тока определяли из выражения

$$i_{кор} = \frac{\Delta i}{\Delta \varphi} \cdot \frac{b_a \cdot b_k}{2,3 \cdot (b_a + b_k)}, \quad (2.1)$$

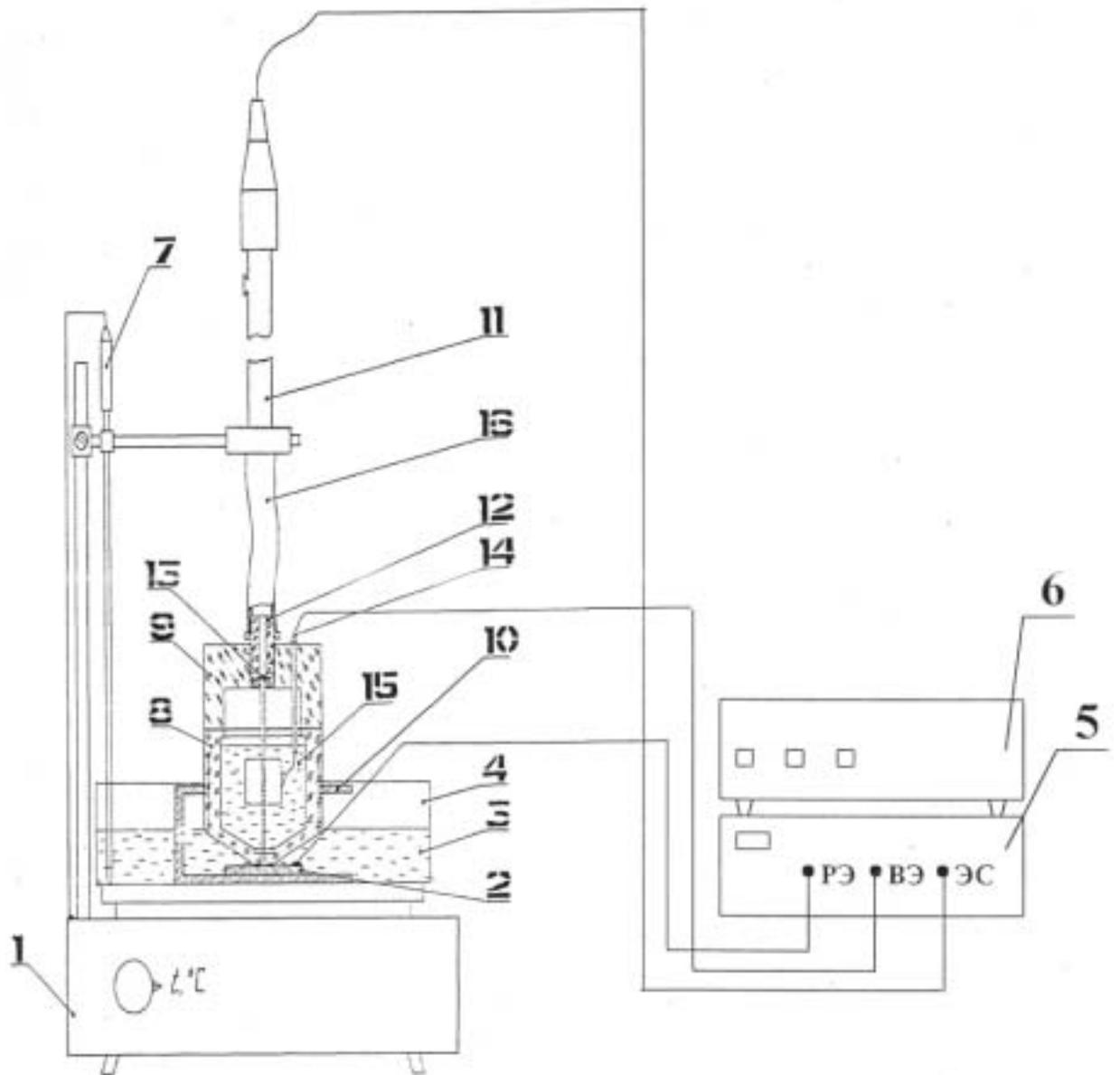
где $i_{кор}$ – плотность тока коррозии, мА/см²;

Δi – плотность тока (мА/см²) при смещении потенциала в анодную сторону на величину $\varphi_{кор} = 20$ мВ;

b_a – наклон анодной поляризационной кривой в тафелевской (линейной) области, при изменении тока на один порядок, мВ;

b_k – наклон катодной поляризационной кривой в той же области, что и при определении b_a , мВ.

СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ



1 - электроплитка с терморегулятором; 2 - исследуемый образец; 3 - масло; 4 - ванна; 5 - потенциостат EP-20A; 6 - вариатор; 7 - датчик терморегулятора; 8,9 - элементы корпуса ячейки; 10 - кронштейн для закрепления ячейки; 11 - электрод сравнения; 12 - прижимной винт; 13 - капилляр Габина - Луггина; 14 - вспомогательный электрод; 15 - 3% ном раствор NaCl; 16 - резиновый шланг.

Рис.2.1 Схема трехэлектродной электрохимической ячейки.

Так как углеродистая сталь в почве подвергается общей коррозии по реакции $\text{Fe}^0 \rightarrow \text{Fe}^{+2} + 2e$ и растворение металла подчиняется законам Фарадея, скорость коррозии K определяется из следующего выражения:

$$K = \frac{i_{\text{кор}} \cdot M}{n \cdot F}, \quad (2.2)$$

где K – скорость коррозии, г/(см²·с);

$i_{\text{кор}}$ – плотность тока коррозии, А/см²;

M – атомная масса металла, перешедшего в раствор (для железа $M = 55,85$ г);

n – валентность металла, перешедшего в раствор (для железа $n=2$);

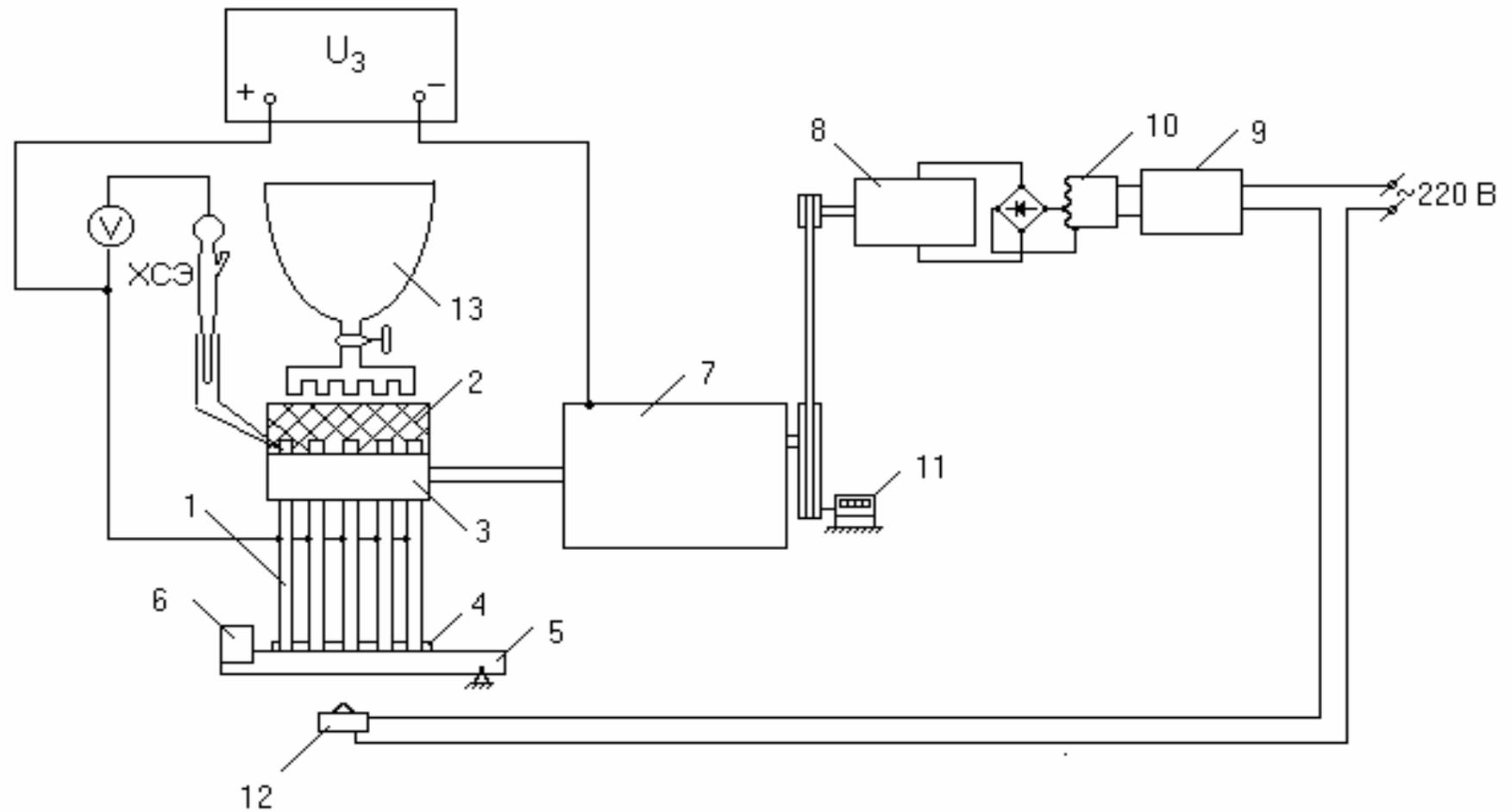
F – число Фарадея, 96496 Кл.

2.3 Методика проведения малоцикловых коррозионных испытаний.

Поскольку сильфонные компенсаторы в процессе эксплуатации испытывают циклические и повторно-статические нагрузки и деформации в упруго-пластической области были проведены малоцикловые коррозионно-усталостные испытания металла компенсатора в том числе при наличии поля блуждающего тока.

Упругопластические циклические деформации в широком интервале амплитуд, с одновременной анодной поляризацией создавали на специальной экспериментальной установке [36], принципиальная схема которой приведена на рис. 2.2. Установка модернизирована для возможности осуществления поляризации испытываемой стали.

Плоские тонколистовые образцы 1 размером 10x0,2x200мм из стали 12Х18Н10 зажимали между двумя сменными шаблонами 2, имеющими определенный радиус скругления и укрепляли на верхнем захвате 3. Нижние концы образцов закрепляли в захвате 4. Натяжение образцов обеспечивалось механизмом 5 с грузом 6, который подбирался опытным путем для обеспечения достаточного натяжения образцов. При помощи качающего механизма с редуктором



1-образец; 2-сменный шаблон; 3-верхний захват; 4-нижний захват; 5-механизм натяжения; 6-груз;
7-регулятор; 8-электродвигатель; 9-стабилизатор напряжения; 10 ЛАТР; 11-счетчик циклов; 12-
микровыключатель; 13-емкость с коррозионной средой.

Рис.2.2. Принципиальная схема экспериментальной установки

7, который переводил вращательное движение вала электродвигателя постоянного тока 8 в колебательное, исследуемые образцы подвергались симметричному изгибу. Деформация осуществлялась поворотом верхнего захвата на угол δ , при условии точного прилегания образца к цилиндрической поверхности сменных шаблонов 2, изготовленных с большой точностью. Прилегание исследуемых образцов к шаблонам при настройке проверяли по краске. Двигатель питался от промышленной сети через стабилизатор напряжения 9 и выпрямительный мост. Скорость оборотов регулировалась ЛАТРом 10. Количество циклов отсчитывалось счетчиком 11. Образец после разрушения под действием груза 6 падает на микровыключатель 12, выключает двигатель со стабилизатором напряжения и счетчик. В установке применен двигатель постоянного тока типа ПБСТ 22, электромагнитный стабилизатор напряжения С-0.5 и счетчик БИС-62.

Анодную поляризацию осуществляли от внешнего источника постоянного тока U_3 . В процессе испытаний потенциал поддерживали постоянным и регистрировали вольтметром относительно хлор-серебряного электрода сравнения. Температура при проведении испытаний составляла 20...25⁰ С.

Толщину исследуемых образцов измеряли микрометром с точностью до 0.005 мм.

Амплитуду относительной деформации ε , %, насчитывали по формуле

$$\varepsilon, \% = \frac{S}{2R} \cdot 100\% , \quad (2.3)$$

где S - толщина исследуемого образца, мм;

R - радиус изгиба средней линии образца, мм.

Для проведения усталостных исследований в коррозионно-активной среде (с целью удобства подвода электролита) верхний захват со сменными шаблонами изготовленными с большой точностью из фторопласта поворачивали на 180⁰ и при помощи блока создавали натяжение исследуемых образцов. Среда по каплям из емкости 13 подавалась через губку к центру качения и испытания

проводили под слоем электролита. Отработанный раствор собирался в специальную кювету.

Установка позволяет одновременно испытывать пять образцов.

Исследования проводили при симметричном цикле нагружения со скоростью изменения деформации 50 циклов в минуту. При испытании использовались сменные шаблоны с цилиндрической поверхностью четырех радиусов (9.5; 20; 30; 38 и 50 мм).

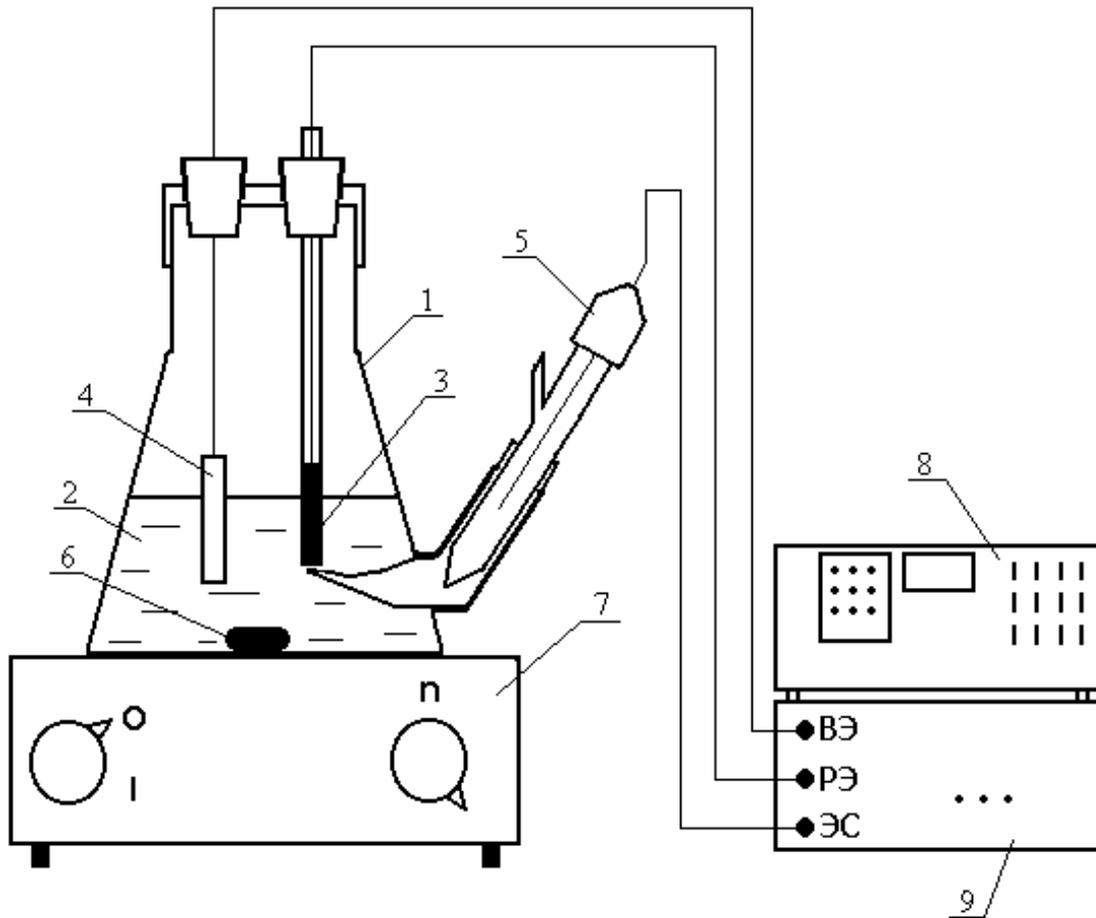
2.4. Методика определения эффективности активатора протекторной защиты.

Для изучения возможности применения отвала Башкирского медно-серного комбината (БМСК) в качестве основы активатора и определения эффективности его действия были созданы экспериментальные установки показанные на рис 2.3 и 2.4 [40]. Установка (рис. 2.3) представляет собой трех электродную электрохимическую ячейку позволяющая снимать поляризационные кривые в среде состоящей из влажного порошкообразного активатора. Методика снятия поляризационных кривых аналогична описанной в п 2.2.

Поляризационные кривые снимали на образцах из стали 10 в 3% растворе NaCl; в 3% растворе NaCl содержащем типовой активатор и в таком же растворе содержащем отвал горно-рудного комбината. Каждую поляризационную кривую (анодную и катодную) снимали не менее 6 раз. Обработка полученных результатов и построение поляризационных кривых проводились в табличном процессоре Microsoft Excel 97.

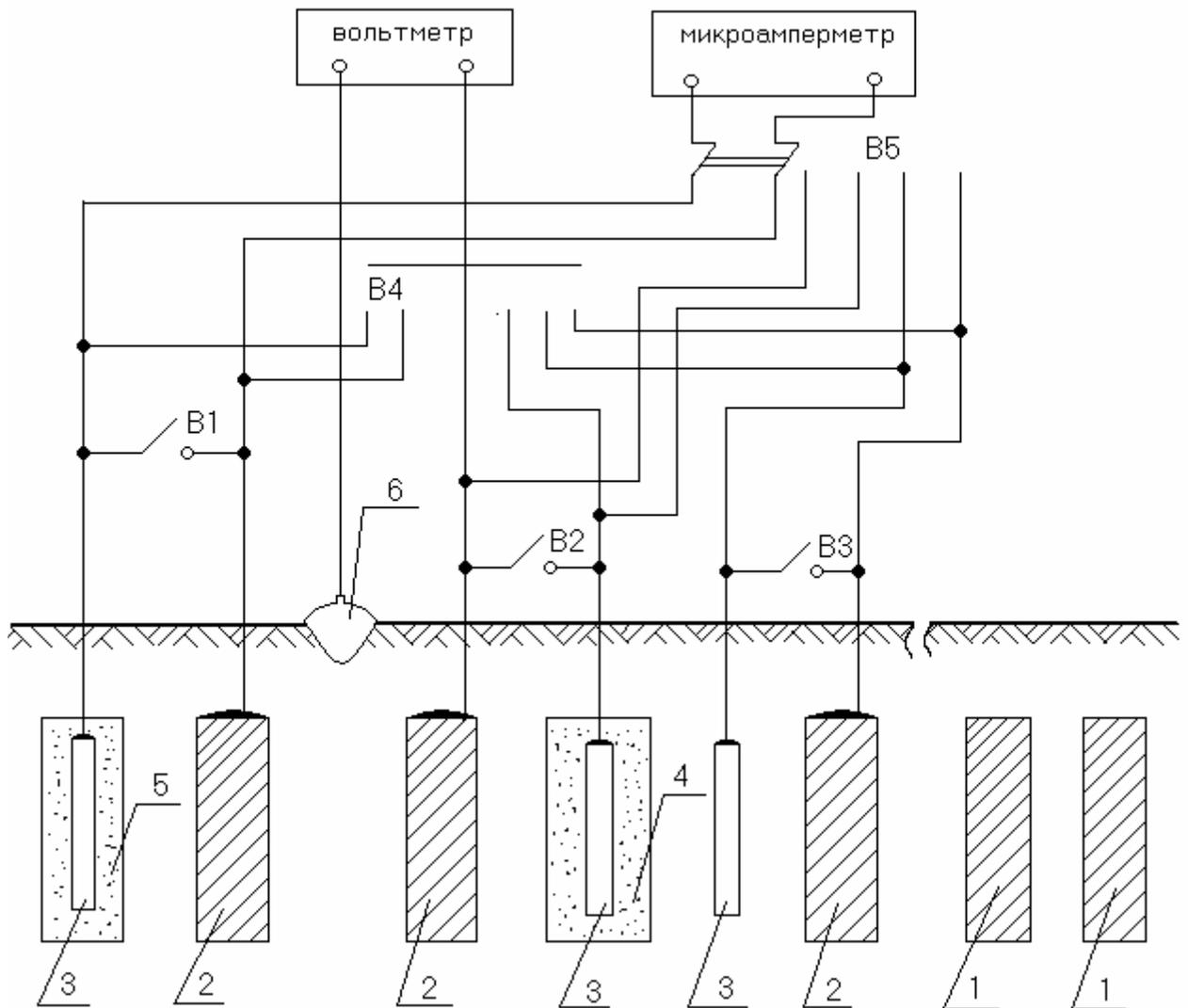
Для определения эффективности действия активатора протекторной защиты в грунте была создана экспериментальная установка принципиальная схема которой показана на рис.2.4.

Установка позволяет проведение одновременных сравнительных электрометрических измерений эффективности действия протекторной защиты с при



- 1 - электрохимическая ячейка;
- 2 - рабочая среда;
- 3 - рабочий (исследуемый) электрод;
- 4 - вспомогательный (поляризующий) электрод;
- 5 - хлорсеребряный электрод сравнения;
- 6 - элемент для перемешивания;
- 7 - электромагнитная мешалка;
- 8 - вариатор;
- 9 - потенциостат.

Рис. 2.3. Схема экспериментальной установки



1 – контрольный образец; 2 – исследуемые образцы; 3 – протектор; 4 – активатор БМСК; 5 – типовой активатор; 6 – электрод сравнения (медносульфатный); В1, В2, В3 – выключатели; В4, В5 – переключатели.

Рисунок 2.4. Принципиальная схема электрометрических измерений.

менением двух разных активаторов, а также определять скорость коррозии по потере масс контрольных образцов без электрохимической защиты.

Пластинчатые образцы из стали 10 и цинковые гальванические аноды перед измерением зачищали тонкой наждачной бумагой, замеряли их геометрические размеры, обезжиривали этиловым спиртом и взвешивали на аналитических весах с точностью до 0,0001 г. После испытаний образцы очищались от продуктов коррозии ластиком, обезжиривались и повторно взвешивались на аналитических весах. Ток между протектором с активатором и защищаемым металлом регистрировали миллиамперметром М 202, электродные потенциалы высокоомным вольтметром с выходным сопротивлением $1 \cdot 10^{12}$ Ом. Испытания проводили непрерывно в течении 400 часов.

Скорость коррозии определяли по массовому показателю K_m , г/(м²·час) или г/(м²·год):

$$K_m = \frac{m_0 - m_1}{S \cdot \tau}, \quad (2.4)$$

где m_0 – начальная масса металла до испытания, г;

m_1 – масса металла после испытания, г;

S – рабочая поверхность образца, м²;

τ - продолжительность испытания, час.

Проникновение коррозии (глубинный показатель) Π , мм/год, определяли из выражения:

$$\Pi = \frac{K}{\rho} \cdot 10^{-3}, \quad (2.5)$$

где ρ - плотность металла, г/см³;

K – скорость коррозии, г/(м²·год).

Эффективность протекторной защиты металлов от коррозии принято характеризовать величиной защитного эффекта (Z , %):

$$Z, \% = \frac{K_{m0} - K_{m1}}{K_{m0}} \cdot 100\%, \quad (2.6)$$

где - K_{m0} – показатель изменения массы металла без электрохимической защиты, $г/(м^2 \cdot год)$;

K_{m1} – показатель изменения массы металла в той же среде при применении электрохимической защиты, $г/(м^2 \cdot год)$.

Важными характеристиками материала протекторов являются: электродный потенциал Φ_p , выход тока и коэффициент полезного действия.[92, 93, 102]

Теоретический выход тока протектора – величина, обратная электрохимическому эквиваленту $C_{теор}$ металла протектора, т.е. $1/C_{теор}$, (А·час/кг).

Практический выход тока протектора рассчитывали по формуле:

$$\frac{1}{C_{\text{практ}}} = \frac{I \cdot \tau}{\Delta m_g}, \quad (2.17)$$

где $1/C_{\text{практ}}$ – практический выход тока, А·час/кг;

$C_{\text{практ}}$ – практический электрохимический эквивалент металла протектора, (г/А·час);

I – средняя сила тока, даваемая протектором, А;

τ - время работы протектора, час;

Δm_p – убыль массы протектора, г.

Расхождение между теоретическим и практическим выходами тока обусловлено главным образом саморастворением (коррозией) металла протектора. Таким образом, убыль массы протектора складывается из полезных потерь, связанных с генерацией защитного тока в цепи гальванической макропары «протектор-защищаемый металл», и непроизводительных потерь массы, связанных с саморастворением протектора.

Коэффициент полезного использования рассчитывали по формулам:

$$\eta = \frac{1}{\frac{C_{\text{практ}}}{1}} \cdot 100\% , \quad (2.8)$$

$$\eta = \frac{(\Delta m_n)_{\text{теор}}}{(\Delta m_n)_{\text{практ}}} \cdot 100\% , \quad (2.9)$$

где η - коэффициент полезного использования протектора, %;

$(\Delta m_{\text{п}})_{\text{теор}}$ – теоретическая потеря массы протектора, г;

$(\Delta m_{\text{п}})_{\text{практ}}$ – действительная потеря массы протектора, г.

Коэффициент полезного использования протектора показывает, какая часть металла протектора расходуется на создание защитного тока.

2.5 Методика микроструктурных исследований

Микроструктурные исследования проводили на стали 12X18H10, в том числе после «провоцирующей» термообработки (имитация зоны, прилегающей к сварному контактно-роликовому и аргонно-дуговому шву) с целью выявления характера расположения коррозионно-усталостной трещины после малоцикловых испытаний в соответствии с методиками, приведенными в п.2.3.

Выявление микроструктуры осуществляли электрохимическим травлением в 10%-ном растворе щавелевой кислоты по общепринятым методикам [63, 90, 107] и в соответствии с рекомендациями ГОСТ [18].

3. ВЫБОР КРИТЕРИЕВ ОЧЕРЕДНОСТИ И МЕТОДОВ ЗАЩИТЫ ОТ КОРРОЗИИ РАЗВЕТВЛЕННОЙ СЕТИ ПОДЗЕМНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТРУБОПРОВОДОВ

Определение очередности защиты от коррозии является важной задачей в обеспечении их безаварийной работы разветвленной сети трубопроводов. Реализация данного направления позволит выявить участки трубопроводов, находящиеся в наиболее агрессивных, с точки зрения коррозии, условиях и, следовательно, подлежащих первоочередной защите. В результате сократится число аварий трубопроводных сетей, от работоспособности которых во многом зависит бесперебойная подача потребителям воды, тепла, газа.

Трубопроводные системы относятся к долговременным и дорогостоящим сооружениям. Большинство из строящихся сегодня трубопроводов предназначается для будущего, так как по ним должны транспортироваться продукты столько времени, сколько будет необходимо. Если срок службы магистрального нефте- или газопроводов определяется в основном сроком службы соответствующего месторождения, технологического – сроком службы технологии, то коммунальные трубопроводные системы, обеспечивающие жизнедеятельность города, района или предприятия, должны служить не одному поколению людей.[9, 12, 14, 61]

В этой связи решение этой проблемы реализовалась применительно к трубопроводам водоснабжения имеющих наиболее разветвленную сеть подземных металлических трубопроводов.

Обеспечение надежной защиты от коррозии трубопроводов водоснабжения особенно водопроводов, находящиеся длительное время в эксплуатации без защиты или с недостаточной защитой является достаточно сложной задачей. В этом случае, с учетом возрастающих затрат, важное значение имеет правильный выбор средств и очередности применения электрохимической защиты.

Особенностями эксплуатации трубопроводов водоснабжения является их большая разветвленность, сочлененность труб различного диаметра (от 100 до

1000 мм), наличие большого количества задвижек, сложноразветвленное расположение подземных коммуникаций (водопроводы, теплотрассы, газопроводы, кабели электропередач и средств связи) и рельсовых путей электрифицированного транспорта.

Опасность коррозии стальных подземных трубопроводов обусловлена характером воздействия блуждающих токов и степенью агрессивности грунтов. Наложение блуждающих токов на подземное металлическое сооружение приводит к их взаимодействию с токами почвенной коррозии, что может существенно ускорить разрушение металла.

Наиболее распространенным и мощным источником блуждающих токов является электрифицированный рельсовый транспорт, линии электропередачи постоянного тока, работающие по системе «провод-земля», токи средств электрохимической защиты (катодные установки не включенные в систему защиты данного сооружения).

Участки, где блуждающие токи натекают на подземные металлические сооружения, являются катодами (катодные зоны), на них создается защитный эффект, аналогичный с катодной защитой. Участки, где токи стекают с металлического сооружения, являются анодами (анодные зоны) и подвергаются дополнительному электрохимическому растворению. Коррозионные повреждения подземных трубопроводов и других металлоконструкций от действия блуждающих токов обычно происходят на небольшой поверхности металла, носят выраженный язвенный характер и имеют круглую или продолговатую форму.

Характер поля блуждающих токов, а следовательно расположение анодных и катодных зон на подземном металлическом сооружении, зависит от ряда трудноучитываемых факторов. Ток, потребляемый моторным вагоном, зависит от скорости движения и веса состава, профиля пути, состояния рельсов и т. п. И изменяется от максимальных значений до нуля. При рекуперативном торможении изменяется и направление тока. Непрерывное изменение точек

приложения тяговых нагрузок и их величины вызывает соответственно и изменение характера полей блуждающих токов. Характер поля блуждающих токов усложнен также тем, что рельсовые пути могут иметь сложную конфигурацию, образуя систему замкнутых и связанных между собой контуров, соединенных с соответствующими тяговыми подстанциями при помощи отсасывающих кабелей. Кроме того, существенным является и то, что количество поездов одновременно находящихся на участке, также непрерывно меняется. Существенное влияние на характер распределения поля блуждающих токов оказывают и состав грунта, его влажность, величина переходного сопротивления между шпалами и землей.[14, 18, 46, 47, 58, 61]

В диссертационной работе задача решалась применительно к трубопроводам водоснабжения г. Уфы, столице республики Башкортостан.

Электрокоррозия является одной из основных причин разрушения подземных коммуникаций, эксплуатирующихся в поле действия блуждающих токов. Проблема борьбы с электрокоррозией стоит наиболее остро для предприятий и организаций, эксплуатирующих подземные трубопроводы в городах с электрофицированным транспортом, использующим в качестве одного из тоководов рельсы. Нарушение электрического контакта между рельсами приводит к возникновению блуждающих токов. Кроме того, в городских условиях могут присутствовать и другие источники блуждающих токов. В местах стекания блуждающих токов (анодные зоны) металл кроме грунтовой коррозии подвергается более интенсивному электрохимическому растворению.

В городе Уфе основными источниками блуждающих токов в земле являются рельсовый транспорт: трамвай и электрифицированная железная дорога. Протяженность рельсовой сети трамвая ежегодно растет и составляет более 130 км. Железная дорога, пересекающая город, имеет очень развитую разветвленную сеть ко многим крупным промышленным предприятиям и заводам.

Почва города Уфы представляет собой глины, суглинки (с глубиной залегания до 5 метров), аргиллиты, песчаники (с глубиной залегания от 5 до 10 метров). Установившийся уровень воды составляет 5-10 метров. Удельное сопротивление грунта составляет от 10 до 45 Ом·м. Такое удельное электрическое сопротивление грунта по отношению к углеродистой стали относит коррозионную агрессивность грунта в городе Уфе к группе “высокая”.

Для анализа причин аварийных отказов по причине коррозии стальных водопроводов центральной части г. Уфы были собраны и систематизированы следующие исходные данные:

- время сооружения и длина различных участков сети водопроводных коммуникаций;
- диаметр и толщина стенок трубопроводов;
- тип изоляционного покрытия;
- среднее рабочее давление в трубопроводах;
- расстояние между трубопроводами и рельсовыми железнодорожными и трамвайными путями;
- электрические параметры трамвайных рельсовых путей с учётом типа шпал и местонахождения тяговых подстанций;
- потенциальные диаграммы рельсовых путей за последние 5 лет;
- наличие и расположение средств электрозащиты от коррозии стальных трубопроводов;
- количество и местонахождение порывов водоводов по годам за 1990-1994 годы;
- удельная частота порывов на различных участках за фиксированное время эксплуатации [38, 41].

Отказы водоводов, как это было показано ранее, возникают под воздействием множества факторов и поэтому в качестве начальной может быть принята основная гипотеза об их распределении по нормальному закону Гаусса, имеющему наибольшую энтропию [113, 114].

В качестве оценки измеряемой величины принимают выборочное среднее

$$\bar{X}_n = (1/n) \cdot \sum_{i=1}^n X_i \quad (3.1)$$

Выборочная дисперсия для $j=i-1$ определяется как

$$S_n^2 = [1/(n-1)] \cdot \sum_{j=1}^n X_j \cdot (x_j - \bar{X}_n)^2, \quad (3.2)$$

Квадратный корень из дисперсии называется выборочным стандартом отклонения, а величина равная

$$S_{cm} = S_n / \sqrt{n} \quad (3.3)$$

называется выборочным стандартом.

Исходя из закономерностей, присущих нормальному распределению, отклонение измеряемой величины от средней более чем на три величины стандартного отклонения может рассматриваться как аномальное наблюдение, обусловленное или отклонением распределения от нормального или промахом.

При анализе полученных данных, кроме выборочных среднего и дисперсии, являющимся выборочным начальным моментом второго порядка, соответственно, часто находят коэффициент вариации v (показатель рассеяния)

$$V = S / \bar{X}_n \quad (\text{для } \bar{X}_n \neq 0) \quad (3.4)$$

Показатели асимметрии b_1 и эксцесса b_2 (островершинности)

$$b_1 = m_3 / S^{3/2}; \quad b_2 = m_4 / (S^2 - 3); \quad (3.5)$$

где m_3 и m_4 – центральные моменты третьего и четвертого порядка, соответственно, определяемые как

$$m_k = (x_i - \bar{x}_n)^k; \quad (3.6)$$

где k - порядок момента.

Для симметричных распределений $b_1=0$. Для нормального распределения $b_2=0$. В ряде случаев, вместо показателей b_1 и b_2 используются $b_1^1=b_1^2$ и $b_2^1=b_2+3$

Модой M_0 распределения называется значение случайной величины при которой плотность распределения достигает максимума. Распределения бывают одно и двумодальными, хотя большинство распределений одномодальные.

Медианой Me называется точка, соответствующая такому значению случайной величины, восстанавливаемый перпендикуляр из которой делит площадь под кривой плотности распределения пополам (квантиль $X=X_{0,5}$). Для симметричных одномодальных распределений выборочное среднее, медиана и мода совпадают.

Принадлежность выборки определенному закону распределения можно оценить по коэффициентам асимметрии и эксцесса с помощью номограммы, изображенной на рис. 3.1. При этом указанные коэффициенты для нормального распределения должны удовлетворять следующим неравенствам

$$b_1 < \sqrt{[6 \cdot (n - 2)] / [(n + 1) \cdot (n + 3)]}; \quad (3.7)$$

$$b_2 < \sqrt{[24n \cdot (n - 2) \cdot (n - 3)] / [(n + 1)^2 \cdot (n + 3) \cdot (n + 5)]}. \quad (3.8)$$

Обычно дополнительно проводится тестирование выборки на соответствие определенным критериям. Кроме того, в последнее время все чаще используются графические методы оценок, включая классический метод «вероятностной бумаги», реализованные в компьютерных пакетах статической обработки экспериментальных данных.

Предварительный анализ данных по отказам водоводов г. Уфы приведён в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Суммарная статистика отказов г. Уфы

Показатель	Числовое значение
Средняя	5,02676
Медиана	1,6
Мода	0,3
Геометрическая средняя	1,98845
Дисперсия	55,8523
Стандартная ошибка	7,54004
Minimum	0,2
Maximum	44,0

Асимметрия	2,91493
Экссесс	10,9444

Как следует из приведённых результатов дисперсия выборочной средней и стандартная ошибка превышают само значение выборочной средней. Поэтому последняя не может быть использована в качестве оценки и измеряемой величины и, соответственно, не пригодна для прогнозирования отказов водоводов г. Уфы. Значения средней, медианы и моды сильно отличаются друг от друга что свидетельствует об асимметрии распределения и значительном отклонении распределения от нормального. Вычисленные величины моментов более высоких порядков (третьего и четвёртого) и на их основе коэффициентов асимметрии и эксцесса подтверждают вышесказанное. Более того, их величины значительно превышают ожидаемые для наиболее распространенных видов распределений представленных на рис. 3.1.

Из теоретических представлений известно, что, когда на систему воздействуют много факторов и вклад каждого незначителен, распределение случайной величины подчиняется нормальному закону распределения Гаусса или близкого к нему. В том же случае, когда имеются факторы, существенно влияющие на закон распределения, последний будет отличаться от нормального. Поэтому в качестве основной статистической гипотезы отказов водоводов, как это было отмечено выше, можно принять нормальный закон распределения. Отклонение же от нормального закона распределения можно интерпретировать как аномалию, возникшую в результате воздействия какого либо фактора на процесс разрушения водоводов. В этом случае распределение отказов водоводов может рассматриваться как образующая в результате наложения нескольких независимых распределений.

Для проверки вышесказанного была построена частотная гистограмма удельного количества порывов водоводов г. Уфы (рис. 3.2). По оси «Y» откладывались частоты отказов, по оси «X» - удельное количество порывов.

Сплошной линией проведена кривая плотности нормального распределения с параметрами, подобранными для рассматриваемой выборки приведёнными в табл. 3.1.

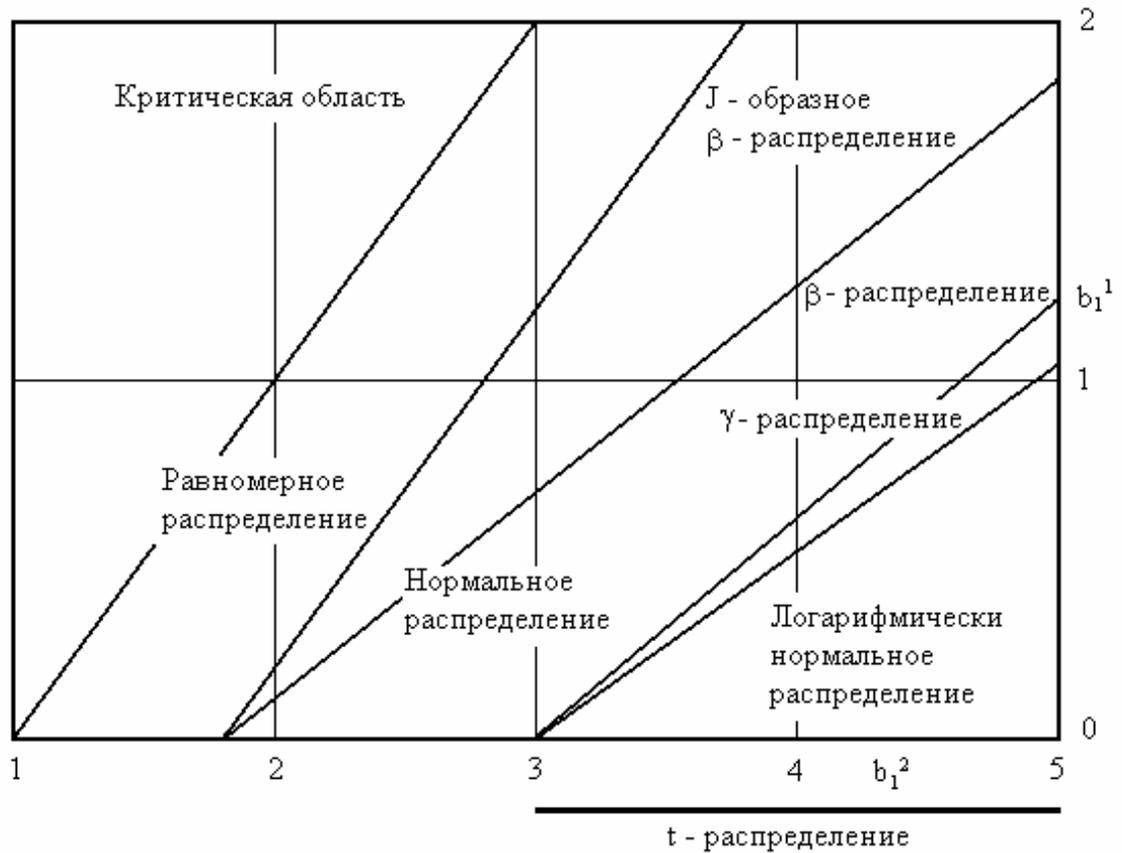


Рис. 3.1. Номограмма для оценки вида распределения

Как это следует из приведённого графика, распределение порывов близко к нормальному в левой и правой части графика. Распределение же порывов г. Уфы может рассматриваться как суперпозиция нескольких (по крайней мере двух) независимых распределений.

Результаты тестирования выборки с помощью критерия Колмогорова-Смирнова [20], заключающиеся в нахождении максимального положительного и отрицательного отклонения выборочных данных от теоретического распределения и последующего расчёта доверительной вероятности принадлежности выборки этому распределению приведены в табл. 3.2.

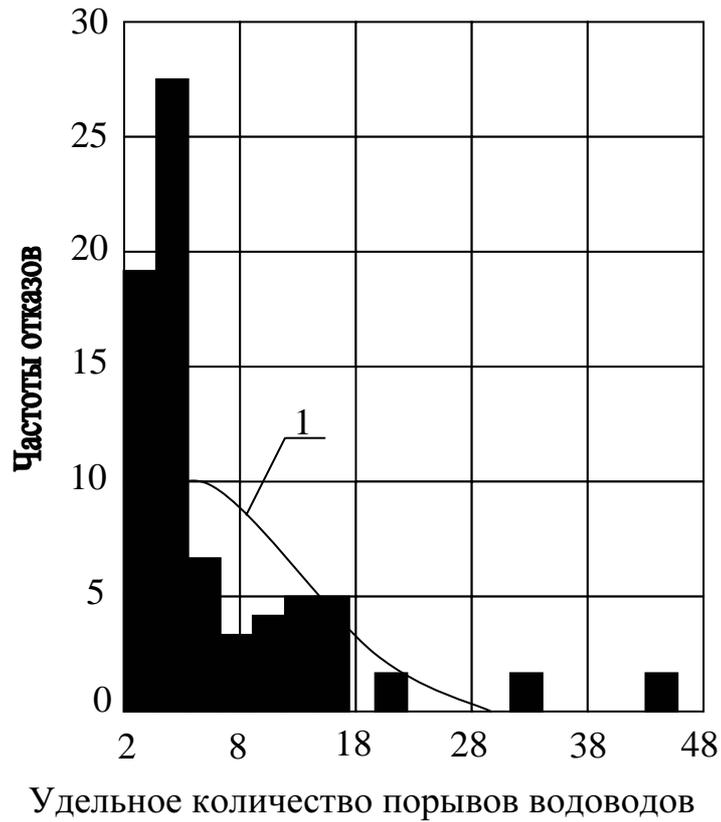


Рис. 3.2. Частотная гистограмма для общей выборки

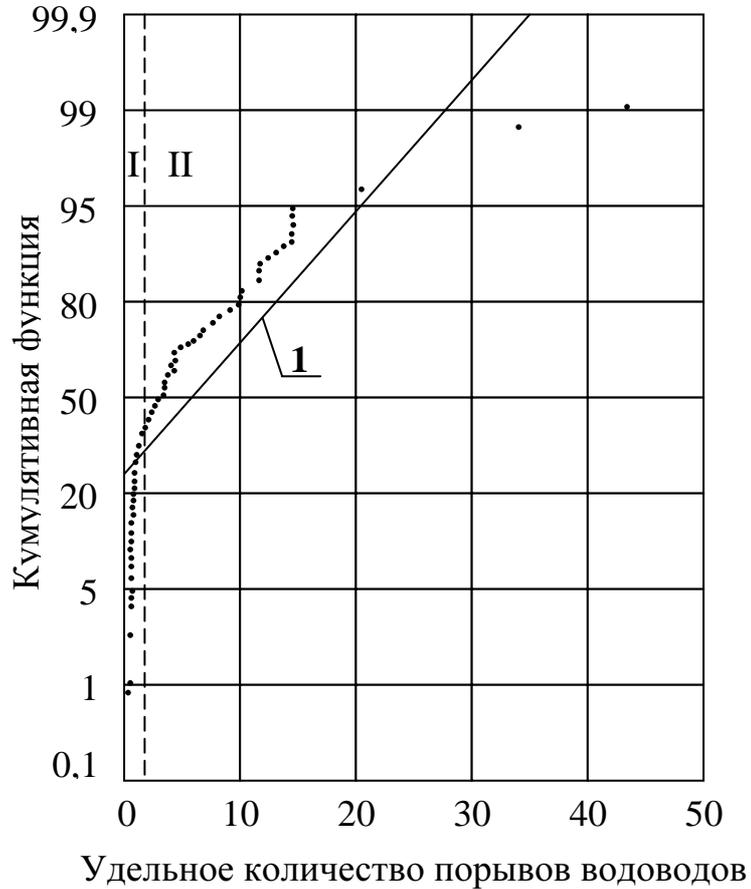


Рис. 3.3. Нормальная вероятностная сетка для общей выборки

Таблица 3.2

Результаты тестирования данных по порывам водоводов г. Уфы по критерию Колмогорова-Смирнова на соответствие нормальному закону распределения

Показатель	Числовое значение
Максимальное положительное отклонение	0,24335
Максимальное отрицательное отклонение	0,261036
Отклонение выборки от нормального распределения	0,261036
Доверительная вероятность нормальности данных	8,34262E-5

Как видно из таблицы, доверительная вероятность принадлежности распределения экспериментальных данных нормальному закону близка к нулю (0,000083), что подтверждает вышесказанное.

На основании вышеизложенного, для более наглядного представления выборочных данных по порывам водоводов, был использован метод нормальной вероятностной бумаги (вероятностной сетки ГОСТ 11.008-84) [20] заключающийся в том, что по оси «X» также откладывается удельное количество отказов, а по оси «Y» процент накопленных частот (кумулятивная функция). Причём ось «Y» построена в соответствии с нормированной центрированной функцией нормального распределения. Прямая на таком графике соответствует нормальному распределению. Для графического определения оценок параметров распределения порывов водоводов г. Уфы была построена вероятностная сетка, изображённая на рис. 3.3.

Как видно из приведённых графиков, прямая 1, построенная с помощью метода наименьших квадратов и соответствующая нормальному распределению, не совпадает с наблюдаемыми значениями. В левой и правой частях графика находятся выборочные значения, лежащие практически на прямых и, соответственно, подчиняющиеся закону распределения близкому к нормальному. Точка перегиба графика объясняется, по видимому, с более жёсткими условиями эксплуатации водоводов (факторы коррозии и

блуждающих токов, подвижки грунта и др.). Рассмотрим подробнее левую и правую части графиков.

Для левой части графика (частота порывов 4 и менее) суммарная статистика отказов приведена в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Суммарная статистика отказов г. Уфы (область I)

Показатель	Числовое значение
Средняя	1,29373
Медиана	0,9
Мода	0,3
Геометрическая средняя	0,907308
Дисперсия	1,18775
Стандартная ошибка	1,08984
Minimum	0,2
Maximum	4
Асимметрия	1,15821
Экссесс	0,33561

Кроме того, для области I была построена частотная гистограмма удельного количества порывов водоводов г. Уфы (рис. 3.4). По оси «Y» откладывались частоты отказов, по оси «X» - удельное количество порывов. Сплошной линией проведена кривая плотности нормального распределения с параметрами подобранными для рассматриваемой выборки. Как следует из приведённого графика, распределение порывов в большей степени близко к нормальному закону.

Область I может быть разделена на две подобласти. Суммарное распределение может рассматриваться как суперпозиция нескольких независимых распределений.

Результаты тестирования выборки с помощью критерия Колмогорова-Смирнова приведены в табл. 3.4.

Как видно из таблицы, доверительная вероятность принадлежности распределения экспериментальных данных по нормальному закону выше, чем

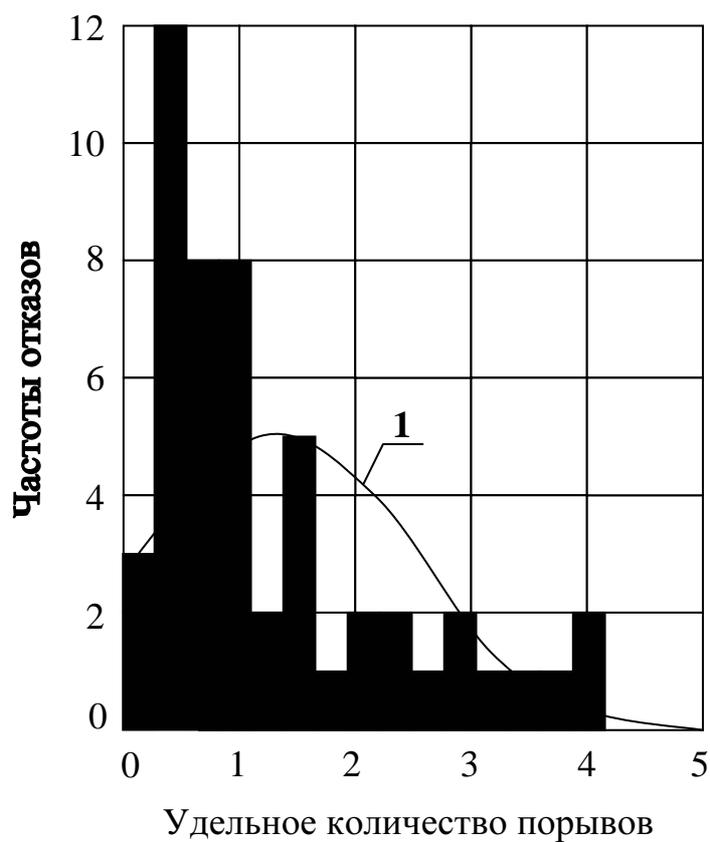


Рис. 3.4 Частотная гистограмма для области I



Рис. 3.5. Нормальная вероятностная сетка для области I

для общей статистики порывов, однако недостаточна для однозначности определения закона распределения.

Таблица 3.4

Результаты тестирования данных по порывам водоводов г. Уфы (область I) по критерию Колмогорова-Смирнова на соответствие нормальному закону распределения

Показатель	Числовое значение
Максимальное положительное отклонение	0,17839
Максимальное отрицательное отклонение	0,157792
Отклонение выборки от нормального распределения	0,17839
Доверительная вероятность нормальности данных	0,0778595

Для графического определения оценок параметров распределения порывов водоводов г. Уфы (область I) была построена вероятностная сетка, изображённая на рис. 3.5.

Как видно из приведённых графиков, прямая 1, построенная с помощью метода наименьших квадратов и соответствующая нормальному распределению, не совпадает с большей частью наблюдаемых значений. В левой и правой частях графика находятся выборочные значения, лежащие практически на прямых и, соответственно, подчиняющиеся закону распределения, близкому к нормальному.

Таким образом, область I может быть разбита на две подобласти Ia и Ib, в которых порывы водоводов имеют различный механизм.

Суммарная статистика отказов для области Ib приведена в табл. 3.5

Таблица 3.5

Суммарная статистика отказов г. Уфы (область Ib)

Показатель	Числовое значение
Средняя	2,28182
Медиана	2,15
Мода	1,4
Геометрическая средняя	2,09141
Дисперсия	0,937749
Стандартная ошибка	0,988374

Minimum	1,1
Maximum	4
Эксцесс	-1,03252
Асимметрия	0,509237

Кроме того, для области Ib была построена частотная гистограмма удельного количества порывов водоводов г. Уфы (рис. 3.6). По оси «Y» откладывались частоты отказов, по оси «X» - удельное количество порывов. Сплошной линией проведена кривая плотности нормального распределения с параметрами подобранными для рассматриваемой выборки. Как это следует из приведённой таблицы и графика, распределение порывов близко к нормальному закону. Однако значение моды отличается от величин средней и медианы. Коэффициенты асимметрии и эксцесса имеют сравнительно большое значение. Поэтому дополнительно было проведено тестирование по критерию Колмогорова-Смирнова, результаты которого приведены в табл. 3.6.

Таблица 3.6

Результаты тестирования данных по порывам водоводов г. Уфы (область Ib) по критерию Колмогорова-Смирнова на соответствие нормальному закону распределения

Показатель	Числовое значение
Максимальное положительное отклонение	0,168403
Максимальное отрицательное отклонение	0,111153
Отклонение выборки от нормального распределения	0,163403
Доверительная вероятность нормальности данных	0,938835

Как видно из таблицы, доверительная вероятность принадлежности распределения экспериментальных данных нормальному закону близка к единице. На этой основе можно сделать заключение о принадлежности выборки нормальному закону.

Для графического определения оценок параметров распределения порывов

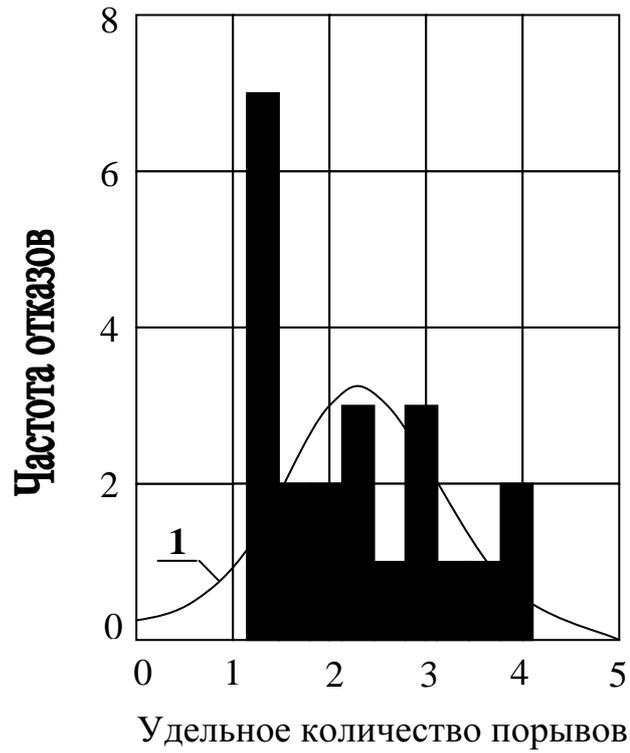


Рис. 3.6. Частотная гистограмма для области 1b

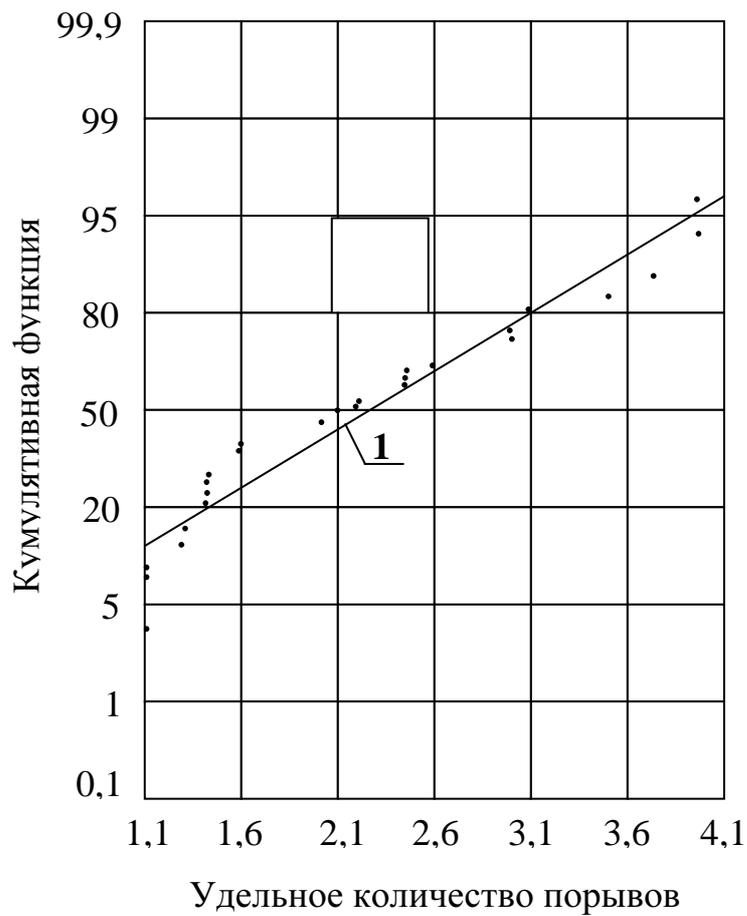


Рис. 3.7. Нормальная вероятностная сетка для области 1b

водоводов г. Уфы (область Ib) была построена вероятностная сетка, изображённая на рис. 3.7.

Как видно из приведённых графиков, прямая 1, построенная с помощью метода наименьших квадратов и соответствующая нормальному закону распределения, совпадает с большей частью наблюдаемых значений.

Суммарная статистика отказов для подобласти Ia приведена в табл. 3.7.

Таблица 3.7

Суммарная статистика отказов г. Уфы (область Ia)

Показатель	Числовое значение
Средняя	0,544138
Медиана	0,5
Мода	0,3
Геометрическая средняя	0,482081
Дисперсия	0,0686108
Стандартная ошибка	0,261937
Minimum	0,2
Maximum	1,04
Асимметрия	0,412351
Эксцесс	-1,0964

Кроме того, для области Ia была построена частотная гистограмма удельного количества порывов водоводов г. Уфы (рис. 3.8). По оси «Y» откладывались частоты отказов, по оси «X» - удельное количество порывов. Сплошной линией проведена кривая плотности нормального распределения с параметрами подобранными для рассматриваемой выборки.

Как это следует из приведённой таблицы и графика, распределение порывов близко к нормальному. Однако коэффициенты асимметрии и эксцесса имеют относительно высокие значения. Поэтому дополнительно было проведено тестирование по критерию Колмогорова-Смирнова, результаты которого приведены в табл. 3.8.

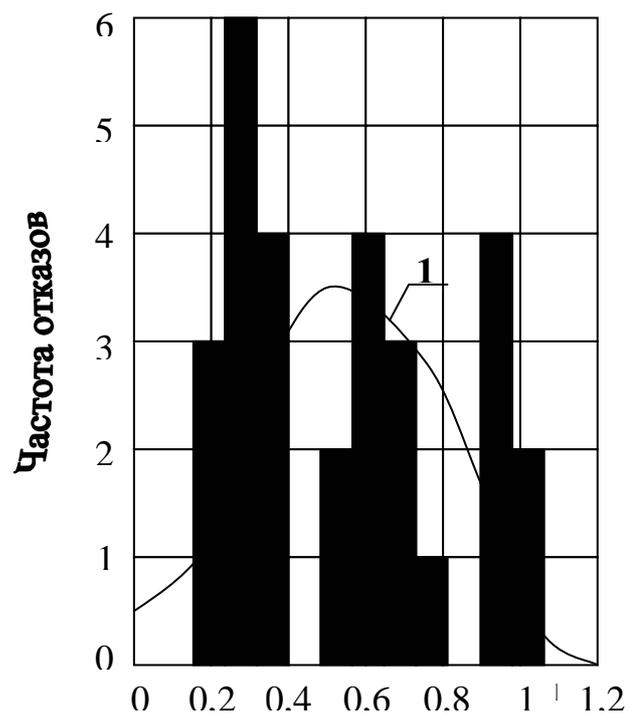


Рис. 3.8. Частотная гистограмма для области Ia

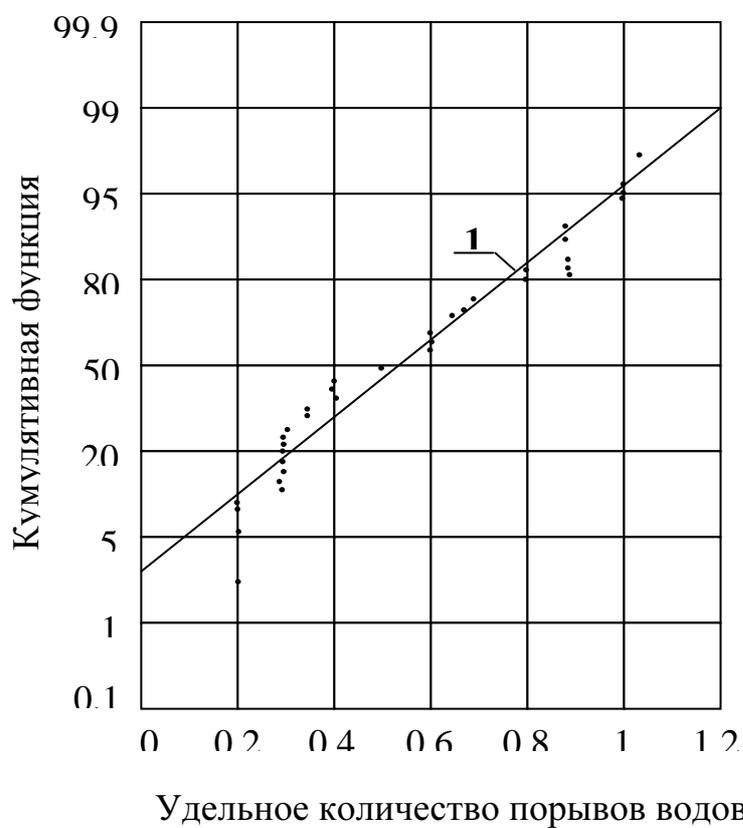


Рис.3.9. Нормальная вероятностная сетка для области Ia

Результаты тестирования данных по порывам водоводов г. Уфы (область Ia) по критерию Колмогорова-Смирнова на соответствие нормальному закону распределения

Показатель	Числовое значение
Максимальное положительное отклонение	0,157213
Максимальное отрицательное отклонение	0,119757
Отклонение выборки от нормального распределения	0,157213
Доверительная вероятность нормальности данных	0,470474

Как видно из таблицы, доверительная вероятность принадлежности распределения экспериментальных данных нормальному закону близка и достаточно высока.

Для графического определения оценок параметров распределения порывов водоводов г. Уфы (область Ia) была построена вероятностная сетка, изображённая на рис. 3.9.

Как видно из приведённых графиков, прямая 1, построенная с помощью метода наименьших квадратов и соответствующая нормальному распределению, совпадает с большей частью наблюдаемых значений.

Для правой части графика (частота порывов более 4) суммарная статистика отказов приведена в табл. 3.9.

Таблица 3.9

Суммарная статистика отказов г. Уфы (область II)

Показатель	Числовое значение
Средняя	13,3043
Медиана	12
Мода	12
Геометрическая средняя	11,3103
Дисперсия	82,0086
Стандартная ошибка	9,05586
Minimum	4,5
Maximum	44
Асимметрия	2,28917

Показатель	Числовое значение
Эксцесс	5,99214

Кроме того, для области II была построена частотная гистограмма удельного количества порывов водоводов г. Уфы (рис. 3.10). По оси «Y» откладывались частоты отказов, по оси «X» - удельное количество порывов. Сплошной линией проведена кривая плотности нормального распределения с параметрами подобранными для рассматриваемой выборки.

Как следует из приведённой таблицы и графика, распределение порывов в большей степени близко к нормальному. Однако значение коэффициентов асимметрии и эксцесса не соответствует нормальному закону. Область II может быть разделена на две подобласти. Суммарное распределение может рассматриваться как суперпозиции нескольких независимых распределений.

Результаты тестирования выборки с помощью критерия Колмогорова-Смирнова приведены в табл. 3.10.

Таблица 3.10

Результаты тестирования данных по порывам г. Уфы (область II) по критерию Колмогорова-Смирнова на соответствие нормальному закону распределения

Показатель	Числовое значение
Максимальное положительное отклонение	0,295296
Максимальное отрицательное отклонение	0,16547
Отклонение выборки от нормального распределения	0,295296
Доверительная вероятность нормальности данных	0,0362239

Как видно из таблицы, доверительная вероятность принадлежности распределения экспериментальных данных нормальному закону выше, чем для общей статистики порывов, однако недостаточна для однозначного определения закона распределения.

Для графического определения оценок параметров распределения порывов водоводов г. Уфы (область II) была построена вероятностная сетка,

изображённая на рис. 3.11.

Как видно из приведённых графиков, прямая 1, построенная с помощью метода наименьших квадратов и соответствующая нормальному распределению, не совпадает с большей частью наблюдаемых значений. В левой и правой частях графика находятся выборочные значения, лежащие практически на прямой и, соответственно, подчиняющиеся закону распределения близкого к нормальному.

Таким образом, область II может быть разбита на две подобласти IIa и IIb, имеющие различный механизм разрушения. Точки, соответствующие удельному количеству порывов более 15 лежат практически на одной прямой, однако имеющаяся выборка для таких значений не представительна для определения статистических параметров. Поэтому статистические расчёты проводились только для области IIa, результаты которого приведены ниже.

Таблица 3.11

Суммарная статистика отказов г. Уфы (область IIa)

Показатель	Числовое значение
Средняя	10,4
Медиана	11
Мода	12
Геометрическая средняя	9,71149
Дисперсия	12,9537
Стандартная ошибка	3,59912
Minimum	4,5
Maximum	15
Асимметрия	-0,294237
Эксцесс	-1,21443

Кроме того, для области IIa была построена частотная гистограмма удельного количества порывов водоводов г. Уфы (рис. 3.12). По оси «Y» откладывались частоты отказов, по оси «X» - удельное количество порывов. Сплошной линией проведена кривая плотности нормального распределения с параметрами подобранными для рассматриваемой выборки.

Как это следует из приведённой таблицы и графика, распределение

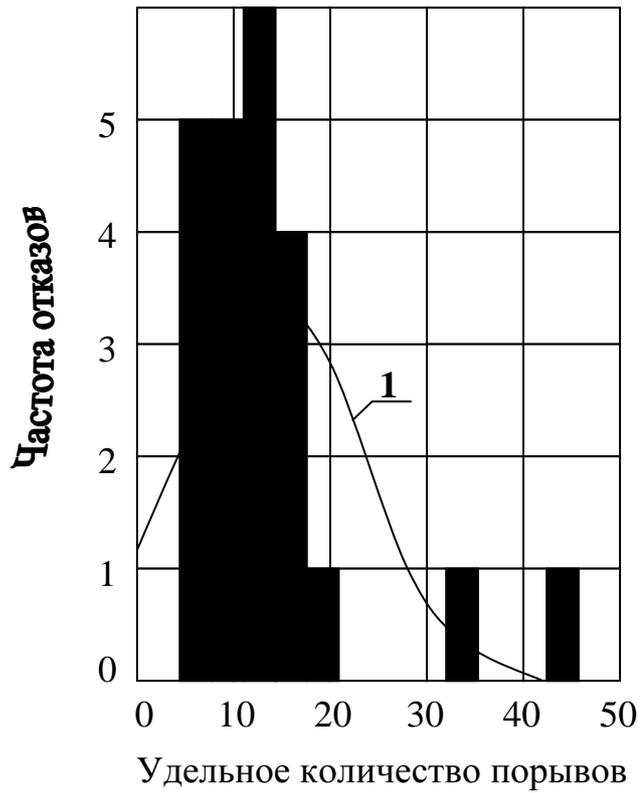


Рис. 3.10. Частотная гистограмма для области II

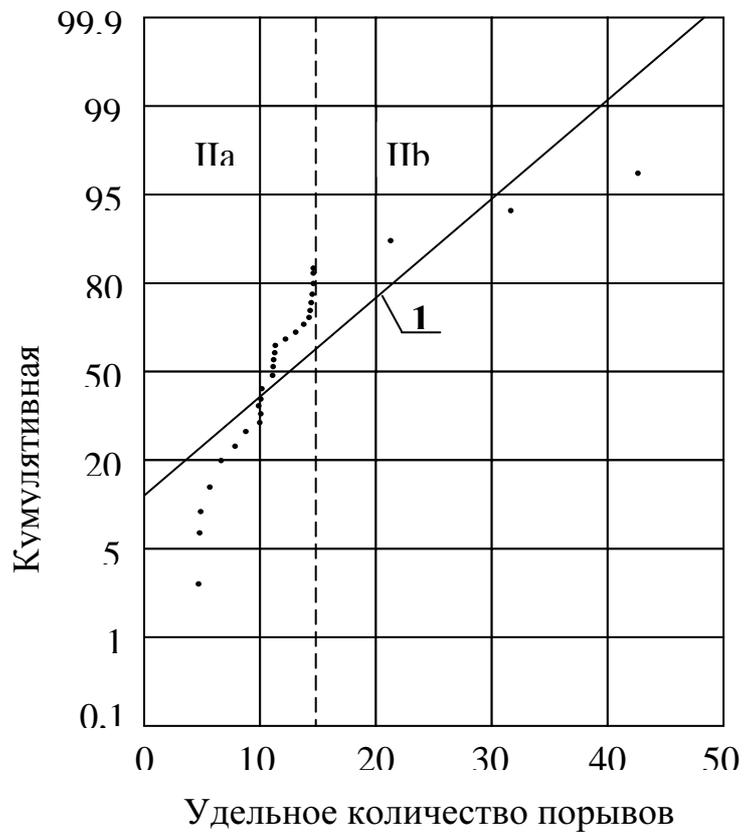


Рис. 3.11. Нормальная вероятностная сетка для области II

порывов близко к нормальному. Коэффициент эксцесса имеет сравнительно большое значение. Поэтому дополнительно было проведено тестирование по критерию Колмогорова-Смирнова, результаты которого приведены в табл. 3.12.

Таблица 3.12

Результаты тестирования данных по порывам водоводов г. Уфы (область Па) по критерию Колмогорова-Смирнова на соответствие нормальному закону распределения

Показатель	Числовое значение
Максимальное положительное отклонение	0,10547
Максимальное отрицательное отклонение	0,17168
Отклонение выборки от нормального распределения	0,17168
Доверительная вероятность нормальности данных	0,999245

Как видно из таблицы, доверительная вероятность принадлежности распределения экспериментальных данных нормальному закону близка к единице. На этой основе можно сделать заключение о принадлежности выборки нормальному закону распределения.

Для графического определения оценок параметров распределения порывов водоводов г. Уфы (область Па) была построена вероятностная сетка, изображённая на рис. 3.13.

Как видно из приведённых графиков, прямая 1, построенная с помощью метода наименьших квадратов и соответствующая нормальному распределению, совпадает с большей частью наблюдаемых значений.

На основании данного статистического подхода, с использованием введённого параметра удельного количества аварий, введено разграничение между участками водоводов, природа разрушений которых различна. Экспериментальные данные показывают, что этими механизмами разрушения являются общая коррозия и электрокоррозия (блуждающие токи). Следует отметить, что при наложении электрокоррозии, при соответствующем знаке поляризации, на общую коррозию, скорость развития разрушения значительно повышается. Как это следует из соответствующего их анализа высокие

скорости разрушения водоводов (область II) наблюдаются на участках, подверженных электрокоррозии. Причём, аномально высокие скорости развития разрушения имеют место на ограниченном числе участков. Такие участки требуют экстренного проведения мероприятий по их защите. Следует отметить, что методы борьбы с различными видами воздействий на водоводы, приводящих к отказам, в частности, с коррозией могут значительно отличаться. Так, например, методы борьбы с подземной коррозией, использующие катодную защиту, в поле блуждающих токов значительной величины могут оказаться неэффективными. Более того, возможен выход из строя станций катодной защиты, поэтому весьма актуальным в дополнении к статистическому анализу является выявление механизмов разрушения водоводов.

Таким образом, на основании проведённого в данном разделе анализа могут быть сделаны следующие основные выводы:

1. В качестве критерия первоочерёдности защиты водоводов может быть использовано статистическое разделение выборок по критерию нормальности (максимума энтропии).

2. Статистический анализ показал, что имеется четыре независимых (по парно стохастически связанных) механизма разрушений водоводов г. Уфы. На основании данного положения может быть предложена следующая очерёдность мероприятий по защите водоводов от порывов: экстренная, первая, вторая и третья очереди.

3. Первоочерёдной защите подлежат водоводы, удельная частота порывов которых составляет 4 и более.

4. Участки, имеющие значения удельного количества порывов более 15, требуют экстренных мер защиты.

5. Участки, имеющие удельное количество порывов от 1.1 до 4 и менее 1.1, должны защищаться во вторую и третью очереди соответственно.

Проведенный статистический анализ разрушений г. Уфы позволил установить очерёдность защиты трубопроводов. Однако, с его помощью

затруднительно выявить причины выхода из строя водоводов. Поэтому, дополнительно было проведено электрометрическое обследование рельсовых путей и подземных коммуникаций г. Уфы, в связи с тем, что оно позволяет выявить возможность возникновения блуждающих токов, и как следствие, электрокоррозию. Прямое измерение потенциалов "рельс-земля" и "сооружение-земля" позволяет получить наиболее полную информацию о наличии катодных анодных и знакопеременных зон. Полученные данные являются исходными для проектирования и сооружения систем защиты водоводов от коррозии.

Измерение потенциалов "рельс-земля" и "сооружение-земля" проводилось в соответствии с ГОСТ 9.602-89 [22]. Данный стандарт определяет, что опасным для сооружения является нахождение его потенциала в анодной и знакопеременной зоне. Это является основанием для проведения проектирования и сооружения систем электрохимзащиты.

Расчет минимальных, максимальных и средних значений потенциалов "рельс-земля" и "сооружение-земля" проводили на IBM совместимом компьютере. Программы были составлены на языке "Турбо-Бейсик".

Как показал анализ расчетов большая опасность в коррозионном отношении имеется практически для всех сетей водоснабжения, расположенных в районе вблизи электрифицированного транспорта..

Коррозионная опасность определяется воздействием полей блуждающих токов от рельсовой сети трамвая и железнодорожного транспорта на водоводы в зонах максимальных отрицательных значениях на рельсах. Менее коррозионно-опасными являются водоводы, расположенные на удалении от трамвайных путей. Коррозионная опасность этих участков, в основном, обусловлена коррозионной активностью грунтов, а в ряде случаев работой существующих средств электрохимзащиты, не включенных в систему защиты "Уфаводоканал".

Анализируя потенциальные диаграммы за ряд лет и учитывая частичные изменения режимов тяговых подстанций были определены участки которые являются коррозионно-опасными.

Критерием эффективности защиты подземных металлических сооружений является минимальный защитный потенциал, который должен быть не менее минус 0.85 В (по абсолютной величине) по медносulfатному электроду сравнения. В этой связи с целью выбора оптимальных средств электрохимической защиты от коррозии водоводов Уфимского городского водоснабжения были проведены суточные измерения потенциалов «рельс-земля», что позволило получить наиболее полную информацию о наличии катодных, анодных и знакопеременных зон и выявить поле блуждающих токов.

Таким образом, используемые результаты замеров электродных потенциалов и статистический подход при анализе отказов сложноразветвленных трубопроводных сетей городского водоснабжения позволяют определить очередность проведения противокоррозионных мероприятий и выбрать оптимальный способ электрохимической защиты (на стадии проектных проработок) включающих установку поляризационных дренажей и катодных станций оптимальной мощности [38, 41, 53, 58, 77].

Очевидно, разработанный метод может быть использован и для других подземных металлических сооружений подверженных почвенной коррозии, в том числе в условиях воздействия поля блуждающих токов.

4. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ОТВАЛА ГОРНО-РУДНОГО КОМБИНАТА В КАЧЕСТВЕ ОСНОВЫ АКТИВАТОРА ПРИ ПРОТЕКТОРНОЙ ЗАЩИТЕ ПОДЗЕМНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТРУБОПРОВОДОВ ОТ КОРРОЗИИ

Защита трубопроводов от почвенной коррозии с использованием протекторов при определённых условиях эффективна, проста, удобна. Её можно применять в районах, где отсутствуют источники электроэнергии. Протекторная защита допускается в отсутствие блуждающих токов или в случаях, когда блуждающие токи оказывают анодные или знакопеременные смещения потенциалов подземных сооружений, средние значения которых не превышают 0,1 В [7].

Эффективность протекторной защиты зависит от физико-химических свойств протектора и внешних факторов, обуславливающих режим его использования.

Свойства протектора определяются составом сплава, массой и формой, способом изготовления, электрохимическим эквивалентом, составом активатора, коэффициентом использования, стационарным потенциалом в грунте и т.д.

К внешним факторам относятся степень оголения металла сооружения, подлежащего защите, параметры, определяющие грунтовые условия, расположение протектора относительно защищаемого сооружения, а также требуемый период времени, в течение которого должно быть обеспечено непрерывное действие защиты [45].

Для протекторов наиболее часто используют магний, алюминий и цинк. Чистые (нелегированные) металлы Mg, Al, Zn не получили практического применения для защиты. Это объясняется тем, что магний имеет сравнительно низкую токоотдачу, а алюминий и цинк склонны к пассивации. Коэффициент использования, например, чистого магния на 10-20 % ниже, чем коэффициент

использования специальных сплавов для протекторов, созданных на его основе. Введение добавок позволяет получить сплавы с более отрицательными, чем у основного металла, потенциалами, оставаться активными, равномерно корродировать и не становиться пассивным в среде, где этот сплав используется для катодной защиты сооружения. При этом стремятся исключить или максимально ограничить содержание включений, приводящих к самокоррозии протекторов.

Для протекторов при защите подземных сооружений наиболее часто используют магниевые сплавы. В магниевые сплавы для протекторов вводят добавки алюминия, цинка и марганца. Алюминий увеличивает эффективность сплава, улучшает его литейные свойства и повышает механические характеристики, хотя при этом потенциал немного снижается. Цинк облагораживает сплав и повышает эффективность, уменьшает вредное влияние таких примесей, как медь и никель, позволяя повышать их критическое содержание в сплаве. Марганец вводят при плавке сплава для осаждения примесей железа. Кроме того, он позволяет повысить токоотдачу и сделать более отрицательным потенциал протектора [45].

Литые протекторы из магниевых сплавов дают разность потенциалов относительно стальной катодно защищённой поверхности 0,6 В, поэтому их применяют для защиты подземных металлических сооружений в грунтах с удельным сопротивлением $\rho \leq 50$ Ом·м. Стержневые магниевые протекторы используются в грунтах с $\rho \leq 80$ Ом·м [45].

Используемый в качестве протекторного материала цинк должен характеризоваться высокой чистотой (99,99 %, содержание железа менее 0,03 %). Присутствие в протекторе таких примесей, как железо, медь и свинец, очень вредно сказывается на его работе, так как при этом происходит пассивация поверхности цинка, в результате чего уменьшается сила поляризующего тока в защитной системе и снижается токоотдача [13].

Для улучшения протекторных свойств цинка в него вводят

незначительные количества легирующих добавок. Положительный эффект, например, достигается при введении в цинк: 1-0,5 % Al и 0,02-0,15 % Cd; 0,1-0,15 % Hg; 0,5 % Al и 0,1 % Si.

К достоинствам цинковых протекторов относятся высокий коэффициент полезного действия и небольшая стоимость, к недостаткам - незначительная разность между стационарным потенциалом стальных конструкций ($\approx 0,25$ В).

Эффективность работы протектора увеличивается при установке его в специальные смеси-заполнители, называемые активаторами. Активаторы служат для снижения самокоррозии протектора, уменьшения анодной поляризуемости, уменьшения сопротивления растеканию тока с протектора, предотвращения образования плотных окисных плёнок на поверхности протектора. Применение активатора повышает КПД протектора, т.е. срок его службы, и стабилизирует ток в цепи протекторной установки [62].

Для обеспечения постоянного значения поляризационного защитного потенциала и уменьшения удельного сопротивления грунта, окружающего протектор, все выпускаемые активаторы содержат сернокислую соль натрия (для магниевых и цинковых анодов) или смесь сернокислых солей натрия, магния, кальция (для магниевых и алюминиевых анодов). В зависимости от удельного сопротивления грунта и типа протектора эти соли составляют от 5 до 50 % от массы активатора.

Для предотвращения вымывания солей в процессе работы протекторной установки в активатор вводят глину и гипс. Гипс препятствует образованию на поверхности протектора слоёв с плохой проводимостью, что способствует равномерному износу протектора. Гипс имеет значительно меньшую, чем Na_2SO_4 , растворимость в воде, благодаря чему в активаторе поддерживается определённая концентрация сульфат-ионов. Стабильная работа протекторной установки обеспечивается при установке протекторов ниже глубины промерзания или высыхания грунта. Bentonит вводят для поддержания в активаторе влаги, кроме того, глина замедляет растворение солей грунтовыми

водами, тем самым сохраняя постоянной проводимость и удлиняя срок службы протектора.

Таблица 4.1

Состав активаторов цинковых протекторов по массе, %

Номер рецепта	Гипс	Бентонит	Na ₂ SO ₄	Условия применения
1	25	75	—	В грунтах с удельным сопротивлением 20 Ом·м
2	50	45	5	То же
3	75	20	5	В грунтах с удельным сопротивлением от 20 до 100 Ом·м

Активатор доводят до вязкой консистенции, добавляя воду перед установкой протектора. На один протектор используют 40-60 кг активатора. Активатор может поставляться в виде готовой смеси или приготавливаться на месте установки протектора [62].

Для увеличения эффективности действия протекторной защиты трубопроводных систем и других металлоконструкций исследована возможность использования минералосодержащих компонентов отвала Башкирского медно-серного комбината (БМСК) в качестве активирующей составляющей материала протектора.

Удельное электрическое сопротивление сухого отвала определенное по четырехэлектродной схеме [19,30,51] составляет 20 Ом·м, рН водной вытяжки 3.5-4.5. При влажности 25% и более удельное сопротивление отвала резко снижается и не превышает 1.0 Ом· м. Химический состав отвала включает в себя до 30% сернистых соединений, а также в небольших количествах медь, цинк, вольфрам, молибден, свинец, кобальт, кадмий, и некоторые другие металлы. Плотность отвала Башкирского медно-серного комбината (БМСК) составляет 1.9 г/см³.

Наличие в составе шлама сернистых соединений (в основном солей, в том числе большого количества легкорастворимых) и слабокислое значение рН

приводит к образованию легкорастворимых в грунтовых водах продуктов коррозии магниевых и цинковых протекторов, что обеспечивает поддержание постоянным потенциал протектора и уменьшает удельное сопротивление грунта, окружающего протектор. Это приводит к уменьшению сопротивлению растекания тока с протектора и его анодной поляризуемости.

Наличие не связанных в соли и оксиды металлов наряду с полной проводимостью приводит так же к сложной проводимости шлама и созданию нужного переходного сопротивления между протектором и грунтом, которое в свою очередь стабилизирует переходное сопротивление "протектор-грунт" в процессе анодного растворения протектора и повышает срок его службы, токоотдачу, а следовательно и эффективность работы протектор.

Вышесказанное делает возможным применение отвала (шлама) БМСК в качестве основы или одного из активных компонентов для его использования в качестве активатора при протекторной защите ПМС.

Наличие в отвале сернистых соединений позволяет сделать предположение о возможности его использования в качестве активатора протекторной защиты трубопроводов. В табл. 4.1 приведены основные электродные реакции для сернистых соединений, содержащихся в отвале.

Таблица 4.2

Возможные электродные реакции для сернистых соединений

Электродный процесс	Стандартный электродный потенциал, В по НВЭ
$S_2^{2-} = 2S + 2e^-$	-0,476
$HS^- = S + H^+ + 2e^-$	-0,005

Продолжение табл.4.2

$2S^{2-} + 3H_2O = S_2O_3^{2-} + 6H^+ + 8e^-$	-0,006
$5HS^- = S_5^{2-} + 5H^+ + 8e^-$	0,003
$2SO_3^{2-} = S_2O_6^{2-} + 2e^-$	0,026

$4\text{HS}^- = \text{S}_4^{2-} + 4\text{H}^+ + 6\text{e}^-$	0,033
$3\text{HS}^- = \text{S}_3^{2-} + 3\text{H}^+ + 4\text{e}^-$	0,097
$\text{S}^{2-} + 4\text{H}_2\text{O} = \text{SO}_4^{2-} + 8\text{H}^+ + 8\text{e}^-$	0,149
$\text{S}^{2-} + 3\text{H}_2\text{O} = \text{SO}_3^{2-} + 6\text{H}^+ + 6\text{e}^-$	0,231
$\text{H}_2\text{S} + 4\text{H}_2\text{O} = \text{HSO}_4^- + 9\text{H}^+ + 8\text{e}^-$	0,289
$2\text{HS}^- = \text{S}_2^{2-} + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$	0,298
$\text{H}_2\text{S} + 4\text{H}_2\text{O} = \text{SO}_4^{2-} + 10\text{H}^+ + 8\text{e}^-$	0,303
$\text{H}_2\text{S}_{(\text{газ})} + 4\text{H}_2\text{O} = \text{SO}_4^{2-} + 8\text{H}^+ + 6\text{e}^-$	0,311
$\text{S} + 4\text{H}_2\text{O} = \text{SO}_4^{2-} + 8\text{H}^+ + 6\text{e}^-$	0,357
$\text{S}_2\text{O}_4^{2-} + 2\text{H}_2\text{O} = 2\text{SO}_3^{2-} + 4\text{H}^+ + 2\text{e}^-$	0,416
$\text{S} + 3\text{H}_2\text{O} = \text{H}_2\text{SO}_3 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$	0,449
$\text{S} + 2\text{H}_2\text{O} = \text{SO}_{2(\text{газ})} + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$	0,451
$\text{S}_2\text{O}_3^{2-} + 3\text{H}_2\text{O} = 2\text{SO}_3^{2-} + 6\text{H}^+ + 4\text{e}^-$	0,705
$\text{S} + \text{HO} = \text{SO}_{(\text{газ})} + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$	1,507
$2\text{SO}_4^{2-} = \text{S}_2\text{O}_8^{2-} + 2\text{e}^-$	2,010

Как видно из таблицы 4.2, все реакции сопровождаются выделением свободных электронов. Электродные процессы, имеющие отрицательный потенциал, способствуют увеличению токовдачи протектора, а положительный потенциал - уменьшению скорости саморастворения материала протектора. Сочетание этих двух явлений увеличивает эффективность работы протектора.

Для определения возможности применения отвала БМСК в качестве активатора протекторной защиты были сняты анодные поляризационные кривые на цинке, в качестве протектора с использованием стандартного активатора (см. п.1.3); в отвале БМСК и катодные поляризационные кривые на стали 10 в качестве металла защищаемого сооружения. Методика проведения исследований приведены в п.2.4.

Результаты проведенных исследований приведены на рис. 4.1,4.2.

Как показывает анализ результатов приведенных исследований предлагаемый активатор для цинкового протектора увеличивает его токоотдачу примерно на 10-13%, тогда как у типового активатора это увеличение составляет порядка 5-6%.

Защитный потенциал цинкового анода в отвале БМСК составляет минус 1,09 В по медносульфатному электроду сравнения МСЭ, а в типовом активаторе минус 1.07 по МСЭ. При этом токоотдача цинкового протектора в отвале БМСК составляет 0.10 мА/см², а в типовом активаторе 0.095 мА/см².

Ток саморастворения рассчитанный по уравнению Штерна-Гири (см.п.2.2), цинкового анода в типовом активаторе составляет 0.02 мА/см², а отвале БМСК 0.015 мА/см².

Таким образом применение предлагаемого активатора при протекторной защите кроме увеличения токоотдачи уменьшает саморастворение гальванического анода, что служит увеличению эффективности работы протектора [16, 54].

На рис. 4.3 приведены результаты длительных (400 часов) сравнительных испытаний предлагаемого и типового активатора для цинкового анода в грунте с удельным сопротивлением 20 Ом·м и влажностью W=25%.

Исследования проводили по методике описанной в п. 2.4. Как видно из анализа результатов проведенных исследований протекторная защита с активатором БМСК выходит на рабочий режим практически не медленно после включения защиты.

Защитный потенциал с активатором БМСК с течением времени практически не облагораживается и составляет не менее (по абсолютной величине) минус 1.0 В по МСЭ. Результаты расчета эффективности протекторной защиты с исследуемым активатором приведены в таблице 4.3.

Выход по току цинкового протектора с активатором БМСК составляет 1100 А·ч/кг. Защитный эффект при использовании активатора БМСК с цинковым анодом не ниже 92%, без активатора примерно 76%. Коэффициент

полезного использования протектора с активатором БМСК составил по опытным данным 99% (без активатора примерно 40%, с типовым активатором примерно 60%).

Как видно из приведенных данных, несмотря на практическое совпадение значений защитного эффекта протекторов с типовым и предлагаемым активаторами, коэффициент полезного использования второго существенно, более чем в 1.5 раза, выше. Это связано с уменьшением саморастворения гальванического анода при использовании активатора БМСК, что, во первых, сокращает непроизводительные потери металла анода, во вторых, свидетельствует о перспективности использования предлагаемого активатора. Это представляется важным в связи с его дешевизной (отход основного производства) и попутным решением экологической проблемы безотходности разработки месторождения. Кроме того, следует отметить, что стабильность режима поддержания защитного потенциала, как это видно из рис.4.3, протектора с предлагаемым активатором существенно выше по сравнению со сравнимаемыми вариантами [39, 40, 53, 56, 58].

Результаты приведенных исследований по возможности применению отвала БМСК при протекторной защите подземным металлических сооружений внедрены в виде стандарта предприятия в АО «Подземметаллзащита» Приложение 1. Одновременно использование отвала в качестве активатора позволяет в значительной мере уменьшить проблему утилизации продукта, загрязняющих окружающую среду.

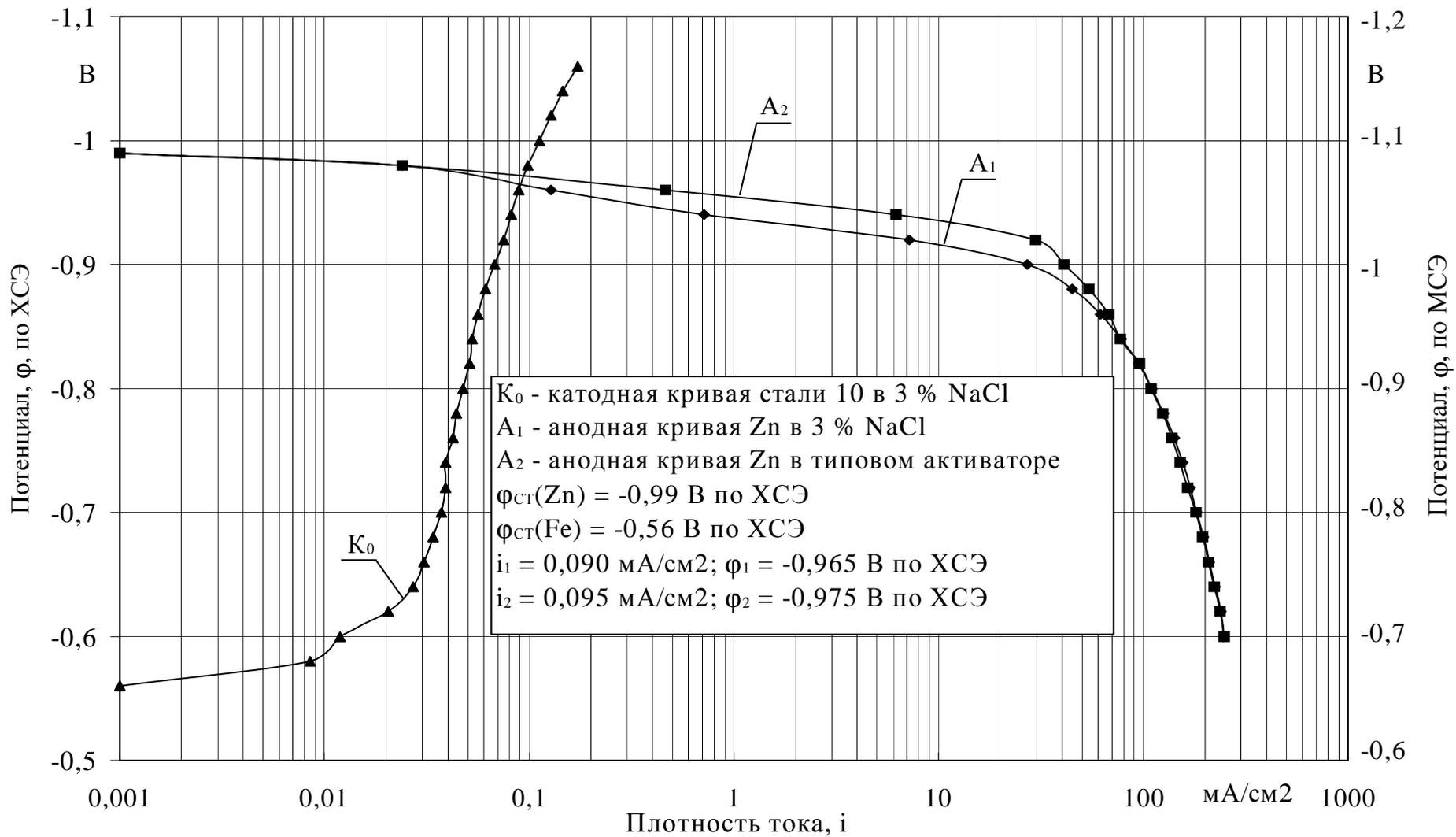


Рис. 4.1. Анодные поляризационные кривые для Zn в 3 %-ном растворе NaCl (A_1) и с типовым активатором (A_2), катодная кривая для стали 10 в 3 %-ном растворе NaCl (K_0).

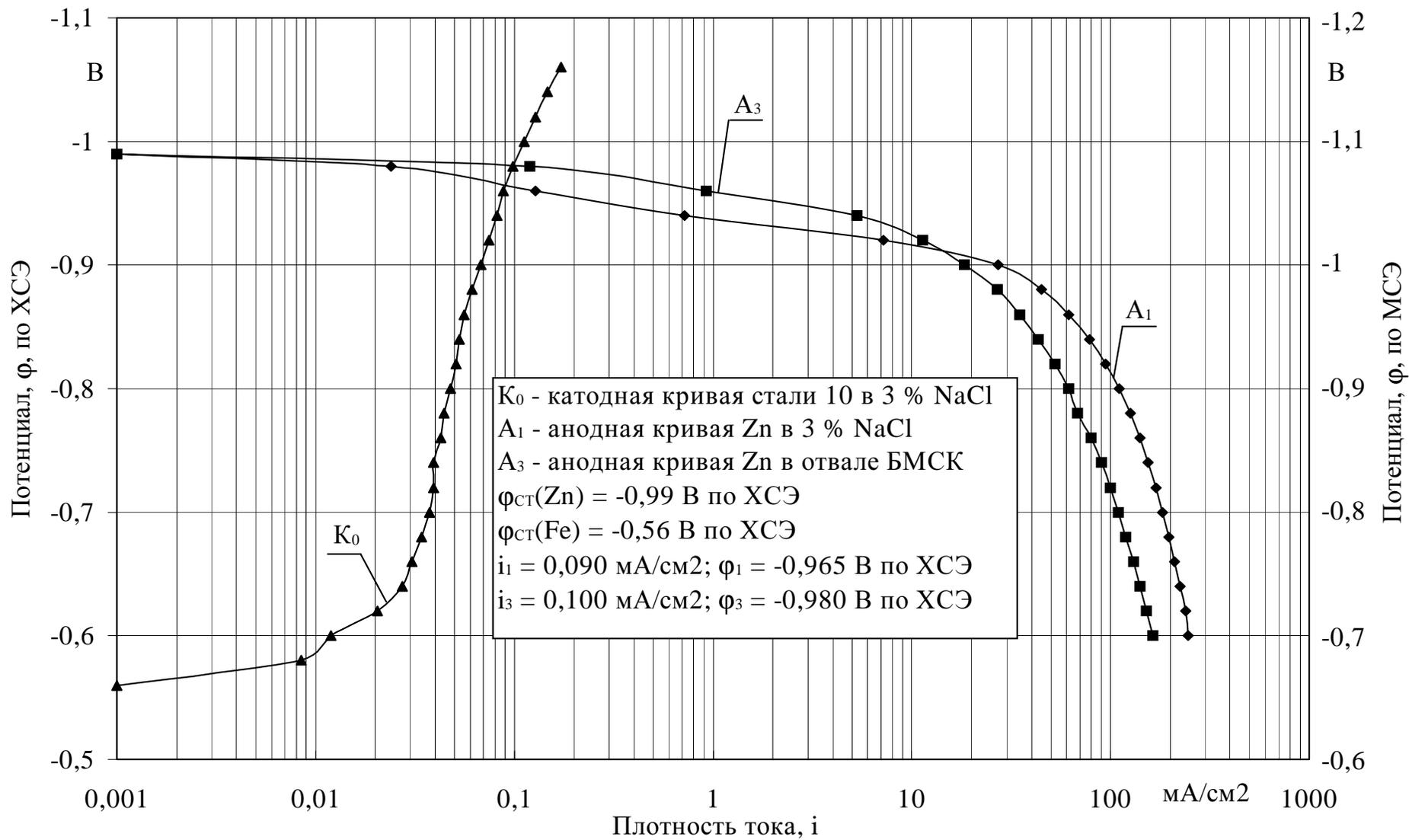


Рис. 4.2. Анодные поляризационные кривые для Zn в 3 %-ном растворе NaCl (A_1) и с активатором БМСК (A_3), катодная кривая для стали 10 в 3 %-ном растворе NaCl (K_0).

Таблица 4.3

Результаты исследований протекторной защиты цинковым анодом

Показатели	В 3 % растворе NaCl		В грунте влажностью W=25 %			
	без защиты	с защитой	без защиты	без активатора	в типовом активаторе	в активаторе БМСК
Скорость коррозии стали 10, $K_m, \text{г}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$	302	45	330	78	26	29
Скорость коррозии анода, $K_m, \text{г}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$		6701		1721	3837	1593
Проникновение коррозии Стали 10, П, мм/год	0,038	0,006	0,042	0,010	0,003	0,004
Проникновение коррозии Анода, П, мм/год		0,940		0,241	0,540	0,223
Защитный эффект, Z, %		85		76	91	92
Коэффициент полезного Использования протектора, $\eta, \%$		86		40	60	99

Рис. 4.3. Изменение разности потенциалов между исследуемым электродом и протектором по времени в различных активаторах при влажности $W = 25\%$

5. АНАЛИЗ ВИДОВ КОРРОЗИОННО-МЕХАНИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ СИЛЬФОННЫХ КОМПЕНСАТОРОВ ТЕПЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ИЗ СТАЛЕЙ ТИПА 18-10 (18-9) ТЕПЛОПРОВОДОВ В УСЛОВИЯХ ПОДЗЕМНОЙ КАНАЛЬНОЙ ПРОКЛАДКИ

Тепловые сети современных промышленных предприятий и городов представляют собой сложные инженерные сооружения, имеющие разветвленную цепь надземных и подземных трубопроводов в основном канальной прокладки. Они являются составной частью системы централизованного или местного теплоснабжения и предназначены для транспорта тепловой энергии от источников тепла к потребителям. В качестве теплоносителя в тепловых сетях используется вода или водяной пар. В РФ для централизованного теплоснабжения (особенно для коммунально-бытового) температура теплоносителя в большинстве случаев превышает 100°C (до 150°C), что в основном и определяет особенности конструкции теплопроводов. В отличие от других (“холодных”) протяженных и сложноразветвленных подземных металлических сооружений теплопроводы в процессе эксплуатации имеют значительные осевые (линейные) перемещения вследствие термического удлинения стали. Температурные колебания в большом диапазоне вызывают знакопеременную и повторно-статическую деформацию металла, что, безусловно, способствует снижению коррозионно-механической прочности и долговечности трубопроводов, в первую очередь за счет уменьшения срока службы изоляционных покрытий и проявления механохимической коррозии и требует применения специальных конструкций для компенсации тепловых перемещений и снятия механических напряжений в металле трубы.

В условиях невозможно самокомпенсации или ее недостаточности применяют в основном три типа компенсирующих устройств: сальниковые, линзовые

и гнутые трубопроводы. Особенности конструкции, условия эксплуатации и основные недостатки таких компенсирующих элементов приведены в главе 1.

Перечисленных выше недостатков лишен разработанный УАП “Гидравлика” для тепловых сетей сильфонный компенсатор (узел компенсирующий металлорукавный, УКМР) изготавливаемый из коррозионностойкой аустенитной хромоникелевой стали типа 18-10 (18-9), позволяющей компенсировать осевые перемещения до 250 мм при рабочем давлении транспортирующей среды до 1.6 МПа. По сравнению с традиционными (сальниковыми) разработанный сильфонный компенсатор допускает значительный перекося осей и не параллельность торцов соединительных трубопроводов, не требует постоянного обслуживания и текущего ремонта, позволяет значительно увеличить расстояние между неподвижными опорами подземных канальных теплопроводов. Это делает весьма перспективным его широкое применение в качестве компенсатора тепловых перемещений теплопроводов, особенно при их подземной канальной прокладке в условиях промышленных предприятий и больших городов.

Особенности конструкции сильфонного компенсатора тепловых перемещений теплопроводов изготовленного из стали типа 18-10 или 18-9 (сварной гибкий гофрированный трубопровод с концевой арматурой и силовой трехслойной оплеткой из той же стали, наличие щелей, зазоров и сварных соединений, обечайка из углеродистой стали), а так же жесткие условия его эксплуатации (паро-воздушная окружающая среда с температурой до 60...80° С, присутствие хлор-ионов, циклические и повторно-статические деформации гофрированной оболочки и силовой оплетки, внутренние и эксплуатационные или технологические напряжения в металле гофра и т.п.) могут привести к сложному совместному сочетанию различных по условиям протекания и характеру разрушения, коррозионным повреждениям и преждевременному аварийному отказу изделия.

Кроме того особенностями эксплуатации и защиты от наружной коррозии теплопроводов (включая сильфонные компенсаторы) является так же сложно-

разветвленное расположение других подземных коммуникаций сопутствующих и пересекающих теплопроводы (водопроводы, газопроводы, кабели электропередач и средств связи) имеющих собственные активные системы защиты (катодная, протекторная, электродренажная), близкое расположение рельсовых путей электрифицированного транспорта, являющихся мощным источником блуждающих токов и т. п.

Следует отметить, что литературные данные по влиянию блуждающих токов на скорость и характер коррозии высоколегированных хромоникелевых сталей (в том числе типа 18-10, 18-9, 18-8) отсутствуют.

Более чем трехлетний опыт эксплуатации сильфонных компенсаторов тепловыми сетями ОАО “Башкирэнерго” показал, что несмотря на высокую функциональную способность таких узлов, имелись отдельные случаи преждевременных отказов гибкой части УКМР.

Типичным примером разрушения гибкой части металлорукавов после примерно полугодовой эксплуатации в одной из технологических колодцев г. Уфы приведен на рис. 5.1.

Анализ причин и характер отказа показал, что разрушение прошло по первому гофру со сварным швом. Трещина развивалась по основному металлу с выходом на отдельных участках в зону термического влияния и сплавления. Излом хрупкий кристаллический. Утонение кромок в месте разрыва не наблюдается. На некоторых участках поверхности излома наблюдается шевронный излом, что свидетельствует о нескольких очагах разрушения [5, 104]. Разрушение началось с наружной поверхности гофра от питтингов находящихся в зоне сплавления сварного шва, в околошовной зоне (зона термического влияния) и на основном металле. На развитие трещины от наружной поверхности гофра вид излома. На участках, примыкающих к внутренней поверхности имеются

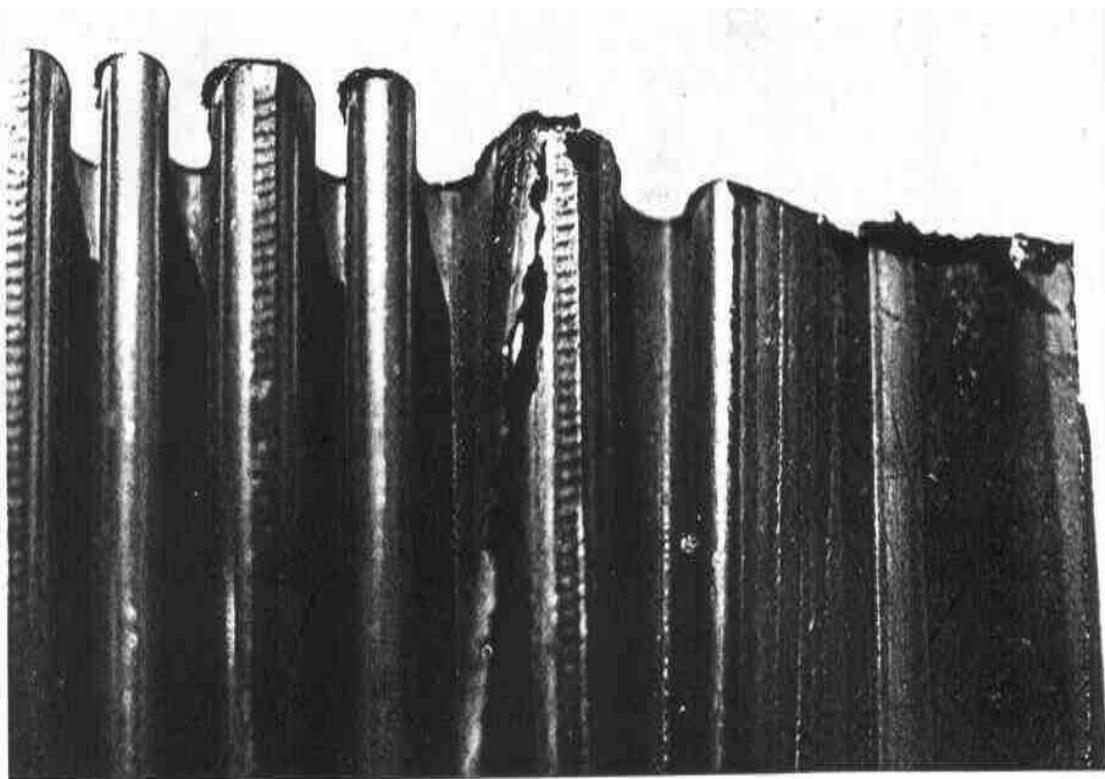


Рис. 5.1 Вид разрушения гибкой части сильфонных компенсаторов городского теплоснабжения

отдельно расположенные губы среза, располагающиеся под углом примерно 45° к образующей. Трещина носит магистральный характер с несущественным ветвлением, что может свидетельствовать о больших величинах прикладываемых деформаций.(рис. 5.2).

Непосредственно с краем шва (один из очагов разрушения) металл имеет явно выраженные цвета побежалости, что хорошо видно под микроскопом (МБС-10) при увеличении в 10...30 раз. Это позволяет предположить, что вблизи сварного шва существует зона провоцирующего нагрева, которая может быть причиной нарушения межкристаллитных связей в стали и привести к межкристаллитной коррозии (МКК), особенно у аустенитных хромоникелевых сталей не стабилизированных титаном или ниобием. По литературным данным [70, 81 и др.] для проявления склонности к МКК для сталей типа 18-10 (18-9)

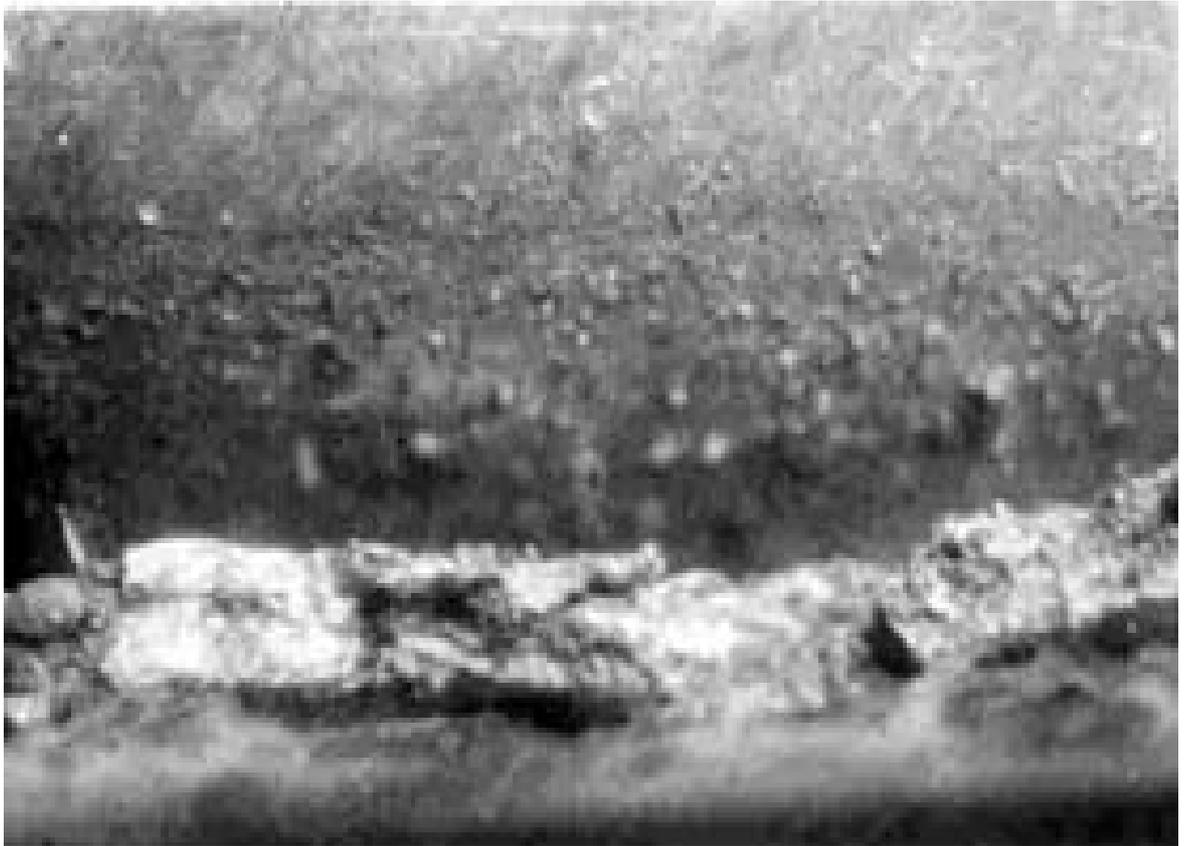


Рис. 5.2 Вид излома по основному металлу

нестабилизированных титаном или ниобием в соответствии с кривыми Роласона (С-образные кривые) достаточно несколько секунд пребывания стали при температуре $600-700^{\circ}\text{C}$. В целом разрушение носит усталостный характер.

Проведенные электрометрические измерения (коррозионная активность грунта, потенциалы “сооружение – земля”, и “рельс – земля” по медносульфатному и стальному электроду сравнения) по ГОСТ [22] непосредственно на компенсаторах и находящихся в данном районе водопровода, газопровода и трамвайных рельсовых путях показали, что на данном участке теплопровода существует явно выраженные знакопеременные (анодно-катодные) или анодные зоны, обусловленные блуждающими токами. Следует отметить, что для магистральных подземных трубопроводов согласно ГОСТ [22] наличие таких зон требует обязательного применения электрохимической защиты от коррозии: электродренажной, катодной или протекторной.

Наличие блуждающих токов может быть вызвано как электрифицированным рельсовым транспортом, так и системами катодной (или протекторной) защиты других подземных металлических сооружений (газопроводов, кабелей связи или линии электропередач, водопроводов) находящихся вблизи и не включенных в систему защиты теплопровода.

Таким образом, учитывая условия эксплуатации сильфона и внешний вид его разрушения, можно констатировать, что причиной преждевременного разрушения гофра является малоцикловая коррозионная усталость за счет концентрации напряжений в местах питтинговой коррозии, обусловленной наличием хлор-ионов, частичной потери пассивности стали и стимулирующего влияния анодной поляризации блуждающими токами.

В этой связи, исходя из приведенного выше анализа возможных видов коррозионно-механического разрушения гибкой части сильфонных компенсаторов тепловых перемещений из сталей типа 18-10 (18-9) в условиях подземной прокладки с учетом преждевременного отказа, были проведены исследования коррозионной стойкости и коррозионно-усталостной долговечности стали 12Х18Н10 в состоянии поставки и после “провоцирующей” термообработки, в том числе при одновременной поляризации анодным током в условиях имитирующих эксплуатационные с целью выявления безопасности с точки зрения общей коррозии полей потенциалов блуждающих токов и обоснования ресурса гибкой части компенсатора в таких условиях.

Для определения коррозионного поведения металла гибкой части сильфонных компенсаторов в условиях имитирующих эксплуатационные, были проведены электрохимические исследования, заключающиеся в снятие анодных и катодных поляризационных потенциостатических кривых на стали 12Х18Н10 (в том числе после провоцирующей термообработки) в 3 % растворе хлористого натрия.

Исследования проводили при температурном интервале 40...45 °С в соответствии с методикой проведения электрохимических коррозионных исследо-

ваний приведенной в главе 2, в специально разработанной и изготовленной трехэлектродной электрохимической ячейке, имитирующей узкий зазор с затрудненным доступом кислорода воздуха, с целью создания условий, близким к условиям работы гофрированной части компенсатора с многослойной оплеткой. Поляризационные кривые снимали от установившегося значения стационарного потенциала при помощи потенциостата ЕР 20А (ГДР) в потенциодинамическом режиме относительно хлорсеребряного электрода сравнения (ХСЭ). Расчет скорости коррозии проводили по методу Штерна-Гири, широко используемого в коррозионных электрохимических исследованиях [1, 35, 81, 83 и др.].

Полученные анодные и катодные поляризационные кривые для стали 12Х18Н10 в состоянии поставки и после провоцирующей термообработки и результаты расчета скорости коррозии для разных величин электродного потенциала приведены, соответственно, на рис. 5.3 и рис. 5.4 .

Как видно из приведенных результатов исследований скорость коррозии стали 12Х18Н10 в состоянии поставки при стационарном потенциале (отсутствие анодных зон блуждающих токов) составляет, примерно, 0.01 мм/год, а на стали после провоцирующей термообработки в аналогичных условиях 0.033 мм/год. Это соответствует группе стойкости “стойкие” по общей принятой шкале коррозионной стойкости металлов (ГОСТ 5272-68), и баллу “1” по международной пятибалльной шкале коррозионной стойкости сталей. Смещение потенциала в сторону более положительных значений относительно стационарного резко усиливает скорость коррозионного растворения. Так, для стали 12Х18Н10 состоянии поставки при потенциале плюс 0.1 В (по МСЭ), скорость коррозии достигает 1.0 мм/год, а при потенциале плюс 0.2 В (МСЭ) уже 7.8 мм/год. Это соответствует группе стойкости “малостойкие” по шкале коррозионной стойкости металлов. У стали 12Х18Н10 после провоцирующей термообработки

Рис. 5.3 Потенциостатические поляризационные кривые стали 12Х18Н10 в 3 % -ном растворе NaCl.

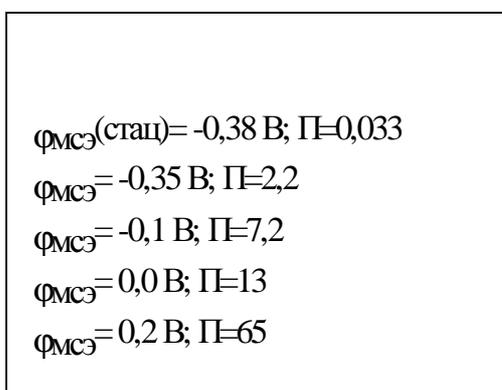


Рис.5.4 Потенциостатические поляризационные кривые стали 12X18H10 в 3 %-ном растворе NaCl (после "провоцирующей термообработки").

скорость коррозии еще выше и составляет при потенциале плюс 0.2 В (МСЭ) – 65 мм/год (“нестойкие” по шкале коррозионной стойкости металлов) [55, 58, 73].

Следует отметить, что в условиях узких щелей и зазоров склонность к пассивации исследуемой стали резко падает, а сталь после провоцирующей термообработки в условиях исследования вообще не пассивируется, т.е. ведет себя как активная. Как свидетельствуют катодные поляризационные кривые, такое поведение стали 12Х18Н10 может быть связано с недостаточным количеством пассиватора (в основном кислорода) в среде, что одновременно приводит к сильному перенапряжению катодной реакции деполяризации.

Учитывая толщину стенки сильфонного компенсатора (≈ 0.4 мм) при постоянном действии анодной поляризации блуждающими токами, сквозное разрушение может произойти уже примерно через полгода после ввода его в эксплуатацию.

Таким образом, проведенные исследования позволяют выявить область потенциалов блуждающих токов, не вызывающих существенного усиления скорости коррозии сильфонных компенсаторов тепловых перемещений теплопроводов канальной прокладки из стали 12Х18Н10 не стабилизированных титаном или ниобием. Для рассматриваемых условий, сильфонные компенсаторы из стали 12Х18Н10 могут эксплуатироваться в области потенциалов блуждающих токов отрицательнее минус 0.1 В по МСЭ.

В настоящее время в литературе опубликовано большое количество работ, посвященных изучению коррозионно-усталостной прочности стали типа 18-10. Однако результаты этих исследований не могут в достаточной степени использоваться для изучения эксплуатационных характеристик гибких металлических трубопроводов, рукавов и компенсаторов, т.к. последние работают в области малоциклового нагружения и имеют ряд специфических,

отличных от многоциклового усталости особенностей [25, 26, 66, 82, 86 и др.], характер которых, особенно при воздействии коррозионно-активных сред еще исследован недостаточно, а литературные данные, касающиеся малоциклового коррозионной усталости сталей типа 18-10, крайне ограничены.

Долговечность аустенитной нержавеющей стали 1X18H9T при малоцикловом кручении в растворах щелочей и хлоридов при повышенной температуре исследовали в работе [100].

Испытанию при жестком нагружении подвергались трубчатые образцы с повышенным внутренним давлением 3.9 МПа на трех уровнях деформации с частотой 2 цикла в минуту. За критерием разрушения принимали появление сквозной трещины длиной 1-2 мм, приводящей к падению давления внутри образца. Зависимости деформации - число циклов до разрушения подчиняется уравнению Коффина-Менсона $\epsilon N^\alpha = C$, хотя показатель степени α различен для каждого конкретного случая. Показано, что концентрированные растворы щелочи (15; 30 % NaOH) и хлоридов (3-30 % NaCl и 42 % Mg Cl₂) при повышенной (до 230 °C) температурах значительно (в 3-17 раз) снижает долговечность сталей в упругопластической области. Установлена взаимосвязь процессов коррозионного растрескивания и малоциклового усталости стали 1X18H10T в горячем 42 % растворе Mg Cl₂.

При аналогичных условиях проведения опытов изучали [101] возможность ингибиторной защиты стали 1X18H9T от малоциклового коррозионной усталости. В качестве ингибитора использован иодистый бензилхинолиний (2 г/л), так как это вещество достаточно эффективно тормозит общую коррозию сталей в кислотах и в растворах хлористого магния, а его защитные свойства сохраняются при повышенных температурах и не утрачиваются в течение длительного времени. Опыты показали, что долговечность стали в неингибированных растворах Mg Cl₂ при высоком уровне деформации ($\epsilon = 8 \cdot 10^{-3}$) уменьшаются по сравнению с долговечностью на воздухе примерно в

2.5 раза, а при низком ($\epsilon = 3 \cdot 10^{-3}$) в 13 раз. В ингибированном растворе $MgCl_2$ долговечность весьма существенно увеличивается и практически не отличается от значений полученных от образцов в воздухе, т.е. ингибитор практически полностью устраняет агрессивное действие среды. Импедансные измерения при частоте 10000 Гц свидетельствуют о преимущественном торможении ингибитором анодного процесса ионизации металла, что, по видимому, и является одной из основных причин эффективного торможения процесса коррозионно-усталостного разрушения.

Влияние предварительного малоциклового нагружения в 3 %- ном растворе $NaCl$ и на воздухе на прочность и структуру стали X18H10T изучалось в работе [68]. Циклическое нагружение чистым изгибом осуществляли при комнатной температуре с частотой 30 циклов в минуту. Анализ полученных результатов показал, что изменение характеристик прочности и пластичности в процессе малоциклового нагружения, как в среде так и на воздухе, проходит в три стадии что соответствует современным представлениям теории малоциклового разрушения [50].

Во всех описанных выше работах [68, 100, 101] наибольшее снижение долговечности в коррозионных средах наблюдается при минимальных деформациях, что говорит о значительном влиянии коррозионного фактора, требующего времени для проявления своего действия. Характер зарождения и распространения коррозионно-усталостной трещины зависит от изменения дислокационной субструктуры стали за счет влияния деформации и коррозионно-активной среды, первопричиной малоциклового разрушения сталей (в том числе типа 18-10) является чередующиеся процессы упрочнения-разупрочнения и соответствующие им изменения электрохимических свойств, ускоряемые воздействием коррозионно-активной среды [4, 30].

Исследования малоцикловой коррозионно-усталостной прочности проводили в условиях жесткого нагружения тонколистовых (~ 0.4 мм) образцов

из стали 12Х18Н10, в состоянии поставки и после провоцирующей термообработки, на воздухе и в 3 % -ном растворе хлорида натрия с одновременной анодной поляризацией, имитируя условия эксплуатации сильфонного компенсатора для тепловых сетей ЕАЛР. 302645 и возможное локальное нарушение пассивного состояния стали за счет питтингообразования при наличии хлорид-ионов. Анодную поляризацию осуществляли от внешнего источника постоянного тока. В процессе испытаний потенциал поддерживали постоянным и регистрировали вольтметром относительно хлор-серебряного электрода сравнения. Температура при проведении испытаний составляла 20...25° С. Методика коррозионно-усталостных испытаний приведена в главе 2.

Графики усталостной прочности при нагружении в малоцикловой области стали 12Х18Н10 в состоянии поставки приведен на рис. 5.5., а после провоцирующей термообработки на рис. 5.6. Результаты коррозионно-усталостных испытаний в 3 % растворе хлорида натрия приведены для этой стали после термообработки на рис. 5.7, а с анодной поляризацией при потенциале плюс 0.2 В по медно-сульфатному электроду сравнения на рис. 5.8.

Полученные зависимости числа циклов до разрушения от амплитуды (размаха, ϵ_p , % = 2ϵ , %) упруго-пластической деформации во всех случаях хорошо описывается аналитически уравнением в форме Лэнджера [66, 67], полученного для области циклов упруго-пластического нагружения от минимальных до величин более 10^4 и дифференциации влияния упругой и пластической составляющих, из известного соотношения Мэнсона-Коффина [67 и др.].

$$\epsilon_p = CN^{-0.5} + 2\frac{\sigma_{-1}}{3G} \quad (5.2)$$

где ϵ_p - размах упруго-пластической деформации;

$c = \frac{1}{2} \ln \frac{1}{1 - k\psi}$ -константа, зависящая от механических свойств материала;

ψ - коэффициент поперечного сужения образца, %;

Рис. 5.5 Кривая малоциклового усталости стали 12Х18Н10

Рис.5.6 Кривая малоциклового усталости стали 12Х18Н10

Рис.5.7 Кривая малоциклового усталости стали 12Х18Н10

Рис.5.8 Кривая малоциклового усталости стали 12Х18Н10

σ_{-1} - предел выносливости, МПа (кгс/мм²);

G- модуль сдвига, МПа (кгс/мм²);

N- число циклов до разрушения.

Такой характер зависимости числа циклов до разрушения от амплитуды упруго-пластической деформации дает возможность использования результатов, полученных на плоских образцах, для оценки коррозионно-усталостной долговечности реальных гофрированных оболочек, как это было показано для малоциклового усталости в работах А.П. Гусенкова, Б.Ю. Лукина, Г.В. Москвитина и др. [26, 27, 28, 29, 66, 86].

Усредненные значения малоциклового прочностии стали 12X18H10 на воздухе и в коррозионно-активной среде сведены в таблицу 5.1.

Малоцикловая прочность нержавеющей стали 12X18H10T на воздухе и в коррозионной среде

Таблица 5.1

ϵ_p , %	Состояние поставки (воздух)	Состояние поставки (3 %-ном NaCl)	После термообработки, на воздухе	После термообработки, 3 %-ном NaCl	Поляризация + 0.2 В (МСЭ), 3 %-ном NaCl
3.0	500	480	550	410	520
0.8	22000	20200	21000	19100	10000
0.7	34000	32900	32500	31000	16200

Как видно из результатов проведенных исследований, наблюдается обоснованное снижение долговечности стали 12X18H10 (и в состоянии поставки, и после термообработки) как в области ограниченной выносливости, при высоких уровнях размаха деформации (3 %), так и при умеренных режимах нагружения (0,7 – 0,8 % - основной режим работы) в присутствии коррозионной среды. Следует отметить некоторое незначительное снижение усталостной и кор-

розионно-усталостной долговечностей сплава, подвергнутого «провоцирующей» термообработке. Вместе с тем, обращает на себя внимание более сильное влияние в условиях МКУ внешней анодной поляризации на коррозионно-усталостную долговечность при реальных режимах эксплуатации. Наблюдается более чем 2-х кратное снижение долговечности. В то же время в области ограниченной выносливости такого влияния поляризации не наблюдается. Это объясняется нами практически полным подавлением влияния коррозионной среды в этой области механическим фактором и согласуется с имеющимися литературными данными [55, 58, 98].

С целью выявления характера расположения и количества коррозионно-усталостных трещин были проведены металлографические исследования образцов после коррозионно-усталостных испытаний при уровне деформации $\epsilon_p=0.7\%$.

Фотографии микротрещин и расположение коррозионно-усталостных трещин приведены на рис.5.9 и 5.10.

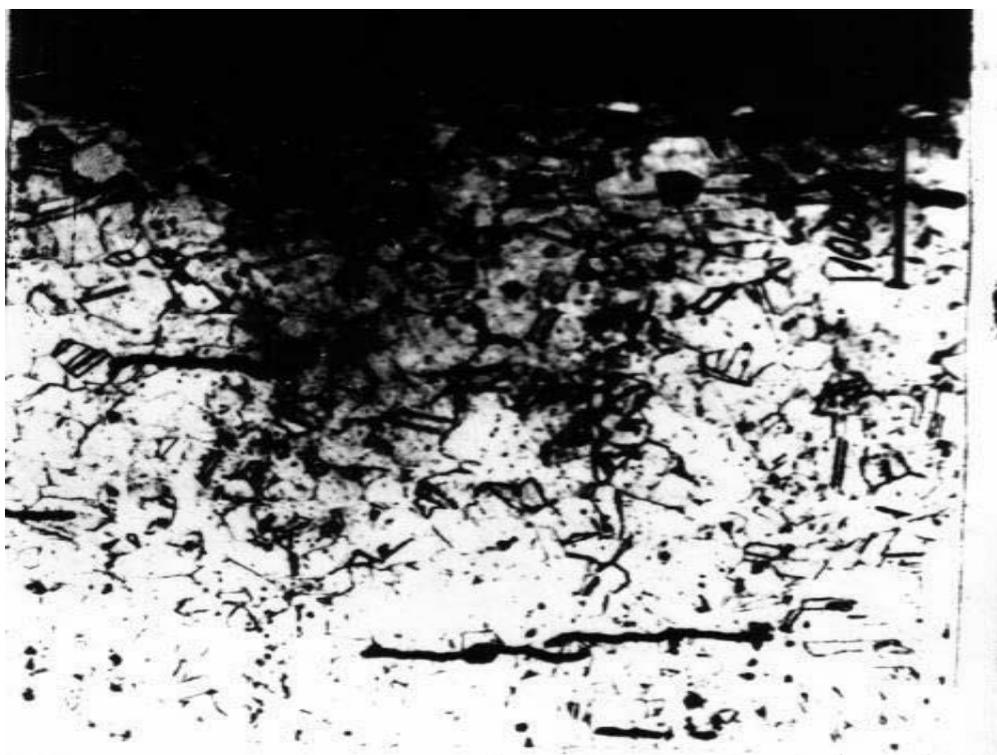


Рис. 5.9 Микроструктура стали 12X18H10 в условиях усталости на воздухе



Рис. 5.10. Микроструктура стали 12X18H10 в условиях коррозионной усталости при поляризации

Как видно из приведенных рисунков (при анодной поляризации), возрастает количество параллельных трещин, сопутствующих магистрально, что, очевидно, и вызывает уменьшение ресурса гибкой части компенсатора.

Учитывая результаты приведенных выше исследований и коррозионных изысканий можно сделать следующее заключение о причине и характере отказа сифонного компенсатора для тепловых сетей.

Причиной разрушения в данном случае является коррозионная малоцикловая усталость в местах первоначальной питтинговой коррозии, обусловленной наличием хлор-ионов, частичной потери пассивности стали и многократно усиленная анодной поляризацией блуждающими токами.

Сильфонные компенсаторы данного типа из стали 18-10 (18-9) могут эксплуатироваться с установленным ресурсом, зависящим от величины упруго-пластической деформации, в условиях отсутствия блуждающих токов. При потенциале блуждающих токов + 0.2 В (по МСЭ) и положительнее, циклическая долговечность снижается в 2.5 раза.

При наличии анодных зон блуждающих токов установленный ресурс может быть обеспечен применением средств электрохимической защиты (электродренажная, протекторная, катодная) или секционированием сильфонных компенсаторов, путем их электроизоляции от теплопровода (например, сочленение с теплопроводом на фланцах через электроизоляционные прокладки).

Выводы

Результаты проведенных исследований позволили сделать следующие основные выводы

1. Методами математической статистики с использованием параметра удельного количества аварий технологических трубопроводных систем и разработанных критериев опасности эксплуатации научно обосновано их разделение на участки с различной природой разрушения (почвенная коррозия, электрокоррозия) и степенью опасности. Это позволило установить очередность проведения противокоррозионных мероприятий с рациональным выбором способа электрохимической защиты на стадиях проектирования и эксплуатации.

2. Установлена возможность использования отвала Башкирского медно-серного комбината в качестве основы активатора протекторной защиты, уменьшающего ток саморастворения при увеличении полезной токоотдачи протектора. Достигнуто повышение коэффициента полезного использования протектора в 1,5 раза при одновременном обеспечении более высокой степени стабильности поддержания защитного потенциала и его выхода на рабочий режим по сравнению с типовым протектором. Это способствует обеспечению промышленной безопасности эксплуатации подземных металлических сооружений и, в определенной мере, решает проблему утилизации отходов основного производства.

3. На основе анализа условий эксплуатации и коррозионно-механического поведения материала сильфонных компенсаторов тепловых перемещений трубопроводов установлено, что основной причиной их отказов является малоцикловая коррозионная усталость. Разрушению способствуют концентрация напряжений в местах питтинговой коррозии, обусловленной наличием хлор-ионов, анодная поляризация блуждающими токами в области потенциалов положительнее минус 0,1 В (МСЭ), снижающая долговечность более чем в 2 раза. Разработаны рекомендации по повышению промышленной безопасности узлов компенсации.

Литература

1. Абдуллин И.Г., Агапчев В.И., Давыдов С.Н. Техника эксперимента в химическом сопротивлении материалов: Учебное пособие. – Уфа: Изд-во Уфимск. нефт. ин-та, 1985.-100 с.
2. Абдуллин И.Г., Бугай Д.Е., Гареев А.Г. Механизм малоциклового коррозионной усталости гибких металлооборудований // Сб. Резервы повышения надежности оборуд. нефтеперерабат. и нефтехим. пром-сти. – Уфа, 1982.- С.170-181.
3. Абдуллин И.Г., Бугай Д.Е., Гутман Э.М. Определение малоциклового усталости долговечности материалов металлоконструкций по кинетике изменения микродеформаций кристаллической решетки // Изв. Вуз. Нефть и газ.-1984.-№7.- С. 83-87.
4. Абдуллин И.Г., Гареев А.Г., Мостовой А.В. Коррозионно-механическая стойкость нефтегазовых трубопроводных систем: диагностика и прогнозирование долговечности. Уфа: Гилем, 1997.-177 с.
5. Абдуллин И.Г., Давыдов С.Н., Худяков М.А. и др. Коррозия нефтегазового оборудования: Учебное пособие.- Уфа: Изд. Уфим. нефт. ин-та, 1990.-72 с.
6. Абдуллин И.Г., Худяков М.А. Расчет и конструирование коррозионностойкого нефтегазового оборудования: Учебное пособие.- Уфа: Изд. Уфим. нефт. ин-та, 1992.-901 с.
7. Ажогин Ф.Ф. Коррозионное растрескивание и защита высокопрочных сталей от коррозии. – М.: Металлургия, 1984.-256 с.
8. Акользин П.А. Коррозия и защита металлов теплоэнергетического оборудования.- М.: Энергоиздат, 1982.-304 с.
9. Антикоррозионная защита городских газопроводов /Зайцев К.И., Притула В.В. //Наука и техника. – 1997, № 3.
10. Антропов Л.И., Герасименко М.А., Герасименко Ю.С. Определение скорости коррозии и эффективности ингибиторов методом поляризационного сопротивления. / Защита металлов. Т.2. № 2. – 1966. – С.115-121.

11. Бабаков А.А., Приданцев М.В. Коррозионностойкие стали и сплавы.-М.: Машиностроение, 1971.-320 с.
12. Баршполов В.Ф. Строительство наружных трубопроводов: Учеб. для ПТУ. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1991. – 208 с.
13. Бугай Д.Е. Коррозионностойкие материалы: Учебное пособие, - Уфа: УГНТУ, 1997.-72 с.
14. Бутырский А.П. Опыт защиты подземных сооружений от коррозии. - Уфа: Баш. кн. изд, 1988.-104 с.
15. Бутырский А.П., Аитов И.Л., Тугунов П.И. Коррозия отступает. Обеспечение надежности подземных сооружений. - Уфа: Баш. кн. изд, 1983.-88 с.
16. Воробьева Н.В., Киреев Д.М., Давыдов С.Н. Активатор протекторной защиты от коррозии подземных металлических сооружений. Материалы 49-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 50-летию Уфимского государственного нефтяного технического университета, 1998. – С.44. ISBN 5-7831-0213-X.
17. Герасимов В.В., Шувалов В.А. Андреев С.А. О влиянии деформации на анодную поляризуемость аустенитных коррозионно-стойких сталей и ее связь с поперечным скольжением дислокаций // Защита металлов,-1974. Т. X. № 2. С.152-153.
18. Глазов Н.П., Стрижевский И.В., Калашникова А.М. и др. Методы контроля и измерений при защите подземных сооружений от коррозии. – М.: Недра, 1978. – 215 с.
19. ГОСТ 5639-82. Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна.
20. ГОСТ 11.008-84. Прикладная статистика. Правила построения и применения вероятностных сеток. – М.: Изд-во стандартов, 1985.-35 с.
21. ГОСТ 51164-98. Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии. – М.: Изд-во ГОСТСТАНДАРТ РОССИИ. 1998. – 41 с.

22. ГОСТ 9.602-89. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии. М.: Изд. стандартов.- 1989.-51 с.
23. Готин А.А., Гетманский М.Д., Шестаков А.А. Методы контроля коррозии и наводораживания трубопроводов транспортирующих нефтяной газ / Обз. Инф. Сер. Коррозия и защита в нефтегазовой промышленности, вып. 2. – М.: ВНИИОЭНГ, 1981.-38 с.
24. Громов Н.К. Городские теплофикационные системы. – М.: Энергия, 1974. – 256 с.
25. Гусенков А.П. Прочность при изотермическом и неизотермическом малоцикловом нагружении. М.: Наука, 1979.-295 с.
26. Гусенков А.П., Величкин Н.Н. Исследование прочности волнистых компенсаторов при малоцикловом нагружении // Проблемы прочности. – 1971. № 3. С. 97-102.
27. Гусенков А.П., Лукин Б.Ю. Прочность при малоцикловом нагружении гибких металлических рукавов // Проблемы прочности. – 1972. № 1. С.98-104.
28. Гусенков А.П., Лукин Б.Ю., Москвитин Г.В. Исследование малоциклового прочностии сильфонных компенсаторов при высоких температурах // Машиностроение, 1978. № 3. С.58-67.
29. Гутман Э.М. Механохимия металлов и защита от коррозии. – М.: Металлургия, 1981.-270 с.
30. Гутман Э.М. Механохимия металлов и защита от коррозии. М.: Металургия, изд. 2-е перераб. и доп. 1981.-271 с.
31. Гутман Э.М. Механохимия металлов и защита от коррозии.-М.: Металлургия, 1974.-232 с.
32. Гутман Э.М., Абдуллин И.Г., Бугай Д.Е. Кинетика изменения микроискажений кристаллической решетки и электрохимического поведения аустенитной стали в процессе малоциклового коррозионной усталости // Защита металлов. - 1982. Т. XVIII, №4. С.535-539.

33. Гутман Э.М., Будилова Е.В., Лукин Б.Ю. Влияние деформации стали 1X18H10T на процесс питтингообразования // Защита металлов .-1975. Т.II № 6. С. 731-733.
34. Гутман Э.М., Давыдов С.Н. Механохимические свойства нержавеющей стали // Материалы пятого Всесоюзного симпозиума по механоэмиссии и механохимии твердых тел. Часть 2. -Таллин: 1977. С. 39-44.
35. Гутман Э.М., Давыдов С.Н. Повышение коррозионной стойкости ГМР и компенсаторов на основе исследования механохимических свойств нержавеющей стали и ее сварных швов / Материалы межотраслевой научно-практической конференции «Повышение эффективности использования оборудования в свете решений XXV съезда КПСС». Часть 4.-Уфа: 1977.С.131-138.
36. Гутман Э.М., Давыдов С.Н., Лукин Б.Ю. Влияние деформаций стали 12X18H10T на питтинговую коррозию в условиях влажной морской атмосферы // Защита металлов 1977. Т. XIII. № 6. С. 592-594.
37. Давыдов С.Н., Абдуллин И.Г. Техника и методы коррозионных испытаний: Учебное пособие Уфа: Изд-во УГНТУ, 1998.-102 с.
38. Давыдов С.Н., Абдуллин И.Г., Киреев Д.М., Красильников А.Г. Выбор критериев очередности и методов защиты от коррозии трубопроводов городского водоснабжения. Уфа: Межвузовский сборник научных статей. Выпуск N3. Нефть и газ, 1998. – С.141-142.
39. Давыдов С.Н., Баймурзин Ю.Р., Киреев Д.М. Исследование возможности применения отвала БМСК в качестве активатора при протекторной защите подземных металлических сооружений. Проблемы нефтегазового комплекса России. Транспорт и хранение нефти и газа: Тезисы докладов Международной научно-технической конференции. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 1998. – С.48.
40. Давыдов С.Н., Киреев Д.М., Абдуллин И.Г. Исследование отвала горнорудного комбината в качестве активатора протекторной защиты подземных металлических сооружений. Проблемы нефтегазового комплекса: Материалы научно-методической конференции. Уфа: Издательство УГНТУ. 2000. – С.32.

41. Давыдов С.Н., Киреев Д.М., Кантор Л.И., Красильников А.Г. Защита от коррозии разветвленной сети трубопроводов городского водоснабжения. Сервис большого города. Тезисы докладов международной научно-практической конференции посвященной 425-летию г. Уфы. Уфа: Уфимский технологический институт сервиса, 1999. – С.31-33.
42. Дизенко Е.И., Новоселов В.Ф., Тугунов П.И., Юфин В. А. Противокоррозионная защита трубопроводов и резервуаров. М.: Недра, 1978.-199 с.
43. Дубровский Б.Г., Волотовский С.А., Заблудовский В.Я. Защита от коррозии подземных сооружений промышленных предприятий. Киев: Техника, 1979
44. Жук Н.П. Курс теории коррозии и защиты металлов. – М.: Metallurgy, 1976.- 586 с.
45. Зайнуллин Р.С. Механика катастроф. Обеспечение работоспособности оборудования в условиях механохимической повреждаемости. Уфа: МИБ СТС, 1997.-462 с.
46. Защита металлических сооружений от подземной коррозии. Справочник: /Стрижевский И.В., Зиневич А.М., Никольский К.К. и др. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Недра, 1981. – 293 с.
47. Зиневич А.М., Глазков В.И., Котик В.Г. Защита трубопроводов и резервуаров от коррозии. М.: Недра, 1975.- 288 с.
48. Инюшин Н.В. и др. Магнитная обработка промысловых жидкостей. Уфа: Государственное издательство научно-технической литературы «Реактив», 200. – 58 с.: табл., ил.
49. Испытание материалов. Справочник. Под ред. Х. Блюменауэра. Пер. с нем. 1979, 448 с.
50. Карпенко Г.В. Влияние среды на прочность и долговечность металлов. Киев: Наукова думна, 1976.-125 с.
51. Катодная защита от коррозии. Справ. изд./ В. Бэкман, В. Швенк. Пер. с нем. М.: Metallurgy, 1984.-496 с.
52. Кеше Г. Коррозия металлов. Физико-химические принципы и актуальные проблемы / Пер. с нем. – М.: Metallurgy, 1984.-400 с.

53. Киреев Д.М. Повышение эффективности электро-химической защиты от коррозии городских подземных металлических трубопроводов. Проблемы нефтегазового комплекса: Материалы научно-методической конференции. Уфа: Издательство УГНТУ. 2000. – С.88.
54. Киреев Д.М., Давыдов С.Н. Исследование возможности применения шлама БМСК в качестве активатора при электрохимической защите подземных металлических сооружений от почвенной коррозии. Материалы 48-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Уфа: Издательство Уфимского нефтяного технического университета, 1997. – С.50.
55. Киреев Д.М. Повышение эффективности электро-химической защиты от коррозии городских подземных металлических трубопроводов. Проблемы нефтегазового комплекса: Материалы научно-методической конференции. Уфа: Издательство УГНТУ. 2000. – С.88.
56. Киреев Д.М., Давыдов С.Н. Применение механохимической активации шлама БМСК и исследование возможности его использования в качестве компонента протектора ПМС. Материалы 48-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Уфа: Издательство Уфимского государственного нефтяного технического университета, 1997. – С.49. ISBN 5-7831-0085-4.
57. Киреев Д.М., Нос А.Н., Давыдов С.Н. Установка электродренажной защиты от коррозии. Материалы XXXXVII-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Том 1 – Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет, 1996. – С. 80.
58. Киреев Д.М., Давыдов С.Н., Абдуллин И.Г. Обеспечение работоспособности и долговечности разветвленных трубопроводных систем в условиях наружной коррозии. Тезисы стендовых докладов III конгресса нефтегазопромышленников России. – Уфа: Транстэк. 2001. - С.5.

59. Когаев В.П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. – М.: Машиностроение, 1977.-232 с.
60. Колотыркин Я.М. Металл и коррозия. – М.: Металлургия, 1987.-88 с.
61. Коррозия и защита коммунальных водопроводов /Б.Л. Рейзин, И.В. Стрижевский, Ф.А. Шевелев. – М.: Стройиздат, 1979. – 398 с.
62. Коррозия. Справочник / Под ред. Л.Л. Шрайера; Пер с англ. – М.: Металлургия, 1981.-632 с.
63. Красноярский В.В. Электрохимический метод защиты металлов от коррозии. – М.: Машгиз, 1961.-86 с.
64. Красноярский В.В., Цикерман Л.Я. Коррозия и защита подземных металлических сооружений. М.: Высшая школа, 1986.
65. Кузнецов М.В., Новоселов В.Ф., Тугунов П.И., Котов В.Ф. Противокоррозионная защита трубопроводов и резервуаров: Учеб. для вузов / М.: Недра, 1992.-238 с.
66. Лукин Б.Ю. Несущая способность металлических рукавов // Проблемы прочности.- 1978. № 1. С. 61-64.
67. Лэнджер Б.Ф. Расчет сосудов давления на малоцикловую долговечность // Техническая механика, 1962. № 3.
68. Максимович Г.Г., Нагирный С.В., Лютый Е.М., Савчин Б.М. Влияние предварительного нагружения в 3 %-ном растворе NaCl на прочность стали X18H10T // Физико-химическая механика материалов. – 1976. № 2. С. 84-88.
69. Марочник сталей и сплавов / В.Г. Сорокин, А.В. Волосникова, С.А. Вяткин и др.; Под общ. ред. В.Г. Сорокина. – М.: Машиностроение, 1989.-640 с.
70. Маттссон Э. Электрохимическая коррозия. Пер. со шведск. /Под ред. Колотыркина Я.М. – М.: Металлургия, 1991.-158 с.
71. Методы испытания, контроля и исследования машиностроительных материалов: Справ. пособие в 3-х томах /Под ред. А.Т. Туманова. Т.2. Методы исследования механических свойств металла. – М.: Машиностроение, 1974.-320 с.

72. Новак П., Чигал В. Сравнительные испытания некоторых электрохимических методов определения склонности к межкристаллитной коррозии. *Kovove materialy*, 4.21.- Bratislava, 1983.
73. Питерцева Е.Ю., Давыдов С.Н., Киреев Д.М. Влияние поля блуждающих токов на коррозионную стойкость сильфонных компенсаторов тепловых перемещений теплопроводов. Материалы 50-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Уфа: Издательство Уфимского государственного нефтяного технического университета, 1999, С. 43.
74. Погодин В.П., Богоявленский В.Л., Сентюрев В.П. Межкристаллитная коррозия и коррозионное растрескивание нержавеющей сталей в водных средах. М.: Атомиздат, 1970.-422 с.
75. Попилов Л.Я., Зайцев Л.П., Электрополирование и электротравление металлографических шлифов. М.: Metallurgizdat, 1963. – 410 с.
76. Проблемы промышленной безопасности в системе магистрального трубопроводного транспорта: Материалы IX Всероссийского семинара-совещания руководителей по надзору за магистральными трубопроводами территориальных органов Госгортехнадзора России, руководителей и специалистов предприятий магистрального транспорта «Совершенствование государственного надзора за безопасностью эксплуатации магистральных трубопроводов» 4-8 июня 2001 г./ Редкол.: Р.И. Габдюшев и др.- Уфа: ГУП Уфимский полиграфкомбинат, 2001. – 281 с. с ил.
77. Пугин К.Г., Киреев Д.М., Давыдов С.Н. Электродренажная защита от коррозии нефтепровода при переходе через железную дорогу. Материалы 48-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Уфа: Издательство Уфимского государственного нефтяного технического университета, 1997. – С.50-51.
78. Рахманкулов Д.Л., Кузнецов М.В., Габитов А.И., Зенцов В.Н., Кузнецов А.М. Современные системы защиты от коррозии подземных коммуникаций. – Уфа:

- Государственное издательство научно-технической литературы «Реактив», 1999. – 234 с.
79. Розенфельд И.Л. Коррозия и защита металлов (локальные коррозионные процессы).-М.: Металлургия, 1970.-448 с.
80. Розенфельд И.Л., Жигалова К.А. Ускоренные методы коррозионных испытаний металлов.- М.: Металургия, 1966.-347 с.
81. Романив О.Н. Новые подходы к оценке усталости металлов / Итоги науки и техники. Коррозия и защита от коррозии. Т.16. – М.: ВИНТИ, 1990.- С. 55-58.
82. Романов В.В. Методы исследования коррозии металлов. – М.: Металлургия, 1965.-279 с.
83. Ряхин В.А., Мошкарров Г.Н. Долговечность и устойчивость сварных конструкций строительных и дорожных машин.- М.: Машиностроение, 1984. – 232 с.
84. Сборник руководящих материалов по защите городских подземных трубопроводов от коррозии. – Л.: Недра, 1987. – 408 с.
85. Серенсен С.В., Шнейдерович Р.Н., Гусенков А.П. и др. Прочность при малоцикловом нагружении. М.: Наука, 1975.-256 с.
86. Сильфоны. Расчет и проектирование. Под редакцией Л.Е. Андреевой. М.: Машиностроение, 1975.-156 с.
87. СНиП 2.05.06-85. Магистральные трубопроводы / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1988.-52 с.
88. Справочник химика. Т.IV.Л.: Химия,. 1965.-919 с.
89. Справочник по металлографическому травлению. Беккерт М., Клемм Х. Пер. с нем. М.: Металлургия, 1979. – 336 с.
90. Стеклов О.И. Прочность сварных конструкций в агрессивных средах.-М.: Машиностроение, 1976.-200 с.
91. Стеклов О.И. Мониторинг и защита конструкций повышенной опасности в условиях их старения и коррозии. // Защита металлов, 1999, том 35, №4, С.341-345
92. Стеклов О.И. Стойкость материалов и конструкций к коррозии под напряжением. –М.: Машиностроение, 1990.-384 с.

93. Стрижевский И.В. Подземная коррозия и методы защиты. – М.: Metallurgy, 1986. – 112 с.
94. Стрижевский И.В., Зиневич А.В., Никольский Н.Н. и др. Защита металлических сооружений от коррозии: Справочник / М.: Недра, 1981.-293 с.
95. Стрижевский И.В., Левин В.М., Тарнижевский М.В. Методы борьбы с электрокоррозией городских трубопроводов. М.: Стройиздат, 1968.-148 с.
96. Стрижевский И.В., Сурис М.А. Защита подземных теплопроводов от коррозии. – М.: Энергоатомиздат, 1983.-344 с.
97. Тагарифуллин В.Н., Давыдов С.Н., Киреев Д.М. Влияние провоцирующего нагрева на малоцикловую усталость сталей типа 18-10. Материалы 50-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Уфа: Издательство Уфимского государственного нефтяного технического университета, 1999, С. 51.
98. Техника борьбы с коррозией. / Р. Юхневич, В. Богданович, Е. Волашковский, А. Виндуховский. Пер. с польск. Л.: Химия, 1980.-304 с.
99. Техника борьбы с коррозией. / Р. Юхневич, Е. Волашковский, А. Виндуховский, Г. Станкевич. Пер. с польск. Л.: Химия, 1978.-304 с.
100. Техника борьбы с коррозией. /ЮхневичР., Богданович В., Валашковский Е., Видуховский А. Пер. с польск./ Под ред. Сухотина А.М. – Л: Химия, 1980. – 224 с. ил.
100. Ткаченко Н.Н., Лискевич И.Ю., Свистун Р.П. Долговечность малоуглеродистой и аустенитной нержавеющей стали при малоцикловом кручении в растворах щелочи и хлоридов повышенной температуры // Физико-химическая механика материалов.- 1973. № 3. С.109-111.
- 101 Ткаченко Н.Н., Петров Л.Н., Карпенко Г.В., Бабей Ю.Н. и др. О возможности ингибиторной защиты стали от малоциклового коррозионной усталости // Физико-химическая механика материалов. – 1972. № 4. С.54-57.
- 102 Томашов Н.Д., Жук Н.П., Титов В.А., Веденеева М.А. Лабораторные работы по коррозии и защите металлов. – М : Metallurgy, - 1971. – 280 с.

103. Томашов Н.Д., Чернова Г.П. Коррозия и коррозионностойкие стали и сплавы.-М.: Металлургия, 1973.-232 с.
104. Туфанов Д.Г. Коррозионная стойкость нержавеющей сталей и чистых металлов. Справочник.-М.: Металлургия. 1973.-352 с.
105. Тюрин Ю.Н., Макаров А.А. Анализ данных на компьютере. – М.: ИНФРА-М, Финансы и статистика, 1995.-384 с.
106. Улиг Г.Г., Ревы Р.У. Коррозия и борьба с ней / Пер. с англ. – Ленинград: Химия. Ленинградское отделение, 1989-456 с.
107. Ульянин Е.А. Коррозионностойкие стали и сплавы. Справочник.- М.: Металлургия, 1980.- 208 с.
108. Фрейман Л.И., Макаров В.А., Брыксин И.Е. Потенциостатические методы в коррозионных исследованиях и электрохимической защите. Под ред. акад. Я.М. Колотыркина. – Л.: Химия. – 1972. – 240 с.
109. Фрактография и атлас фрактограм / Справ. Изд. Пер. с англ. / Под ред. Дж. Феллоуза. – М.: Металлургия, 1982.-489 с.
110. Электрохимическая защита от коррозии. Люблинский Е.А. – М.: Металлургия, 1987,- 96 с.
111. Юрченко Ю.Ф., Агапов Г.И. Коррозия сварных соединений в окислительных средах.-М.:Машиностроение, 1976.-150 с.
112. Stern M., Geary A.L. J. Electrochem. Soc. 1957, v. 104, 56.
113. Корн Г. Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров /пер. с англ. – М: Наука, 1974. – 831 с.
114. Четыркин Е.М., Калихман И.Л. Вероятность и статистика. – М.: Финансы статистика, 1982. – 319 с.
115. Обеспечение промышленной безопасности производственных объектов топливно-энергетического комплекса Республики Башкортостан: Материалы Второго научно-технического семинара / Редкол: В.Я.Кершенбаум и др. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 1999. – 238 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

