

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования  
«Полоцкий государственный университет»

# СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ ОБЪЕКТОВ ТРУБОПРОВОДНОГО ТРАНСПОРТА

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС  
для студентов специальности 1-70 05 01  
«Проектирование, сооружение и эксплуатация  
газонефтепроводов и газонефтехранилищ»

Составители

И. Н. Клышко, А. Г. Кульбей

Общая редакция А. Г. Кульбея

Новополоцк 2006

УДК 622.692.4.076:620.197.6(075.8)

ББК 34.661я73

С 34

РЕЦЕНЗЕНТЫ:

Г. С. ФИАЛКО, начальник службы электрохимической защиты  
цеха ремонта оборудования Новополоцкого республиканского унитарного  
предприятия по транспорту нефти «Дружба»;  
Л. М. СПИРИДЕНОК, канд. техн. наук, доцент;  
А. И. ВЕГЕРА, канд. техн. наук, доцент

Рекомендован к изданию советом технологического факультета

**С 34 Системы электрохимической защиты объектов трубопроводного транспорта** : учеб.-метод. комплекс для студ. / Сост. И. Н. Клышко, А. Г. Кульбей;  
Под общ. ред. А. Г. Кульбея. – Новополоцк: ПГУ, 2006. – 192 с.

ISBN 985-418-465-X

Приведены темы изучаемого курса, изложены теоретические и практические основы дисциплины, представлены задания для самостоятельного контроля, вопросы к экзамену.

Предназначен для студентов технических вузов, преподавателей и специалистов.

УДК 622.692.4.076:620.197.6

ББК 34.661 я73

ISBN 985-418-465-X

© И. Н. Клышко, А. Г. Кульбей, составление, 2006

© УО «ПГУ», 2006

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
Рабочая программа.....	8
КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ.....	9
ТЕМА 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ О КОРРОЗИИ.....	10
1.1. История развития, значение и перспективы электрохимической защиты объектов трубопроводного транспорта.....	10
1.2. Термин «коррозия». Классификация процессов коррозии.....	11
1.3. Виды коррозионных разрушений.....	13
1.4. Влияние окислов, образующихся на поверхности металла, на протекание процесса коррозии... 15	
Вопросы самоконтроля по теме.....	17
ТЕМА 2. ХИМИЧЕСКАЯ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ КОРРОЗИЯ.....	18
2.1. Химическая коррозия. Коррозия металлов в неэлектролитах. Газовая коррозия. Процессы, протекающие при возникновении газовой коррозии. Виды продуктов реакции при газовой коррозии. ....	18
2.2. Электрохимическая коррозия. Процессы, протекающие при возникновении электрохимической коррозии. Виды продуктов реакции при электрохимической коррозии. Виды и особенности коррозионных разрушений металлических сооружений объектов трубопроводного транспорта.....	24
2.3. Классификация почв. Удельное электрическое сопротивление почвы. Почва как коррозионная среда. Коррозионная активность грунтов. Почвенная коррозия подземных металлических трубопроводов.....	26
2.4. Контактная коррозия. Потенциалы металла. Электрохимический ряд напряжений металлов. Нормальный водородный электрод.....	29
2.5. Биокоррозия. Причины биокоррозии. Виды повреждения трубопроводов при возникновении биокоррозии. Методы предотвращения биокоррозии.....	36
2.6. Коррозия под воздействием блуждающих токов. Причины возникновения. Методы предотвращения коррозии под воздействием блуждающих токов.....	39
Вопросы самоконтроля по теме.....	44
ТЕМА 3. СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ЗАЩИТЫ ОТ КОРРОЗИИ.....	45
3.1. Современные методы защиты объектов трубопроводного транспорта от коррозии.....	45
3.2. Ингибиторы коррозии.....	46
3.3. Требования нормативных документов. Особенности методов.....	52
Вопросы самоконтроля по теме.....	53
ТЕМА 4. КАТОДНАЯ ЗАЩИТА ОБЪЕКТОВ ТРУБОПРОВОДНОГО ТРАНСПОРТА.....	54
4.1. Катодная защита объектов трубопроводного транспорта. Принцип катодной защиты трубопроводов. Основные составляющие.....	54
4.2. Типы катодных станций.....	55
4.3. Нормативные требования к катодной защите сооружений.....	63
Вопросы самоконтроля по теме.....	65
ТЕМА 5. ПРОТЕКТОРНАЯ ЗАЩИТА ОБЪЕКТОВ ТРУБОПРОВОДНОГО ТРАНСПОРТА.....	66
5.1. Протекторная защита объектов трубопроводного транспорта. Принцип протекторной защиты трубопроводов.....	66
5.2. Нормативные требования к протекторной защите сооружений.....	68
Вопросы самоконтроля по теме.....	69
ТЕМА 6. ПРОТИВОКОРРОЗИОННЫЕ ПОКРЫТИЯ.....	70
6.1. Назначение противокоррозионных покрытий. Виды противокоррозионных покрытий. Классификация.....	70
6.2. Нормативные требования, предъявляемые к покрытиям.....	72
6.3. Подготовка поверхности к нанесению покрытия.....	73
6.4. Свойства и конструкции изоляционных покрытий на основе полимерных материалов. Виды покрытий.....	89

6.5. Свойства и конструкции изоляционных покрытий на основе битумных мастик.	
Виды покрытий.....	94
6.6. Контроль качества изоляционных покрытий.....	98
Вопросы самоконтроля по теме.....	105
<b>ТЕМА 7. ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ ЯВЛЕНИЯ.....</b>	<b>106</b>
7.1. Поляризационные явления при электрохимической коррозии, их влияние на коррозию металлов. Анодная поляризация. Катодная поляризация.....	106
7.2. Коррозионная диаграмма при электрохимической коррозии. Назначение. Виды коррозионной диаграммы.....	107
Вопросы самоконтроля по теме.....	110
<b>ТЕМА 8. КОРРОЗИОННОЕ РАСТРЕСКИВАНИЕ МЕТАЛЛА ПОД НАПРЯЖЕНИЕМ.....</b>	<b>111</b>
8.1. Причины возникновения коррозионного растрескивания металла под напряжением... ..	112
8.2. Методы борьбы с коррозионным растрескиванием металла под напряжением.....	117
Вопросы самоконтроля по теме.....	120
<b>МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ПРОВЕДЕНИЮ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ И ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ.....</b>	<b>121</b>
Практическое занятие № 1. Расчёт электрических параметров трубопровода.....	122
Практическое занятие № 2. Расчёт катодной защиты магистрального трубопровода.....	131
Практическое занятие № 3. Расчет противокоррозионной защиты изолированного трубопровода с помощью одной станции катодной защиты.....	135
Практическое занятие № 4. Расчет противокоррозионной защиты изолированного трубопровода с помощью одиночных протекторов.....	139
Практическое занятие № 5. Расчёт защиты днища резервуара типа РВС одиночными протекторными установками.....	143
Практическое занятие № 6. Расчёт защиты днища резервуара типа РВС групповой протекторной установкой.....	147
Лабораторная работа № 1. Исследование коррозионной активности грунта.....	154
Лабораторная работа № 2. Изучение механизма электрохимической коррозии металлов... ..	157
Лабораторная работа № 3. Определение длины участка трубопровода, защищаемого станцией катодной защиты.....	162
Лабораторная работа № 4. Определение коэффициента затухания наложенного потенциала при катодной защите магистральных трубопроводов.....	167
Лабораторная работа № 5. Протекторная защита магистральных трубопроводов.....	171
Лабораторная работа № 6. Определение мощности, расходуемой станцией катодной защиты.....	174
<b>ИТОГОВЫЙ КОНТРОЛЬ.....</b>	<b>179</b>
<b>ЛИТЕРАТУРА.....</b>	<b>180</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЯ.....</b>	<b>181</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Общая масса металла, используемого одновременно в различных объектах техники, т. е. металлический фонд, заключенный в разнообразных конструкциях, составляет несколько миллиардов тонн и непрерывно возрастает из года в год. В связи с ростом объема используемого металла растут и общие потери металла от коррозии, достигая таких масштабов, которые сравнимы с затратами на развитие крупнейших отраслей промышленности. По имеющимся оценкам применительно к США общий ущерб от коррозии оценивался несколько лет назад примерно в 100 миллиардов долларов в год. Миллионы тонн металла «съедает» коррозия и в других странах. Подсчитано, что вследствие коррозионных разрушений ежегодно выходят из строя конструкции, в которых заключено столько же металла, сколько дает одна треть мощностей металлургической промышленности. До двух третей металла, заключенного в выходящих из строя металлоконструкциях, возвращается в металлооборот путем переплавки, а одна треть, т. е. около 10 – 15 % общего объема ежегодно добываемого металла, распыляется и составляет невозвратимые потери. Поэтому считается, что «каждая шестая домна металлургической промышленности работает на восполнение коррозионных потерь». Поскольку большая часть металлургических мощностей связана с возмещением коррозионных затрат, можно считать, что все защитные мероприятия, обеспечивающие снижение потерь металла от коррозии, могут косвенно способствовать увеличению металлического фонда страны. Поэтому академик Я.М. Колотыркин в свое время называл защиту от коррозии «невидимой металлургией».

В результате коррозионных разрушений выходит из строя большое количество металлических конструкций, народное хозяйство несет значительные убытки, связанные с ремонтом и заменой подчас дорогостоящего оборудования. Из-за коррозионных процессов большая часть прокорродировавшего металла безвозвратно распыляется по планете. Эти две разновидности потерь, вызванных коррозией, называют прямыми расходами.

Коррозионные процессы являются причиной не только прямых, но и косвенных расходов, которые могут значительно превышать уровень прямых. Это убытки из-за простоев технологических линий и снижения производительности оборудования при остановках отдельных агрегатов вследствие коррозии, убытки от снижения сортности производимой продукции, например, в пищевой или химической промышленности, при загрязнении ее продуктами коррозии технологического оборудования. Осо-

бую статью в этой группе расходов составляют потери в народном хозяйстве, возникающие при разливе на больших пространствах техногенных сред при коррозионных авариях оборудования, что является одной из причин постепенного загрязнения атмосферы и водоемов.

Одним из важных источников загрязнения окружающей среды является коррозионное разрушение трубопроводов, транспортирующих различные коррозионно-активные вещества, например, газы, нефть или продукты их химической переработки. Протяженность трубопроводов, используемых для транспортных целей, непрерывно возрастает, что связано с бесспорным их преимуществом перед всеми существующими способами транспортировки нефтепродуктов. В то же время увеличение протяженности трубопроводов приводит к повышению возможности их разрушения в результате коррозии, а значит, и к возрастанию загрязнения окружающей среды вследствие разлива транспортируемых веществ. Коррозия трубопроводов, по которым транспортируются газы или нефтепродукты, бывает причиной крупных катастроф и порождает чрезвычайные ситуации.

Особенно остро стоят проблемы коррозии и защиты металлов от нее в различных отраслях добывающей и химической промышленности. В связи с этим защита от коррозии в этих отраслях имеет особенно актуальное значение, так как потери от нее оказываются весьма значительными.

По усредненным оценкам, прямые потери от коррозии составляют в среднем около 4 – 5 % национального дохода промышленно развитых стран. Косвенные потери учесть довольно трудно. Однако во многих случаях обращалось внимание на то, что стоимость продукта, недополученного или испорченного вследствие коррозии, либо ущерб, нанесенный утечкой ценных веществ или загрязнениями окружающего пространства, могут, по некоторым зарубежным данным, в 4 раза превышать затраты на ремонт и восстановление оборудования, разрушающегося при коррозии. Это позволило подсчитать, что коррозия отнимает у промышленно развитых стран мира в среднем около десятой доли их национального дохода. Для таких крупных стран, как Россия и США, десятая часть национального дохода составляет очень крупные суммы и в пределах этих сумм даже частичная экономия может представлять большую ценность.

Коррозионные процессы часто являются поводом для споров и судебных разбирательств между поставщиками продукции или услуг и их потребителями в связи с обнаружением коррозионных поражений и их следствий, проявляющихся в условиях эксплуатации. При разрешении таких споров большое значение имеет правильная экспертная коррозиологи-

ческая оценка коррозионного прецедента и выявление в нем определяющего фактора, так как причинами обнаруженного дефекта могут быть как недостатки проекта или ошибки в изготовлении (вина поставщика), так и нарушения технологического регламента (вина потребителя).

Юридические последствия коррозионных прецедентов возможны и в других случаях. Связано это с тем, что многие технические объекты представляют потенциальную опасность, что делает необходимым контроль их состояния на всех стадиях жизненного цикла объекта – от строительства до ликвидации. Прогнозирование коррозии металлов в таких объектах особенно важно при оценке остаточного ресурса стареющей аппаратуры химических и нефтехимических производств. Для удобства управления безопасностью и унификации информации о техническом состоянии металлоконструкций используют понятие предельных состояний. С коррозиологической точки зрения – это общее или местное коррозионное повреждение основного металла или сварных швов. Зависимость явления от многочисленных неучитываемых факторов делает необходимым вместо детерминированной трактовки процесса привлечение средств стохастической динамики для прогнозирования показателей надежности и безопасности техники.

Коррозия трубопроводов или объектов трубопроводного транспорта не ограничивается только невозвратимой потерей металла, но и служит причиной выхода из строя как отдельных участков трубопровода, так и всего трубопровода, что сопровождается огромными экономическими потерями. Эффективная защита трубопроводного транспорта от коррозии является общей проблемой трубопроводного транспорта в целом.

Изучение дисциплины «Системы электрохимической защиты объектов трубопроводного транспорта» способствует формированию у студентов знаний современных проблем, связанных с коррозией объектов трубопроводного транспорта. В результате изучения дисциплины специалист приобретает навыки использования нормативной документации и инженерных расчетов, связанных с реализацией проектных решений, обоснованного выбора технологий сооружения и ремонта защиты объектов трубопроводного транспорта.

В результате освоения дисциплины студент должен ознакомиться:

- с механизмом коррозионных процессов;
- с видами коррозии и коррозионных повреждений;
- с методами пассивной защиты;
- видами, назначением и требованиями к противокоррозионным покрытиям;

- эксплуатационными показателями покрытий; конструкцией изоляционных покрытий и технологией их нанесения;
- с устройствами систем электрохимической защиты;
- современными схемами катодной защиты, типами станций, анодных заземлений;
- протекторной защитой.

Будущие инженеры овладевают навыками расчёта электрических параметров трубопроводов, расчета катодной защиты, расчёта протекторной защиты объектов трубопроводного транспорта.

## **РАБОЧАЯ ПРОГРАММА**

Курс «Системы электрохимической защиты объектов трубопроводного транспорта» читается для студентов специальности 1-70 05 01 «Проектирование, сооружение и эксплуатация газонефтепроводов и газонефтехранилищ». Предполагаемое распределение часов на лекционные, практические и лабораторные занятия приведено ниже.

### **Виды занятий и формы контроля знаний**

Виды занятий, формы контроля знаний	Д		З	
	П	С	П	С
Лекции, ч	36	-	-	-
Практические (семинарские), ч	16	-	-	-
Лабораторные занятия, ч	36	-	-	-
Расчетно-графические работы (семестр)	-	-	-	-
Контрольные работы (семестр)	-	-	-	-
Курсовая работа (семестр/часы)	-	-	-	-
Курсовой проект (семестр)	-	-	-	-
Самостоятельная работа (часы)	-	-	-	-
Экзамен (семестр)	7			
Зачет (семестр)	-			

### **Перечень дисциплин с указанием тем, усвоение которых необходимо для изучения данного курса**

Наименование дисциплины	Раздел (тема)
Химия	Все разделы
Физика	Электричество
Основы экологии	Все разделы
Охрана труда	Охрана труда в строительстве



# **КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ**

## **ТЕМА 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ О КОРРОЗИИ**

### **1.1. История развития, значение и перспективы электрохимической защиты объектов трубопроводного транспорта**

Магистральные трубопроводы – конструкции, имеющие длительный срок эксплуатации и вместе с тем практически не подвергающиеся моральному износу. Из факторов, которые влияют на надёжность и долговечность всего трубопровода (металла трубы), большую роль играют процессы коррозии.

Препятствовать коррозии можно пассивными и активными способами. Пассивные – это нанесение изолирующих покрытий с целью изоляции стенки трубы от грунта. Однако у изоляционных покрытий есть недостатки: обычно через год-два после окончания строительства происходит нарушение полной сплошности покрытия, так как в процессе взаимодействия с окружающей средой покрытие стареет и разрушается. В результате этого почвенный электролит и блуждающие токи вызывают разрушение трубопроводов. К активным способам защиты от коррозии относится электрохимическая защита (ЭХЗ). К недостаткам ЭХЗ можно отнести бóльшую стоимость установки и наблюдения за станциями ЭХЗ. Тем не менее нужно отметить, что, например, применение катодной защиты подземных сооружений почти полностью устраняет коррозионное разрушение. Затраты на установку станций ЭХЗ составляют примерно 1 % от стоимости трубопровода, при этом срок службы трубопровода возрастает почти в 2 раза.

Коррозия трубопроводов или объектов трубопроводного транспорта не ограничивается только невозвратимой потерей металла, но и служит причиной выхода из строя как отдельных участков трубопровода, так и всего трубопровода, что сопровождается огромными экономическими потерями. Эффективная защита трубопроводного транспорта от коррозии является общей проблемой трубопроводного транспорта в целом.

Можно выделить следующие тенденции в противокоррозионной защите:

- совершенствование пассивных методов защиты (изоляционные покрытия);
- автоматизация и компьютеризация активных методов защиты (катодная, протекторная, дренаж и т.д.);
- сочетание средств ЭХЗ с изоляционными покрытиями.

Внедрение активных методов защиты в промышленность началось с 1956 г. на нефтепроводах Баку – Батуми, Саратов – Москва и т. д.

Уже к 1959 г. в результате интенсивного применения средств электрохимической защиты число сквозных проржавлений от коррозии только на нефтепродуктопроводах сократилось более чем в 14 раз. Поэтому 70-80-е годы – это быстрое внедрение методов активной противокоррозионной защиты как при строительстве новых трубопроводов, так и при эксплуатации уже построенных.

Основным предметом изучения дисциплины «Системы электрохимической защиты объектов трубопроводного транспорта» являются:

- механизмы различных видов коррозии;
- методы и системы активной и пассивной защиты от коррозии;
- эксплуатация систем ЭХЗ.

## 1.2. Термин «коррозия». Классификация процессов коррозии

**Коррозией** называется самопроизвольное окисление металлов (от позднелат. *corrosio* – разъедание). Среда, в которой металл подвергается коррозии, называется **коррозионной** или **агрессивной**. При этом процессе образуются продукты коррозии: химические соединения, содержащие металл в окисленной форме.

В тех случаях, когда окисление металла необходимо для осуществления какого-либо технологического процесса, термин «коррозия» употреблять не следует. Например, неверно говорить о коррозии растворяемого анода в электролитической ванне, поскольку для того, чтобы протекал процесс электролиза, анод должен окисляться, посылая свои ионы в раствор. Некорректно также говорить о коррозии алюминия при осуществлении алюмотермического процесса (термитного горения). Но физико-химическая сущность изменений, происходящих с металлом во всех подобных случаях, одинакова: металл окисляется. В целом термин «коррозия» прочно укоренился как в фундаментальных научных работах, так и в технической литературе.

Принято различать два механизма, по которым идёт процесс коррозионного разрушения: химический и электрохимический.

Химический процесс коррозии протекает, в основном, при непосредственном взаимодействии металла с агрессивными средами. Он осуществляется без деления на отдельные стадии и не сопровождается протеканием электрического тока, в отличие от процесса электрохимической коррозии (например, взаимодействие металла с кислородом). Классификация коррозионных процессов представлена на схеме (рис. 1.1).



Рис. 1.1. Классификация коррозионных процессов

*Химическую коррозию* подразделяют на газовую коррозию и коррозию в неэлектролитах.

*Газовая коррозия* – окисление металла кислородом или другим газом (коррозия лопаток газовых турбин).

*Коррозия в неэлектролитах* – разрушение металла в жидких или газообразных агрессивных средах, обладающих малой электропроводностью (коррозия стали в бензине, коррозия внутренней поверхности трубопроводов).

*Электрохимическая коррозия* – окисление металла в электропроводящих средах, сопровождающееся образованием электрического тока. При этом происходят следующие коррозионные процессы:

- *коррозия в электролитах* – коррозия металла в жидких средах, проводящих электрический ток (в речной и морской воде, кислотах, щелочах);

- *почвенная коррозия* – коррозия подземных сооружений под действием почвенного электролита;

- *электрокоррозия* – коррозия, вызванная токами утечки (с рельсов электрифицированного транспорта, промышленных установок);

- *атмосферная коррозия* – коррозия в среде атмосферы;

- *биокоррозия* – почвенная коррозия под действием микроорганизмов;

- *контактная* – коррозия, возникающая при контакте двух металлов с разным электрохимическим потенциалом.

### 1.3. Виды коррозионных разрушений

По характеру коррозионных разрушений различают следующие виды коррозии:

- сплошная – коррозия по всей поверхности;
- местная – коррозия на отдельных участках.

Виды сплошной коррозии:

- равномерная – сталь в кислоте;
- неравномерная – сталь в морской воде.

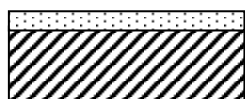


Рис. 1.2. Схема сплошного равномерного коррозионного разрушения

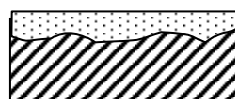


Рис. 1.3. Схема сплошного неравномерного коррозионного разрушения

Виды местной коррозии:

1. *пятнами* (диаметр пятен больше глубины) – латунь в морской воде;



Рис. 1.4. Схема коррозионного разрушения пятнами

2. *язвенная или кавернами* (диаметр соответствует глубине);



Рис. 1.5. Схема язвенного коррозионного разрушения

3. *точечная или питтинговая* (в виде множества отдельных точек 0,1 – 2 мм) – хромоникелевая сталь в морской воде;

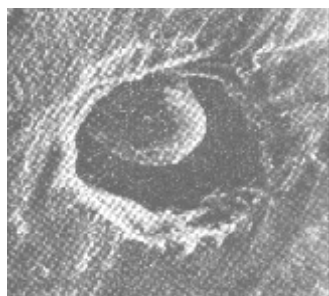


Рис. 1.6. Питтинг у неметаллического включения на поверхности нержавеющей стали X17H14C2 в  $H_2SO_4$  при потенциале  $-0,15$  В в течение 30 минут

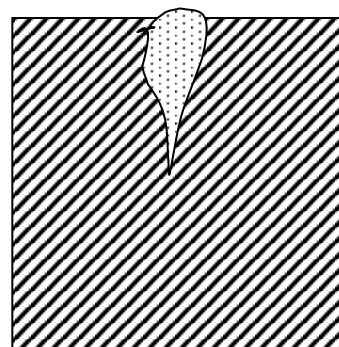


Рис. 1.7. Схема питтингового коррозионного разрушения

4. *поверхностная* (пузыри на поверхности металла);



Рис. 1.8. Схема местного поверхностного коррозионного разрушения

5. *структурно-избирательная* (разрушается одна структурная составляющая) – графитизация чугуна;



Рис. 1.9. Схема структурно-избирательного коррозионного разрушения

6. *сквозная* (сквозное разрушение металла);



Рис. 1.10. Схема сквозного коррозионного разрушения

7. *межкристаллитная* (разрушение по границам кристаллов металлов) – внешний вид не меняется, а прочность теряется.



Рис. 1.11. Состояние поверхности стали X20H20 после потенциостатического травления

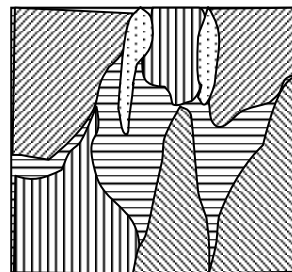


Рис. 1.12. Схема межкристаллитного коррозионного разрушения

Для трубопроводов наиболее характерны язвенный и точечный виды коррозионных разрушений.

Среди перечисленных видов коррозии иногда выделяют так называемые «старые» и «новые». Такое деление связано с тем, что по мере развития техники изменялись не только масштабы коррозионных разрушений, зависящие от количества металла, находящегося в эксплуатации, но вместе с изменением условий его службы происходило «перераспределение ролей» между разнообразными видами коррозии.

К наиболее «старым» видам коррозии относится общая коррозия, характеризующаяся относительно равномерным проникновением коррозионного разрушения в глубь металла. Для этого вида коррозии характерно относительно небольшое изменение прочности конструкции при довольно больших коррозионных потерях металла.

По мере развития техники изделия из металлов стали подвергаться все большим механическим, тепловым и другим нагрузкам, усиливающим коррозионные процессы. Для таких условий разрабатывались все более стойкие материалы. Однако сочетание новых внутренних и внешних факторов коррозии породило и новые разновидности коррозионных процессов, новые виды «болезней» металлов.

Обычная ржавчина («старая болезнь») перестает быть основной опасностью. На самом деле в последние десятилетия вследствие расширения ассортимента конструкционных сплавов и изменения условий эксплуатации металлических материалов у них появилось много новых «болезней», значительно более коварных. К ним относятся коррозионное растрескивание, питтинговая, щелевая, межкристаллитная, ножевая коррозия и некоторые другие виды.

Эти новые «болезни» металлов проявляются во многих условиях, но особенно ярко они дают о себе знать при эксплуатации химического оборудования. Нержавеющие и высокопрочные стали и сплавы, широко применяемые в тепловой и атомной энергетике, химической и других отраслях промышленности, оказались подверженными коррозионному растрескиванию. При этом коррозионные потери металла ничтожно малы, а детали машин, иногда даже целые конструкции выходят из строя полностью.

Вместе с тем трудно не согласиться с академиком Я.М. Колотырским: «Все чаще мы говорим или слышим, что в ходе научно-технической революции «обычное» ржавление отступило на задний план перед «новыми» видами коррозии. Объективно «обычное» ржавление – едва ли не самый сложный, многовариантный и многоступенчатый из коррозионных процессов, и в деталях мы представляем его себе не лучше, чем «новейшее» коррозионное растрескивание».

#### **1.4. Влияние окислов, образующихся на поверхности металла, на протекание процесса коррозии**

В процессе коррозии на поверхности металлического сооружения (в зоне контакта металла и электролита) образуются продукты коррозии, представляющие собой окисные плёнки. Толщина окисной пленки колеблется от 5 – 10 Å до нескольких тысяч ангстрем. Окисная пленка может

утолщаться только в том случае, когда через нее диффундирует кислород. Если ионы металла и принадлежащие им электроны диффундируют из железа через окисную пленку намного быстрее, чем кислород, то окисная пленка растет на границе газа и окисла (рис. 1.13, а). В противном случае зона роста будет находиться под слоем окисла (рис. 1.13, б). Если скорости диффузии ионов металла и кислорода не очень отличаются друг от друга, то зона роста располагается внутри окисной пленки (рис. 1.13, в). Окисная пленка утолщается из-за диффузии. Ее утолщение, в свою очередь, замедляет диффузию – коррозия уменьшается. Толщина окисной пленки зависит от вида металла, характера среды, температуры и т. п.

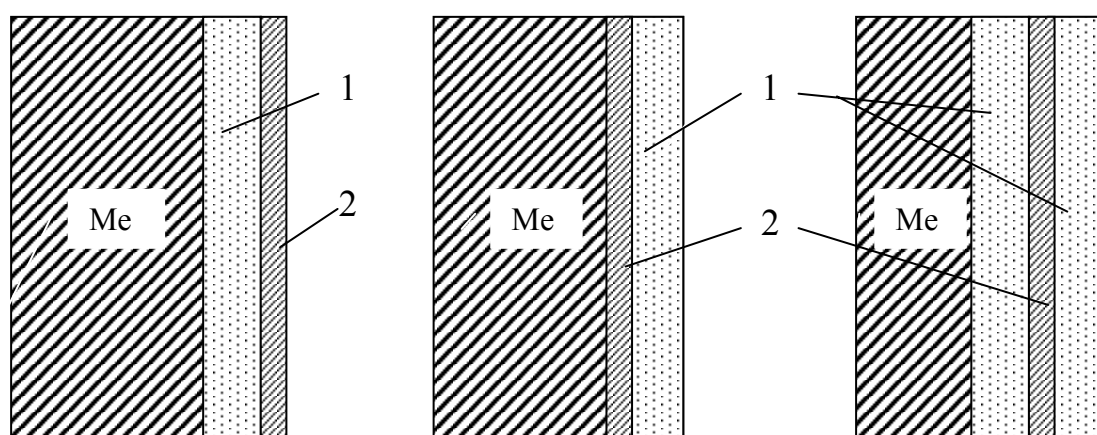


Рис. 1.13. Типы роста окисных пленок:  
1 – окисная пленка; 2 – зона роста

Основное условие защитного действия окисной пленки против дальнейшего окисления металла – ее сплошность, которая зависит от соотношения объема окисленного металла и объема образовавшегося при этом окисла. Пусть окислится 1 моль металла, объем которого

$$V_M = \frac{A}{\rho_M},$$

где  $\rho_M$  – плотность металла;  $V_M$  – объем окисленного металла;

$$V_{OK} = \frac{M_{OK}}{n\rho_{OK}}$$

Объем окисла, получившегося при окислении 1 моля металла, где  $M_{OK}$  – относительная молекулярная масса окисла;  $n$  – число атомов металла



в молекуле окисла;  $\rho_{OK}$  – плотность окисла. Если  $\frac{V_{OK}}{V_M} < 1$  образуются рыхлые окисные пленки со слабыми защитными свойствами. Если  $1 < \frac{V_{OK}}{V_M} < 3$  образуются достаточно сплошные окисные пленки, тормозящие дальнейшее окисление металла.

Наилучшими защитными свойствами обладают окисные пленки с соотношением объемов  $V_{OK}$  и  $V_M$  в следующих пределах:  $1 < \frac{V_{OK}}{V_M} < 3$

Если  $V_{OK}/V_M > 3$ , то в большой по объему пленке могут возникнуть растягивающие напряжения, нарушающие ее сплошность и, следовательно, снижающие ее защитное действие.

Окисные пленки по мере своего роста, а также при деформациях металла могут разрушаться, что снижает их защитные свойства и ускоряет процесс газовой коррозии. Увеличивают интенсивность газовой коррозии и колебания температуры, например, чередующиеся нагрев и охлаждение, так как при этом в окисной пленке возникают термические напряжения и образуются трещины.

Скорость газовой коррозии убывает с уменьшением шероховатости поверхности стали, так как на хорошо обработанных поверхностях окисная пленка сохраняется лучше.

## ВОПРОСЫ САМОКОНТРОЛЯ ПО ТЕМЕ

1. Расскажите, какой смысл имеет термин «коррозия»?
2. Можно ли употреблять термин «коррозия» для определения процесса термитного горения металлов?
3. Какие вы можете назвать типы коррозии?
4. В чем различие химической и электрохимической коррозии?
5. Назовите виды электрохимической коррозии.
6. Воссоздайте полную классификацию процессов коррозии.
7. Какие бывают виды коррозионных повреждений металлов?
8. Какие виды коррозионных повреждений наиболее опасны для объектов трубопроводного транспорта?
9. Какое влияние оказывают окислы, образующиеся на поверхности металла, на процесс коррозии?

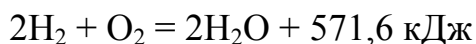
## ТЕМА 2. ХИМИЧЕСКАЯ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ КОРРОЗИЯ

### 2.1. Химическая коррозия. Коррозия металлов в неэлектролитах. Газовая коррозия. Процессы, протекающие при возникновении газовой коррозии. Виды продуктов реакции при газовой коррозии

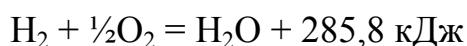
*Химическая коррозия. Коррозия металлов в неэлектролитах. Газовая коррозия.* Химические реакции протекают с выделением или поглощением энергии. Другими словами, необходимо признать, что при взаимодействии различных веществ происходит превращение одной энергии в другую и что эти вещества ещё до реакции в скрытой форме обладали определенной внутренней энергией. Заметим, что превращение энергии происходит только в форме работы или в форме теплоты. При химических превращениях освобождается часть содержащейся в веществах внутренней энергии, об изменении которой в химических реакциях судят по измеряемому количеству теплоты (т.е. по так называемому тепловому эффекту). Энергетические изменения, измеряемые по принципу теплового эффекта и сопровождающие протекание химических реакций, имеют большое практическое значение. Достаточно назвать реакции горения, коррозии и реакции, происходящие в гальваническом элементе. Реакции, протекающие с выделением энергии, называют экзотермическими, а реакции, при которых энергия поглощается, – эндотермическими. Однако следует заметить, что при некоторых реакциях наблюдается, наряду с тепловыми эффектами, выделение или поглощение других видов энергии (лучистой, световой). Большое значение имеют процессы взаимного превращения внутренней и электрической энергий. В реакциях, протекающих со взрывом, внутренняя энергия превращается в механическую непосредственно. Поэтому только по тепловому эффекту количественно выделяемую энергию при реакциях оценить достаточно сложно, а в ряде случаев бесперспективно. Несмотря на это, учитывая важность тепловых эффектов при протекании химических реакций, тепловые эффекты реакций уже давно тщательно изучаются.

В конце XVIII века было установлено, что если при образовании какого-либо соединения выделяется (или поглощается) некоторое количество теплоты, то при разложении этого соединения в тех же условиях такое же количество теплоты поглощается (или выделяется). Это положение вытекает из закона сохранения энергии: чем больше теплоты выделяется при образовании того или иного соединения, тем больше энергии надо потратить на его разложение. Результаты термохимических измерений – тепловые эффекты реакций – принято относить к одному молю образующегося

вещества. Например, выражение «теплота образования жидкой воды равна 285,8 кДж/моль» означает то, что при образовании 18 г жидкой воды из 2 г водорода и 16 г кислорода выделяется 285,8 кДж. Величина теплового эффекта указывается обычно в правой части термохимического уравнения. Например,



или



Основной принцип, на котором основываются все термохимические расчеты, установлен в 1840 г. русским химиком Г.И. Гессом. Тепловой эффект реакции зависит только от начального и конечного состояния веществ и не зависит от промежуточных стадий процесса. Этот принцип известен под названием закона Гесса и является частным случаем закона сохранения энергии, выражающего первый закон термодинамики применительно к химическим процессам.

Химический процесс коррозии протекает, в основном, при непосредственном взаимодействии металла с агрессивными средами. Он осуществляется без разделения на отдельные стадии и не сопровождается протеканием электрического тока (например, взаимодействие металла с кислородом).

Представим себе металл в процессе производства металлического проката на металлургическом заводе: по клетям прокатного стана движется раскаленная масса. Во все стороны от нее разлетаются огненные брызги. Это с поверхности металла скалываются частички окалины – продукта химической коррозии, возникающего в результате взаимодействия металла с кислородом воздуха. Такой процесс самопроизвольного разрушения металла из-за непосредственного взаимодействия частиц окислителя и окисляемого металла называется *химической коррозией*.

По характеру разрушений различают общий и локальный виды химической коррозии. При этом химическая коррозия может протекать как компонентно-избирательная или структурно-избирательная, а локальная коррозия может быть межкристаллитной или носить язвенный характер (например, такой может оказаться ванадиевая коррозия).

Химическая коррозия проявляется в том случае, если коррозионная среда не является электропроводной. Такие условия возникают, когда металл соприкасается с газами при высоких температурах, когда исключается конденсация влаги на поверхности металла. Поэтому при подборе материалов, пригодных для эксплуатации в условиях газовой коррозии, приходится сочетать их устойчивость к окислению (жаростойкость) с высокой прочностью при повышенных температурах (жаропрочность).

Коррозия является естественным процессом, обратным металлургическому. В результате коррозии высвобождается энергия и образуются окислы. Например, при образовании  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  свободная энергия уменьшается на 177 ккал/моль.

К химической коррозии относятся газовая и коррозия металлов в неэлектролитах.

*Коррозия металлов в неэлектролитах*, т. е. в жидких средах, не обладающих электропроводностью (нефть, нефтепродукты и другие органические соединения), представляет опасность для резервуаров, трубопроводов и другого оборудования в системе транспорта и хранения нефти. Входящие в состав нефти и моторных топлив углеводороды в чистом виде и при отсутствии воды неактивны по отношению к металлам. Опасными в коррозионном отношении они становятся при наличии в них сернистых соединений (меркаптанов, сероводорода, сернистого газа и т. п.).

При взаимодействии с сухими газами, воздухом, газообразными продуктами горения топлива при высоких температурах происходит газовая химическая коррозия. По законам химических реакций она возможна и при низких температурах, если на поверхности конденсируется жидкость.

Весьма активно реагируют с металлами расплавленная сера, жидкий бром. При взаимодействии сернистых соединений и серы с углеродистыми сталями на их поверхности образуются сульфиды (от пирита  $\text{FeS}_2$  до пирротита  $\text{FeS}$ ).

*Газовая коррозия* – наиболее распространенный вид коррозии. Газовой коррозии подвергаются детали газовых турбин, двигателей внутреннего сгорания, арматура печей и другие изделия, работающие при повышенных температурах в среде сухих газов.

При коррозии металлов в таких условиях образуется окалина. На железе, стали, чугунах окалина имеет сложное строение: часто она состоит из трех слоев (рис. 2.1) с разной концентрацией кислорода и степенью окисления железа (рис. 2.2).

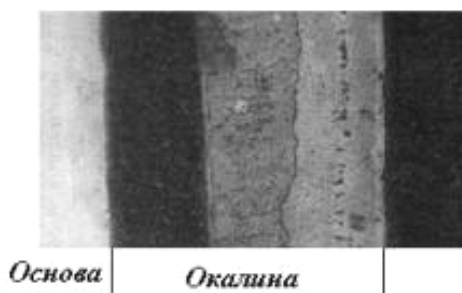


Рис. 2.1. Слоистое строение окалины, образующейся на железе при его окислении на воздухе при повышенной температуре

Слоистость окалины наблюдается вследствие убывания концентрации кислорода в пленке окалины по мере приближения к металлу, так как каждый из слоев представляет барьер на пути диффузии кислорода к металлу. При окислении сплавов состав окалины может быть переменным (рис. 2.2), по толщине слоя окалины соотношение компонентов сплава может изменяться по сложному закону (рис. 2.3). Переменными по составу оказываются и слои окалины и при сульфидной коррозии в расплаве серы, например при коррозии ковара (сплав Fe+Co+Ni) [4].

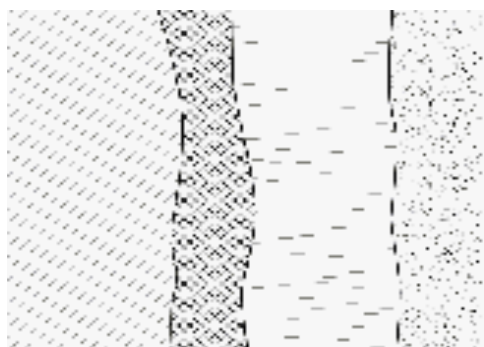


Рис. 2.2. Схема слоистого строения окалины, образующейся на железе при его окислении на воздухе при повышенной температуре

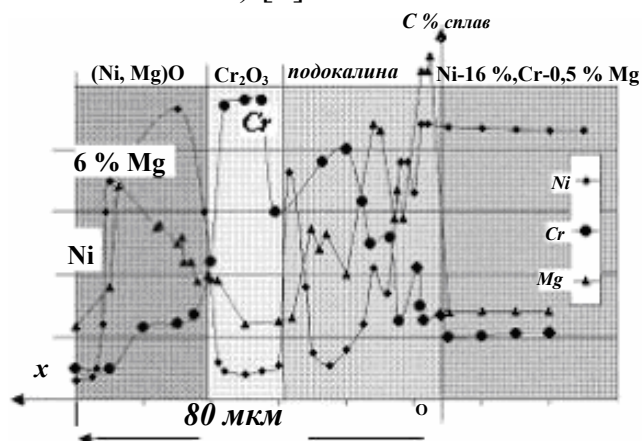


Рис. 2.3. Распределение никеля, хрома и магния по сечению окалины на сплаве Ni-10%Cr-0,5%Mg после окисления в течение 10 часов

При кислородной коррозии стали происходит ее обезуглероживание. Углерод в стали находится в виде цементита  $Fe_3C$ , возникновение которого в процессе термообработки обеспечивает ее высокую прочность. Под действием кислорода цементит окисляется, и сталь теряет в поверхностных слоях свои прочностные свойства. В чугунах углерод содержится не только в виде цементита, но и в форме пластинчатого графита, который располагается по границам зерен металла, где и происходит наиболее интенсивная диффузия кислорода. Окислению подвергаются участки металла, расположенные на границе зерен. Поскольку продукты окисления имеют больший объем, чем металл, из которого они образовались, то происходит увеличение объема металла при коррозии (так называемый «рост чугуна»).

Кислородсодержащие газы вызывают снижение поверхностной прочности металлов, вследствие чего они оказываются подверженными более интенсивному износу. Одна из причин этого явления – удаление цементита из поверхностных слоев металла. Износ топочного оборудования при высоких температурах происходит из-за его контакта с газом, омывающим тру-

бы при большой скорости. Вместе с газом перемещаются и твердые частицы топлива и шлака, имеющие абразивные свойства. Кроме того, в топочных газах обычно содержится окись углерода, которая при температуре 250 – 400 °С способна реагировать с металлами, образуя летучие продукты (карбонилы), уносящиеся вместе с топочными газами. Этот вид коррозии называется карбонильной коррозией металла.

В серосодержащих высокотемпературных газах на поверхности железа, стали, чугунов и других металлов образуется сульфидная или смешанная окалина, которая обладает свойствами, близкими к свойствам кислородной окалины. Она является препятствием для взаимной диффузии реагентов и проявляет защитное действие. Некоторые виды окалины (например, сульфидная окалина никеля) образуют с никелем легкоплавкие вещества. В этом случае возможен переход химической газовой коррозии в высокотемпературную электрохимическую.

Водородная коррозия вызывает изменение механических свойств металлов (повышается хрупкость стали, происходит ее расслоение, «пузырение»). Хрупкое разрушение при водородной коррозии происходит в тех случаях, когда сталь имеет высокие прочностные показатели (высокоуглеродистая сталь). Мягкие пластичные стали могут подвергаться расслоению, пузырению. Причиной водородной коррозии является диффузия водорода в сталь и другие материалы, происходящая при высоких температурах. Это может иметь место, например, в аппаратуре для синтеза аммиака.

Проникающий в металл водород в таких случаях взаимодействует с цементом, образуя газообразные соединения, например, метан  $\text{CH}_4$ , который в стали не растворяется, а собирается в отдельных пустотах, трещинах, дефектах металла, вызывая внутренние напряжения, из-за которых приходится снижать рабочие нагрузки на детали. В результате в мягких сталях возникают пузыри и металл расслаивается, а высокопрочные стали при относительно небольших механических нагрузках подвергаются хрупкому разрушению.

Медь, а также некоторые ее сплавы могут быть склонны к водородной коррозии в тех случаях, когда недостаточно глубоко проведено их раскисление в процессе металлургического производства, т. е. когда в металле сохранился кислород, например, в виде закиси меди  $\text{Cu}_2\text{O}$ . Этот оксид образует отдельную фазу в металле, а проникающий в металл водород, химически взаимодействуя с ним, восстанавливает его. При этом возникает водяной пар, который при высокой температуре может быть причиной возникновения хрупкости меди.

Некоторые металлы, например, титан, способны поглощать (абсорбировать) большие количества кислорода при высокой температуре. Если такой металл оказывается затем в контакте с водородом, то также может наблюдаться водородная коррозия, снижающая его прочность.

При сжигании топлив, содержащих соединения ванадия, в мазутных топках парогенераторов возникает ванадиевая коррозия. Особенностью ее является то, что она может проходить как электрохимическая благодаря образованию расплава на поверхности металла, возникающего при взаимодействии оксида ванадия с железной окалиной.

Галогенидная коррозия представляет собой процесс коррозии металлов в хлористом водороде, хлоре, фторе, броне, йоде с образованием галогенидов. Обычно при низких температурах большинство металлов слабо взаимодействует с этими веществами, но при температуре 200 – 300 °С происходит самоускорение этих реакций и некоторые металлы буквально сгорают в этих условиях с большой скоростью.

Чтобы определить, возможно ли окисление металла, т. е. может ли начаться коррозионный процесс, используют несколько методов. Один из них, наиболее простой, заключается в следующем. В кислородсодержащих газах сопоставляют давление кислорода в газовой смеси (коррозионной среде) и давление распада (диссоциации) оксида металла. Эту величину находят в справочных таблицах. Например, требуется определить, возможно ли окисление палладия на воздухе и в кислороде при 800 °С. Сопоставляя табличную величину давления диссоциации оксида палладия, равную 0,61, с давлением кислорода в воздухе, равным 0,21, можно сделать вывод, что на воздухе окисления палладия быть не может, поскольку давление кислорода меньше табличной величины. Но в чистом кислороде палладий будет окисляться, так как давление кислорода равно 1.

Обратимся еще к одному примеру. Попытаемся определить, возможна ли сульфидная коррозия серебра при 200 °С в смеси водорода и сероводорода. Поскольку коррозия серебра происходит в результате его взаимодействия с сероводородом с образованием водорода, сульфидная коррозия может происходить в том случае, если отношения давлений сероводорода и водорода больше или равны 0,2. Это означает, что при всех других соотношениях давлений этих газов можно защитить металл от сульфидной коррозии, выбрав соответствующий состав газовой смеси. Такой прием используют, применяя так называемые «защитные атмосферы» при нагреве металла в процессе его термической обработки. В печи для нагрева металла создают газовую смесь определенного состава, который подбирают так, чтобы исключалось окисление металла.

Таким образом, различают следующие виды газовой коррозии: окисление, обезуглероживание, водородная хрупкость, «рост» чугуна.

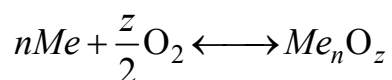
*Окисление железа, стали и чугуна* происходит при нагреве их в среде воздуха. Окисление происходит особенно быстро при температуре выше 600 °С. Железо с кислородом образует три вида окислов, имеющих различные кристаллические решетки: закись железа FeO (вюстит), окись железа Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (гематит) и сложный окисел или закись-окись Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (магнетит).

*Обезуглероживание стали и чугуна* происходит при высоких температурах вследствие диффузии углерода из металла к его поверхности. При этом снижается прочность, одновременно происходит окисление железа. Легирующие элементы замедляют обезуглероживание.

*Водородная хрупкость стали* может появиться при нагреве ее в среде водорода при высоких температурах (выше 300 °С) и высоких давлениях. Водород растворяется в металле, и появляется хрупкость.

*«Рост» чугуна (вспучивание)* сопровождается заметным увеличением размеров чугунных изделий и снижением их прочности. Он происходит вследствие межкристаллитного окисления металла по границам зерен и включений графита.

Металл окисляется кислородом воздуха



где  $n$  – число атомов металла, участвующих в реакции;  $z$  – валентность металла.

## **2.2. Электрохимическая коррозия. Процессы, протекающие при возникновении электрохимической коррозии. Виды продуктов реакции при электрохимической коррозии. Виды и особенности коррозионных разрушений металлических сооружений объектов трубопроводного транспорта**

К электрохимической коррозии относятся все случаи коррозии в водных растворах. Электрохимическая коррозия наиболее распространена, ей подвергаются все строительные металлические конструкции, находящиеся в земле и воде, а также во влажной атмосфере (газопроводы, нефтепроводы, водопроводы, кабели связи, электрокабели и т. д.) В результате электрохимической коррозии окисление металла может привести к образованию нерастворимых продуктов (ржавчины) и к переходу металла в раствор в виде ионов.



*Механизм электрохимической коррозии* – это самопроизвольное разрушение в результате электрического взаимодействия с жидкостями-электролитами (вода, водные растворы кислот, солей и т. д.).

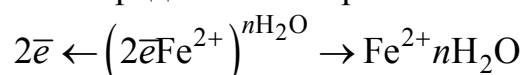
*Причина электрохимической коррозии* – пониженная термодинамическая устойчивость металлов и стремление переходить в ионное состояние на границе раздела металл – электролит.

Взаимодействие твердого тела с жидкостью может привести к разрушению твердого тела. Атомы кислорода и водорода создают полярные молекулы, характеризующиеся наличием двух полюсов – положительного и отрицательного. Это определяет наличие силового электрического поля молекул воды и агрессию воды.

Молекулы  $H_2O$  имеют очень маленький размер, поэтому они как бы внедряются в кристаллическую решетку металла. Этот процесс называется *гидратацией*.

Гидратация может быть настолько сильной, что ослабленные связи атома металла с валентными электронами нарушаются и атом металла получает возможность покинуть узел кристаллической решетки и перейти в воду. Так образуется ион-атом, несущий положительный заряд. Данный ион атом гидратируется, т. е. окружается молекулами воды, при этом оставшиеся в металле электроны являются носителями отрицательных зарядов. Таким образом, у поверхности металла образуется двойной электрический слой, характеризующийся разностью потенциалов между поверхностным металлом и слоем раствора, прилегающего к поверхности металла.

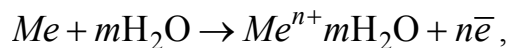
Этот процесс можно представить выражением



Так возникает скачок разности потенциалов, который зависит от концентрации (подвижности) ионов в двойном слое.

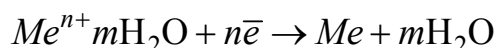
В случае если на поверхности металлического сооружения возникают участки с различными потенциалами, появляется уравнительный ток, который будет протекать через грунт от участков сооружения, обладающих более отрицательным потенциалом, к участкам с более положительным потенциалом, а в самом сооружении ток будет протекать в обратном направлении. Участки, на которых растворяется металл, называются анодными. На анодных участках коррозионный ток стекает с сооружения в окружающий грунт, а на катодных – наоборот. Электрохимические процессы на аноде и на катоде различны, но взаимосвязаны, т. е. не могут, как правило, протекать самостоятельно. Такая система называется коррозионным элементом.

При анодной реакции поверхностные атомы металла, теряя электроны, переходят в раствор в виде гидратированных ионов и оставляют в металле эквивалентное количество свободных электронов, что можно выразить следующей реакцией

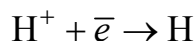


где  $Me$  – атом металла;  $m$  – количество молекул воды;  $Me^{n+}$  – катион металла;  $n$  – количество потерянных электронов;  $e$  – электрон.

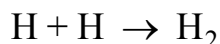
Катодная реакция характеризуется восстановлением атомов, молекул и ионов присоединением электронов и может быть выражена уравнением



Наиболее возможной на катоде является водородная деполяризация

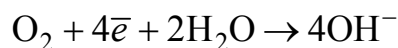


и далее



При этой реакции происходит восстановление иона водорода в газообразный водород.

В солевом или щелочном растворе катодный процесс может протекать и с кислородной деполяризацией по формуле



При этом скорость процесса на катоде зависит от скорости движения кислорода в электролите к катоду и от скорости ионизации кислорода на поверхности катода.

### **2.3. Классификация почв. Удельное электрическое сопротивление почвы.**

#### **Почва как коррозионная среда. Коррозионная активность грунтов.**

##### **Почвенная коррозия подземных металлических трубопроводов**

Основные факторы, определяющие интенсивность почвенной коррозии: тип грунта; состав и концентрация веществ, растворимых в грунте; влажность грунта; характер проникновения воздуха в грунт; структура грунта; наличие в грунте бактерий, активизирующих развитие процессов коррозии; температура и удельное сопротивление грунта.

Грунты в зависимости от условий образования разделяются на глинистые и пылеватые (глины, супеси, суглинки, лёсс), обломочные (галечники, щебни, гравелистые грунты и пески), торфянистые, искусственные и насыпные.

Для оценки естественных грунтов большое значение имеет связанность, под которой понимают взаимную связь отдельных частиц грунта. Связанность грунта возрастает по мере уменьшения размера отдельных частиц. Из естественных грунтов наибольшей коррозионной активностью обладают глинистые, солончаковые, пылеватые и торфянистые.

Несмотря на то, что искусственные и насыпные грунты встречаются очень редко, именно они должны рассматриваться как особо опасные с точки зрения коррозии.

Состав и концентрация веществ, растворимых в грунте, определяют свойства почвенного электролита. В значительной мере степень коррозионной активности грунта определяется величиной pH, от которой зависит стойкость пленок, возникающих на поверхности металла.

Одним из показателей коррозионной активности грунта по отношению к стали является концентрация ионов  $\text{Cl}^-$  и  $\text{SO}_4^-$ . Суммарное содержание их в грунте более 0,1 %, как правило, указывает на его повышенную коррозионную активность, при этом содержание иона  $\text{Cl}^-$  более определено характеризует коррозионную активность грунта, чем содержание  $\text{SO}_4^-$ . Это объясняется тем, что при большом содержании хлоридов затрудняется образование защитных пленок. Опасность коррозии зависит от насыщения грунта водой.

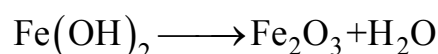
Считается, что наиболее сильная коррозия подземных сооружений происходит в грунте, имеющем влажность  $W = 30\%$ . Это обусловлено более быстрой диффузией кислорода в грунтах, не насыщенных водой, т. е. в рыхлых и пористых, тогда как при  $W \gg 30\%$  газообразного кислорода в грунте меньше и скорость диффузии его замедляется. В случае  $W \ll 30\%$  в грунте не хватает влаги для снижения электросопротивления грунта. Процесс коррозии в грунте развивается быстро при проникновении воздуха в грунт, так как кислород воздуха способствует микробиологическим процессам. Размеры частиц грунта влияют на его воздухопроницаемость.

Таблица 2.1

Коррозионная активность грунтов по отношению к углеродистой стали в зависимости от их удельного электрического сопротивления

Коррозионная активность	$\rho$ , Ом·м
Низкая	свыше 100
Средняя	от 20 до 100
Повышенная	от 10 до 20
Высокая	от 5 до 10
Весьма высокая	до 5

На поверхности металлических изделий, находящихся в контакте с почвенным электролитом, вследствие местных неоднородностей состава металла или электролита возникает большое количество коррозионных элементов, природа которых аналогична природе гальванических элементов: на выходных участках протекает реакция окисления с образованием ионов металла  $Fe^{2+}$ , а на катодных участках под влиянием кислорода образуется гидроокись. Ионы  $Fe^{2+}$  и  $OH^-$  направляются друг к другу и образуют нерастворимый осадок  $Fe(OH)_2$ , который может разлагаться на окись железа и воду



Высвобождающиеся при реакции окисления электроны от анодного участка по металлу изделия протекают к катодному участку и участвуют в реакции восстановления.

Основными условиями возникновения почвенной коррозии металлов являются следующие:

- наличие разности потенциалов двух разноименных металлических изделий или их деталей, а также отдельных участков поверхности одного и того же металла;
- наличие контакта двух металлов или двух участков металла с электролитом;
- соединение анода и катода металлическим проводником, которым является металл сооружения, если на его поверхности возникли анодные и катодные участки;
- наличие в электролите диссоциированных ионов.

Степень коррозионного разрушения металла определяется силой тока коррозии  $I_{кор}$ .

Зависимость силы тока коррозии от характеристики гальванического коррозионного элемента можно представить в следующем общем качественном виде

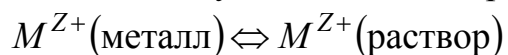
$$I_{кор} = \frac{\Phi_{OK} - \Phi_{OA}}{R_K - R_A - R},$$

где  $\Phi_{OK}$ ,  $\Phi_{OA}$  – равновесные потенциалы катодного и анодного участков;  $R_A$ ,  $R_K$  – поляризационные сопротивления анодного и катодного участков;  $R$  – омическое сопротивление цепи элемента.

## 2.4. Контактная коррозия. Потенциалы металла. Электрохимический ряд напряжений металлов. Нормальный водородный электрод

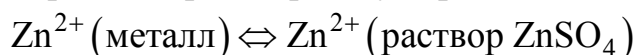
Под электрохимической системой подразумевается совокупность всех веществ, участвующих в образовании электродного потенциала. Окислительно-восстановительная способность представляет собой одно из понятий, характеризующих именно электрохимическую систему («электрохимический процесс в системе»). Окислительно-восстановительная реакция протекает в гальваническом элементе несмотря на то, что окислитель и восстановитель друг с другом не соприкасаются. Как же возникает ЭДС при пространственном разделении процессов окисления и восстановления?

Если привести металл ( $M$ ) в контакт с раствором его соли, то ионы металла ( $M^{Z+}$ ) переходят из металлической фазы в раствор и обратно из раствора в металл. Поскольку энергетическое состояние ионов в этих фазах неодинаково, то в первый момент ионы металла переходят из металла в раствор и обратном направлении с различной скоростью. Если преобладает скорость перехода ионов из металла в раствор, то раствор приобретает положительный заряд, а металлический электрод заряжается отрицательно. По мере накопления положительных зарядов в растворе переход катионов металла в одноименно заряженный раствор затрудняется. Скорость перехода зарядов из металла в раствор уменьшается, в то время как скорость перехода катионов из раствора в металл возрастает. В результате скорости обоих процессов выравниваются и устанавливается равновесие

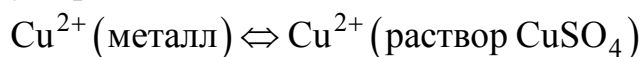


При этом металлический электрод оказывается заряженным отрицательно, а раствор – положительно. Если установить контакт с раствором его соли и при этом скорость перехода катионов из металла в раствор будет меньше, чем скорость их перехода в обратном направлении, то в этом случае электрод заряжается положительно, а раствор отрицательно. Для примера рассмотрим подробно процессы, происходящие в гальваническом элементе Якоби – Даниэля (рис. 2.4).

В этом элементе соответствующие равновесия устанавливаются между цинковым электродом и раствором сульфата цинка



Точно также устанавливается равновесие и между медным электродом и раствором сульфата меди



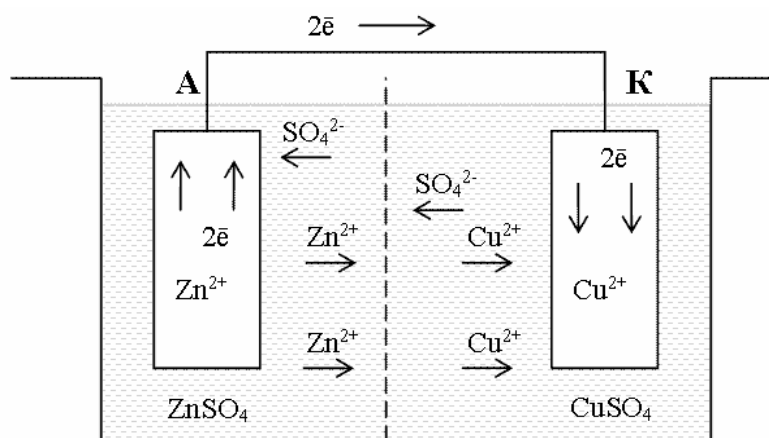
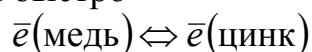


Рис. 2.4. Схема гальванического элемента Якоби – Даниэля

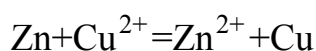
Как видим, в элементе Якоби – Даниэля имеются еще две границы раздела фаз: между растворами сульфатов цинка и меди, а также между самими электродами цинка и меди. Рассмотрим влияние каждой из трех границ на величину ЭДС. Граница между растворами не оказывает существенного влияния ни на величину ЭДС, ни на протекание реакции при работе элемента. Через границу между металлами могут проходить не ионы, как в случае границы металл – раствор, а электроны. При этом диффузия атомов и ионов из металла в металл происходит медленно и практически не влияет на установление равновесия на границе между металлами. Здесь вследствие неодинакового энергетического состояния электронов в цинке и в меди первоначальные скорости перехода электронов из одного металла в другой и в обратном направлении различны. Однако и в этом случае равновесие, при котором металлы также приобретают заряды противоположного знака, устанавливается быстро



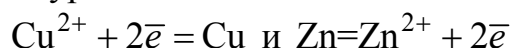
Таким образом, при разомкнутой цепи элемента Якоби – Даниэля на трех рассматриваемых границах раздела фаз устанавливаются равновесия, причем фазы заряжаются. Энергетическое состояние электронов на концах разомкнутой цепи оказывается неодинаковым: на цинковом электроде энергия Гиббса электронов выше, а на медном электроде – ниже. Разность энергий Гиббса электронов на концах цепи и определяет ЭДС данного элемента.

При замыкании внешней цепи электроны перемещаются от цинкового электрода к медному. В этом случае равновесие на фазовых границах нарушается, происходит направленный переход ионов цинка из металла в раствор, ионов меди – из раствора в металл, электроны протекают от цинка к меди. Так осуществляется окислительно-восстановительная реакция в гальваническом элементе Якоби – Даниэля, так, в принципе, образуется ЭДС в любом гальваническом элементе.

*Электродные потенциалы.* Окислительно-восстановительная реакция, протекающая в гальваническом элементе, разделяется на две полуреакции. В соответствии с этим электродвижущая сила представляется в виде разности двух величин, каждая из которых отвечает данной полуреакции. Эти величины называются электродными потенциалами. Например, для медно-цинкового элемента при его замыкании внешней цепи окислительно-восстановительная реакция



разбивается на полуреакции:



Соответственно ЭДС ( $\varepsilon$ ) представляется как разность электродных потенциалов, один из которых  $\varphi_1$  отвечает первой, а другой  $\varphi_2$  – второй из записанных полуреакций:

$$\varepsilon = \varphi_1 - \varphi_2$$

В результате изучения потенциалов различных электродных процессов установлено, что их величины зависят от трёх факторов:

- природы веществ – участников электродного процесса;
- соотношения между концентрациями этих веществ;
- температуры системы.

Эта зависимость выражается следующим уравнением:

$$\varphi = \varphi_0 + \frac{2,3 \cdot R \cdot T}{Z \cdot F} \cdot \lg \frac{[ox]}{[red]},$$

где  $\varphi_0$  – стандартный электродный потенциал данного процесса (константа);  $R$  – газовая постоянная;  $T$  – абсолютная температура;  $Z$  – число электронов, принимающих участие в процессе;  $F$  – постоянная Фарадея;  $[ox]$  и  $[red]$  – произведения концентраций веществ, участвующих в процессе в окисленной  $[ox]$  и в восстановленной  $[red]$  формах.

В этом уравнении первое слагаемое  $\varphi_0$  учитывает влияние на его величину природы веществ, а второе – их концентраций. При этом оба слагаемых члена изменяются с температурой. Для того чтобы найти значение электродного потенциала, необходимо измерять не напряжение работающего элемента, а именно его ЭДС при разомкнутой внешней цепи. В этом случае реакция в гальваническом элементе практически не протекает.

Таким образом, электродные потенциалы отвечают обратному протеканию процессов или состоянию электрохимического равновесия на электродах. Поэтому электродные потенциалы часто называют равновесными электродными потенциалами или просто равновесными потенциалами.

В табл. 2.2 приведены уравнения важнейших электродных процессов и соответствующие электродные потенциалы в порядке возрастания величины  $\varphi_0$  (стандартных электродных потенциалов). В катодной защите стальных подземных сооружений в отличие от электродных потенциалов, как правило, различают стационарные потенциалы. Стационарные потенциалы не отвечают обратимому протеканию процессов коррозии.

Таблица 2.2

Электродные потенциалы в водных растворах при 25 °С  
и парциальном давлении газов, равном нормальному атмосферному давлению

Электродный процесс	Уравнение электродного потенциала
$\text{Li}^+ + \bar{e} = \text{Li}$	$\varphi = -3,045 + 0,059 \cdot \lg [\text{Li}^+]$
$\text{Rb}^+ + \bar{e} = \text{Rb}$	$\varphi = -2,925 + 0,059 \cdot \lg [\text{Rb}^+]$
$\text{K}^+ + \bar{e} = \text{K}$	$\varphi = -2,925 + 0,059 \cdot \lg [\text{K}^+]$
$\text{Cs}^+ + \bar{e} = \text{Cs}$	$\varphi = -2,923 + 0,059 \cdot \lg [\text{Cs}^+]$
$\text{Ca}^{2+} + 2\bar{e} = \text{Ca}$	$\varphi = -2,866 + 0,030 \cdot \lg [\text{Ca}^{2+}]$
$\text{Na}^+ + \bar{e} = \text{Na}$	$\varphi = -2,714 + 0,059 \cdot \lg [\text{Na}^+]$
$\text{Mg}^{2+} + 2\bar{e} = \text{Mg}$	$\varphi = -2,363 + 0,030 \cdot \lg [\text{Mg}^{2+}]$
$\text{H} + 2\bar{e} = 2\text{H}$	$\varphi = -2,251 + 0,059 \cdot \lg [\text{H}^-]$
$\text{Al}^{3+} + 3\bar{e} = \text{Al}$	$\varphi = -1,662 + 0,020 \cdot \lg [\text{Al}^{3+}]$
$\text{Ti}^{2+} + 2\bar{e} = \text{Ti}$	$\varphi = -1,628 + 0,030 \cdot \lg [\text{Ti}^{2+}]$
$\text{Mn}^{2+} + 2\bar{e} = \text{Mn}$	$\varphi = -1,180 + 0,030 \cdot \lg [\text{Mn}^{2+}]$
$\text{Cr}^{2+} + 2\bar{e} = \text{Cr}$	$\varphi = -0,913 + 0,030 \cdot \lg [\text{Cr}^{2+}]$
$\text{Zn}^{2+} + 2\bar{e} = \text{Zn}$	$\varphi = -0,763 + 0,030 \cdot \lg [\text{Zn}^{2+}]$
$\text{Cr}^{3+} + 3\bar{e} = \text{Cr}$	$\varphi = -0,744 + 0,020 \cdot \lg [\text{Cr}^{3+}]$
$[\text{Au}(\text{CN})_2]^- + \bar{e} = \text{Au} + 2\text{CN}^-$	$\varphi = -0,61 + 0,059 \cdot \lg \frac{[\text{Au}(\text{CN})_2]}{[\text{CN}^-]^2}$
$2\text{H}^+ + 2\bar{e} = \text{H}_2$	$\varphi = -0,059 \text{ pH}$
$\text{Cu}^{2+} + 2\bar{e} = \text{Cu}$	$\varphi = 0,337 + 0,030 \cdot \lg [\text{Cu}^{2+}]$
$\text{I}(\text{K}) + 2\bar{e} = 2\text{I}^-$	$\varphi = 0,536 - 0,059 \cdot \lg [\text{I}^-]$
$\text{MnO}_4^- + \bar{e} = \text{MnO}_4^{2-}$	$\varphi = 0,558 + 0,059 \cdot \lg \frac{[\text{MnO}_4^-]}{[\text{MnO}_4^{2-}]}$
$\text{Fe}^{3+} + \bar{e} = \text{Fe}^{2+}$	$\varphi = 0,771 + 0,059 \cdot \lg \frac{[\text{Fe}^{3+}]}{[\text{Fe}^{2+}]}$
$\text{NO}_3^- + 2\text{H}^+ + \bar{e} = \text{NO}(\text{r}) + \text{H}_2\text{O}$	$\varphi = 0,80 + 0,059 \cdot \lg [\text{NO}_3^-] - 0,118 \text{ pH}$
$\text{Hg}_2^{2+} + 2\bar{e} = 2\text{Hg}$	$\varphi = 0,788 + 0,030 \cdot \lg [\text{Hg}_2^{2+}]$
$\text{Ag}^+ + \bar{e} = \text{Ag}$	$\varphi = 0,799 + 0,059 \cdot \lg [\text{Ag}^+]$
$\text{Hg}^{2+} + 2\bar{e} = \text{Hg}$	$\varphi = 0,854 + 0,030 \cdot \lg [\text{Hg}^{2+}]$
$2\text{Hg}^{2+} + 2\bar{e} = \text{Hg}_2^{2+}$	$\varphi = 0,920 + 0,030 \cdot \lg \frac{[\text{Hg}_2^{2+}]}{[\text{Hg}^{2+}]^2}$
$\text{Br}_2(\text{ж}) + 2\bar{e} = 2\text{Br}^-$	$\varphi = 1,065 - 0,059 \cdot \lg [\text{Br}_2]$
$\text{Pt}^{2+} + 2\bar{e} = \text{Pt}$	$\varphi = 1,2 + 0,030 \cdot \lg [\text{Pt}^{2+}]$
$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\bar{e} = 2\text{H}_2\text{O}$	$\varphi = 1,229 - 0,059 \text{ pH}$
$\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-} + 14\text{H}^+ + 6\bar{e} = 2\text{Cr}^{3+} + 7\text{H}_2\text{O}$	$\varphi = 1,333 + 0,010 \cdot \lg \frac{[\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}]}{[\text{Cr}^{3+}]^2} - 0,138 \text{ pH}$
$\text{Cl}_2(\text{r}) + 2\bar{e} = 2\text{Cl}^-$	$\varphi = 1,358 + 0,059 \cdot \lg [\text{Cl}_2]$
$\text{PbO}_2 + 4\text{H}^+ + 2\bar{e} = \text{Pb}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O}$	$\varphi = 1,455 + 0,030 \cdot \lg [\text{Pb}^{2+}] - 0,118 \text{ pH}$
$\text{Au}^{3+} + 3\bar{e} = \text{Au}$	$\varphi = 1,498 + 0,020 \cdot \lg [\text{Au}^{3+}]$



Разность потенциалов между металлом и раствором, в который он погружен, можно измерить, «соединив» раствор проводником с измерительным прибором. Самое трудное – это присоединить к прибору раствор. Такое соединение можно сделать только при помощи металлического проводника, который служит для погружения в раствор. Но при соприкосновении с раствором на поверхности металла проводника образуется двойной электрический слой и появляется разность потенциалов.

Значит, при помощи измерительного прибора можно определить не потенциал одного электрода, а разность потенциалов между двумя электродами.

Поэтому для расчетов электродных потенциалов выбран электрод, потенциал которого условно принят равным нулю (рис. 2.5). Этот платиновый электрод, который погружен в раствор, содержащий ионы водорода, омывается пузырьками газообразного водорода, продуваемого через раствор, и адсорбирует на своей поверхности водород, образуя водородный мешок. Количество воды, содержание соляной кислоты и давление обтекающего его потока водорода должны иметь строгое значение.

Водородный электрод, электролит которого в расчете на 1000 г воды содержит 43,18 г соляной кислоты, а обтекающий его поток водорода имеет давление 1 кгс/см<sup>2</sup> называется *нормальным водородным электродом*. Его электродный потенциал по соглашению принимается равным нулю.

Равновесными являются потенциалы различных электродов, возникающие на границе металл – раствор.

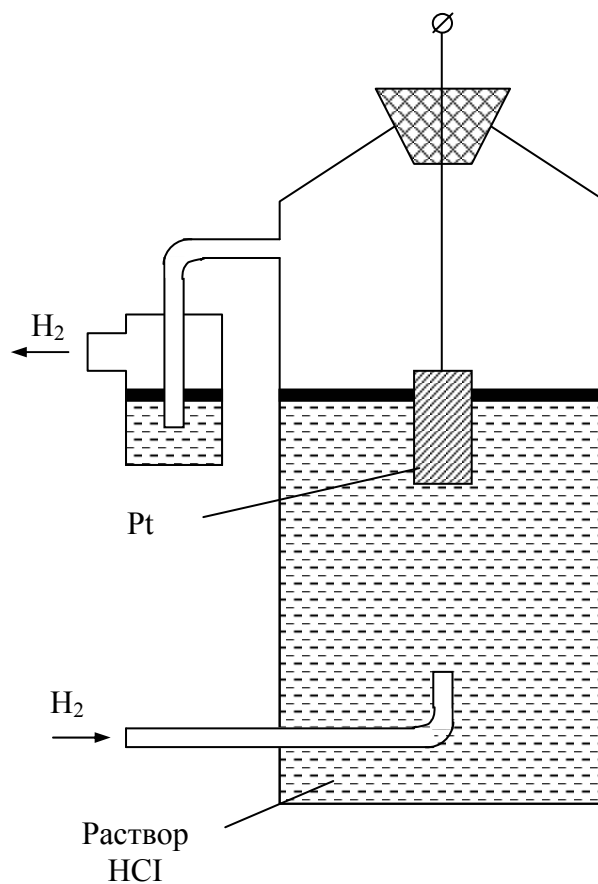


Рис. 2.5. Нормальный водородный электрод

Измеренные относительно нормального водородного электрода потенциалы называются *нормальными*, они образуют так называемый *электрохимический ряд напряжений*. По этому ряду можно предсказать, какой металл из выбранной пары будет разрушаться, т.е. будет служить анодом, а также степень опасности коррозионного процесса.

Потенциалы являются отрицательными, если сами металлы заряжены отрицательно по отношению к раствору, и положительными, если металлы заряжены положительно. Чем более отрицателен потенциал металла, тем больше склонность его к коррозии, если нет других причин, препятствующих переходу катионов в раствор, например, если металл не защищен от воздействия внешней среды окисной пленкой на его поверхности.

Стационарным называется потенциал, при котором устанавливается баланс между числом зарядов, потерянных металлом, и числом зарядов, вновь им приобретенных.

Потенциал, отвечающий электродному процессу:  $2\text{H}^+ + 2\bar{e} = \text{H}_2$  в нейтральной среде ( $\text{pH} = 7$ ) равен:  $-0,059 \cdot 7 = -0,41$  В.

Следовательно, ионы водорода, находящиеся в воде и в нейтральных водных средах, могут окислить только те металлы, потенциалы которых меньше, чем  $-0,41$  В (табл. 2.3).

Таблица 2.3

Ряд напряжений металлов

Уравнение электродного процесса	Стандартный потенциал $\varphi^0$ при 25 °С, В	Уравнение электродного процесса	Стандартный потенциал $\varphi^0$ при 25 °С, В
$\text{Li}^+ + \bar{e} = \text{Li}$	-3,045	$\text{Co}^{2+} + 2\bar{e} = \text{Co}$	-0,277
$\text{Rb}^+ + \bar{e} = \text{Rb}$	-2,925	$\text{Ni}^{2+} + 2\bar{e} = \text{Ni}$	-0,250
$\text{K}^+ + \bar{e} = \text{K}$	-2,925	$\text{Sn}^{2+} + 2\bar{e} = \text{Sn}$	-0,136
$\text{Cs}^+ + \bar{e} = \text{Cs}$	-2,923	$\text{Pb}^{2+} + 2\bar{e} = \text{Pb}$	-0,126
$\text{Ca}^{2+} + 2\bar{e} = \text{Ca}$	-2,866	$\text{Fe}^{3+} + 3\bar{e} = \text{Fe}$	-0,036
$\text{Na}^+ + \bar{e} = \text{Na}$	-2,714	$2\text{H}^+ + \bar{e} = \text{H}_2$	0
$\text{Mg}^{2+} + 2\bar{e} = \text{Mg}$	-2,363	$\text{Bi}^{3+} + \bar{e} = \text{Bi}$	0,215
$\text{Al}^{3+} + 3\bar{e} = \text{Al}$	-1,662	$\text{Cu}^{2+} + \bar{e} = \text{Cu}$	0,337
$\text{Ti}^{2+} + 2\bar{e} = \text{Ti}$	-1,628	$\text{Cu}^+ + \bar{e} = \text{Cu}$	0,521
$\text{Mn}^{2+} + 2\bar{e} = \text{Mn}$	-1,180	$\text{Hg}^{2+} + 2\bar{e} = 2\text{Hg}$	0,788
$\text{Cr}^{2+} + 2\bar{e} = \text{Cr}$	-0,913	$\text{Ag}^+ + \bar{e} = \text{Ag}$	0,799
$\text{Zn}^{2+} + 2\bar{e} = \text{Zn}$	-0,763	$\text{Hg}^{2+} + 2\bar{e} = \text{Hg}$	0,854
$\text{Cr}^{2+} + 3\bar{e} = \text{Cr}$	-0,744	$\text{Pt}^{2+} + 2\bar{e} = \text{Pt}$	1,2
$\text{Fe}^{2+} + 2\bar{e} = \text{Fe}$	-0,440	$\text{Au}^{3+} + 3\bar{e} = \text{Au}$	1,498
$\text{Cd}^{2+} + 2\bar{e} = \text{Cd}$	-0,403	$\text{Au}^+ + \bar{e} = \text{Au}$	1,691

Таким образом, вода, содержащая растворенный кислород, значительно опаснее в коррозионном отношении, чем вода, не содержащая его и способная окислять металлы только ионами водорода. Поэтому кроме природы металла, природы окислителя, концентрации окислителя на скорость коррозии могут влиять различные примеси, добавки, которые изменяют потенциал или самого металла, или изменяют среду в зависимости от размеров включений, добавок, а также их природы.

Например, включения инородного металла очень малы. В этом случае включения практически не изменяют величину потенциала основного металла в каком-то растворе. Тогда ускорение процесса коррозии может наблюдаться в том случае, если потенциал окислительной полуреакции металла-включения меньше, чем потенциал основного металла.

Включения инородного металла достаточны для изменения потенциала основного металла. В этом случае, помимо потенциала основного металла окислительной полуреакции, на скорость коррозии может повлиять поляризационный потенциал металла-включения. Если металл включения имеет больший потенциал, чем основной металл, то последний поляризуется анодно и скорость его коррозии возрастает.

Классический пример: алюминий, содержащий включения железа и меди, корродирует значительно быстрее, чем алюминий высокой чистоты. Скорость коррозии металла повышается также при включении в него неметаллических примесей, потенциал которых выше потенциала основного металла. Поэтому включения оксидов или шлаков в стали снижают её коррозионную стойкость. Заметим также, что ингибиторы примеси, находящиеся в окружающей металл среде, могут также влиять на потенциал окислительной полуреакции (на скорость коррозии), ускоряя или замедляя её.

Отсюда можно сделать выводы:

- коррозия невозможна, когда потенциалы обоих процессов полуреакций окислителя и восстановителя равны между собой. В этом случае окислительно-восстановительная реакция заканчивается и наступает химическое равновесие;
- коррозия возможна, когда потенциалы окислителя и восстановителя не равны.

В общем случае коррозия возможна тогда, когда равновесный потенциал растворения металла в данном растворе электролита отрицательнее равновесного потенциала восстановления окислителя. Величина равновесного потенциала при данной концентрации ионов металла в электролите точно определяется из уравнения Нернста. Однако при коррозии стальных подземных сооружений в грунтах и водах концентрация ионов в окружающем электролите практически всегда равна нулю, следовательно, величина равновесного потенциала не может быть определена.

## **2.5. Биокоррозия. Причины биокоррозии. Виды повреждения трубопроводов при возникновении биокоррозии. Методы предотвращения биокоррозии**

Для активации коррозии микроорганизмами окружающая среда должна быть подходящей для их роста и размножения. Основными факторами, способствующими активному развитию микробов, являются влага, рН среды, присутствие ряда элементов (фосфора, калия, азота, серы, железа), наличие источников углерода и энергии (органические и неорганические вещества, солнечный свет).

Известен ряд способов усиления коррозии микроорганизмами, среди которых можно выделить механическое воздействие (покрытие поверхности металла); изменение электрохимических условий (действие гальванической ячейки и поверхностные заряды); изменение рН и окислительно-восстановительного потенциала среды  $E_h$ .

В коррозионных процессах принимают участие различные микроорганизмы, среди которых наиболее опасны литотрофные бактерии, участвующие в трансформации серы в природе и способствующие созданию агрессивных сред.

В процессе жизнедеятельности бактерий в почве и природных водах возможно протекание трех основных типов биологических реакций превращения серы: ассимиляция, окисление серы и серосодержащих соединений ( $S^0$ , сульфиды, тиосульфаты, политионаты), восстановление сульфатов в сульфиды.

Бактерии активно участвуют в круговороте серы в природе, в процессах биохимического превращения соединений серы. Схематично этот цикл представлен на рис. 2.6. Сера является необходимым элементом питания животных, растений и микроорганизмов, что обуславливает ее сложный круговорот в природе. В результате разложения микробами органической материи (животных остатков), гниения растений в заболоченных почвах и других средах, характеризующихся анаэробными условиями, образуется сероводород. Источником серы могут служить также осадки и минеральные загрязнения (особенно в промышленных районах).

Микроорганизмы почвы и водоемов играют важную роль в превращении серы и ее соединений в усвояемые растениями сульфаты, а также сульфиды или летучие соединения. Одни микроорганизмы ответственны за окислительные процессы в биохимических реакциях серы с конечным образованием сульфатов и минеральных кислот; другие, напротив, – за восстановительные с образованием из сульфатов сероводорода и сульфидов.

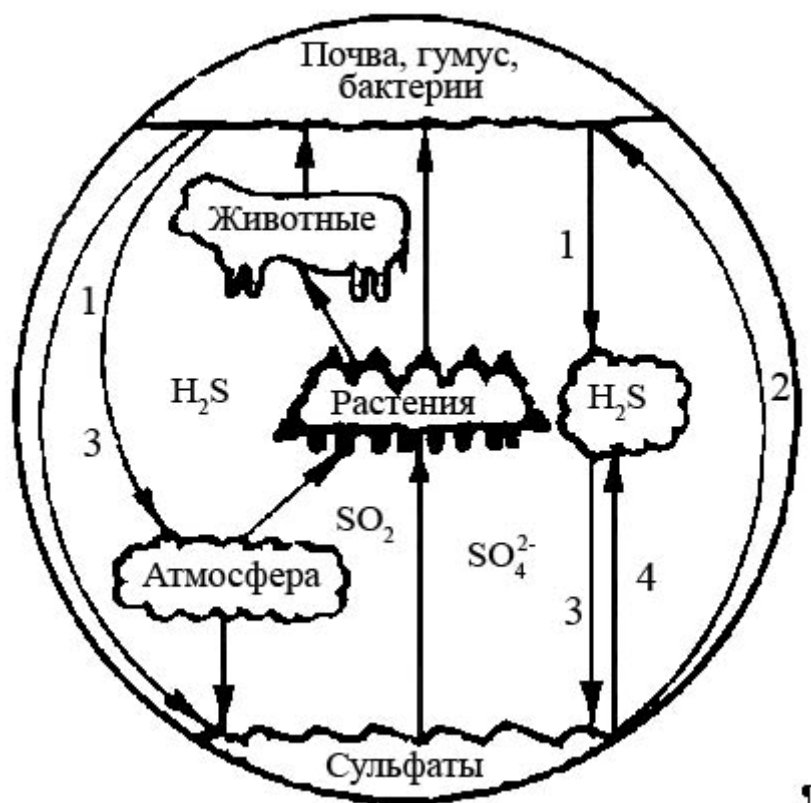


Рис. 2.6. Круговорот серы в природе:  
 1 – образование сернистых соединений; 2 – ассимиляция серы;  
 3 – окисление серы; 4 – сульфаторедукция

В процессах окисления серы преобладающая роль отводится бактериям рода *Thiobacillus*, а восстановительную стадию реакций в основном выполняют сероводородные бактерии (СВБ). Деятельность тионовых бактерий и СВБ и их отношения в определенной степени носят синтрофный характер, когда продукты жизнедеятельности одних микроорганизмов служат необходимым энергетическим субстратом, пищей для активного роста других, несмотря на то, что тионовые бактерии по природе своей аэробны, а СВБ – анаэробны. С другой стороны, наряду с окислительно-восстановительными процессами, протекающими с участием бактерий, в природных условиях заметное влияние на этот процесс оказывают растения и животные.

Микроорганизмы вызывают коррозию металлов, выделяя продукты метаболизма ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{HNO}_3$  и др.), в которых действуют непосредственно и в качестве деполяризирующих агентов, а также в случаях, когда процесс коррозии является отдельной частью метаболического цикла бактерий.

Среди бактерий наибольшую коррозионную опасность представляют анаэробы СВБ. Эти бактерии встречаются в реках, озерах, морях, океанах, почве, нефтепромыслах и др. Они потребляют азот и углерод из органических соединений. Как продукт анаэробного дыхания они продуцируют в среде сероводородов путем поглощения водорода и восстановления сульфатов, сульфитов, тиосульфатов и других соединений серы в сульфиды.

По мнению Е.П. Розановой и А.Л. Балдиной, основным фактором, влияющим на биогенную сульфаторедукцию, является наличие в среде растворенного окисленного органического вещества, в генерации которого активно участвуют углеводородокисляющие бактерии.

Испытания, проведенные в промышленных стоках Оренбургского газоконденсатного месторождения, содержащих СВБ, серобактерии, тионовые и другие группы микроорганизмов, показали, что скорость коррозии стали достигает значительных величин – 0,8 г/(м<sup>2</sup>·ч). Со временем (после 354 ч) в результате локального развития микрофлоры и электрохимической коррозии пары сульфид железа – железо возникают питтинг и сквозное разрушение оборудования.

Большой вред микроорганизмы наносят запасам нефти. Подсчитано, что только в нефтехранилищах бактерии разлагают более полутонны (640 кг) нефти в год с площади 1 км<sup>2</sup>.

Основными возбудителями аэробной коррозии являются тионовые, нитрифицирующие и железобактерии. Жизнедеятельность первых двух создает условия для накопления серной и азотной кислот и резкого снижения рН среды; железобактерии образуют осадки соединений железа (в частности, гидроокиси), что способствует возникновению пар дифференциальной аэрации.

Анализ отечественных и зарубежных данных показал, что борьба с сульфаторедукцией и микробиологической коррозией в нефтяной промышленности чрезвычайно актуальна. В настоящее время разработан ряд методов борьбы с коррозией, вызываемой СВБ. Однако на нефтяных месторождениях нашей страны в основном используются химические методы подавления бактерий (бактерициды), номенклатура которых пока ограничена. В деле борьбы с микробиологической коррозией исключительно важно предотвращение заражений продуктивных пластов СВБ и возникновение сульфаторедукции.

## 2.6. Коррозия под воздействием блуждающих токов. Причины возникновения. Методы предотвращения коррозии под воздействием блуждающих токов

Коррозия блуждающими токами связана с работой электрических устройств, использующих в качестве токопровода землю. В ней появляются электрические токи, величина и направление которых могут изменяться во времени. Источниками блуждающих токов являются линии электрифицированных железных дорог, трамваев, установки катодной защиты подземных металлических сооружений, линии передачи энергии, промышленные предприятия, потребляющие постоянный электрический ток.

Известно, что положительный полюс источника питания (положительная шина тяговой подстанции) подключается к контактному проводу, а отрицательный – к ходовым рельсам. При такой схеме электроснабжения тяговый ток от положительной линии тяговой подстанции по питающим линиям поступает в контактную сеть, откуда через токоприемник – к двигателю электровоза и далее через рельсы – в отсасывающую линию к отрицательной линии тяговой подстанции (рис. 2.7).

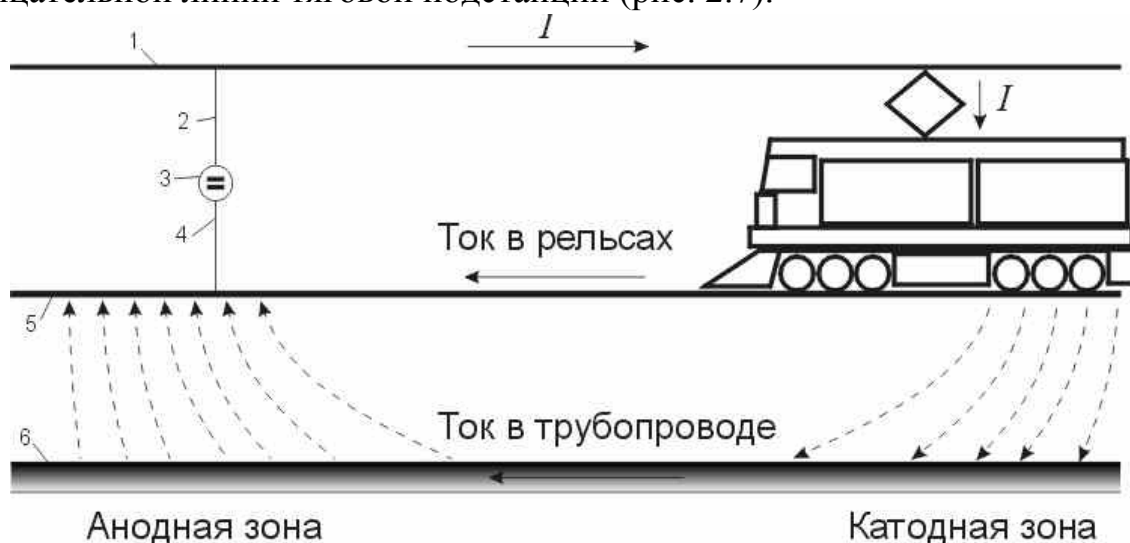


Рис.2.7. Схема возникновения блуждающего тока от электрифицированного транспорта:  
1 - контактный провод; 2 - питающая линия; 3 – тяговая подстанция; 4 – дренажная линия; 5 – рельсы; 6 – трубопровод

Так как рельсы не полностью изолированы от земли, то часть тягового тока стекает с них в землю. Величина тока, который называют блуждающим, тем больше, чем меньше переходное сопротивление между рельсами и землей и чем больше продольное сопротивление рельсов.

Блуждающие токи, протекая в земле и встречая на своем пути подземные металлические сооружения, ответвляются в них, т. к. сопротивление последних значительно меньше сопротивления земли. В местах входа блуждающих токов в трубопровод и выхода из него в землю протекают электрохимические реакции. Участок, где блуждающие токи входят в подземное сооружение, является катодным, а участок где они выходят из него в грунт, – анодным. В анодных зонах подземных сооружений происходит интенсивное разрушение металла.

Общий путь тока в цепи общего питания трамвая (электровоза) бывает чаще всего следующим. От положительной шины 2 источника постоянного тока на питающей подстанции ток поступает в питающие кабели 4 и с них переходит на контактные провода 5. Поступая из контактного провода через токоприемник трамвая (электровоза) в двигатель, ток попадает на колеса, а из них в рельсы. Протекая по рельсам, ток собирается в отсасывающих пунктах, поступая затем к отрицательным шинам подстанции.

Наиболее несовершенной изоляцией обладает тот участок пути, где ток проходит по рельсам, так как последние через шпалы и балласт соединяются с землей, являющейся хорошим электролитом. Часть возвращающегося тока из рельсов перетекает в землю, течет по ней и здесь ищет себе пути наименьшего сопротивления, которыми оказываются подземные металлические сооружения – трубопроводы и кабели, расположенные на путях блуждающего тока.

Значительная часть попавшего в почву тока переходит на подземные металлические сооружения, течет по ним и, наконец, в каком-нибудь месте, чаще всего вблизи пункта отсоса, покидает подземные линии и переходит сначала в почву, а затем в рельсы и отсасывающий кабель. Тогда общая схема возникновения и распространения блуждающего тока принимает вид, показанный стрелками на рис. 2.8.

Как видно из рисунка, ток попадает на рельсы после приведения в действие трамвайного мотора и должен с них собираться линиями 6 на шинах тяговой подстанции. Однако на участках близкого расположения рельсов ток покидает их, через почву собирается трубопроводом и движется по нему в ту или другую сторону. Там, где трубопровод отходит от рельсов вблизи точки присоединения отсасывающего фидера, ток должен вернуться обратно на рельсы. В местах сближения двух подземных линий ток перетекает с одной линии на другую через почву, пытаясь найти пути наименьшего сопротивления для возвращения обратно на рельс. При этом пути удаления тока от рельсов могут быть очень велики и причудливы, достигая нескольких километров.



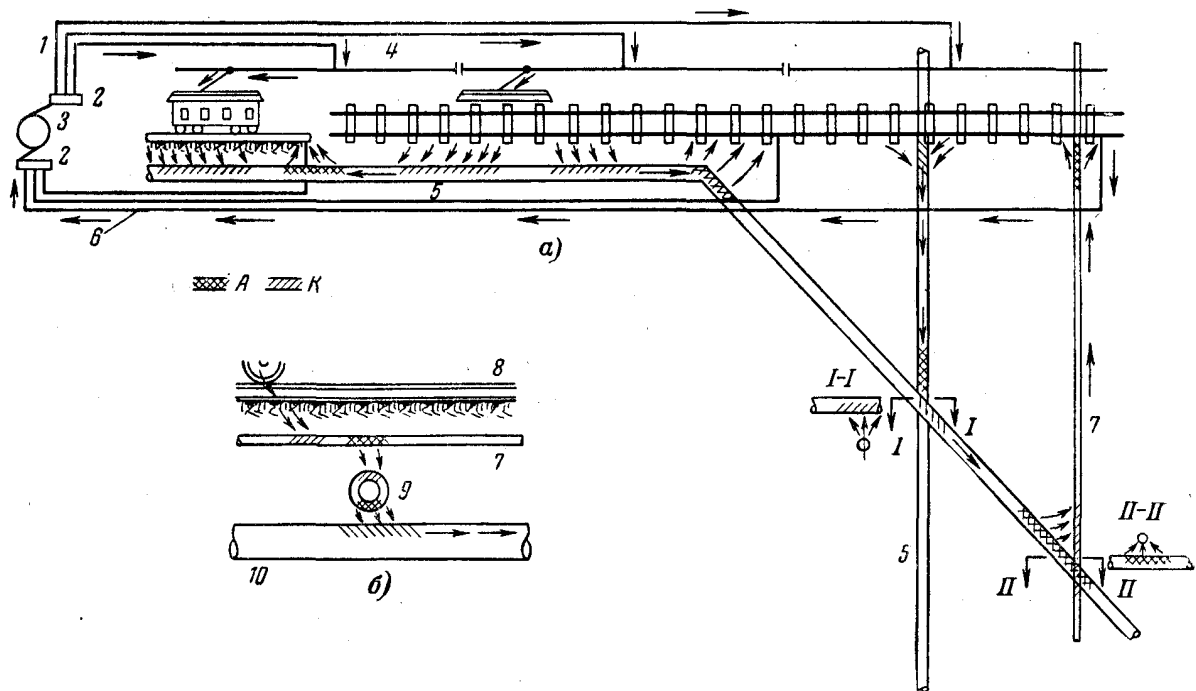


Рис. 2.8. Схема возникновения и движения блуждающего тока:

- а – принципиальная схема возникновения и движения блуждающего тока; б – схема движения блуждающего тока в вертикальном направлении; А – анодные зоны – места разрушения металла; В – катодные зоны – места собирания тока; 1 – питающие линии; 2 – шины; 3 – генератор; 4 – троллейный провод; 5 – подземный трубопровод; 6 – отсасывающие линии; 7 – кабель; 8 – рельс; 9 – газопровод; 10 – водопровод

Величина протекающего по подземным сооружениям тока может быть очень велика. Вблизи электрических железных дорог были измерены токи в трубопроводе, достигающие 200 – 300 А. Такие большие блуждающие токи являются исключительными, однако в обычных условиях достаточно часты блуждающие токи в несколько десятков ампер. Токи же в 10 – 20 А являются обычными на подземных трубопроводах.

Сама по себе величина тока, протекающего на подземном сооружении, не определяет опасности коррозионного влияния. Существенной является плотность тока, которая возникает на анодных поверхностях при стекании тока с металлического сооружения в окружающую почву. Эта плотность зависит не только от величины тока, но и от площади поверхности анодной зоны, поэтому плотности стекающего тока могут быть в отдельных случаях больше и при меньшем протекании тока, когда анодная зона имеет очень небольшие размеры.

Возможные плотности тока на анодных зонах подземных сооружений изменяются в очень больших пределах. Согласно практике защиты подземных сооружений от блуждающих токов опасной средней суточной плотностью блуждающего тока для стальных трубопроводов считается  $0,75 \text{ мА/дм}^2$ , или  $75 \text{ мА/м}^2$ , а для свинца –  $0,15 \text{ мА/дм}^2$ . На практике наблюдаются случаи, когда трубопроводы, и особенно телефонные кабели, в отдельных местах выходят из строя из-за блуждающего тока уже через два-три месяца после своей укладки.

Стальные трубопроводы с большой толщиной стенки не разрушаются столь быстро, хотя отдельные случаи сквозных проржавлений в течение нескольких месяцев также имеют место. Случаи разрушения подземных линий блуждающими токами распространяются и на чугунные трубопроводы, на которых часто развивается графитизация. Учитывая опасность разрушения жизненных коммуникаций и трудности ремонта, можно видеть, какую большую опасность представляют блуждающие токи, особенно в городских условиях.

Необходимо отметить следующие характерные особенности блуждающего тока, протекающего как в почве, так и по трубопроводам:

1. Пути блуждающего тока являются весьма причудливыми и иногда совершенно неожиданными, т. к. пути наименьшего сопротивления часто бывает трудно предугадать.

2. Дальность распространения блуждающего тока при благоприятных условиях может быть очень велика (измеряется иногда десятками километров).

3. Из-за частых изменений нагрузки на линиях величина блуждающего тока электрических железных дорог бывает непостоянна по времени, изменяясь быстро в широких пределах.

4. Блуждающий ток распространяется по всем возможным путям. Ток ищет себе всегда путь наименьшего сопротивления и всегда подчиняется закону Кирхгофа, распределяясь по всем возможным путям своего движения соответственно их сопротивлению.

Земля с заложенными в нее металлическими проводниками представляет собой сложную систему возможных параллельных проводников, по которым может проходить блуждающий ток. Согласно закону Кирхгофа величина тока в отдельных путях протекания блуждающих токов и других параллельных ветвях будет прямо пропорциональна проводимости. Нуж-

но, однако, указать, что вследствие исключительной сложности определения сопротивлений на отдельных участках фактическую проводимость отдельных цепей обычно можно определить только очень ориентировочно. Общее сопротивление каждой отдельной параллельной ветви складывается из следующих основных частей:

$$R_{об} = R_{cp} + R_{pz} + R_{n'} + R_{nm} + R_{nc} + R_{mn} + R_{n''} + R_{зр},$$

где  $R_{cp}$  – сопротивление рельсов от трамвая электровоза до места утечки;  $R_{pz}$  – переходное сопротивление между рельсами и землей;  $R_{n'}$  – сопротивление почвы между рельсами и подземным сооружением;  $R_{nm}$  – переходное сопротивление между почвой и металлом трубопровода или кабеля;  $R_{nc}$  – сопротивление тела трубопровода (или кабеля) на пути прохождения тока;  $R_{mn}$  – переходное сопротивление между металлом трубопровода или кабеля и почвой;  $R_{n''}$  – сопротивление почвы между подземным сооружением и рельсами;  $R_{зр}$  – переходное сопротивление между почвой и рельсами.

Давая общую характеристику перечисленным выше отдельным сопротивлениям, следует отметить, что каждое из  $R_{cp}$ ,  $R_{nc}$ ,  $R_{nm}$ ,  $R_{n'}$  и  $R_{n''}$  может быть выражено общей формулой для определения сопротивления проводника

$$R = \frac{\rho L}{S},$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление материала или среды, Ом·м;  $L$  – длина проводника, м;  $S$  – поперечное сечение проводника, м<sup>2</sup>.

Каждое из указанных выше сопротивлений ( $R_{n'}$ ,  $R_{nc}$ ,  $R_{n''}$ ), определяемых по этой формуле, обычно бывает заметно бóльшим лишь при достаточной большой величине  $L$ . Величина сопротивления на пути тока в подземном сооружении определяется также по другой формуле, по удельному сопротивлению металлического проводника. Большими сопротивлениями на пути блуждающего тока оказываются обычно переходные сопротивления между рельсами и почвой и между трубопроводом или кабелем и почвой. Величина этих сопротивлений определяется формулой

$$R_{nep} = \varphi / S,$$

где  $\varphi$  – удельное переходное сопротивление, Ом·м<sup>2</sup>;  $S$  – площадь перехода тока в почву или из почвы, м<sup>2</sup>.

## ВОПРОСЫ САМОКОНТРОЛЯ ПО ТЕМЕ

1. Раскройте механизм процессов, протекающих при химической коррозии.
2. Приведите примеры возникновения коррозии в неэлектролитах для системы трубопроводного транспорта.
3. Приведите примеры и условия возникновения газовой коррозии для системы трубопроводного транспорта.
4. Перечислите виды продуктов реакции при газовой коррозии.
5. Раскройте процессы, протекающие при возникновении электрохимической коррозии.
6. Перечислите виды продуктов реакции при электрохимической коррозии.
7. Что такое удельное электрическое сопротивление почвы?
8. От чего зависит коррозионная активность грунта?
9. Каковы причины возникновения контактной коррозии?
10. Что такое «нормальный водородный электрод»?
11. Что такое «медносульфатный электрод»?
12. Причины биокоррозии.
13. Какие существуют методы предотвращения биокоррозии?
14. Расскажите о механизме возникновения блуждающего тока.
15. Какие существуют методы борьбы с блуждающим током?

## ТЕМА 3. СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ЗАЩИТЫ ОТ КОРРОЗИИ

### 3.1. Современные методы защиты объектов трубопроводного транспорта от коррозии

Среди методов защиты объектов трубопроводного транспорта от коррозии выделяют методы активной (катодной и протекторной) и пассивной (нанесение изоляции) защиты. Подробно они будут рассмотрены ниже.

Одна из наиболее опасных причин выхода из строя трубопроводов (в частности, промысловых) кроется в процессе внутренней коррозии стенок труб. Средняя скорость внутренней коррозии составляет около 2 мм/год и значительно превосходит скорость наружной коррозии.

По данным «Главтюменнефтегаза», за десятилетний предперестроечный период 1974 – 1984 гг. на промыслах Среднего Приобья произошло 800 аварий. На ликвидацию одного разрыва нефтесборного коллектора затрачивалось в эквиваленте от 50 до 70 тыс. долларов. Ежегодное количество аварий на нефтесборных трубопроводах возросло с 90 – 100 в 1973 г. до 376 в 1984 г. (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Пример распределения отказов трубопроводов по скорости внутренней коррозии (за 10 лет, «Главтюменнефтегаз»)

Скорость внутренней коррозии, мм/год	Относительное количество отказов, %
0 – 0,5	10,1
0,5 – 1,0	16,2
1,0 – 1,5	22,0
1,5 – 2,0	20,2
2,0 – 2,5	15,0
2,5 – 3,0	6,0
3,0 – 3,5	3,6
3,5 – 4,0	2,5
4,0 – 5,0	3,1
5,0 – 10,0	1,3

Для снижения аварийности необходимо применять действенные меры, так как выход из строя трубопроводов через 1 – 5 лет приносит огромные убытки их владельцам. С целью предупреждения таких разрушений были разработаны разнообразные меры:

1. Ингибиторная защита.
2. Изоляция внутренней поверхности труб пластмассами и стеклоэмалиями.
3. Металлизация внутренней поверхности труб.
4. Технологические процедуры.

Эти методы прошли промышленную апробацию на нефтяных промыслах и показали высокую эффективность. Например, иногда только ингибиторы могут дать защитный эффект 80 – 85 %, т.е. уменьшение скорости внутренней коррозии в 10 – 20 раз.

Широкое применение комплекса методов защиты от внутренней коррозии снижает ее скорость до 0,1 – 0,2 мм/год, однако в этом случае появляется необходимость защиты от почвенной коррозии.

### 3.2. Ингибиторы коррозии

Одним из эффективных и перспективных способов защиты оборудования нефтепромыслов от коррозии является применение ингибиторов коррозии – поверхностно-активных веществ, растворимых в воде или в жидких углеводородах.

Введение в агрессивную среду небольших количеств ингибиторов значительно снижает скорость коррозии металла.

Марки используемых ингибиторов и их физико-химические характеристики приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Физико-химические характеристики ингибиторов коррозии

№ п/п	Марка ингибитора	Общая характеристика	Плотность при 20 °С, г/см <sup>3</sup>	Содержание, %			Вязкость при 50 °С, сСт	Температура, °С		
				основного азота, в пределах	смола, не более	механических примесей		застывания	вспышки	самовоспламенения
1	И-1-А* (ТУ 38-103246-87)	Вязкая темно-коричневая жидкость с характерным запахом пиридинов, почти не растворяется в воде, хорошо растворяется в органических растворителях, а также в соляной, серной и др. сильных кислотах	1,0...1,1	7,0-9,5	5	0,2	-	-	-	-
2	И-1-В* (ТУ 38-103-238-74)	Темно-коричневая жидкость с характерным слабым запахом, легко растворима в кислотах и воде	1,25...1,35	-	3,0	-	-	-	-	-
3	"Север-1" (И-2-А)* (ТУ 38-103-201-76)	Легкоподвижная темно-коричневая жидкость, хорошо растворима в бензоле, спирте, ацетоне, соляной и серной кислотах	0,93...1,05	4,90-6,65	3,5	0,2	7...12	-65	+23	+385
4	И-3-А* (ТУ 38-403-29-73)	Темно-коричневая жидкость с характерным запахом, хорошо растворима в полярных органических растворителях и минеральных кислотах	0,99...1,07	8,3-11,0	3,5	0,2	15	-33...-45	+76	+413

№ п/п	Марка ингибитора	Общая характеристика	Плотность при 20 °С, г/см <sup>3</sup>	Содержание, %			Вязкость при 50 °С, сСт	Температура, °С		
				основного азота, в пределах	смола, не более	механических примесей		застывания	вспышки	самовоспламенения
5	И-4-А* (ТУ 38-403-44-73)	Темно-коричневая жидкость с характерным запахом, хорошо растворима в бензоле, спирте, ацетоне, соляной, серной кислотах и ряде др. продуктов	0,94...1,00	4,9...6,65	3,5	0,2	3...7	-50...-75	+15	+413
6	И-4-Д (ТУ 38-403-46-73)	Темно-коричневая вязкая жидкость с характерным запахом, эмульгируется в водных растворах, растворяется в толуоле, хлороформе, четыреххлористом углероде и некоторых др. средах	0,85...0,95	-	-	-	65...95	-12...-15	+81	+239
7	"Тайга-1" (И-5-ДНК) (ТУ 38-403-47-73)	Легкоподвижная темно-коричневая жидкость с характерным запахом, эмульгируется в водных растворах, растворяется в углеводородах	0,92...0,96	-	-	-	-	-50	+20	+340
8	И-2-Е	Легкоподвижная темно-коричневая жидкость со слабым характерным запахом, растворима в воде, спирте, кислотах	1,0...1,1	-	-	8...10	-	-50	-	-
9	"Тайга-2" (И-5-ДТМ) ТУ 38-403-78-78)	Легкоподвижная темно-коричневая жидкость, растворимая в спирте, бензоле, дихлорэтане и других органических растворителях	0,87...0,89	-	-	3,9... 4,0	-	-45	-	-
10	И-21-Д (ТУ 38-403-101-78)	Легкоподвижная темно-коричневая жидкость, растворимая в спирте, бензоле, дихлорэтане и других органических растворителях	0,8...0,9	-	-	5,0	-	-16	-	-
11	И-30-Д (ТУ 38-403-79-76)	Легкоподвижная темно-коричневая жидкость, эмульгируется в воде, растворима в спирте, бензоле, дихлорэтане	0,85... 0,87	-	-	5,0	-	-40	-	-
12	И-К-10 (ТУ 38-403-68-75)	Легкоподвижная коричневая жидкость, растворима в воде, спирте, кислотах	1,06...1,1	-	-	8...11	-	-50	-	-
13	И-К-40 (ТУ 38-403-75-75)	Легкоподвижная коричневая жидкость, растворима в воде, спирте, кислотах	0,95...1,15	-	-	10...15	-	-50	-	-

№ п/п	Марка ингибитора	Общая характеристика	Плотность при 20 °С, г/см <sup>3</sup>	Содержание, %			Вязкость при 50 °С, сСт	Температура, °С		
				основного азота, в пределах	смола, не более	механических примесей		застывания	вспышки	самовоспламенения
14	Нефтехим (ТУ 38.УССР 201463-66)	Представляет собой смесь полиэтиленполиамидов, карбоновых кислот легкого талового масла и солей пиперазина этих кислот в растворе керосина и катализатора риформинга	-	-	-	-	7	-18	+37	340...435
15	Газохим (ТУ 113-03-20-73)	Однородная жидкость темно-коричневого цвета, растворяется в углеводородах	0,97	-	-	-	-	-10	+61	262

\*Скорость растворения Ст.3 в 20 %-ном растворе серной кислоты, определяемая в присутствии 1 % ингибитора, при 20 ± 2 °С в течение 24 ч испытания составляет не более 0,15 г/м<sup>2</sup>·ч.

Ингибиторы образуют на поверхности металла защитные адсорбционные пленки, препятствующие доступу агрессивной среды к поверхности металла. Ингибиторы можно использовать, не изменяя соответствующих технологических процессов и их аппаратурного оформления.

Применение ингибиторов коррозии является единственным методом защиты действующего нефтепромыслового оборудования по всей технологической линии – от эксплуатационных до нагнетательных и поглощающих скважин (табл. 3.3).

Таблица 3.3

Рекомендуемые области применения ингибиторов коррозии

Область применения	Ингибиторы коррозии
Для защиты нефтепромыслового оборудования от сероводородной коррозии и коррозии, вызываемой смесью сероводорода и углекислого газа, могут применяться также при солянокислотных обработках скважин. Замедляют коррозию сталей в растворах серной и соляной кислот	И-1-А, И-1-В, "Север-1" И-3-А, И-4-А, И-21-Д
Для защиты от коррозии нефтегазопромыслового оборудования, вызываемой пластовыми и сточными водами, как содержащими, так и не содержащими сероводород	И-4-Д
Для защиты нефтегазопромыслового оборудования от коррозии, вызываемой пластовыми и сточными водами, содержащими сероводород, смесь сероводорода с углекислотой, кислот	"Тайга-1" (И-5-ДНК), "Тайга-2" (И-5-ДТМ), И-30-Д, Газохим, Нефтехим
Для защиты нефтегазопромыслового оборудования от коррозии, вызываемой пластовыми и сточными водами, содержащими сероводород или смесь сероводорода и углекислого газа	И-2-Е, И-К-10
Для подавления жизнедеятельности СВБ, для защиты нефтегазопромыслового оборудования от коррозии, вызываемой пластовыми и сточными водами, содержащими сероводород или смесь сероводорода с углекислотой	И-К-40



Ингибиторы также являются замедлителями сероводородной коррозии и могут быть рекомендованы для защиты нефтепромыслового оборудования, работающего в агрессивных сероводородных средах, высокоминерализованных пластовых и сточных водах.

Оценка эффективности защиты металла от коррозии при помощи ингибиторов основана на сравнении скоростей коррозии образцов-свидетелей до и после закачки ингибиторов. Образцы-свидетели устанавливаются в байпасах по всей технологической линии. Кроме того, эффективность ингибирования определяется по уменьшению числа аварий нефтепромыслового оборудования, происходящих вследствие коррозии. Способ ввода ингибиторов в коррозионно-активную среду зависит от конструкции защищаемого оборудования. Так, в трубопроводы наземных выкидных линий, водоводов сточных вод ингибитор закачивают через распределительную головку (рис. 3.1) с помощью дозирующего насоса. Для защиты от коррозии глубинного оборудования ингибитор заливают в кольцевое межтрубное пространство скважины при помощи агрегата типа «АЗИНМАШ».

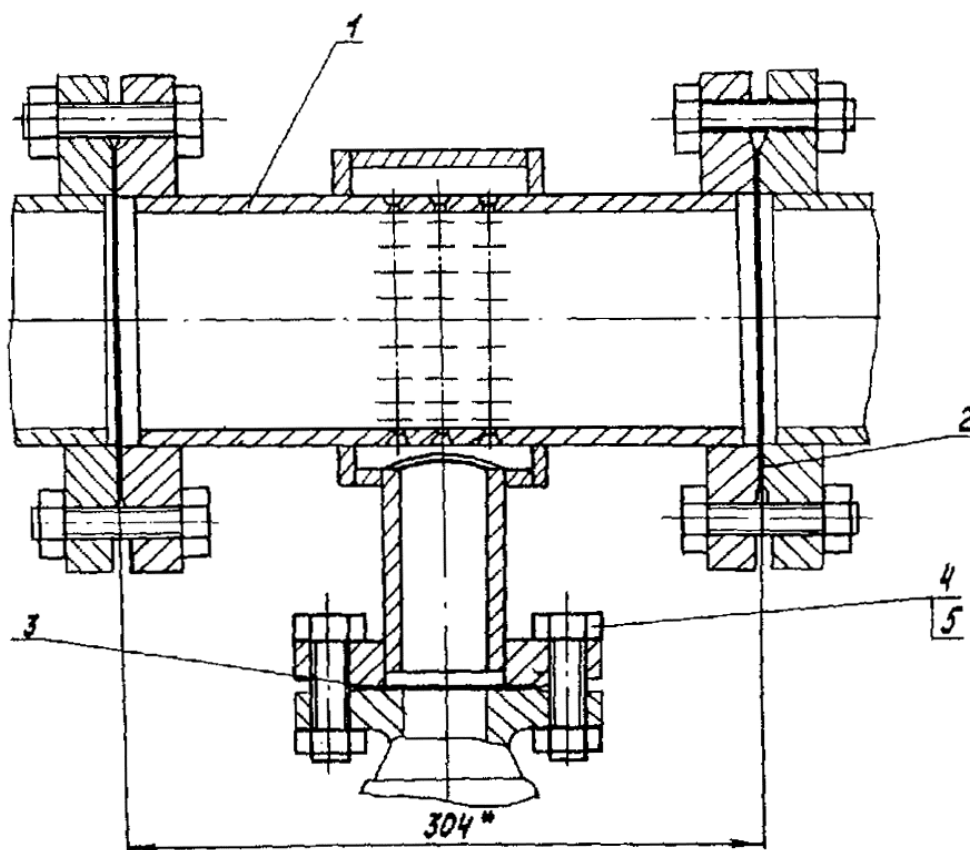


Рис. 3.1. Распределительная головка для ввода ингибитора (сборочный чертеж):  
1 – ввод; 2 – прокладка; 3 – болт; 4 – гайка; 5 – прокладка

Установка для закачки ингибитора коррозии (рис. 3.2) включает две емкости для растворения ингибитора. В нижней части емкостей расположены змеевики для подогрева раствора. В первую емкость загружают расчетное количество ингибитора и растворителя (нефти, пластовой, технической воды и др.), затем при помощи центробежного насоса в течение четырех часов перемешивают раствор, подавая его из емкости 1 в дозировочную емкость 2. Перемешанный ингибитор дозировочными насосами типа РПН подают в распределительную головку, вмонтированную в технологический трубопровод. Ингибитор вводят в трубопровод на расстоянии 10 м до первого байпаса (по направлению технологического потока).

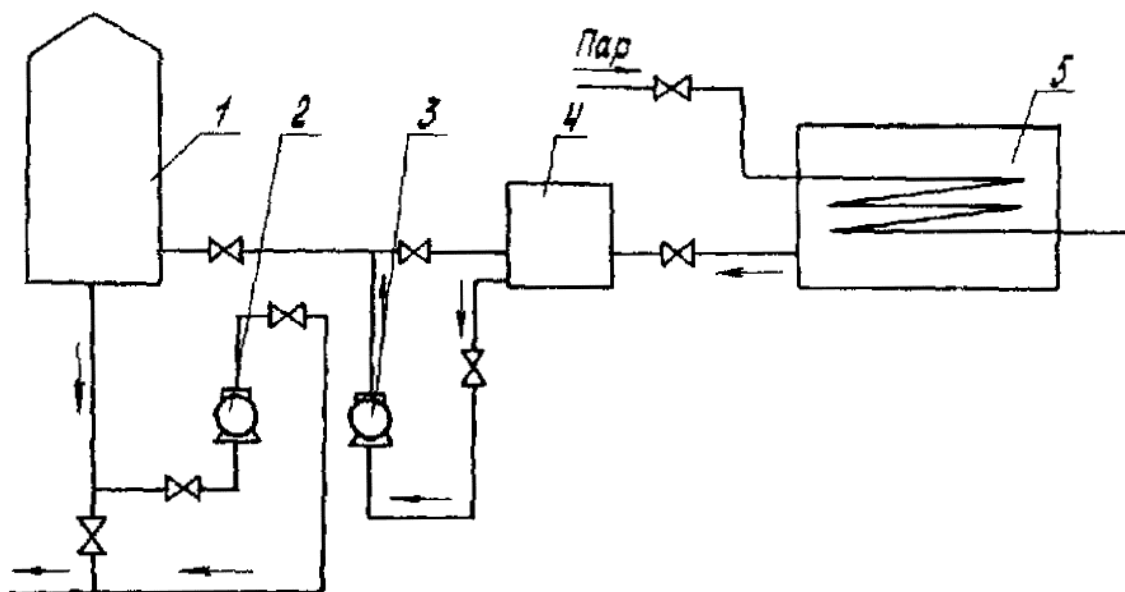


Рис. 3.2. Схема установки для закачки ингибитора:

- 1 – дозировочная емкость; 2 – насос дозировочный; 3 – насос центробежный;  
4 – емкость для перемешивания; 5 – распарочная емкость для подогрева  
опытных партий ингибиторов, затаренных в бочки

В трубопроводы большого диаметра (более 203 мм) коррозионные образцы спускаются в кассетах через задвижку со специальным приспособлением – лубрикатором. Схема установки контрольных образцов через задвижку показана на рис. 3.3.

При помощи дозировочного насоса через распределительную головку 10 – 50 %-ный раствор ингибитора (в нефти, пластовой или технической воде и других растворителях) подается в технологические коммуникации.

В первые три часа для более быстрого создания защитной пленки концентрация ингибитора должна быть в 5 – 8 раз больше оптимальной (более 100 – 150 мг/л). Остальные 69 часов ингибитор подается равномерно из расчета 100 – 150 мг/л.

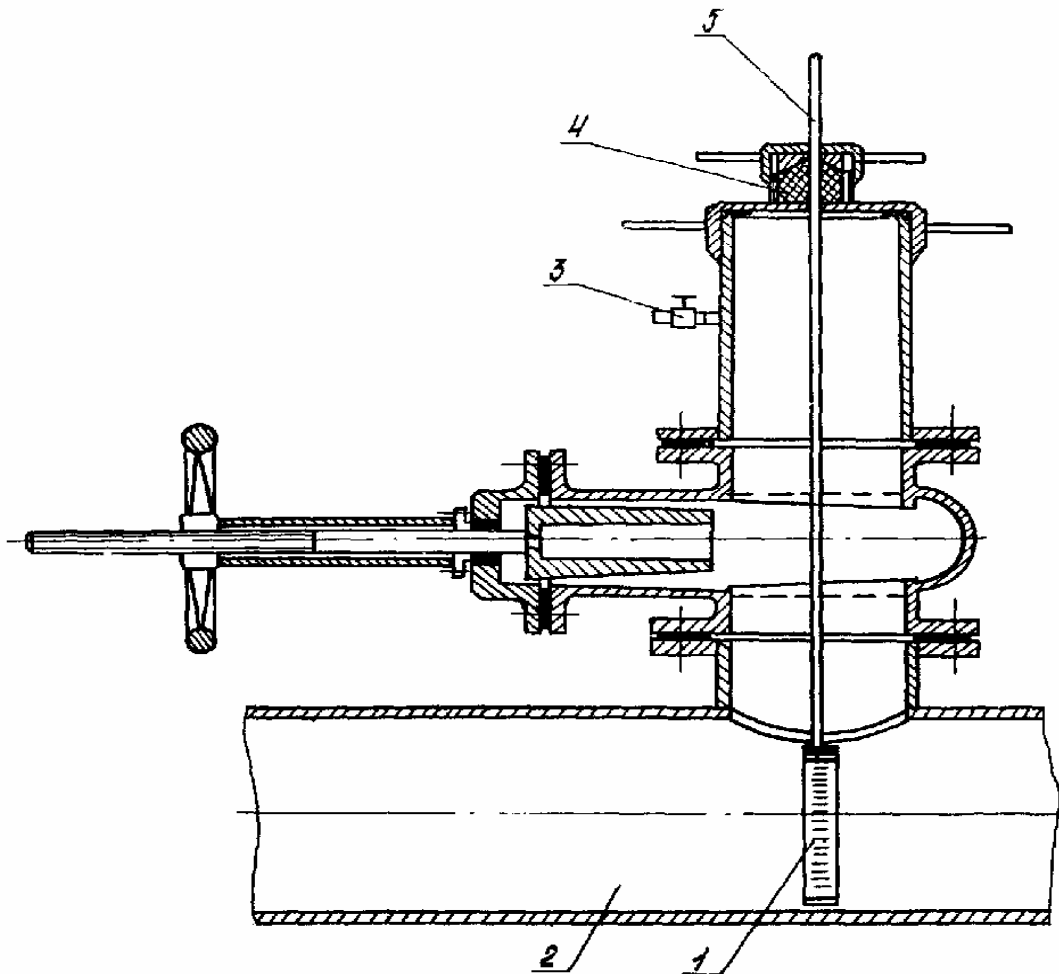


Рис. 3.3. Схема установки контрольных образцов через задвижку:  
 1 – кассета с образцами; 2 – трубопровод; 3 – вентиль; 4 – сальник; 5 – шток

*Технология закачки ингибиторов.* Через 20 – 30 мин после начала закачки ингибитора устанавливают по десять образцов-свидетелей – с первого байпаса около ввода ингибитора и затем с интервалом через каждые 30 – 40 мин по всей технологической линии.

После окончания закачки ингибитора из каждого байпаса, начиная с первого, вынимают по два образца-свидетеля и определяют скорость коррозии после введения ингибитора по описанной выше методике.

Последующие образцы-свидетели снимают по два через каждые 7, 14, 21, 28 сут и определяют скорость коррозии после введения ингибитора.

Строят график изменения скорости коррозии после ввода ингибитора во времени.

Рассчитывают эффективность замедления скорости коррозии ингибиторов по формуле

$$z = [(\rho_0 - \rho) / \rho_0] \cdot 100 \%,$$

где  $z$  – эффект защитного действия ингибитора, %;  $\rho_0$  – скорость коррозии образцов-свидетелей без ингибитора,  $\text{г/м}^2\cdot\text{ч}$ ;  $\rho$  – скорость коррозии образцов-свидетелей в присутствии ингибитора,  $\text{г/м}^2\cdot\text{ч}$ .

После снижения эффективности замедления скорости коррозии до 75 % необходимо проводить следующую закачку ингибитора.

### 3.3. Требования нормативных документов. Особенности методов

В настоящее время для защиты объектов трубопроводного транспорта от коррозии согласно ГОСТ 9.602-89 применяют следующие методы:

1. Рациональный выбор трассы прокладки и сооружений.
2. Изоляция поверхности металла от агрессивной среды (пассивный метод).
3. Воздействие на металл для повышения коррозионной стойкости.
4. Воздействие на окружающую среду для снижения агрессивности.
5. Поддержание такого энергетического состояния металла, при котором окисление заторможено (активные методы защиты).
6. Ограничение величины блуждающих токов.

Данные методы защиты могут быть использованы в сочетании друг с другом, а также применяться отдельно

**Первый метод:** выбор трассы.

Выбор трассы трубопроводов зависит от удельного электрического сопротивления грунта (типа грунта, коррозионной активности грунта, влажности, наличия бактерий в грунте). Учитывается, что наибольшей коррозионной активностью обладают песчаные, глинистые, торфянистые грунты.

**Второй метод:** изоляция поверхности металла от агрессивной среды – *пассивный*. Он включает следующие способы защиты:

1. Нанесение на поверхность металла химически инертных по отношению к металлу и агрессивной среде веществ: мастик, красок, лаков, эмалей, пластмасс. К этому методу следует отнести также и специальные методы укладки (например, коллекторная прокладка, при которой подземные трубопроводы располагают в специальных каналах, изолирующим слоем в данном случае является воздушный зазор между стенкой трубопровода и каналом).

2. Обработка металлических изделий растворами окислителей (пассиваторов) для перевода поверхностного слоя металла из активного со-

стояния в пассивное, а также обработка специальным окислителем – фосфатирование.

**Третий метод:** воздействие на металл с целью повышения стойкости.

Заключается в получении коррозионно-стойких сплавов легированием сталей хромом и никелем.

**Четвертый метод:** введение замедлителей коррозии – ингибиторов, которые адсорбируются на поверхности и тормозят коррозию. К этому методу относят способы замены грунта, очистку воздуха от примесей, осушку воздуха, обработку агрессивного грунта.

**Пятый метод** носит название *активной защиты*.

К нему относятся:

1. Постоянная *катодная защита* изделия, эксплуатирующегося в среде с достаточно большой электропроводностью. При катодной защите изделию сообщается настолько отрицательный электрический потенциал, что окисление металла становится термодинамически невозможным.

2. *Протекторная защита* – контакт изделия с металлом, обладающим более отрицательным электродным потенциалом, например, сталь с магниевой отливкой (протектор – от латинского *protector* – защитник). Более электроотрицательный металл разрушается (окисляется). Его периодически заменяют. Принципиально отличается от анодного способа защиты автономностью работы.

**Шестой метод:** борьба с блуждающими токами:

1. Использование высокоизолирующих совершенных покрытий.
2. Установка изолирующих соединений (фланцев) на трубопроводах.
3. Применение электродренажной защиты.

## ВОПРОСЫ САМОКОНТРОЛЯ ПО ТЕМЕ

1. Какие существуют современные методы защиты объектов трубопроводного транспорта от коррозии?

2. Какие методы защиты объектов трубопроводного транспорта от коррозии относят к активным, а какие – к пассивным?

3. Расскажите о требованиях нормативной документации по выбору методов защиты от коррозии.

4. Расскажите об ограничениях при выборе места сооружения или трассы прокладки объектов трубопроводного транспорта.

## **ТЕМА 4. КАТОДНАЯ ЗАЩИТА ОБЪЕКТОВ ТРУБОПРОВОДНОГО ТРАНСПОРТА**

### **4.1. Катодная защита объектов трубопроводного транспорта.**

#### **Принцип катодной защиты трубопроводов.**

#### **Основные составляющие**

Для защиты газопроводов от подземной коррозии применяют изоляционные покрытия различных конструкций и материалов. Однако даже хорошо выполненное покрытие, находясь в земле, постепенно разрушается, стареет, становится водопроницаемым и теряет изолирующие свойства. Практически в покрытиях остается некоторое количество не замеченных при контроле изоляции дефектов, а также повреждений, образующихся при спуске газопроводов в траншею и засыпке грунтом. Встречаются также случаи повреждений изоляции корнями растений при эксплуатации газопровода. Поэтому изоляционные покрытия не гарантируют защиту газопровода от коррозии. Опыт эксплуатации показал, что на трубопроводах, защищенных только изоляционными покрытиями, возникают сквозные коррозионные повреждения: на участках почвенной коррозии через 5 – 7 лет после укладки в грунт, а при наличии блуждающих токов, стекающих с трубопровода в грунт, – через 1 – 2 года. Имеется много случаев возникновения сквозных повреждений газопроводов блуждающими токами еще в период строительства. Поэтому эффективная защита газопровода от коррозии может быть достигнута только при комплексном применении изоляционных покрытий и электрохимической защиты (катодной, протекторной, электродренажной).

В некоторых случаях применяют электрохимическую защиту неизолированных труб, например, при защите от коррозии патронов газопроводов на переходах через железные и шоссейные дороги, сооруженных методом горизонтального бурения или продавливания.

В соответствии с Правилами защиты металлических подземных сооружений от коррозии (ОН 266-63) запрещается принимать в эксплуатацию подземные металлические сооружения (трубопроводы, кабели и т. д.) до осуществления всех предусмотренных проектом мер по защите этих сооружений от коррозии, а также принимать в эксплуатацию сооружения – источники блуждающих токов (электрифицированные на постоянном токе железные дороги, линии метро, трамвая, электротранспорта шахт, карьеров и разрезов и т. п.) – до осуществления всех предусмотренных проектом мер по ограничению блуждающих токов.

Правилами производства и приемки работ по защите подземных металлических сооружений от коррозии предусмотрено, что сооружение, наладка и проверка эффективности работы устройств защиты должны выполняться специализированными строительными-монтажными организациями. Если после включения защитных устройств защита не обеспечивается, то строительная-монтажная организация обязана совместно с проектантами разработать и осуществить дополнительные защитные мероприятия, после чего производится окончательная приемка сооружений защиты в эксплуатацию.

Стальные трубопроводы считаются электрохимически защищенными, если разность потенциалов «труба – земля», измеренная с помощью медносульфатного электрода сравнения, равна или отрицательней величины минус 0,87 В, называемой минимальным защитным потенциалом. Для получения такой величины на участке, наиболее удаленном от места подключения установки электрохимической защиты (СКЗ, СДЗ, протектора), необходимо в местах подключений этих установок к газопроводу (точках дренажа) иметь более отрицательные значения. Не рекомендуется устанавливать разность потенциалов отрицательней величины минус 1,22 В по медносульфатному электроду сравнения (максимально допустимого потенциала), так как в противном случае битумная изоляция может потерять прилипаемость к трубе. Для неизолированных стальных труб смещение разности потенциалов в отрицательную сторону не ограничивается, кроме случаев вредного влияния на соседние подземные сооружения.

#### **4.2. Типы катодных станций**

Станция катодной защиты предназначена для защиты трубопровода от коррозии путем смещения разности потенциала «труба – земля» внешним током в область отрицательных значений. Она состоит из источника постоянного (выпрямленного) тока (рис. 4.1, а), анодного заземления, катодного вывода, питающих и соединительных электролиний (проводов, кабелей, шин), защитного заземления. Станции катодной защиты с полупроводниковыми выпрямителями питают электроэнергией от линий напряжением 220 В (рис. 4.2, б), 6 и 10 кВ.

При подключении к ЛЭП 6 и 10 кВ применяют однофазные масляные трансформаторы серии ОМ и однофазные масляные трансформаторы распределительных сетей серии ОМС с комплектом высоковольтного оборудования: разъединителями, разрядниками, предохранителями. Для выпрямления тока на станциях катодной защиты служат специальные выпрямители серии КСС, известные под названием сетевых катодных станций.

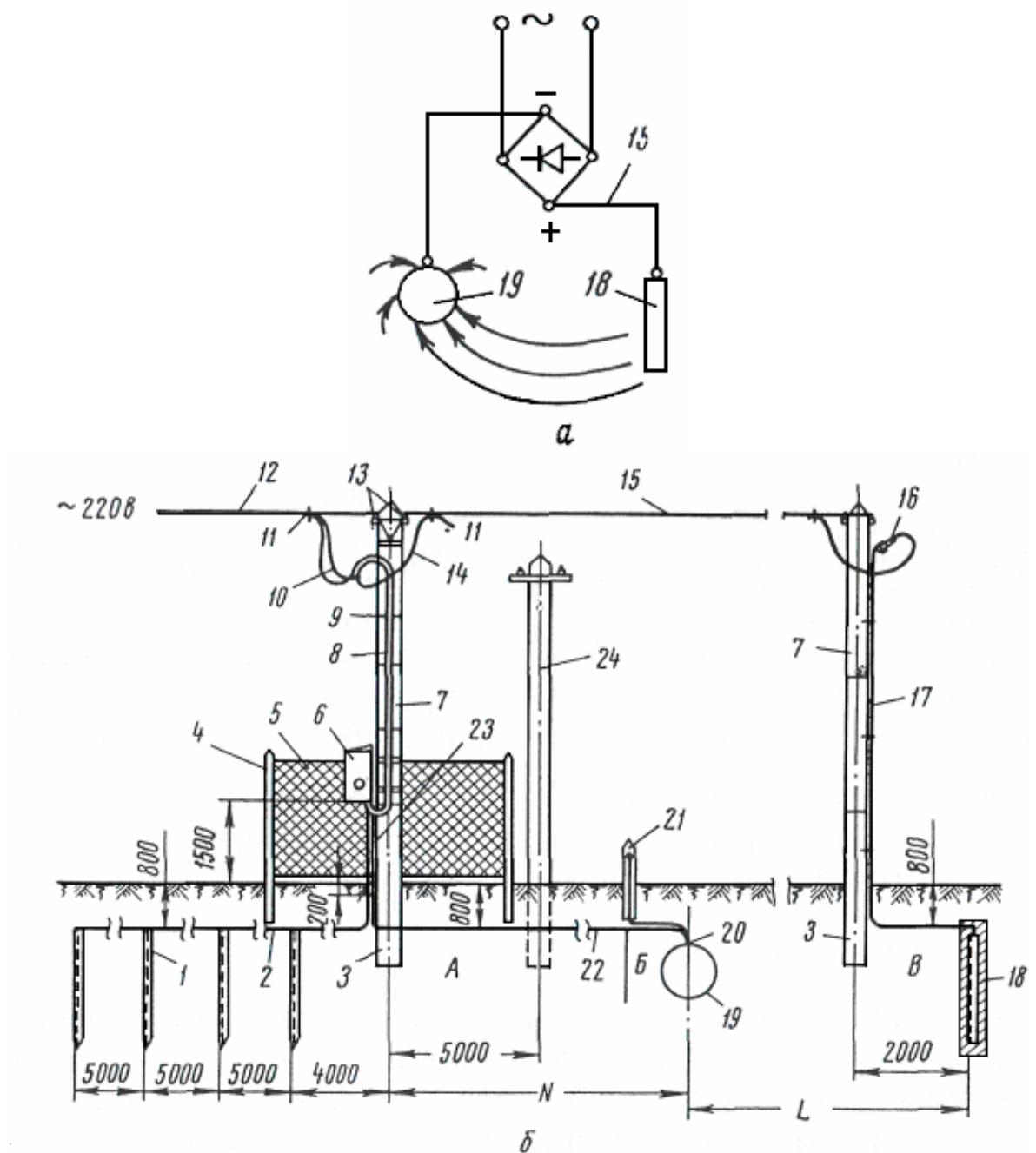


Рис. 4.2. Станция катодной защиты:

*a* – принципиальная схема; *б* – общий вид: 1 – электрод защитного заземления; 2 – соединительная шина; 3 – железобетонный столб (или приставка); 4 – столб ограждения; 5 – сетка; 6 – выпрямитель (сетевая катодная станция); 7 – деревянный столб; 8 – труба газовая; 9 – хомут; 10 – ввод переменного тока; 11 – плащечный зажим; 12 – ЛЭП 220 в; 13 – изоляторы ТФ-2; 14 – ввод выпрямленного тока; 15, 16, 17 – провод анодного заземления; 18 – анодное заземление в коксовой засыпке; 19 – газопровод; 20 – точка дренажа; 21 – катодный вывод в железобетонном столбике; 22 – кабель; 23 – труба кабельного ввода; 24 – опора связи газопровода; *L* – расстояние между анодным заземлением и газопроводом (100 – 800 м); *N* – расстояние между опорой СКЗ и газопроводом (5 м, при наличии опор связи – 10 м)



При совместной защите нескольких ниток трубопровода или трубопровода с другими подземными сооружениями регулировку тока на сооружениях производят с помощью сопротивлений СД-210.

Расчет потенциалов и токов при катодной защите можно определить по формулам

$$E_x = -\frac{1}{2}\left(\alpha R_{из} e^{-\alpha x} + \frac{\rho}{\pi l_x}\right),$$

$$I_x = \frac{1}{2}\left(\alpha R_{из} e^{-\alpha x} + \frac{\rho}{\pi l_x}\right),$$

где  $E_x$  и  $I_x$  – потенциал и ток в произвольной точке  $x$  газопровода;  $I$  – ток в точке дренажа СКЗ, при расчете параметров СКЗ, относящихся к точке  $x$ , в формулу вводят величину  $1/2$ , предполагая равномерное распределение тока в обе стороны от точки дренажа;  $\alpha$  – постоянная распространения тока и потенциала вдоль газопровода,  $1/\text{м}$ ;  $R_{из}$  – сопротивление изоляционного покрытия,  $\text{ом}$ ;  $\rho$  – удельное сопротивление грунта,  $\text{Ом}\cdot\text{м}$ ;  $l_x$  – расстояние анодного заземления до точки  $x$ , в которой определяются потенциал и ток газопровода.

Анодное заземление предназначено для создания низкоомного контакта положительной клеммы источника тока СКЗ с грунтом. Оно обеспечивает минимальное сопротивление растеканию тока в течение длительного времени. При устройстве анодного заземления применяют металлические (стальные, железокремнистые) и неметаллические (графитированные) электроды. Конструкция стального анодного заземления создается при помощи сварки рабочих электродов из труб, прутков, уголков, рельсов и т. п., устанавливаемых вертикально или горизонтально. При соединении вертикальных электродов неизолированной горизонтальной шиной получают комбинированную конструкцию заземления. Сварка конструкции должна выполняться непрерывным швом для обеспечения надежного электрического контакта между соединяемыми элементами. В процессе эксплуатации анодные заземления разрушаются токами СКЗ и блуждающими токами, стекающими с рабочих электродов ( $I_{общ} = I_{скз} + I_{бл}$ ), со скоростью, зависящей от электрохимического эквивалента металла. Стальной электрод, установленный в грунте, разрушается со скоростью 7 – 9 кг/А в год, стальной электрод в коксовой засыпке – со скоростью 3 – 4 кг/А в год, графитированный (графит марки Б) электрод в коксовой засыпке – 0,22 кг/А в год, железокремнистый (кремния – 14,35 %, углерода – 0,85 %, марганца – 0,65 %, молибдена – 0,3 %, железа – 81,15 %) в коксовой засыпке – 0,045 – 0,104 кг/А в год. Стальные электроды, устанавливаемые в грунт вследствие малого

срока службы на анодных заземлениях СКЗ, стараются не применять. Широкое применение нашли стальные электроды типа ЗКА-140, упакованные в коксовую мелочь и армированные кровельным железом. Контур заземления образуется соединением электродов с помощью изолированного провода. Для обеспечения минимального переходного сопротивления заземления его устанавливают в местах с наименьшим удельным сопротивлением грунта.

Сопротивление одиночного вертикального электрода, установленного в засыпку, может быть определено по формуле

$$R = R_1 + \frac{\rho}{2\pi l} \left[ \ln \frac{2l}{d_3} + \frac{1}{2} \ln \frac{4t + 3l}{4t + l} + \frac{\rho_1}{\rho} \ln \frac{d_3}{d} \right],$$

где  $R_1$  – сопротивление контакта заземлителя, Ом;  $l$  – длина электрода, м;  $d$  – диаметр электрода, м;  $d_3$  – диаметр засыпки, м;  $t$  – расстояние от верхнего конца электрода до поверхности земли, м;  $\rho$  – удельное сопротивление грунта в Ом·м;  $\rho_1$  – удельное сопротивление засыпки.

Оптимальным сопротивлением растекания тока анодного заземления принята величина, не превышающая 0,5 Ом, а общего сопротивления цепи СКЗ – не более 1 Ом. Сопротивление защитных заземлений не должно превышать 4 Ом.

Станции катодной защиты с выпрямительными установками, электропитание которых осуществлено от ЛЭП напряжением 220 В, 6 и 10 кВ, являются электроопасными. Они должны иметь ограждения, запирающиеся на замок, защитные заземления, предупредительные плакаты и устройства грозозащиты.

Блок катодной защиты типа КАВ-15 (в дальнейшем – блок защиты) предназначен для регулирования тока по величине и направлению при устранении вредного влияния устройства электрохимической защиты на одну смежную подземную коммуникацию и при совместной защите двух подземных коммуникаций с различными электрическими параметрами, а также для защиты подземных коммуникаций, в том числе и металлических оболочек кабелей, место пересечения которых является опасной зоной при различных потенциалах по отношению к земле.

На рис. 4.3 представлена электрическая схема данного блока.

Широко используются преобразователи катодной защиты типа ПТА (преобразователь тиристорный автоматический) для защиты магистральных нефтепродуктопроводов (рис. 4.4). Характерной особенностью является автоматическое поддержание защитного потенциала или защитного тока.

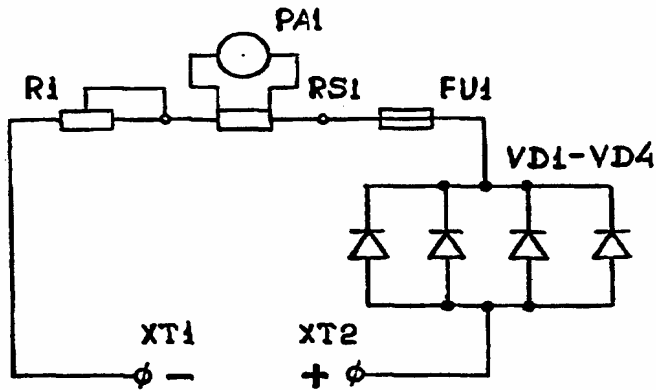


Рис. 4.3. Электрическая схема блока катодной защиты типа КАВ-15

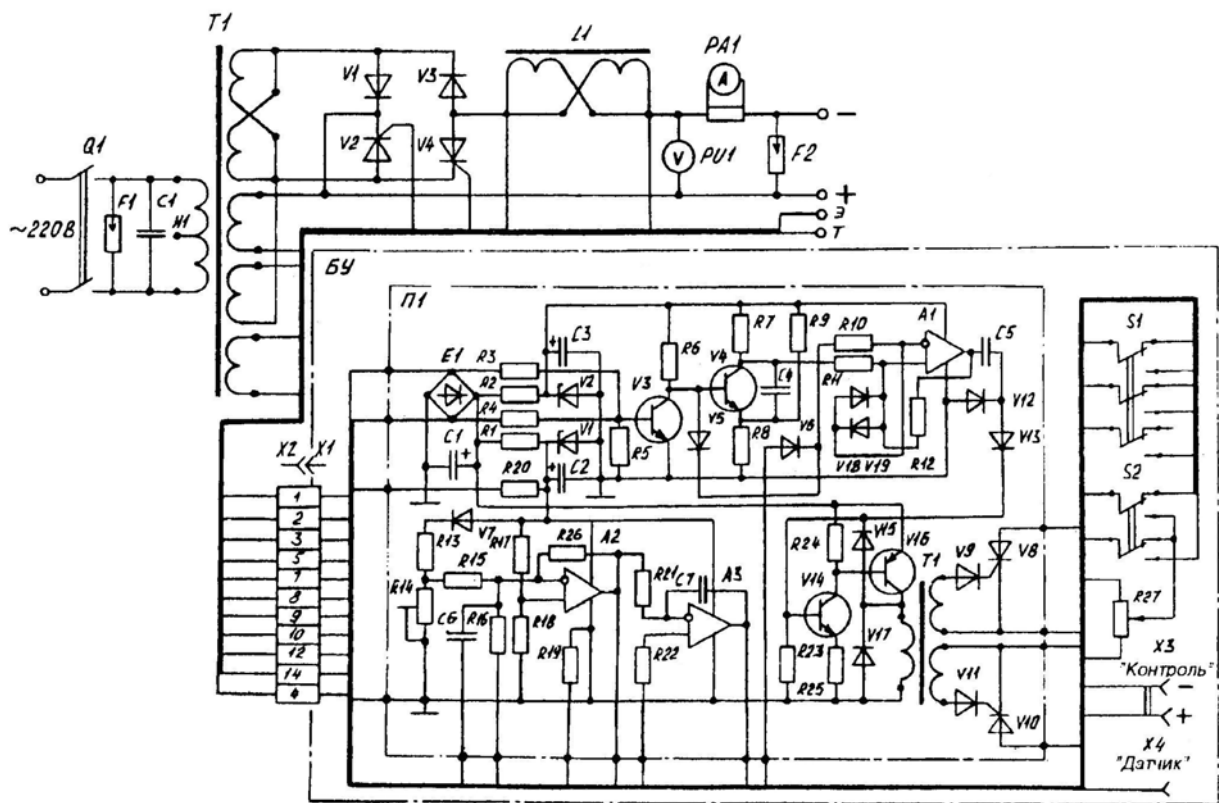


Рис. 4.4. Схема электрическая принципиальная ПТА

Преобразователь катодной защиты представляет собой регулируемый однофазный выпрямитель, собранный по мостовой двухполупериодной схеме с двумя регулирующими тиристорами, дросселем.

Преобразователь катодной защиты конструктивно состоит из кожуха, силового электроблока, блока управления, элементов защиты от перенапряжения, подавления радиопомех, контроля выходных параметров.

От атмосферных осадков и механических повреждений электроблок закрывается кожухом. Двери кожуха запираются замками. Охлаждение преобразователя воздушное, естественное. Охлаждающий воздух через жалюзи в основании поступает снизу, обтекает тепловыделяющие элементы и выходит через жалюзи, расположенные в боковых стенках кожуха.

Ввод силового и измерительного кабелей производится через гнезда в основании электроблока. Для заземления преобразователя предусмотрен специальный блок, к которому присоединяется проводник защитного заземления.

Применяют распределительные устройства катодной защиты УКЗВ (установка катодной защиты высоковольтная, 6 – 10 кВ) (рис. 4.5), УКЗН (установка катодной защиты низковольтная, 0,22 кВ).

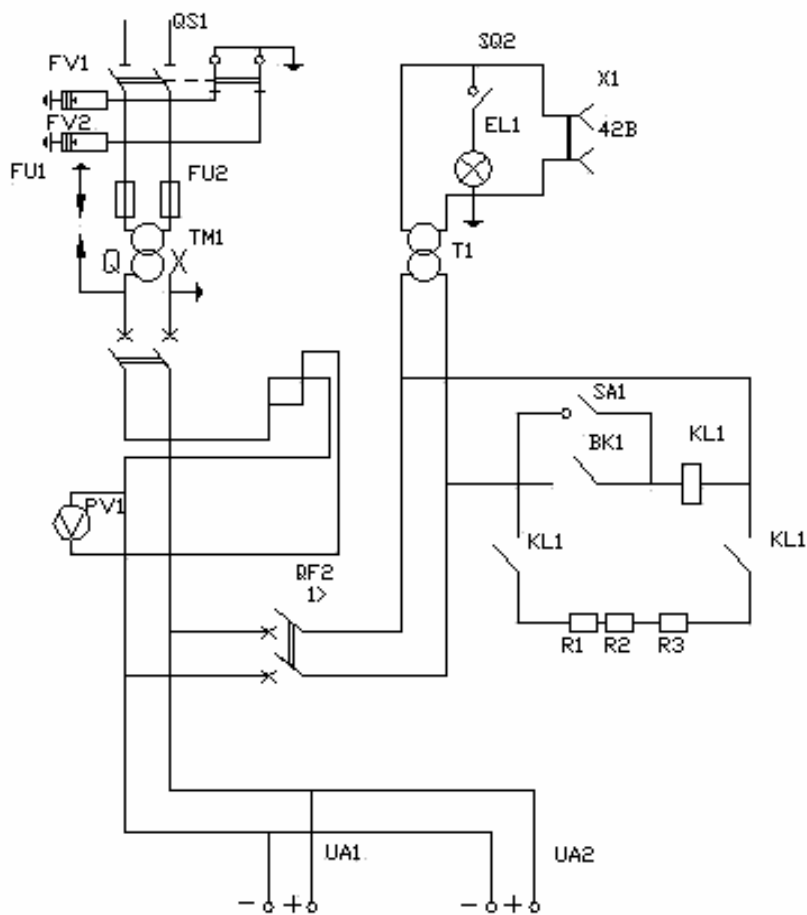


Рис. 4.5. Схема электрическая принципиальная УКЗВ-Р с трансформатором 6(10)/0,23 кВ

Регулирование защитного потенциала может быть автоматическим (А) и ручным (Р). УКЗВ-А – автоматическое регулирование защитного потенциала. Оно обслуживает несколько станций.

Преобразователи обеспечивают следующие режимы работы:

- поддержание (стабилизация) заданного значения защитного тока, протекающего в цепи катодной защиты;
- поддержание заданного значения поляризационного защитного потенциала на подземном сооружении в точке дренажа;
- выравнивание потенциалов в точках дренажа при совместной защите подземных сооружений при использовании нескольких преобразователей.

*Примечание.* Преобразователь допускает переключения для работы с выходным напряжением 100 В при выходном токе  $0,5 I_{ном}$ .

Основная погрешность поддержания защитного потенциала и выходного тока при изменении тока нагрузки от 10 до 100 % не превышает 2 % с учетом номинального напряжения питающей сети.

Дополнительная погрешность уставки защитного потенциала при изменении напряжения питающей сети и при изменении сопротивления нагрузки не превышает 0,5 %.

Дополнительная погрешность поддержания уставки защитного тока при изменении напряжения питающей сети не превышает 2 %, при этом номинальное выходное напряжение и ток обеспечиваются при напряжении питающей сети не ниже номинального, а при напряжении ниже номинального изменение выходного напряжения и тока пропорционально изменению напряжения питающей сети.

Выходной ток преобразователя ограничивается заранее установленным значением при уменьшении сопротивления, нагрузки вплоть до короткого замыкания.

В преобразователе предусмотрен автоматический переход из режима поддержания защитного потенциала в режим стабилизации заранее установленного значения тока при неисправности или обрыве в цепи измерения защитного потенциала.

Выходное напряжение преобразователя автоматически уменьшается до нуля при обрыве в цепи катодной защиты. Введение преобразователя в рабочее состояние после устранения обрыва осуществляется выключением и последующим включением питающего напряжения.

Счетчик времени наработки фиксирует суммарное время работы катодной защиты в заданном режиме.

Входное сопротивление преобразователя на выводах подключения электрода сравнения и датчика электрохимического потенциала составляют не менее 1 МОм.

К автоматическим катодным преобразователям относятся преобразователь катодной защиты типа КЗУ-А, который широко применяется на объектах газового хозяйства (ММПП «Белстройремналадка»). Он автоматически поддерживает заданный защитный потенциал в диапазоне 0,85 до 3,5 В. Стабилизирует значение тока защиты.

Описанные выше типы катодных станций предусматривали ручное и автоматическое управление станциями. «Белстройремналадка» предлагает принципиально новый подход к решению задачи электрохимической защиты магистральных трубопроводов.

Суть его состоит в организации комплекса катодных преобразователей нового поколения типа КЗУ-АМ, соединенных двухпроводной линией связи. К этой же линии связи подключается компьютер службы ЭХЗ (рис. 4.6). Линия связи используется не только для контроля электрических параметров работающих преобразователей, но и для управления их работой.

Диспетчер ЭХЗ (ответственный дежурный работник ЭХЗ) может связываться с любым из преобразователей и получать на мониторе своего компьютера следующую информацию:

- величину тока защиты;
- напряжение на выходе преобразователя;
- величину разностного защитного потенциала;
- величину поляризационного потенциала;
- показания счетчика времени наработки;
- сообщения об аварийных режимах (перегрузка, короткое замыкание, обрывы силовых и измерительных проводов и т. д.)

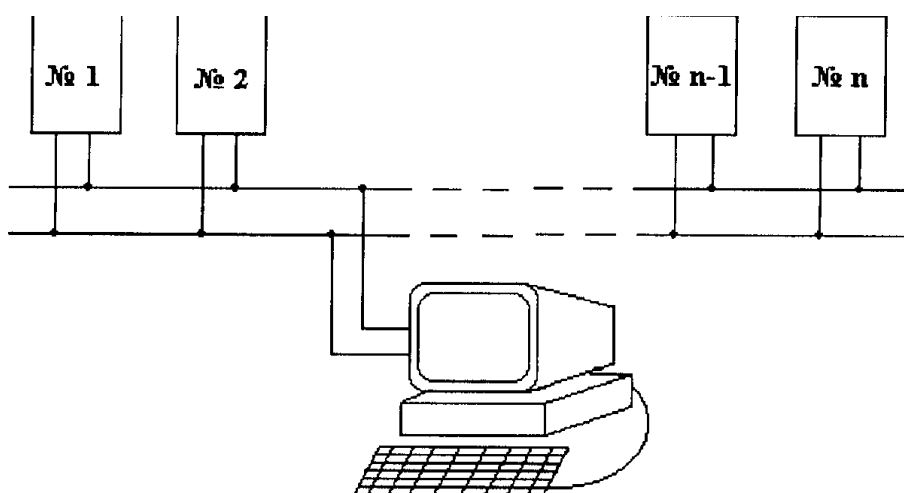


Рис. 4.6. Схема организации связи

Все данные о работе каждого преобразователя (защитный потенциал, ток, напряжение, сопротивление анод – труба) можно получить также в виде графиков или диаграмм за любой период времени (час, сутки, месяц, год).

Используя свой компьютер, диспетчер ЭХЗ может:

– производить включение и отключение любого преобразователя (или нескольких синхронно) с любыми временными интервалами или по определенному закону, заданному диспетчером.

– переключать преобразователи в любой из режимов:

- стабилизации разностного защитного потенциала;
- стабилизации поляризационного потенциала;
- стабилизации тока защиты;
- стабилизации выходного напряжения;

– изменять значения напряжения и тока и соответственно защитного потенциала в любом из режимов.

Применение такого комплекса позволяет существенно снизить затраты на эксплуатацию катодных преобразователей, т. к. отпадает необходимость в периодических осмотрах. Выезд на трассу производится лишь при выходе из строя преобразователя или возникновении аварийного режима. Преобразователь распознает характер аварии и передает сообщение диспетчеру немедленно.

Кроме того, появляется возможность следить за сезонными и климатическими изменениями защитных потенциалов без выезда на трассу.

Катодные преобразователи нового поколения, не объединенные в компьютеризованный комплекс, могут работать как обычные автоматические преобразователи в автономном режиме.

Такие преобразователи внедрены на нефтепроводах НРУПТН «Дружба» и РУП «Гомельтранснефть «Дружба», ОАО «Белтрансгаз».

### **4.3. Нормативные требования к катодной защите сооружений**

Согласно ГОСТ 25812-85 электрохимическую защиту следует осуществлять системно, оптимизируя для всего сооружения в целом ее параметры:

- диапазон рабочего тока и напряжений, а также начальных и конечных значений длины защитной зоны каждой единичной установки ЭХЗ;
- начальные и конечные значения защитных потенциалов в точке подключения установки;
- потенциалы по всей длине;
- защитный потенциал  $E_{\min \text{ защ}} = -0,85 \dots E_{\max \text{ защ}} = -1,15$ .

Подземные сооружения необходимо защищать непрерывной катодной поляризацией всей поверхности. Элементы технологической системы электрохимической защиты должны состоять из восстанавливаемых изделий с эксплуатационным сроком службы не менее 10 лет.

Системы катодной и протекторной защиты в течение 10 лет, дренажной – в течение 5 лет с начала их эксплуатации должны поддерживать защитные потенциалы на всем протяжении защищаемых сооружений, не требуя дополнительной реконструкции. Для сооружений с температурой транспортируемого продукта не более 293 К (20 °С), проложенных в грунтах с удельным электрическим сопротивлением не менее 10 Ом·м или с содержанием водорастворимых солей не более 1 г на 1 кг грунта, минимальный поляризационный защитный потенциал «сооружение – земля» относительно медносульфатного электрода сравнения должен быть равен минус 0,85 В (с омической составляющей – минус 0,90 В). Для сооружений с температурой транспортируемого продукта не более 333 К (60 °С), непосредственно контактирующих с водной средой не менее 6 месяцев в году и в грунтах с удельным электрическим сопротивлением менее 10 Ом·м, максимальный допустимый поляризационный защитный потенциал «сооружение – земля» относительно медносульфатного электрода сравнения должен быть равен минус 1,10 В (с омической составляющей – минус 1,20 В). При всех других условиях защитные потенциалы устанавливаются по ГОСТу.

Оценку коррозионного влияния полей блуждающих токов от источников постоянного тока на подземные сооружения и меры защиты от этого влияния осуществляют в соответствии с требованиями нормативной документации.

Участки сооружений с электрохимической защитой при надземной прокладке должны быть электрически изолированы от опор. Общее сопротивление этой изоляции должно быть не менее 100 кОм на одной опоре.

Расчет электрохимической защиты участков трубопроводов, включающий непрерывную надземную прокладку не более 3 км, следует осуществлять, исходя из условия электрической непрерывности трубопроводов на всем протяжении этих участков.

При наличии анодных и знакопеременных зон потенциалов, созданных постоянными блуждающими токами на подземных сооружениях, последние необходимо постоянно защищать в течение всего срока службы сооружения, непрерывно поддерживая на них защитный потенциал.

Перерыв в действии каждой установки систем электрохимической защиты допускается при необходимости проведения регламентных и ре-



монтажных работ не более одного раза в квартал до 80 ч. При необходимости проведения опытно-исследовательских работ и электрометрических обследований допускается отключение электрохимической защиты по согласованию с эксплуатирующей организацией на срок не более 10 суток в год.

Все соседние трубопроводы одного назначения должны быть включены в единую технологическую систему совместной электрохимической защиты. Допускается включение в такую систему соседних сооружений различного назначения, а также применение на них самостоятельных технологических систем электрохимической защиты при технико-экономическом обосновании. В случае невозможности создания единой системы совместной электрохимической защиты всех сооружений необходимо исключить вредное влияние раздельной защиты соседних сооружений друг на друга путем изменения мест расположения и конструкций анодных заземлений и точек подключения защитных установок. Эксплуатация катодной защиты соседних сооружений с любой разностью потенциалов между ними допустима при защитных потенциалах на каждом из них в пределах требований.

## ВОПРОСЫ САМОКОНТРОЛЯ ПО ТЕМЕ

1. Расскажите о составляющих катодной защиты трубопровода.
2. Каким образом достигается защищённость трубопровода?
3. Какие существуют типы катодных станций, каковы их недостатки?
4. Какие существуют нормативные требования к катодной защите сооружений?
5. Почему величину защитного потенциала рекомендуется поддерживать в диапазоне от  $-0,8$  до  $-1,2$  В?
6. Как определяется величина защитной зоны одной станции катодной защиты?
7. Как осуществляется одновременная защита нескольких трубопроводов?
8. От чего зависит мощность станции катодной защиты?
9. Как определяется количество станций катодной защиты, необходимых для защиты трубопровода длиной  $L$ ?

## ТЕМА 5. ПРОТЕКТОРНАЯ ЗАЩИТА ОБЪЕКТОВ ТРУБОПРОВОДНОГО ТРАНСПОРТА

### 5.1. Протекторная защита объектов трубопроводного транспорта. Принцип протекторной защиты трубопроводов

Принцип протекторной защиты заключается в подключении к стальному газопроводу металлического электрода, потенциал которого в грунте отрицательнее потенциала газопровода (рис. 5.1, *а*). Обычно естественный потенциал газопровода изменяется в пределах от минус 0,23 (в сухих песках) до минус 0,72 В (в глинах, насыщенных водой). Для изготовления протекторов применяют магниевый сплав МЛ-5 (алюминия 7,5 – 9,3 %, цинка 0,2 – 0,8 %, марганца 0,15 – 0,5 %, остальное – магний; примеси: кремний 0,25 %, медь 0,1 %, железо 0,08 %, никель 0,01 %). Протектор из этого сплава, установленный в заполнитель, состоящий из смеси сернокислого магния – 25 %, сернокислого кальция – 25 % и глины – 50 % (по весу), имеет электродный потенциал, равный минус 1,5 – 1,6 В. При подключении протектора (рис. 5.1, *б*) потенциал газопровода смещается до минус 1 – 1,2 В, что обеспечивает его защиту от коррозии.

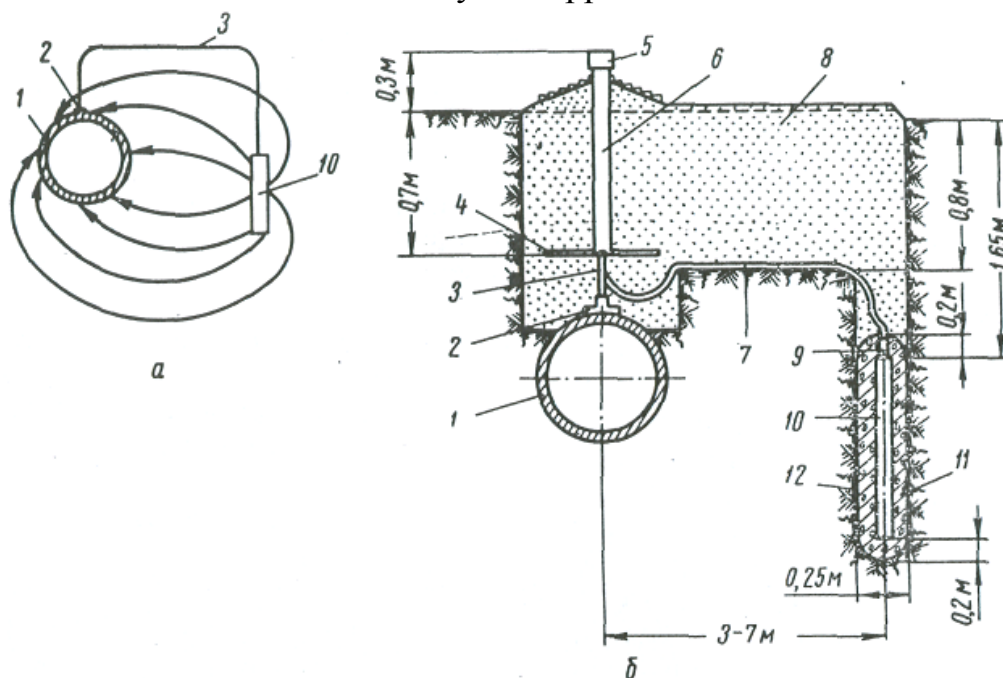


Рис. 5.1. Протекторная установка:

*а* – принципиальная схема; *б* – общий вид: 1 – магистральный газопровод; 2 – контакт с газопроводом; 3 – изолированный провод, подключенный к газопроводу и контакту колонки; 4 – поперечная планка; 5 – крышка; 6 – контрольно-измерительная колонка; 7 – изолированный провод, подключаемый к контакту колонки и протектору; 8 – насыпной грунт; 9 – контакт протектора; 10 – протектор; 11 – заполнитель; 12 – мешок

Для наиболее эффективного действия протекторной установки должны быть обеспечены следующие требования:

- электрохимический эквивалент материала протектора должен быть минимальным, а, следовательно, продолжительность работы протектора – максимальной;
- количество электрической энергии с единицы массы протектора должно быть максимальным;
- электродвижущая сила в системе «протектор – сооружение» должна быть максимальной;
- стоимость протекторной установки и ее эксплуатации должна быть минимальной.

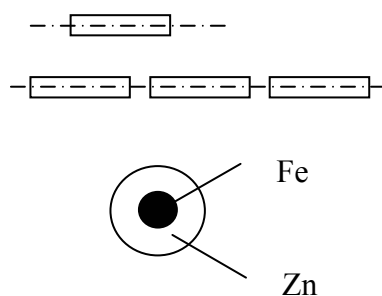


Рис. 5.2. Виды протекторов: стержневые, цепочка протекторов

Также встречаются протекторы: пластинчатые, трапециевидные, протекторная проволока.

Протекторы нельзя помещать в кокс, как практикуется для анодных заземлителей катодной защиты. При этом ввиду разности потенциалов между протектором и коксом образуется сильный коррозионный элемент, что приводит к разрушению протектора.

Повышение эффективности действия протекторной установки достигается погружением его в специальную смесь солей, называемую активатором. Назначение активатора: снижение собственной коррозии; уменьшение анодной поляризуемости; снижение сопротивления растеканию тока с протектора.

Стандартной засыпкой для протектора является смесь 75 % гипса, 20 % бетона и 5 % сульфата натрия.

Основными компонентами активаторов к магниевым сплавам являются глина, гипс  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , эпсомит  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  и мирабилит  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ .

Для защиты резервуаров успешно применяются магниевые и алюминиевые протекторы.

Протекторные установки наиболее просты в эксплуатации, так как они электробезопасны. Контроль работы установок осуществляют при помощи измерений разности потенциалов «труба – земля», а также тока и омического сопротивления цепи протекторных установок, имеющих контрольно-измерительные колонки.

## **5.2. Нормативные требования к протекторной защите сооружений**

Требования к протекторной защите предъявляют такие же, как и к системам катодной защиты.

Системы протекторной защиты в течение 10 лет с начала их эксплуатации должны поддерживать защитные потенциалы на всем протяжении защищаемых сооружений, не требуя дополнительной реконструкции. Для сооружений с температурой транспортируемого продукта не более 293 К (20 °С), проложенных в грунтах с удельным электрическим сопротивлением не менее 10 Ом·м или с содержанием водорастворимых солей не более 1 г на 1 кг грунта, минимальный поляризационный защитный потенциал «сооружение – земля» относительно медносульфатного электрода сравнения должен быть равен минус 0,85 В (с омической составляющей – минус 0,90 В). Для сооружений с температурой транспортируемого продукта не более 333 К (60 °С), непосредственно контактирующих с водной средой не менее 6 месяцев в году и в грунтах с удельным электрическим сопротивлением менее 10 Ом·м, максимальный допустимый поляризационный защитный потенциал «сооружение – земля» относительно медносульфатного электрода сравнения должен быть равен минус 1,10 В (с омической составляющей – минус 1,20 В). При всех других условиях защитные потенциалы устанавливают по ГОСТу.

В установках протекторной защиты используют литые протекторные электроды длиной до 1,5 м или протяженные протекторы с технологической длиной более 10 м.

Литые протекторы следует использовать в грунтах с удельным сопротивлением не более 50 Ом·м, устанавливая их на глубине не менее 1 м ниже границы зоны промерзания грунта.

Протяженные протекторы следует использовать с удельным сопротивлением не более 500 Ом·м.

Групповые протекторные установки, единичные протекторы с интервалом размещения не менее 500 м и протяженные протекторы должны быть подключены к защищаемому сооружению через контрольно-измерительные пункты.

Допустимо подключение новых сооружений к действующей технологической системе протекторной защиты с последующей ее реконструкцией, в том числе и ранее срока.

### **ВОПРОСЫ САМОКОНТРОЛЯ ПО ТЕМЕ**

1. Расскажите о составляющих протекторной защиты трубопровода.
2. Каким образом достигается защищённость трубопровода?
3. Какие существуют типы протекторов? Каковы их недостатки?
4. Какие металлы можно использовать для протекторной защиты стального трубопровода?
5. Какие существуют нормативные требования к протекторной защите сооружений?
6. Как определяется величина защитной зоны одного протектора?
7. Как осуществляется защита резервуаров?
8. От чего зависят количество и тип выбираемых протекторов для обеспечения защиты резервуаров?
9. По каким критериям выбираются протекторы для защиты объектов трубопроводного транспорта от коррозии?

## **ТЕМА 6. ПРОТИВОКОРРОЗИОННЫЕ ПОКРЫТИЯ**

### **6.1. Назначение противокоррозионных покрытий. Виды противокоррозионных покрытий. Классификация**

В качестве защиты от коррозии трубопроводов и резервуаров, предназначенных для транспортировки и хранения нефти и нефтепродуктов, применяют изоляционные покрытия. Применение тонкопленочной изоляции значительно повышает качество и надежность защиты, увеличивает срок службы трубопровода, создает условия для круглогодичного выполнения строительно-монтажных работ.

В настоящее время насчитывается большое количество изоляционных покрытий:

- битумные;
- битумно-резиновые;
- полиэтилен высокого давления;
- экструдированные с жестким клеем;
- экструдированные с мягким клеем;
- нанесенные оплавлением порошка;
- изоляционные покрытия на основе полимерных липких лент;
- поливинилхлоридные;
- эпоксидные полимеры;
- эпоксидная смола;
- полиуретан-пек;
- покрытия из каменноугольных пеков и др.

Университет им. Панфилова (г. Москва), ВНИИСТ (г. Москва) и другие организации проводят различные исследования по изучению разных видов изоляционных покрытий для стальных трубопроводов и резервуаров.

Различают два типа изоляции: усиленный и нормальный. Усиленная изоляция используется при прокладке трубопроводов диаметром более 1020 мм, если он прокладывается в засоленных, болотистых почвах, на подводных переходах, на переходах через автомобильные и железнодорожные дороги, на территориях КС и ГРС, НПС и др. На этих участках применяют изоляционные покрытия с оберткой из бризола, в качестве защиты трубопровода от механических повреждений используют жесткую футеровку из деревянных реек.

В условиях повышенной опасности (железнодорожные и автомобильные переходы, населенные пункты, болотистые районы и др.) используют усиленную изоляцию из битумно-полимерных, битумно-минеральных и полимерных материалов. Структура таких покрытий состоит из трех чередующихся слоев битумной мастики толщиной 3 мм и слоя армирующей обмотки из стеклохолста. Покрытие наносится по битумной грунтовке и снаружи покрывается оберточной бумагой, общая толщина покрытия  $9\pm 0,5$  мм.

Слой битумной мастики несет основную защитную нагрузку, препятствуя проникновению к металлу агрессивных агентов среды. В качестве обертки применяют бризол, полимерно-дегтебитумные пленки, полимерно-резиново-дегтебитумные пленки, стеклорубероид.

Изоляционные покрытия на основе полимерных липких лент предназначены для подземных трубопроводов и выполняются из слоя грунтовки и 1 – 3 слоев липкой полимерной ленты. Для предохранения полимерного покрытия на основе липких лент от механических повреждений применяют защитную обертку из 1 – 2 слоев рулонного материала. Перед нанесением липкой ленты на трубопровод необходимо произвести грунтовку прямых и спиральных швов. Наносят липкую ленту на трубопровод после высыхания грунтовки при помощи специальных машин. При нанесении изоляционного покрытия необходимо следить, чтобы на покрытии не образовалось складок, морщин, пузырей. При их появлении необходимо снять ленту с трубопровода и после устранения дефектов нанести вновь.

В качестве покрытия для резервуаров наибольшее распространение в нефтяной промышленности получили эпоксидные лакокрасочные материалы. Для противокоррозионной защиты резервуаров обычно применяют материалы холодной сушки.

Используются многослойные системы нанесения изоляционного покрытия на стальные конструкции: грунтовка внутренней поверхности резервуара под покрытие, нанесение лакокрасочного покрытия с помощью пневматического распылителя, контроль качества покрытия, заделка технологических отверстий и их закраска.

За рубежом широко применяются изоляционные покрытия из каменноугольных пеков. Пеки – это тяжелые остатки от перегонки каменноугольного дегтя более черного цвета, чем битумы. Изоляционные покрытия из каменноугольного пека включают в себя средний каменноугольный пек, пластификатор (смола пиролиза резины, каменноугольная смола) и наполнитель в виде порошка резины или асбеста.

Стеклоэмалевые покрытия – это полученная плавлением стекловидная масса, состоящая преимущественно из окислов и наплавленная на металл одним или несколькими слоями.

Для борьбы с коррозией трубопроводов применяют одновременно покрытие и катодную защиту.

## **6.2. Нормативные требования, предъявляемые к покрытиям**

К покрытиям для изоляции подземных трубопроводов предъявляются следующие требования (ГОСТ 25812-85):

- сплошность, обеспечивающая надежность покрытия (в противном случае оголяется поверхность трубопровода и возникают коррозионные элементы);

- водонепроницаемость, обеспечивающая невозможность насыщения пор покрытия почвенной влагой, что устраняет контакт электролита с металлом;

- прилипаемость (адгезия) покрытия к металлу – один из основных показателей качества изоляционного покрытия (при нарушении адгезии снижается сопротивляемость покрытия механическим воздействиям, а также проникновению под него электролита);

- химическая стойкость, обеспечивающая длительную работу покрытия в условиях наиболее агрессивных грунтов;

- электрохимическая нейтральность – отдельные составляющие покрытия не должны участвовать в катодном процессе, в противном случае это может привести к разрушению изоляции трубопровода при электрохимической защите;

- механическая прочность, достаточная для проведения изоляционно-укладочных работ на трассе трубопровода;

- термостойкость, определяемая необходимой температурой размягчения, что важно для изоляции «горячих» трубопроводов, и температурой наступления хрупкости, что важно при проведении изоляционных работ в зимнее время;

- диэлектрические свойства, определяющие сопротивление возникновению коррозионных элементов на поверхности трубопровода и обуславливающие экономический эффект от применения электрохимзащиты;

- возможность механизации нанесения изоляционного покрытия;

- недефицитность;

- экономичность.



### 6.3. Подготовка поверхности к нанесению покрытия

Постоянно растущие объемы трубопроводного строительства приводят к необходимости разработки и внедрения новых технологических и конструктивных решений, обеспечивающих сокращение сроков и повышение качества сооружения объектов. Одним из эффективных направлений развития трубопроводного транспорта является использование труб с изоляцией, наносимой в заводских и базовых условиях.

В стационарных условиях становится возможным наносить наиболее совершенными способами (экструзией, напылением в электрическом поле и др.) современные изоляционные покрытия из композиций полиэтилена, термореактивных смол и других полимерных материалов с заранее заданными физико-механическими и защитными свойствами.

Однако независимо от того, какой вид изоляционного покрытия применяется для защиты труб от коррозии, их поверхность перед изоляцией обязательно очищают от грязи, наледи, ржавчины, окалины, пыли и жирных загрязнений.

Под качеством очистки понимают состояние металла, при котором на поверхности остается допустимое количество загрязнений.

Под подготовкой поверхности труб перед нанесением защитных покрытий понимают не только их очистку, но и придание стальной поверхности соответствующих физико-химических свойств, а также профиля, которые обеспечивали бы необходимую адгезию с защищаемой поверхностью.

Все большее применение в последнее время лакокрасочных, полимерных и металлизационных покрытий делает проблему выбора эффективного способа подготовки поверхности труб в процессе нанесения изоляционных покрытий особенно актуальной, так как для этих покрытий их адгезия к поверхности в значительной степени определяет высокое качество, надежность и долговечность противокоррозионной защиты.

Осуществление физико-химических процессов взаимодействия на границе покрытие – труба связано со структурой и энергетическим состоянием поверхности металла трубы, формируемым в процессе подготовки ее поверхности. Известно, что атомы свежееобразованной поверхности металла обладают повышенной реакционной способностью благодаря наличию нескомпенсированных связей. Причем энергия их повышается по мере уменьшения числа ближайших соседних атомов. В связи с этим подготовка поверхности, в результате которой определяется макро- и микрогеометрия поверхностного слоя трубы, должна быть направлена на увеличение ис-

тинной площади поверхности (а значит числа возможных физических и химических связей) путем увеличения шероховатости. Особо действенным фактором является развитие микроскопической и субмикроскопической шероховатости, связанной с процессами пластической деформации и наклепа. Эти процессы активизируют поверхность с точки зрения адсорбции и химических реакций.

Соприкосновение свежееобразованной поверхности металла со средой приводит к мгновенной адсорбции атомов и молекул из окружающей среды на поверхности и затем к ее окислению и загрязнению. Необходимо учитывать на поверхности трубы наличие жировых загрязнений, следов консервации, смазочно-охлаждающей жидкости, окалины, ржавчины, неорганических солей, а при отрицательных температурах – снега и наледи. Развитая пористая поверхность окалины и ржавчины активно адсорбирует внешние загрязнения (воду, масло, пыль), в результате чего поверхность трубы покрывается еще добавочным слоем загрязнений. Пленки паров воды и органических загрязнений имеют толщину от 10 до 100 и более молекулярных слоев и прочно связаны с поверхностью.

Состояние стальной поверхности перед очисткой (по степени ее коррозии) и степень очистки нормируются в специальных технических стандартах, разработанных институтами, национальными ассоциациями, обществами инженеров, фирмами и т. д.

Основными техническими нормами и стандартами за рубежом в области подготовки поверхности, имеющими силу закона, являются SIS 05 5900-1967 (Швеция), BS 4232-67 (Англия), NACE TM-OI-75 и SSPC – Vis I (США), Rugotest (Франция), DIN 18364 (ФРГ), TGL 18730 (ГДР), DS 2019 (Дания) и др.

Из большого многообразия стандартов, используемых в зарубежной практике при оценке состояния исходной поверхности металла труб и качества ее очистки, наибольшее распространение получил стандарт SIS 05 5900-1967, разработанный Институтом по коррозии (Швеция) совместно с Американским обществом испытания материалов (ASTM) и Советом по окраске стальных конструкций (SSPC). Стандарт выполнен в виде альбома и иллюстрирован цветными фотографиями, изображающими степени загрязнения поверхности до и после очистки. В нем установлены четыре степени загрязнения исходной поверхности металла до очистки: А, В, С и D.

Степень загрязнения поверхности А характеризует стальную поверхность без ржавчины, покрытую окалиной, образованной в процессе проката и имеющей прочное сцепление с металлом.

Степень загрязнения В оценивают поверхность с окалиной, непрочной связанной с металлом, и небольшим содержанием ржавчины.

Степень загрязнения С характеризует стальную поверхность с небольшим количеством ржавчины и удаленной окалиной. Поверхность, вся покрытая слоем ржавчины, образованной, например, в результате длительного хранения металла под воздействием атмосферных осадков, оценивается степенью загрязнения D.

Очистку наружной поверхности труб выполняют механическим, химическим, термическим и другими способами. При этом выбор наиболее эффективного метода очистки зависит от вида загрязнений, состояния поверхности, требуемой степени очистки, применяемого противокоррозионного покрытия и способа изоляции труб.

*Химическая очистка* используется при нанесении изоляции в заводских условиях на трубы малых диаметров. Этот способ очистки заключается в воздействии водных растворов щелочей и кислот на загрязненную окалиной, ржавчиной, масляными пятнами и эмульсионными пленками поверхность металла. Однако в настоящее время химическая очистка труб все больше вытесняется механическими способами вследствие значительного увеличения затрат на регенерацию отработанных растворов, жестких требований к охране окружающей среды и низкой производительности самого процесса.

*Термические способы подготовки поверхности.* При газопламенном способе очистки поверхность труб нагревают горелками до температуры не выше 300 °С. При нагреве и последующем охлаждении окалина, имеющая меньший коэффициент температурного расширения, чем сталь, растрескивается и отслаивается, ржавчина обезвоживается и также отслаивается, а органические загрязнения сгорают без значительной передачи тепла в основной металл трубы. Для нагрева применяют многофакельные горелки с кислородно-ацетиленовым пламенем.

К преимуществам данного способа необходимо отнести сравнительную малогабаритность оборудования и возможность использования операторов невысокой квалификации.

К недостаткам способа следует отнести то, что при толстых слоях окалины полная очистка поверхности труб не достигается. Шероховатость поверхности после газопламенной очистки составляет от 320 до 40 мкм. Однако наличие окисных пленок, продуктов сгорания газов и загрязнений требует дополнительной подготовки поверхности перед изоляцией (например, струйно-абразивной). Кроме того, при газопламенном способе

очистки требуется развитая система местных способов и общеобменной вентиляции. Процесс требует соблюдения весьма строгих норм и правил по технике безопасности.

*Индукционный нагрев труб* осуществляется токами высокой частоты до 10 кГц. При прохождении труб через индуктор окалина быстро нагревается до температуры 150 – 200 °С. Поверхность металла после индукционного нагрева имеет те же свойства, что и после газопламенной очистки, однако полное отсутствие продуктов сгорания газов и более быстрый нагрев относятся к числу несомненных преимуществ способа индукционного нагрева.

С точки зрения норм и правил техники безопасности к процессу применимы все ограничения, которые связаны с исследованием воздействий токов высокой частоты. В то же время требования к вентиляции ниже, чем при газопламенной очистке.

*Механические способы подготовки поверхности.* К механическим способам подготовки поверхности труб относятся: обработка пескоструйными аппаратами, ручным и механическим инструментом, струйно-абразивная (дробеметная и дробеструйная) обработка.

Пескоструйный способ очистки основан на том принципе, что измельченные абразивы (кварцевый песок) при помощи воздуха с большой скоростью направляются на очищаемую поверхность. Ударяясь о поверхность металла, они разрыхляют и удаляют слои окислы, ржавчины и другие загрязнения. Пескоструйную очистку труб ряд зарубежных фирм использует на полустационарных установках непосредственно в районах строительства морских трубопроводов. Вместе с тем этот способ малопродуктивен, требует больших расходов песка, который из-за пылеобразования в результате дробления невозможно многократно использовать.

*Обработка ручным инструментом.* Ручной инструмент применяется при небольших объемах работ. К преимуществам способа относится возможность выполнять разнообразные операции по удалению окислы, снятию заусенцев, зачистке сварных швов и др. Недостатками являются быстрый износ и необходимость замены рабочей части инструмента. Кроме того, при ручной очистке трудно обеспечить необходимое качество обработки на всей поверхности, при этом велики затраты труда и времени.

Ручную очистку от окислы, ржавчины и загрязнений производят стальными шпателями, скребками, проволочными щетками, ершами, зубилами, карборундовыми и наждачными кругами и т. п.

*Обработка механизированным инструментом.* Для очистки труб наиболее часто используются металлические щетки. Сущность процесса очистки с помощью металлических щеток заключается в совместном режущем и ударном воздействии проволочного ворса на обрабатываемую поверхность. Проволочные ворсинки, с одной стороны, снимают микростружку, с другой – производят ударное действие, сбивая ржавчину и непрочную закрепленную окалину. Работоспособность щеток определяется материалом проволоки, длиной ворса и степенью заполнения щетки ворсом. Для механизированной очистки труб от окалины и ржавчины применяют установки с металлическими щетками производительностью до 500 м<sup>2</sup>/ч. Энергоемкость очистки щетками – 0,5 кВт·ч /м<sup>2</sup>.

В США, Англии, ФРГ, Швеции и других развитых странах щетки применяют, главным образом, в механизированном инструменте и, в меньшей степени, в стационарных установках. Это объясняется применением для очистки труб более производительных установок дробеметной и дробеструйной очистки.

Очистка щетками имеет ряд существенных недостатков. Несмотря на комбинированное ударное и режущее действие ворса, удаление прочно закрепленных слоев окалины затруднено. При очистке происходит глянцевание окалины, что придает поверхности блеск и создает иллюзию очищенного металла. В силу малой упругости ворсинки не проникают глубоко в поверхность металла; при этом удаляются лишь микронеровности, поверхность становится гладкой, что может привести к снижению адгезии покрытия. При этом адгезионные свойства поверхности трубы невысоки.

*Струйно-абразивная обработка.* Процесс заключается в воздействии на обрабатываемую поверхности металла струй твердых частиц (абразива), движущихся с большой скоростью, в результате чего на поверхности металла происходят различные количественные и качественные изменения. Твердые частицы (абразивные зерна), ударяясь о поверхность, снимают продукты окисления (первый период), а затем – основной металл (второй период).

До 1930 г. очистка дробью производилась только аппаратами, выбрасывающими дробь из сопла посредством сжатого воздуха, дробеструйная очистка даже сейчас является в ряде случаев весьма эффективным средством подготовки поверхности. Струйно-абразивная очистка как автоматизированная цеховая операция конвейерного типа стала возможной лишь с изобретением центробежной дробеметной очистки в начале 30-х годов. Центробежные системы дробеметной очистки являются намного более производительными и дешевыми по сравнению с воздушными дробеструйными системами.

Толщина и химический состав окислов существенно влияют на продолжительность первого периода обработки. Так как твердость окалины (HV 680) выше, чем ржавчины (при толщине 0,1 мм HV 50 – 60) и основного металла (HV 280), то абразивные зерна (дробинки) срезают ржавчину, а окалину скалывают, тем более что между слоем окалины и основным металлом имеется высокая концентрация напряжений, способствующих отслоению. Съем окалины не зависит от ее химического состава, более толстые слои отслаиваются легче. Во время съема продуктов окисления протекает процесс упругой и пластической деформации основного металла.

Контакт дроби с металлической поверхностью самый разнообразный. Часть зерен, врезаясь в металл, снимает стружку, другая часть, имеющая глубину врезания меньшую, чем радиус округления режущей кромки, скоблит поверхность без снятия стружки, а третья – давит на поверхность и выдавливает металл в стороны.

При струйно-абразивной обработке съем металла происходит вследствие микрорезания, хрупкого, полидеформационного и усталостного разрушения поверхностного слоя. Преобладание каких-либо из этих явлений в съеме металла зависит в основном от формы абразивных зерен, от физико-механических свойств обрабатываемого материала и режима обработки.

При повторно-циклическом ударе дроби вместе с пластическими деформациями начинается процесс образования усталостных трещин по зернам металла и их границам. Интенсивность разрушения поверхностного слоя металла под воздействием струи дроби определяется сочетанием прочности зерна металла и его границ. У менее твердых сталей разрушение протекает более интенсивно по зернам металла, чем по их границам. При обработке стали металлической дробью глубина проникновения наклепа или толщина наклепанного слоя колеблется от 0,005 до 0,025 мм.

В результате микроударного действия дроби образуется новый микро-рельеф поверхности с пластически деформированным слоем. К основным изменениям в поверхностном слое относятся упругая и пластическая деформация, разрушение микрообъемов, упрочнение или разупрочнение, остаточные напряжения, изменения микроструктуры, нагрев слоя металла, прилегающего к месту удара, а также изменение шероховатости поверхности.

Количественная характеристика этих изменений зависит от технологических параметров процесса: вида движения дроби в период контакта с обрабатываемой поверхностью, угла атаки струи, продолжительности обработки, физико-механических свойств обрабатываемой поверхности трубы и активного носителя дроби.

Съем металла при увеличении продолжительности обработки растет непропорционально. В первые секунды съем протекает более интенсивно, чем в последующие. После 60 с съем металла стабилизируется.

Шероховатость поверхности после струйно-абразивной обработки различна, определяется она в основном размером дробы и, следовательно, довольно просто регулируется. Шероховатость поверхности вдоль и поперек направления струи дробы почти одинакова, следы от дробы имеют различные формы и направления. Хаотичное расположение этих следов объясняется разнообразием форм граней абразивных зерен и беспорядочностью расположения в струе. На шероховатость поверхности металла оказывают влияние зернистость, форма, скорость дробы и угол атаки струи. Шероховатость поверхности, шаг и радиус закруглений неровностей увеличиваются с увеличением размера дробы. Исходная шероховатость поверхности мало влияет на результат обработки. Дополнительная неровность поверхности зависит еще и от неравномерной скорости частиц абразива в струе. Чем ближе частицы абразива к периферии струи, тем меньше их скорость и больше расстояние между ними. Поэтому в середине охватываемого струей участка абразивные частицы снимают больше металла. С удалением от центра струи шероховатость уменьшается. То же самое можно сказать и о распределении внутренних напряжений, возникающих в микрообъемах металла и влияющих на качество обработки поверхности.

На шероховатость поверхности оказывает влияние также угол атаки струи дробы. Для малоуглеродистой стали по мере увеличения угла атаки при прочих неизменных параметрах шероховатость поверхности уменьшается. Это объясняется тем, что по мере увеличения угла атаки съем металла уменьшается, а деформация увеличивается.

При непрерывном воздействии дробы образующиеся при каждом ударе разрушения все более возрастают. Объясняется это повышением твердости вновь образуемых поверхностей и деформируемых частиц металла. В том случае, когда твердость металла становится выше проникающей способности дробы (абразива), происходит разрушение путем отслоения и вырывов. До этого момента преобладает процесс срезания микростружек (начальный период длится обычно около 15 с).

Практически отслоения и вырывов избежать нельзя, так как поверхностный слой всегда структурно неоднороден. Поэтому важно остановиться на такой стадии обработки, при которой эти нарушения целостности поверхности можно считать для конкретных условий допустимыми. В результате струйно-абразивной обработки образуется свежая, пластически

деформированная поверхность с большим запасом свободной энергии, с развитой поверхностью и равномерной шероховатостью во всех направлениях обработки.

Изменением технологического режима струйно-абразивной обработки можно в широких пределах изменять шероховатость и другие свойства обрабатываемой поверхности, добиваясь оптимальной адгезионной прочности изоляционного покрытия с металлом трубы.

Для очистки труб применяются следующие способы струйно-абразивной обработки:

- абразивно-центробежный (дробеметный);
- абразивно-пневматический (дробеструйный).

Дробеметные установки (рис. 6.1) состоят из камеры центробежных головок (колесных блоков с рабочими лопатками), рабочего конвейера, ленточного и ковшового подъемника, сепаратора дроби, пылесборника, вентилятора, рольганга.

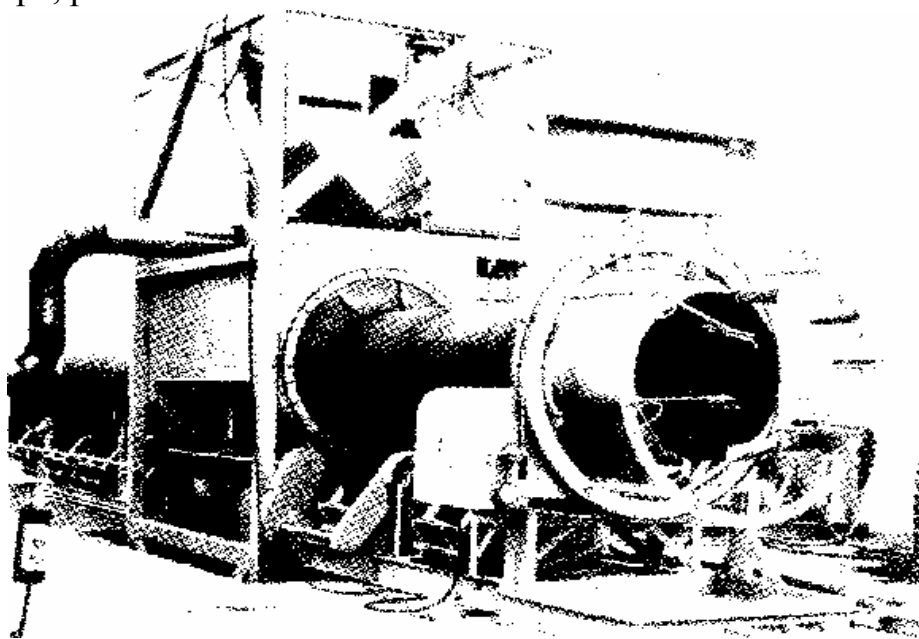


Рис. 6.1. Общий вид дробеметной установки для очистки труб

Рабочим органом в аппаратах дробеметной очистки служит центробежная головка, предназначенная для придания потоку абразива высокой скорости движения в определенном направлении. Принципиальная схема работы дробеметной установки следующая: дробь из верхнего бункера подается через распределительную камеру на лопатки ротора, частота вращения которого 2000 – 3000 об/мин, и под действием центробежной силы выбрасывается со скоростью 50 – 80 м/с на обрабатываемую поверхность трубы.



Вращение ротора с большой скоростью осуществляется с помощью ременной или зубчатой передач.

В одной из конструкций головки дробь подается в литой стальной барабан-ускоритель, вращающийся совместно с колесом. Барабан сообщает начальную скорость абразиву, который перемещается к стационарной клетке, где происходит ее выброс с лопаток. В другой конструкции (рис. 6.2) дробь через сопло подается к центру колеса и далее – с помощью маломощного воздушного насоса – на лопатки. Направление вылета дроби регулируется фиксацией выходного сопла.

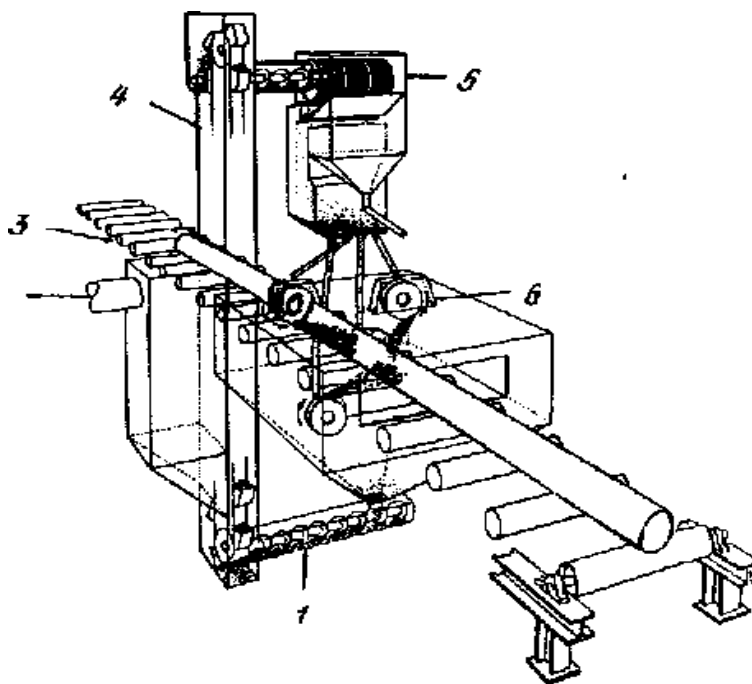


Рис. 6.2. Принципиальная схема очистки труб на дробеметных установках  
1 – шнековый транспортер для абразива; 2 – пылесборник; 3 – роликовый конвейер;  
4 – ленточный и ковшовый подъемник; 5 – сепаратор абразива; 6 – колесный блок с лопатками

Обычно используют несколько центробежных головок, расположенных так, чтобы дробь достигала каждой точки обрабатываемой трубы. Выбор числа головок определяется так, чтобы обеспечивалась обработка трубы за один проход со средней эксплуатационной скоростью, дробь с каждого колеса выбрасывается струей шириной 8 – 10 см и длиной 80 – 90 см в зависимости от расстояния от колеса до трубы (рис. 6.3, 6.4). Скорость выбрасывания дроби есть функция диаметра колеса, длины и формы лопатки, скорости, с которой вращается колесо.

Количество выбрасываемой дроби при данной скорости вращения колеса регулируется мощностью приводного мотора.

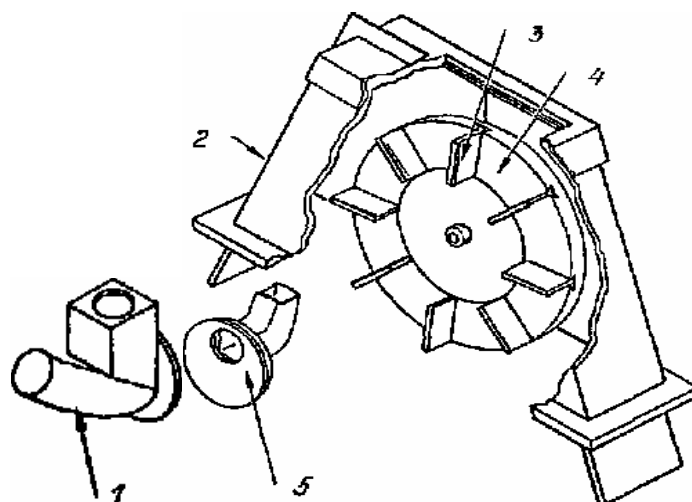


Рис. 6.3. Конструкция центробежной головки  
1 – инжектор; 2 – кожух; 3 – лопатки; 4 – рабочее колесо; 5 – сопло

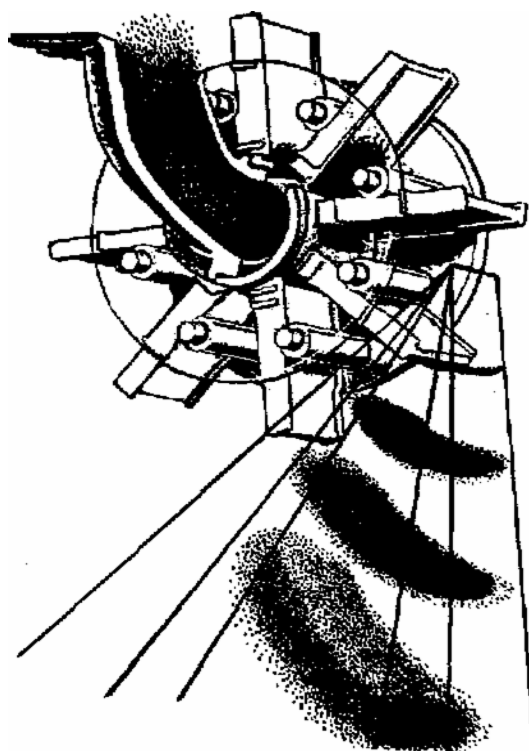


Рис. 6.4. Схема выброса дроби на поверхность  
при работе центробежной головки

Система повторного использования дроби содержит следующие конструктивные элементы:

- транспортер дроби;
- систему доставки дроби от транспортера к сепаратору;
- воздушный сепаратор для удаления отработанных абразивных частиц и продуктов очистки;

- сборник для хранения использованной дробы;
- сборник для сбора отходов дробы;
- устройство для управления и измерения потока дробы на колеса;
- механизм для перемещения дробы из камеры к транспортеру.

Очистка труб производится в камерах непрерывного действия, оборудованных вытяжной вентиляцией, транспортерами для загрузки дробы и возврата использованной дробы, приспособлениями и транспортными устройствами для труб. Использованная дробь скатывается в загрузочный бункер. Далее винтовым транспортером она подается на ковшовый подъемник и попадает в расходный бункер. На дуги движения дробы от верхней части элеватора до расходного бункера установлен воздушный сепаратор, в котором дробь очищается от частиц окалины и ржавчины. При движении воздуха через сепаратор уносятся грязь и мелкие частицы абразива, не пригодные для дальнейшего использования. Чистые частицы абразива подаются в бункер и вновь используются для работы. Большое внимание уделяется предотвращению загрязнения дробы. Пылесборник обеспечивает устойчивую работу системы вентиляции дробеметной машины.

Большинство дробеметных установок оснащается также щетками и мощными системами отсоса для удаления пыли и частиц дробы с наружной поверхности труб, выходящих на камеру.

Пылесборники дробеметных машин различны по конструкции, но все используют тканевые трубы, сквозь которые проходит воздух, и пыль оседает на внутренней или наружной стороне труб (в зависимости от конструкции).

Простой, но весьма эффективный тип пылесборника показан на рис. 6.5. Пыльный воздух входит в коллектор через перфорированную пластину. При резком изменении скорости воздушного потока наиболее тяжелые частицы падают в сборник, оставляя в потоке легкие взвешенные частицы. Из расходного бункера дробь по распределительным трубам возвращается в дробеметные аппараты. Подача дробы в аппараты регулируется дозаторами.

Рабочий поток содержит взвешенный абразив и отходы, создаваемые процессом очистки. Отверстия для входа и выхода трубы из камеры оборудуются эластичными уплотнениями, чтобы предотвратить попадание абразива и пыли в помещение. Камера монтируется из листов малоуглеродистой стали, обычно защищенных в местах прямого попадания абразивных струй материалами, устойчивыми к абразивному износу.

Для перемещения труб внутри камеры, как правило, используются роликовые транспортеры-рольганги.

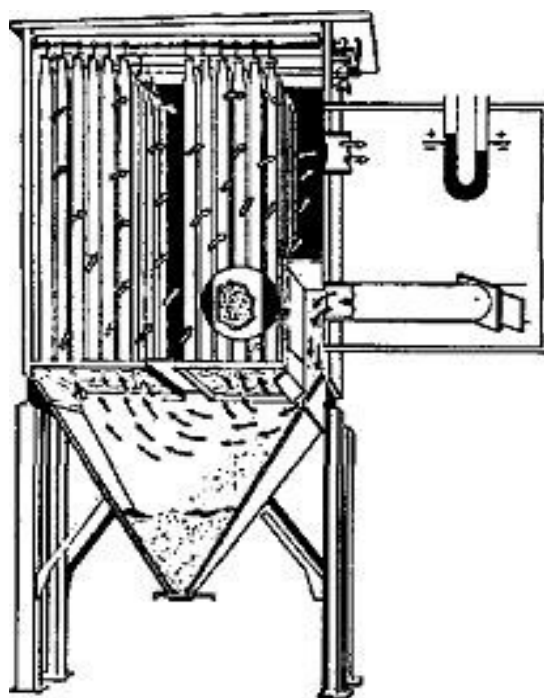


Рис. 6.5. Пылесборник

Управление всеми механизмами дробеметной установки производится оператором с единого пульта.

К недостаткам дробеметного способа очистки следует отнести:

- наличие систем сбора, очистки и возврата дробы, которые приводят к необходимости иметь громоздкий комплекс связанных между собой механизмов, работающих в тяжелых условиях абразивного износа;
- сопровождение работы дробеметных аппаратов большим шумом.

Абразивно-пневматический способ (дробеструйный) по своему технологическому назначению аналогичен дробеметному, но отличается по эксплуатационным показателям: энергоемкости, степени механизации и производительности оборудования, конструктивной сложности и т. д.

По энергетическим показателям дробеструйные аппараты уступают дробеметным. Для сообщения 1 кг дробы рабочей скорости в дробеструйном аппарате требуется в 8 – 10 раз больше энергии, чем в дробеметном.

Достоинство дробеструйной очистки по сравнению с дробеметной – относительная простота и высокая эксплуатационная надежность оборудования.

В дробеметных установках имеется комплекс устройств для циркуляции дробы в системе, а в дробеструйных установках эти элементы могут отсутствовать, что упрощает конструкцию, снижает стоимость и высвобождает производственную площадь.

Принцип работы дробеструйных аппаратов состоит в том, что дробь поступает в смесительную камеру или эжекционную головку, где попадает в струю сжатого воздуха и выбрасывается через специальное сопло на обрабатываемую поверхность, очищая ее при ударе от загрязнений.

В зависимости от способа подачи дроби и смешивания ее с воздухом различают три типа дробеструйных аппаратов.

В аппаратах нагнетательного действия дробь под давлением подается в камеру для смешивания с воздухом и далее по шлангу через сопло на обрабатываемую поверхность. Этот способ наиболее производителен, но требует применения сложных аппаратов и сопровождается большим износом сопел и шлангов.

В аппаратах всасывающего действия дробь из бункера засасывается струей сжатого воздуха и по шлангу направляется через сопло на обрабатываемую поверхность. Этот способ прост, но малопроизводителен, аппараты наиболее дешевы, надежны в работе, меньше износ шлангов и сопел.

В аппаратах гравитационного действия дробь из бункера попадает к соплу под действием собственной массы и лишь перед самым выходом из сопла смешивается с воздухом. Аппараты просты, надежны в работе и их применение целесообразно, если сохраняется постоянное направление струи и сопло может быть неподвижно закреплено в аппарате.

Важным элементом в конструкции дробеструйных аппаратов является сопло, от которого во многом зависят производительность и экономичность работы установки. Эффективность работы сопла определяется диаметром выходного отверстия, конфигурацией проходного сечения и материалом вставки. Диаметр выходного отверстия сопла прежде всего определяет расход воздуха дробеструйным аппаратом при данном давлении воздуха в подводящей магистрали.

Увеличение расхода воздуха существенно влияет на себестоимость очистки, так как стоимость сжатого воздуха в общей себестоимости очистки достигает 60 – 70 %.

Увеличение диаметра выходного отверстия сопла в результате износа влечет за собой падение давления воздушно-абразивной струи. Однако с увеличением диаметра сопла до 16 мм производительность процесса очистки возрастает благодаря увеличению расхода дроби и площади мгновенной очистки, затем при дальнейшем увеличении диаметра сопла производительность процесса начинает падать. Таким образом, максимальный диаметр сопла, при котором оно должно быть заменено новым, составляет 15 – 16 мм. Начальный диаметр выходного сопла принимают порядка

8 мм, исходя из минимально допустимой производительности процесса очистки и времени работы до полного износа.

*Материалы для струйно-абразивной очистки.* Размер, форма и твердость абразивных частиц, состав абразивных смесей являются важнейшими факторами в достижении требуемых характеристик очищаемой поверхности.

Для дробеметной и дробеструйной обработки труб применяют дробь чугунную или колотую, дробь стальную литейную или колотую. Дробеструйную и дробеметную обработку проводят при толщинах стенок труб не менее 3 мм. Обработка дробью допускается и для более тонкостенных труб, но только при условии, что не нарушается их геометрическая форма.

Чугунная и стальная колотая дробь получается путем дробления чугунной и стальной литой дроби. Эффективным для очистки труб является применение стальной рубленой дроби, изготавливаемой из проволоки делением ее на части, длина которой равняется диаметру проволоки. Литая дробь имеет округлую форму, колотая – форму неправильного многогранника, на сторонах которого допускается наличие сферических поверхностей. Стальная рубленая дробь имеет форму цилиндра, диаметр и высота которого равны.

Исследованиями зарубежных специалистов установлено, что слабо прокорродировавшая сталь (шкала А или В) по стандарту SIS 05 5900-1967 (Швеция) наиболее эффективно очищается стальной дробью. Мелкие стальные частицы (опилки) с твердостью по Роквеллу 40 – 48 также могут использоваться для очистки труб со степенью коррозии поверхности А или В. Частицы опилок должны быть, по возможности, сферическими. Опилки являются более эффективными при удалении продуктов коррозии с поверхности труб, пораженных до степени В. Стальные опилки с твердостью по Роквеллу 40 – 50 эффективны для очистки труб со степенью коррозии поверхности С и D, для наиболее пораженных коррозией и питингом поверхностей труб классов С и D опилки твердостью 50 – 60 по Роквеллу более эффективны, чем опилки меньшей твердости.

При тщательно управляемом процессе очистки для поверхностей всех степеней коррозии, в частности, для степеней С и D эффективным является применение смесей. Правильность составления рабочей смеси важна для всех операций центробежной дробеметной очистки. Соотношение дробь/опилки, выбираемое для смесей, должно быть в пределах от 1:1 до 3:2. Такие смеси сложно получить в требуемых пропорциях, так как опилки будут опускаться на дно быстрее, чем дробь. Ввиду различия скоростей

оседания может случиться, что новая порция абразива будет содержать больше опилок, чем дроби.

В этом случае смесь должна быть перемешана перед подачей в машину с другой смесью в следующих пропорциях (табл. 6.1).

Таблица 6.1

Соотношение рабочей смеси	Состав добавляемой смеси
1:1 (50 % дроби, 50 % опилок)	1:2 (33 % дроби, 67 % опилок)
3:2 (60 % дроби, 40 % опилок)	1:1 (50 % дроби, 50 % опилок)
7:3 (70 % дроби, 30 % опилок)	3:2 (60 % дроби, 40 % опилок)

При применении на практике может потребоваться корректировка соотношения дроби и опилок в добавляемой смеси. Установление нужного соотношения требует особого внимания к контролю за потерями абразива из системы, за качественной работой сепаратора, к контролю при добавлении новых порций абразива в машину.

*Влияние рабочей смеси на профиль поверхности.* Стальная дробь с твердостью 40 – 50 RC образует относительно гладкостенные кратеры и обычно волнообразную поверхность. Стальные опилки с той же твердостью образуют небольшую шероховатость профиля поверхности трубы, однако опилки большей твердости (50 – 60 RC) образуют большую разность вершин и впадин микропрофиля, чем более мягкие опилки тех же размеров. Смесь стальной дроби (40 – 50 RC) и опилок дает поверхность, характерную для твердых опилок с более сглаженным, благодаря действию дроби, профилем.

Поверхность металла, очищенная струей стальных опилок, будет казаться светлее и ярче, чем поверхность, очищенная струей дроби.

Различия в цвете объясняются отличиями в форме шероховатости поверхности, производимыми различными абразивами, которые изменяют отражение от поверхности.

В США приняты две спецификации на стальную дробь и опилки. Абразив имеет размеры в соответствии со спецификацией SAE J444.

Каждый абразив любой формы, типа и размера имеет свой соответственный жизненный цикл. Новый абразив должен добавляться по мере удаления отработанного абразива из системы. При отсутствии автоматических систем новый абразив добавляется либо раз за каждый цикл очистки, либо после каждых 8 часов работы очистной установки. Потребление абразива зависит от размера его частиц, удаляемых из системы. Чем больше размеры удаляемой дроби, тем выше уровень потребления и стоимости абразива.

*Контроль качества подготовки поверхности.* Качество подготовки наружной поверхности труб перед нанесением изоляционных покрытий оценивают, в основном, визуальными методами путем внешнего осмотра очищаемой поверхности и сравнения ее с эталонными образцами в соответствии с техническими стандартами.

Стандартом SIS 05 5900-1967 (Швеция) установлено шесть степеней очистки поверхности Sa 1; Sa 2; Sa 2,5; Sa 3; St 2 и St 3. Степень очистки St 2 характеризует поверхность, с которой частично удалены стальными щетками окалина и ржавчина, а также посторонние частицы и пыль. Поверхность металла после такой очистки имеет слабый металлический блеск. Для степени очистки St 3 характерна более тщательная обработка; после очистки от пыли эта поверхность имеет явный металлический блеск.

После очистки дробью поверхность, с которой удалены легко отделяемые частицы окислы, ржавчины и других загрязнений, характеризуется степенью чистоты Sa 1. Более тщательно обработанные поверхности имеют степень очистки Sa 2 и Sa 2,5. При степени очистки Sa 3 с поверхности полностью удаляются окалина, ржавчина, посторонние частицы и пыль. Очищенная поверхность имеет однородный металлический цвет.

В применяемом в ГДР стандарте TGL 18730 в отличие от стандарта SIS 05 5900-1967 нормированы только три степени очистки поверхности металла от продуктов коррозии и других загрязнений, которые условно обозначены цифрами 1, 2 и 3. Степень очистки 1, достигаемая при ручной обработке, характеризует поверхность, с которой удалена только ржавчина. Степень очистки 2 достигается при механических способах обработки поверхности стальными щетками, скребками, дробью и др. При этом на очищенной поверхности остается только окалина, имеющая высокую прочность сцепления с металлом. Более тщательная очистка поверхности оценивается степенью 3, которая устанавливает полное удаление ржавчины, окислы и других загрязнений.

Сопоставление некоторых зарубежных норм приведено в табл. 6.2.

Внешний вид стальной поверхности после ее очистки на дробеметной или дробеструйной установке может быть различным в зависимости от типа применяемого абразива.

Таблица 6.2

Сопоставление зарубежных норм

Стандарт	Страна	Степень очистки
SIS 05 5900-1967	Швеция	Sa 1, Sa 2, Sa 2,5, Sa 3
NACE TM-01-75	США	4 3 2 1
SSPC-Vis1	США	SP-7, SP-6, SP-10, SP-5
TGL 18730	ГДР	1 2 3



Поверхность, очищенная до состояния белого металла при помощи металлической дроби, отлична от поверхности, очищенной до такого же состояния песком или другими неметаллическими материалами.

#### 6.4. Свойства и конструкции изоляционных покрытий на основе полимерных материалов. Виды покрытий

Изоляционные покрытия на основе полимерных материалов применяются в условиях болот, вечной мерзлоты, засоленных или песчаных грунтов для магистральных трубопроводов  $\varnothing$  1220 – 1420 мм с давлением до 7,5 МПа. Они изготавливаются из следующих химических составов.

*Поливинилхлоридные изоляционные ленты.* В процессе эксплуатации при повышенных температурах модуль упругости возрастает от 600 до 4000 МПа, относительное удлинение при разрыве уменьшается от 100 – 200 до 1 – 2 % и менее. Поэтому поливинилхлоридные ленты применяют для изоляции трубопроводов при температуре эксплуатации не выше 308 К, т. е. на «холодных» участках трубопроводов, где температура транспортируемого продукта приблизительно соответствует температуре грунтовой среды.

Более стабильными с этой точки зрения являются полиэтиленовые ленты, имеющие в исходном состоянии прочность на разрыв примерно 10 – 25 МПа, относительное удлинение при разрыве 300 – 650 %, модуль упругости 400 – 700 МПа.

Полимерные изоляционные покрытия, предназначенные для защиты подземных трубопроводов от коррозии, выполняются из слоя грунтовки и одного – трех слоев липкой полимерной ленты (табл. 6.3). Ширину полимерной липкой ленты для изоляции трубопроводов рекомендуется брать равной 0,5 – 0,7 диаметра трубы.

Таблица 6.3

Структура защитного покрытия из полимерных липких лент

Тип изоляции	Грунтовка битумная или клеевая	Полимерная липкая лента	Наружная обертка
Нормальный	+	1 слой	+
Усиленный	+	2 слоя	+

Для предохранения изоляции из липких лент от механических повреждений при прокладке трубопроводов в скальных и каменистых грунтах, на болотах, подводных переходах, под железными и автомобильными дорогами по изоляционному покрытию дополнительно наносят защитные

обертки из одного – двух слоев рулонного материала с обязательной приклейкой горячей битумной мастикой, клеем или другим надежным креплением концов оберточного материала.

В зависимости от свойств используют армирующие и защитные оберточные материалы. К армирующим материалам относятся нетканый волокнистый холст марок ВВ-К и ВВ-Г.

Защитные оберточные материалы используют для фиксирования изоляционного слоя и защиты его от механического воздействия грунта при укладке изолированного трубопровода в траншею и засыпке. В качестве наружной обертки изолированных трубопроводов применяют обертки ПДБ и ПРДБ, бризол марки БР-П, бикарул, стеклорубероид, гидроизол, толь оберточный, рубероид.

*Нетканый стеклохолст* представляет собой рулонный материал из перекрещенных стеклянных волокон, склеенных синтетическими связующими (мочевино-формальдегидной или карбомидной смолой, каучуковыми латексами, поливинилацетатной эмульсией или композициями из этих и других связующих). Он предназначается для армирования битумных изоляционных покрытий с целью повышения их механической прочности, морозостойкости и защитной эффективности.

*Бризол* – оберточный рулонный материал, изготавливаемый из смеси битума с резиновой крошкой, асбестом и пластификатором.

*Бикарул* – оберточный рулонный материал, изготавливаемый из смеси битума, каучуков, полиэтилена, наполнителей и пластификаторов.

*Обертки полимерно-дегтебитумные (ПДБ) и полимерно-резино-дегтебитумные (ПРДБ)* представляют собой рулонный материал, изготавливаемый из полиэтилена высокого и низкого давления, полиизобутилена П-118 или П-200, раствора резиновой крошки в окисленном антраценовом масле или газогенераторной смоле и мягчителя.

Под покрытия из полимерных лент применяются клеевые или битумно-клеевые грунтовки.

Перед наложением полимерной ленты необходимо тщательно загрунтовать зону прямых и спиральных швов. Наносить полимерную ленту на трубопровод следует сразу же после высыхания грунтовки до «отлипа» с помощью серийных изоляционных машин. Ширину полимерной липкой ленты для изоляции трубопроводов рекомендуется брать равной 0,5 – 0,7 диаметра трубы. Для этого рулоны ленты, выпускаемой заводом-изготовителем в соответствии с техническими условиями шириной 450 – 500 мм, для труб диаметром 529 мм и менее следует разрезать на станке.

При устройстве покрытий нормального типа необходимо следить за тем, чтобы нахлест был не менее 2 – 2,5 см.

Для получения покрытия усиленного типа используют две шпули изоляционной машины: с помощью одной из них наносят полимерную ленту с нахлестом наполовину, другой (закрепленной под тем же углом и вынесенной от цевочного колеса на ширину рулона липкой ленты) – защитную обертку.

Для получения покрытий весьма усиленного типа используются три шпули либо две (тогда с помощью одной шпули наносят липкую ленту с нахлестом на две трети, другой – защитную обертку с нахлестом 2 – 2,5 см).

При нанесении липких лент необходимо следить за тем, чтобы на покрытии не образовалось складок, морщин и пузырей. При обнаружении дефектов ленту необходимо снять с трубопровода и после устранения дефекта намотать вновь. В зоне продольных и поперечных сварных швов допускаются небольшие воздушные прослойки между трубой и покрытием.

При производстве изоляционных работ с применением импортных (США) полимерных лент «Плайкофлекс 340-20», «Плайкофлекс 340-30» и «Поликен 980-20» необходимо руководствоваться следующим:

- для каждого типа ленты применяют соответствующую клеевую грунтовку («Плайкофлекс-105» или «Поликен-109») при температуре 10 – 30 °С;

- ленты на трубопровод наносят сразу же после нанесения грунтовки, не ожидая ее высыхания, при температуре окружающего воздуха не ниже – 40 °С;

- при температуре окружающего воздуха ниже 10 °С рулоны ленты перед нанесением необходимо выдерживать не менее 48 ч в теплом помещении при температуре не ниже 15 °С; при температуре окружающего воздуха ниже 3 °С поверхность защищаемого трубопровода необходимо подогревать до температуры не менее 15 °С, но так, чтобы на нагретой поверхности не оставалось следов копоти и масла;

- однослойные покрытия по своим защитным свойствам отвечают требованиям нормальной и усиленной изоляции; на подводные переходы необходимо наносить, как правило, двухслойные покрытия;

- для предохранения изоляции из полимерных лент от механического повреждения на изоляционное покрытие трубопроводов диаметром 1020 мм и более дополнительно наносят обертки из одного слоя рулонного материала; при меньших диаметрах такие обертки выполняют на трубопроводах, проложенных в скальных, щебенистых, сухих комковатых, глинистых и суглинистых грунтах, а также на болотах.

Кроме того, разработаны поливинилхлоридные липкие ленты, стабильные при высоких и низких температурах. Липкая лента ЛТЛ-1 предназначена для изоляции труб на участках газопровода на выходе из КС с высокой температурой газа, так как она устойчива при температурах до + 70 °С (табл. 6.4).

Таблица 6.4

Основные характеристики и физико-механические свойства поливинилхлоридных и полиэтиленовых пленок

Показатели	Липкие ленты	
	поливинилхлоридные	полиэтиленовые
Цвет	синий, черный	черный
Толщина, мм	0,4	0,3
Ширина, мм	100 – 500	100 – 500
Длина ленты в рулоне (не менее), м	100	100
Удельный вес при 20 °С, г/см <sup>3</sup>	1,3	0,91 – 0,93
Сопротивление разрыву (не менее), кгс/см <sup>2</sup>	100	120
Относительное удлинение в пределах, %	100 – 180	200 – 400
Удельное переходное сопротивление при мокром контакте, Ом·см <sup>2</sup>	$9,3 \cdot 10^{10}$	$3 \cdot 10^{14}$
Удельное объемное электрическое сопротивление при 20 °С (не менее), Ом·см	$1 \cdot 10^{11}$	$1 \cdot 10^{16}$

Липкие ленты марок ЛМЛ-1 и ЛМЛ-2, устойчивые при температуре – 60 °С, могут использоваться для защиты газопроводов от коррозии в зимних условиях.

Изоляционные материалы хранятся в запасе соответственно роду изоляции, имеющейся на газопроводе, или принятому мотивированному решению. При этом битумно-резиновая и пленочная поливинилхлоридная изоляция для одного и того же участка газопровода друг друга исключают.

Типы противокоррозионной изоляции приведены в табл. 6.5.

Таблица 6.5

Типы противокоррозионной изоляции

№ слоев	Нормальный	Усиленный	Весьма усиленный
<i>Битумно-резиновая</i>			
1	Битумно-резиновая мастика 3,0 мм	Битумно-резиновая мастика 5,5 мм	Битумно-резиновая мастика 7,0 мм
2	Крафт-бумага или стекловолокнистый холст	Крафт-бумага или стекловолокнистый холст	Бризол 1,5 мм
	Толщина изоляции 3,0 мм	Толщина изоляции 5,5 мм	Толщина изоляции 8,5 мм
	Допуск 0,3 мм	Допуск 0,5 мм	Допуск 0,5 мм

<i>Битумная с минеральными наполнителями</i>			
1	Битумная мастика 3 мм	Битумная мастика 3 мм	Битумная мастика 3 мм
2	Крафт-бумага или стекло-волоконный холст	Армирующая обмотка	Армирующая обмотка
3	—	Битумная мастика 3 мм	Битумная мастика 3 мм
	—	Крафт-бумага или стекло-волоконный холст	Армирующая обмотка
4	—	—	Битумная мастика 3 мм
5	—	—	Крафт-бумага или стекло-волоконный холст
	Толщина изоляции 3 мм	Толщина изоляции 6 мм	Толщина изоляции 9 мм
	Допуск 0,3 мм	Допуск 0,5 мм	Допуск 0,5 мм
<i>Для участков после компрессорных станций</i>			
1	Битумно-резиновая мастика 3,0 мм	Битумно-резиновая мастика 4,0 мм	Битумно-резиновая мастика 5,5 мм
2	Бризол 1,5 мм или стекло-волоконный холст	Бризол 1,5 мм	Стекловолоконный холст
	Толщина изоляции 3,0 – 4,5 мм	Толщина изоляции 5,5 мм	Толщина изоляции 5,5 мм
	Допуск 0,3 мм	Допуск 0,5 мм	Допуск 0,5 мм

*Примечание.* Во всех случаях изоляцию выполняют по грунтовке, но как слой изоляции она в таблицу не включена.

Конструкции изоляции в зависимости от типа приведены в табл. 6.6.

Таблица 6.6

Типы и конструкции противокоррозионных покрытий

№ п/п	Тип изоляции	Конструкции покрытия	Общая толщина, мм	Допуск, мм
<i>Битумно-резиновые</i>				
1	Нормальный	Мастика – 4 мм, стеклохолст – 1 слой	4,0	+0,3
2	Тот же	Мастика – 4 мм, бризол – 1 слой (1,5 мм)	5,5	±0,5
3	Усиленный	Мастика – 6 мм, стеклохолст – 1 слой	6,0	±0,5
4	Тот же	Мастика – 6 мм, бризол – 1 слой (1,5 мм)	7,5	±0,5
5	Тот же	Мастика – 3 мм, стеклохолст – 2 слоя, мастика – 3 мм, бризол – 1 слой (1,5 мм)	7,5	±0,5
6	Тот же	Мастика – 3 мм, стеклохолст – 1 слой, мастика – 3 мм, стеклохолст – 1 слой	6,0	±0,5
<i>Полимерные липкие ленты</i>				
7	Нормальный	Полимерная липкая лента – 1 слой	—	—
8	Тот же	Полимерная липкая лента – 1 слой, бризол – 1 слой	—	—
9	Усиленный	Полимерная липкая лента – 2 слоя	—	—
10	Тот же	Полимерная липкая лента – 2 слоя, бризол – 1 или 2 слоя	—	—

*Примечание.* Во всех случаях изоляции выполняются по грунтовке: битумно-резиновая – по битумной, а из полимерных липких лент – по клеевой или битумной.

В США и Канаде широко применяются изоляционные покрытия из каменноугольных пеков. Пеки – это тяжелые остатки от перегонки каменноугольного дегтя более черного цвета, чем битумы. Изоляционные покрытия из каменноугольного пека включают в себя средний каменноугольный пек, пластификатор (смола пиролиза резины, каменноугольная смола) и наполнитель в виде порошка резины или асбеста

### **6.5. Свойства и конструкции изоляционных покрытий на основе битумных мастик. Виды покрытий**

Для изоляции магистральных подземных трубопроводов и ответвлений от них применяют битумные мастики, которые в зависимости от природы наполнителя, используемого при их изготовлении, можно подразделить на битумно-резиновые, битумно-полимерные и битумно-минеральные. Битумные мастики рекомендуется применять для изоляции стальных трубопроводов диаметром не более 820 мм с температурой транспортируемого продукта не выше 40 °С.

При нанесении битумных покрытий исходный нефтяной битум оказывается негодным из-за его малой вязкости в расплавленном состоянии, невысокой температуры размягчения и низкой механической прочности, поэтому в качестве защитных покрытий используются битумные мастики (битум и наполнитель), имеющие повышенную вязкость в расплавленном состоянии, механическую прочность и температуру размягчения.

Для повышения структурной прочности и вязкости в состав битумов входят специальные активные вещества – наполнители, частицы которых являются как бы центром структурообразования и придают материалу определенные свойства. Различают следующие виды наполнителей:

- минеральные: тонкомолотые горные породы (доломитизированный известняк средней плотности, доломит), асбест 6 и 7-го сортов сухой распушки;
- органические: резиновая крошка;
- полимерные: полиэтилен порошкообразный нестабилизированный, атактический полипропилен и др.

Один из методов получения изоляционного материала с заданными свойствами – это пластификация, т.е. введение в битум веществ, химически не взаимодействующих с ним, но образующих гомогенную систему. Основное назначение пластификаторов – повысить пластичность изоляционных материалов для нанесения их при температуре до – 25 °С. Пластификаторы считаются эффективными, если при введении их в битум наряду

с приданием мастике упругопластичных свойств наблюдается наименьшее снижение вязкости и температуры размягчения.

Лучшими пластификаторами являются полимерные продукты – полиизобулен и полидиен.

Изоляция труб начинается с нанесения грунтовки. Назначение грунтовки – обеспечение необходимой адгезии между металлом и основным слоем битумного покрытия. Чтобы улучшить адгезию, на поверхность металла предварительно наносят слой грунтовки, которая, имея жидкую консистенцию и будучи холодной, целиком заполняет все неровности. На высушенную грунтовку наносят первый слой битумной мастики, которая, расплавив слой грунтовки, плотно соединяется с ней, а, следовательно, и с поверхностью металла.

Битумная мастика может готовиться в заводских условиях и непосредственно на трассе строящегося трубопровода в битумоплавильных установках. Для предупреждения коксования битумные мастики в процессе изготовления или разогрева следует держать при температуре 180 – 190 °С не более 1 часа, 160 – 170 °С – не более 3 часов.

Изоляционные покрытия, как правило, наносят на сухую грунтовку. В отдельных случаях допускается нанесение битумной мастики на не совсем высохшую грунтовку. Не допускается нанесение изоляционных покрытий при снегопаде, дожде, тумане, сильном ветре или пыли.

Битумно-резиновая мастика заводского изготовления выпускается пяти марок, характеристики которых приведены в табл. 6.7.

Таблица 6.7

Основные свойства битумно-резиновых мастик заводского изготовления и условия их применения

Марки мастики	Технические условия	Температурные пределы окружающего воздуха в момент нанесения на трубы, °С	Свойства мастик		
			температура размягчения по К и Ш, °С, не менее	глубина проникания иглы при 25 °С, не менее	растяжимость при 25 °С, см, не менее
МБР-ИЗ-75	ВТУ 51-17 <sup>а</sup> -65	от +15 до –15	71 – 75	30	4
МБР-ИЗ-80	МРТУ 12Н-125-64	от +30 до –15	80	30	4
МБР-ИЗ-90	То же	от +35 до –10	90	20	3
МБР-НИТ-100	То же	от +40 до –10	100	15	2
МБР-НТП-120	ВТУ ТН 3162-65	от +50 до –10	120	20	2

*Примечание.* Мастики МБР-НИТ-100 и МБР-НТП-120 рекомендуются для участков газопроводов с высокой температурой газа на выходе из компрессорных станций и на летний период строительства газопроводов в южных районах.

При отсутствии заводской мастики ее приготавливают из строительного нефтяного битума или из нефтяного битума для изоляции нефтегазопроводов, характеристики которых даются в табл. 6.8.

Таблица 6.8

Технические характеристики битумов

Показатели	Нормы по маркам					Методы испытаний
	ГОСТ 9812-74			ГОСТ 6617-76		
	БНИ-IV	БНИ-4-3	БНИ-5	БН-IV	БН-5	
Температура размягчения, °С, не ниже	75	65-75	90	70	90	—
Глубина проникания иглы при 25 °С, в пределах	25-40	30-40	не менее 20	21-40	5-20	—
Растяжимость при 25 °С, см, не менее	4	4	2	3	1	—
Растворимость в хлороформе или бензоле, %, не менее	99	99	99	99	99	—
Потери в весе при 160 °С за 5 ч, %, не более	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	—
Температура вспышки, °С, не ниже	230	230	230	230	230	ГОСТ 4333-87
Содержание водорастворимых соединений, %, не более	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	—
Содержание воды	—	—	Следы	—	—	ГОСТ 2477-65
Водонасыщенность за 24 ч, %, не более	0,2	0,2	0,2	—	—	ГОСТ 9812-74, п. 4
Содержание асфальтогеновых кислот, %, не менее	1,25	1,25	1,25	—	—	ГОСТ 9812-74, п. 5
Содержание парафина, %, не более	—	4	—	—	—	ГОСТ 9812-74, п. 6
Глубина проникания иглы в остаток после определения потери в весе, % от первоначальной величины, не менее	—	—	—	60	60	—
Содержание водорастворимых кислот и щелочей	—	—	—	отсутствуют		—
Содержание серы, %, не более	—	2	—	—	—	—

В качестве наполнителя применяется резиновая крошка, представляющая порошкообразную резину, получаемую путем дробления старых, пришедших в негодность автомобильных покрышек с крупностью частиц не более 1 мм. Порошок резины не должен содержать более 5 % текстиля, 1,5 % влаги и 0,1 % металлической пыли и каких-либо других загрязняющих включений.



Поставляется порошок в бумажных мешках. Храниться резиновая крошка должна в помещении, где исключается увлажнение и приняты противопожарные меры, так как она является горючим материалом. При долгом хранении резиновая крошка способна нагреваться. Один раз в месяц следует производить проверку ее состояния и, если замечено, что крошка нагревается, ее надо освободить от тары, просушить и снова засыпать в бумажные мешки. Так как резиновая крошка слеживается, то перед употреблением ее комки нужно размять и растереть, а затем просеять на грохоте из проволочной сетки с ячейками не более 5 мм.

Бризол – это битумно-резиновый рулонный материал, изготавливаемый в основном из битума с добавлением рубракса и резиновой крошки. Бризол выпускается трех марок (характеристики их приводятся в табл. 6.9) и поставляется в виде рулонов, намотанных на картонный сердечник диаметром 60 – 70 мм с присыпкой между витками с внутренней стороны порошкообразным мелом или асбестом. Хранится бризол в закрытом проветриваемом помещении с дощатым полом, в горизонтальном положении не более 4 рулонов по высоте.

Таблица 6.9

Характеристика бризола

Показатели	Нормы и допуски		
	БР-С (средней тер- мостойкости)	БР-М (морозо- стойкий)	БР-Т (термо- стойкий)
Толщина, мм	1,6±0,1	1,6 – 1,9	1,6±0,1
Ширина, мм	425±25	425±25	425±25
Длина, м	50±1	50±1	50±1
Сопротивление разрыву (не менее), кгс/см <sup>2</sup>	10	8,5	12
Относительное удлинение (не менее), %	70	90	60
Остаточное удлинение, %	15 – 35	20 – 45	10 – 30
Водопоглощение за 24 ч, % (не более)	0,6	0,5	0,7
Водопроницаемость за 24 ч	Отсутствует		
Количество изгибов на 180° при температуре 20 – 25 °С до появления трещин (не менее)	10	10	10
Температура, при которой образец выдерживает без появления трещин 4 двойных перегиба на валике диаметром 10 мм	– 5	–	– 10
Слипаемость бризола в рулоне	Не допускается		

Стекловолокнистый холст марки ВВ-Г, применяющийся для армирования изоляции, изготавливается по МРТУ 6-Н-3. Он представляет собой рулонный нетканый материал из штапельных стеклянных волокон, скрепленных синтетическими смолами. Ширина холста 400 мм, длина холста в рулоне 100 м, толщина 0,4 мм. Прочность на разрыв полосы шириной

50 мм равна 8 кгс. Поставляется стекловолоконный холст в виде рулонов с картонной гильзой в качестве сердечника диаметром 60 – 70 мм, завернутых в крафт-бумагу и упакованных по 6 рулонов в ящике. Крафт-бумага применяется в качестве оберточного материала в исключительных случаях при отсутствии стекловолоконного холста. Вес 1 м<sup>2</sup> бумаги равен 70 – 80 г. Поставляется в виде рулонов при ширине ленты от 100 до 130 см. Крафт-бумагу необходимо разрезать вдоль на полосы требуемой ширины для удобства обертывания труб.

### 6.6. Контроль качества изоляционных покрытий

Простейшим методом электрохимических испытаний является измерение потенциала металла с защитным покрытием как функции времени погружения. Тщательный обзор этого метода был сделан Уолстенхолмом. Наиболее полезный и исчерпывающий анализ этой методики был предложен Уормвелом и Брэшером, которые использовали стальные образцы с лакокрасочным покрытием, погруженные в искусственную морскую воду. Они пришли к выводу, что кривая потенциал – время состоит из трех различных участков (рис. 6.6): первоначального участка падения потенциала, последующего повышения, а затем его постепенного спада. Из приведенных данных видно также, что эти ступени кривой сопровождаются характерными изменениями зависимости потерь веса (массы) от времени. Период времени до достижения максимального значения потенциала считается полезным сроком службы лакокрасочного покрытия.

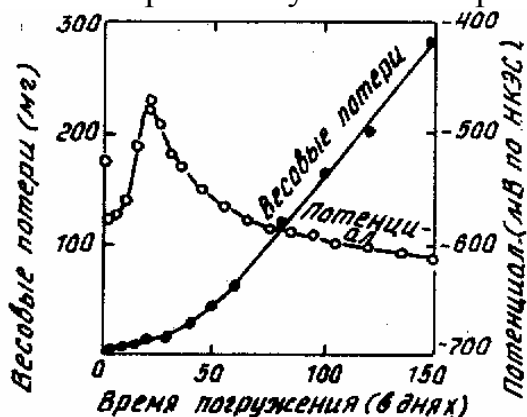


Рис. 6.6. Зависимость потенциала коррозии и весовых потерь от времени погружения образцов стали с покрытием в искусственную морскую воду

Измерения потенциала представляют значительный интерес благодаря простоте и легкости процесса. Однако эксперименты с образцами из оцинкованной стали с силиконово-полиэфирным покрытием толщиной 25 мкм в 5 %-ном р-ре NaCl продемонстрировали преждевременное падение потенциала, а затем его повышение, в результате чего интерпретация данных эксперимента оказалась затруднительной. Более того, выяснилось, что не у всех образцов с покрытием можно промерить потенциал после погружения.

Например, потенциал коррозии нельзя измерять на алюминиевом образце с лакокрасочным покрытием толщиной 25 мкм в 5 %-ном р-ре NaCl вплоть до 41-го дня. Даже если по методу измерения потенциал – время можно обнаружить разрушение лакокрасочной пленки, это может произойти только спустя значительное время после погружения. Это свидетельствует о том, что этот метод не дает большой информации об ухудшении свойств металла с покрытием до разрушения образца, и в этом смысле не может оцениваться как ускоренный метод испытания. Тем не менее, этот метод представляет собой простой неразрушающий способ контроля, требующий относительно недорогого оборудования. Он позволяет установить период коррозионного разрушения образцов с лакокрасочным покрытием, когда для этого нет других возможностей, а также дает дополнительную информацию в сочетании с другими методами (рис. 6.7).

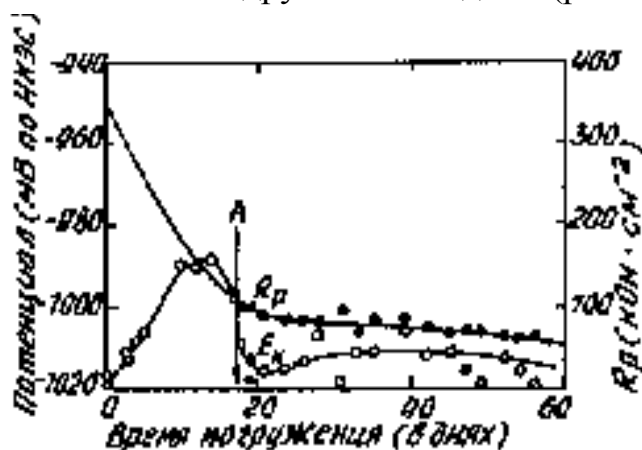


Рис. 6.7. Зависимость потенциала коррозии и квазиполяризационного сопротивления от времени при погружении образцов оцинкованной стали толщиной 25 мкм в 5 %-ном р-ре NaCl при комнатной температуре. Точка А – первое наблюдаемое появление продуктов коррозии

*Методика измерения на постоянном токе.* Методика измерения на постоянном токе (электросопротивление на постоянном токе, поляризационные кривые, поляризационное сопротивление и гальванический ток), по мнению специалистов, не удовлетворяет основной цели неразрушающей методики измерений. Через пленку органического покрытия в одном или другом направлении проходит форсированный поток ионов, что приводит к ускорению или, наоборот, замедлению коррозионного разрушения металлического образца с органическим покрытием в зависимости от полярности наложенного потенциала постоянного тока. Методика измерения поляризационного сопротивления ближе всего к неразрушающей методике испытаний, поскольку наложенные потенциалы обычно ограничены

короткими промежутками (около десятков мВ) и периодически обращаются таким образом, что перемещение ионов в анодном направлении быстро уравнивается перемещением ионов в противоположном направлении, т. е. общий эффект приближается к нулю.

На основе данной методики была проведена большая полезная работа по выявлению механизмов коррозии, распределению и передаче влаги и ионов в органических покрытиях.

Измерение электросопротивления на постоянном токе больше годится, как инструмент исследования, чем как метод по установлению степени коррозии. При измерении электросопротивления пленок обычно применяются потенциалы около 1В постоянного тока, которые считаются слишком высокими для неразрушающего контроля погруженных образцов и которые могут вызвать постоянные изменения в металле с органическим покрытием. Многие работы касались покрытий, потерявших адгезию. Но по электросопротивлению покрытий без адгезии к металлу не всегда можно дать надежную характеристику защитных свойств покрытия, и наоборот, по электросопротивлению пленок, плотно наложенных на металл, можно получить хорошее представление об эффективности защиты подложки покрытием. Функция для обозначения времени, после которого потеря адгезии становится значительной из-за накопления влаги на поверхности раздела металл – покрытие, использовал общую часть графика зависимости водопоглощения от времени на отслоившихся и неотслоившихся пленках. У адгезированных пленок наблюдается более высокая степень водопоглощения и менее высокая степень проникновения ионов хлоридов, чем у отслоившихся пленок, и эти результаты ставят под сомнение возможность экстраполировать результаты исследования отслоившихся покрытий на адгезированные в реальных условиях. В некоторых работах отмечалось, что измерение электросопротивления на постоянном токе включает в себя поляризационное сопротивление подложки, а также ионное сопротивление постоянного тока защитной пленки.

Исследователи Сассекс и Скентлбери не смогли обнаружить участки с высоким и низким электросопротивлением в отслоившихся пленках каменноугольно-эпоксидного покрытия на основе методики импеданса переменного тока и пришли к выводу, что измерение электросопротивления на постоянном токе на самом деле не означает, что мы измеряем истинное сопротивление слоя покрытия, а скорее это эффект некоторого диффузионного сопротивления. Они высказали сомнения относительно интерпретации результатов и отметили, что измерение электросопротивления на

постоянном токе – это практически одна-единственная точка на схеме импеданса, тогда как для измерения фактического электросопротивления органического покрытия необходимы многочисленные измерения импеданса переменного тока. Однако имеются и другие мнения по этому вопросу.

*Метод измерения по поляризационным кривым.* Информация об анодной и катодной реакциях, которые протекают при потенциале коррозии, может быть получена на основе поляризационных кривых, снятых путем сканирования потенциала (для тока) от коррозионного потенциала и измерения ответного импульса тока (или потенциала). Сканирование потенциала может происходить либо в положительном направлении, когда образец выступает больше как анод, или в более отрицательном направлении, когда образец выступает больше как катод. Для металлов без покрытия в идеальных условиях скорость коррозии может быть рассчитана на основе поляризационных кривых, но в более сложных системах, например, в металлах с покрытием, исследуя форму кривой, можно получить только качественную информацию. Например, положение поляризационной кривой (рис. 6.8) аналогично как в анодном, так и катодном направлениях, что может свидетельствовать о том, что высокое электросопротивление является главным фактором, контролирующим скорость коррозии стального образца с эпоксидной грунтовкой и с полиэфирным наружным покрытием, модифицированным силиксаном (кремнийорганическим соединением) в 5 %-ном р-ре NaCl при 50 °С.

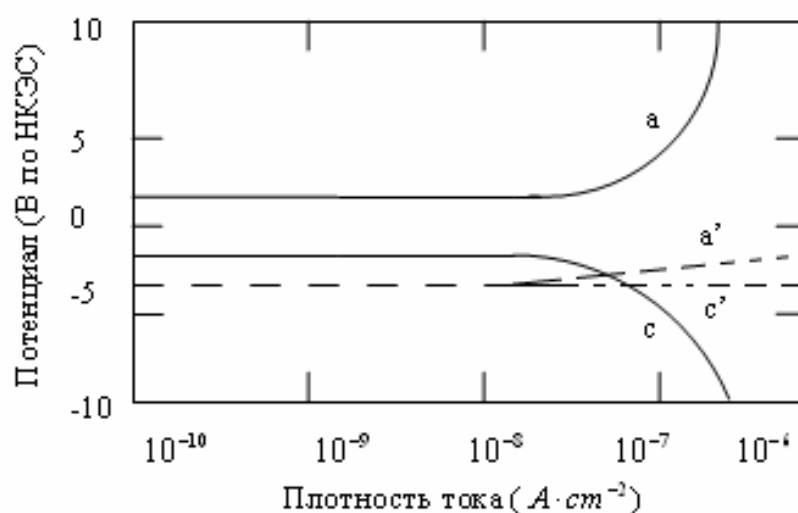


Рис. 6.8. Зависимость потенциала от плотности наложенного тока для покрытий на стальных образцах с эпоксидной грунтовкой и составом наполнителей Zn/55 % Cl и полиэфирным покрытием в 5 % р-ре NaCl при 50 °С; а, с – анодные и катодные поляризационные кривые

В существующей литературе имеется несколько обзоров, посвященных этому методу, но не все они касаются металлов с неповрежденными органическими покрытиями.

Данный метод нельзя применять как воспроизводимый, неразрушающий способ определения степени коррозии, поскольку большие отклонения от коррозионного потенциала могут изменить условия на поверхности раздела металл – органическое покрытие и вызвать появление дефектов в самом органическом покрытии. Например, некоторые образцы (рис. 6.8), которые можно охарактеризовать как образцы с высоким наклоном поляризации, на половине пути поляризационного сканирования могут изменить свои характеристики и походить на образцы с низким наклоном поляризации. Из этого следует, что само сканирование привело к ухудшению состояния образца.

Если в результате испытаний не происходит какого-либо заметного разрушения покрытия, образцы, подвергающиеся поляризации, могут характеризоваться кривыми с меньшим наклоном, что свидетельствует о более высокой степени ухудшения состояния покрытия по сравнению с образцами, не подвергавшимися поляризации. Ученые изучали катодную поляризацию очень тонких изоляционных пленок (1 – 6 мкм) и доказали, что изоляционная пленка становилась электропроводной при более отрицательных потенциалах и имела тенденцию перфорироваться током.

Еще одна проблема заключается в том, что омическое падение напряжения высокоомной пленки накладывается на истинный потенциал металлической поверхности. Уолстенхолм отмечает, что многие исследователи игнорировали возможный источник ошибки и тем самым обесценили результаты своих работ.

Попытки компенсировать омическое падение напряжения не всегда оказывались удовлетворительными. Так, например, Клей изложил результаты измерений электросопротивления слоя краски на металлах с использованием моста переменного тока. Однако фактический сдвиг потенциала при заданном поляризационном токе оказался меньше расчетного падения напряжения, что свидетельствует о слишком высоком уровне электросопротивления, измеренном по методу моста переменного тока.

Была также сделана попытка компенсации омического падения напряжения путем замера электросопротивления отслоившихся пленок на постоянном токе. Авторы некоторых работ применили методику прерывания тока для измерения омического сопротивления битумных пленок на железной подложке. Они показали, что мгновенное падение потенциала при прерывании тока является линейной функцией тока, что свидетельст-

вует о том, что это падение потенциала происходит на сопротивлении слоя лакокрасочного покрытия.

*Метод поляризационного сопротивления.* Для исследования образцов металлов с лакокрасочным покрытием в настоящее время широко применяется метод поляризационного сопротивления.

Идея метода заключается в том, что угол наклона поляризационной кривой ( $\Delta E/\Delta I$ ) вокруг коррозионного потенциала (в пределах  $\pm 10$  мВ), который называется поляризационным сопротивлением  $R \cdot P$ , обратно пропорционален скорости коррозии металла. Однако часто упускается из виду, что указанная зависимость действует только применительно к катодным реакциям под активационным контролем и в отсутствие омического падения напряжения, вызванного, например, высокоомными пленками.

Кроме того, изменение поляризационного сопротивления в этом случае происходит значительно медленнее, чем для образцов без покрытия (иногда в течение нескольких минут). После отключения поляризации потенциал образца с покрытием приходит в норму в течение длительного периода времени, что ставит под сомнение неразрушающий характер метода.

Установлено также, что квазиполяризационные измерения сопротивления стали с покрытием в 5%-ном р-ре NaCl, без поправок на омическое падение напряжения, свидетельствуют о постепенном ухудшении состояния образцов наподобие того, что наблюдалось при измерениях методом потенциал – время. Ряд ученых пришли к выводу, что коррозия, с одной стороны, контролируется скорее поляризационным сопротивлением, чем ионным сопротивлением пленки.

С другой стороны, установлено, что лишь 20 % изменения потенциала можно объяснить омическим падением напряжения в слое пленки, а главным фактором, ограничивающим коррозию, является торможение катодной реакции в порах и дефектах изоляционной пленки.

Совершенно очевидно, что необходимость поправки на омическое падение напряжения в пленке представляет собой проблему, которая уменьшает значимость метода поляризационного сопротивления.

*Метод гальванического тока.* Испытываемый образец может стать анодом или катодом в гальванической ячейке при соединении с более анодным или более катодным металлом. Например, сталь с покрытием может быть анодом при соединении с цинком.

Гальванический ток, проходящий между анодом и катодом, контролируется с помощью потенциометра, подключенного в качестве амперметра с нулевым сопротивлением. Изменения гальванического тока в контрольном растворе в зависимости от времени погружения интерпретируются с точки зрения проникновения веществ через пленку и электрохими-

ческих реакций, которые происходят на поверхности раздела металл – пленка. Крейг и Ольсен исследовали гальваническую пару сталь (анод) + сталь с феноловым покрытием (катод) в 3,5 %-ном р-ре NaCl. Они измеряли ток как функцию времени погружения образца для ряда толщин покрытия и для различных соотношений катодного и анодного участков.

Таким образом, они изучили механизмы перемещения влаги, кислорода и ионов, связанные с катодными реакциями, которые протекают на образцах стали с покрытием. Фраунхофер и Боксхолл исследовали защитное действие пигментированных и непигментированных винилхлоридных сополимеров на стали. Они отметили повышение тока при изменении типа металла, соединенного со сталью (медь или цинк), объяснив это изменением диаметра капилляров краски при различных направлениях диффузии ионов через пленку. Из результатов исследования следует, что испытания методом гальванического тока не являются неразрушающими или воспроизводимыми. Этот метод больше подходит для различного рода механических испытаний, чем для установления скорости коррозии.

В настоящее время электрохимические методы часто используются для оценки защитной способности покрытий и металлов с органическими покрытиями, хотя они еще не получили должного признания наподобие, например, стандартного испытания в солевом растворе и т. п. При выборе метода лабораторных испытаний для определения скорости коррозии различных образцов с защитным покрытием учитывали степень разрушения образцов с органическим покрытием как функции времени пребывания в некоторой агрессивной среде. Главные требования к такому методу состоят в том, чтобы он был неразрушающим, воспроизводимым и относительно простым.

Таким требованиям, в первую очередь, удовлетворяет метод потенциал – время, поскольку это истинно неразрушающий, воспроизводимый и простой метод испытаний из всех измерений на постоянном токе. Для его проведения требуется довольно недорогое оборудование, технология проведения испытания самая простая. Его положительной стороной является возможность исследования системы металл – электролит экономичным путем, без больших затрат, еще до приобретения более дорогостоящего оборудования.

Кроме того, важным положительным моментом этого метода является возможность количественной оценки разрушения образца, хотя показания потенциал – время не всегда удается интерпретировать однозначно. Поэтому рекомендуется применять этот метод в сочетании с другими, например, с квазиполяризационным сопротивлением, чтобы получить дополнительную информацию.



Измерение электросопротивления на постоянном токе не удовлетворяет главному требованию – неразрушающему характеру испытания. Кроме того, значительное количество работ связано с исследованием неадгезированных пленок, а в связи с этим их значение подчас исчерпывается чисто механическими данными о прохождении ионов через пленку при градиенте потенциала.

Метод поляризационных кривых также не удовлетворяет главному требованию: он не является неразрушающим, его нельзя повторить на одном и том же образце. Существуют также проблемы, связанные с омическим падением напряжения в пленке.

Метод поляризационного сопротивления тесно связан с предыдущим. Он более полезен, поскольку отклонения потенциала обычно ограничены несколькими десятками милливольт по обе стороны остаточного потенциала, поэтому он ближе к неразрушающим методам. Иногда теорию этого метода нельзя применить по отношению к реальным условиям органического покрытия, в силу чего расчеты скорости коррозии могут стать ненадежными. Из-за наличия пленки измерения относительно медленны, необходимо вносить поправку на омическое падение напряжения.

Наконец, методика гальванического тока не удовлетворяет основному требованию о неразрушающем характере испытаний. Он больше подходит для получения данных механического типа, чем для определения скорости коррозии. Поляризация металла с органическим покрытием не контролируется должным образом из-за подключения к другому элементу пары, т.е. ионов другого элемента. Пары в растворе могут влиять на поведение металла с покрытием.

## **ВОПРОСЫ САМОКОНТРОЛЯ ПО ТЕМЕ**

1. Каково назначение противокоррозионных покрытий?
2. Перечислите виды противокоррозионных покрытий.
3. Как классифицируются изоляционные покрытия по толщине изоляции?
4. Какие нормативные требования предъявляются к покрытиям?
5. Как происходит подготовка поверхности к нанесению покрытия?
6. Каковы свойства и конструкции изоляционных покрытий на основе полимерных материалов?
7. Как происходит нанесение покрытия на основе полимерных материалов?
8. Каковы свойства и конструкции изоляционных покрытий на основе битумных мастик?
9. Как происходит нанесение покрытия на основе битумных мастик?

## ТЕМА 7. ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ ЯВЛЕНИЯ

### 7.1. Поляризационные явления при электрохимической коррозии, их влияние на коррозию металлов. Анодная поляризация. Катодная поляризация

Условия протекания процессов коррозии не остаются постоянными по своей характеристике после образования коррозионного элемента. Вследствие целого ряда причин значения потенциалов как анодной, так и катодной поверхности после начала работы коррозионного элемента начинают изменяться, уменьшая первоначальную разность потенциалов. Схема такого изменения разности потенциалов анода и катода в отдельном коррозионном элементе показана на рис. 7.1.

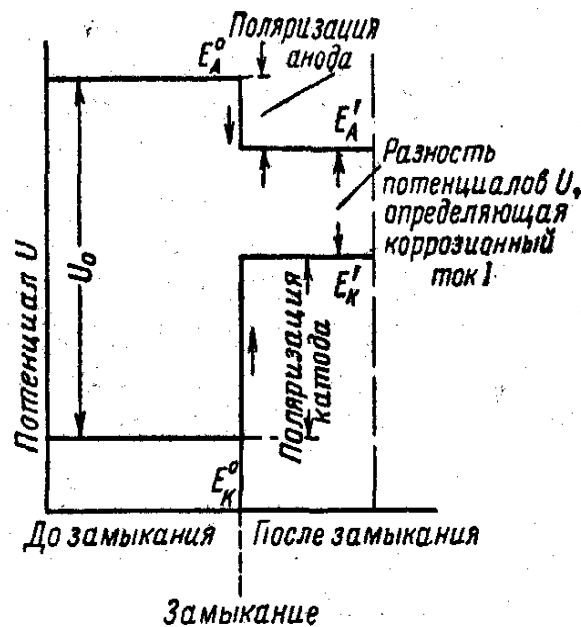


Рис. 7.1. Схема изменения потенциалов катода  $E_K$ , анода  $E_A$  и разности потенциалов  $E_K - E_A = U_0$  после замыкания гальванической пары

Изменения потенциалов электродов коррозионного элемента называются *поляризацией*, и в зависимости от того, происходят ли они у анода или катода, различают *анодную* и *катодную поляризацию*.

Анодная поляризация обычно имеет меньшее влияние на изменение разности потенциалов коррозионного элемента. Основной причиной ее возникновения является увеличение концентрации ионов разрушающегося металла в прилегающем слое электролита. Такое увеличение концентрации вызывается коррозией металла, током коррозионного элемента и переносом

ионов металла из кристаллической решетки в окружающий электролит. Увеличение концентрации ионов металла облагораживает потенциал самого металла и сдвигает его в сторону потенциала катода, уменьшая общую разность потенциалов коррозионного элемента. Анодная поляризация будет уменьшаться при движении электролита, уносящего от поверхности анода ионы растворенного металла. Анодная поляризация может также уменьшаться путем связывания ионов металла, переходящих в раствор с веществами, растворенными в электролите, с образованием продуктов коррозии.

Значительно более сильное влияние на разность потенциалов коррозионного элемента оказывает катодная поляризация. Причинами возникновения катодной поляризации являются факторы, связанные с процессами выделения на поверхности катода молекулярного водорода. Одним из этих факторов является перенапряжение водорода, т. е. задержка в реакции соединения деполяризатора с электроном. Другим фактором катодной поляризации является торможение подвода к катодной поверхности деполяризатора, который нужен для удаления выделяющегося здесь водорода. Водород, выделяющийся на катоде в результате коррозионного процесса, может удаляться с поверхности катода двумя путями.

Во-первых, путем превращения атомарного водорода в молекулярный и удаления газообразного водорода (см. рис. 7.1), что носит название *водородной деполяризации*.

Во-вторых, возможно связывание выделяющегося водорода подводимым кислородом, что носит название *кислородной деполяризации*.

Так как коррозионный процесс является стадийным, его общая скорость ограничивается той частью процесса, который протекает с наименьшей скоростью. Это стадия процесса носит название контролирующего фактора, поскольку он практически контролирует скорость всего процесса. В большинстве случаев контролирующим фактором оказывается катодная или анодная поляризация, или омическое сопротивление внутренней цепи коррозионного элемента.

## **7.2. Коррозионная диаграмма при электрохимической коррозии.**

### **Назначение. Виды коррозионной диаграммы**

При электрохимической коррозии происходит изменение потенциала анодных и катодных электродов. При прохождении электрического тока через электрод наблюдается отклонение потенциала от его начального значения. Это явление называется *поляризацией*.

Причины поляризации могут быть различными.

При анодной поляризации, когда металл растворяется, скорость отвода ионов отстает от скорости растворения, в приэлектродном слое накапливаются положительные ионы металла и потенциал анода смещается в сторону более положительных значений.

Предположив, что количество растворяющегося металла пропорционально силе тока, а скорость отвода положительных ионов металла в электролит постоянна, зависимость изменения потенциала анода от силы тока можно выразить графиком, который называется *анодной поляризационной кривой* (рис. 7.2).

При катодной поляризации на катоде накапливаются свободные электроны пропорционально силе тока, протекающего через электролит. Катодной реакцией является реакция восстановления или присоединения электрона ионом металла, ионом водорода или молекулой кислорода. Если скорость подвода этих веществ отстает от скорости накопления электронов на катоде, то его потенциал смещается в более отрицательную сторону. Зависимость этого смещения от силы тока иллюстрируется *катодной поляризационной кривой* (рис. 7.3).

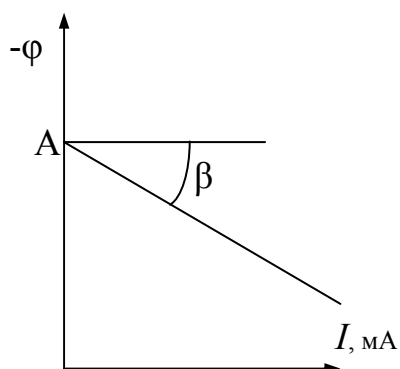


Рис. 7.2. Анодная поляризация

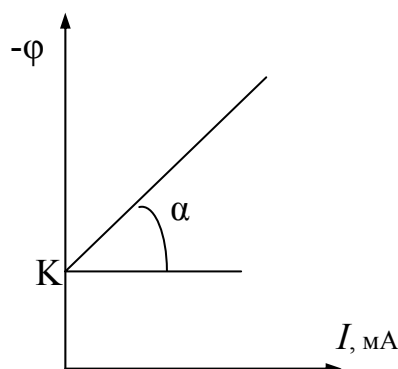


Рис. 7.3. Катодная поляризация

По наклону поляризационных кривых судят о легкости протекания электродной реакции. Чем меньше угол наклона, тем больше скорость электродной реакции, т.к. снижается сопротивление электрода протеканию на нем реакций. Физический смысл величин тангенсов углов  $\beta$  и  $\alpha$  на поляризационных кривых представляет собой соответственно поляризационные сопротивления анода  $R_a$  и катода  $R_k$ .

Коррозионная диаграмма (рис. 7.4) является совмещенным графиком анодной и катодной поляризации. При их рассмотрении следует иметь в виду, что омическое сопротивление между отдельными точками катодного и анодного участков неодинаково, а поэтому неодинаковы и потенциалы на

поверхности гетерогенного металла. Ввиду того, что на границе анодного и катодного участков сопротивление фактически равно нулю, здесь наблюдается максимальный ток  $I_{max}$  и общий для катода и анода потенциал  $\varphi_{общ}$ .

Коррозионный процесс является сопряженным, т.е. состоящим из отдельных связанных между собой стадий. Другими словами, коррозия возможна при одновременном протекании, к примеру, анодной и катодной реакции.

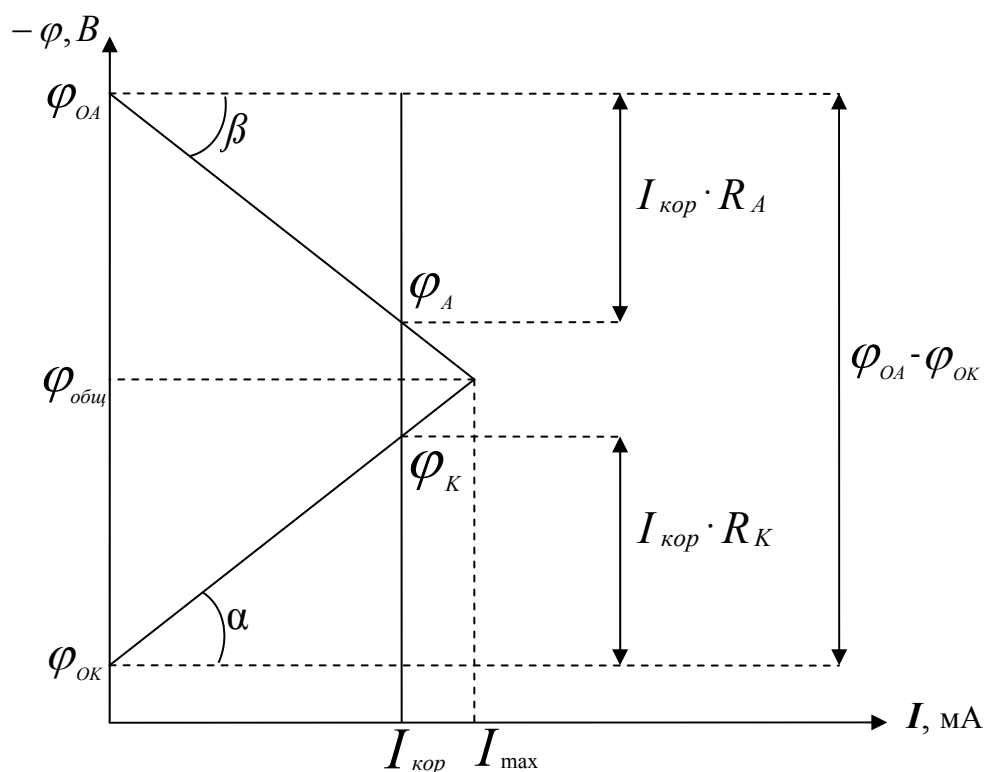


Рис. 7.4. Коррозионная диаграмма

Общая скорость процесса коррозии определяется скоростью той стадии, которая протекает с наименьшей интенсивностью.

В зависимости от природы возникающей на металлической поверхности разности потенциалов все коррозионные элементы подразделяются на микро- и макрокоррозионные.

Микрокоррозионные элементы возникают за счет:

- неоднородности микроструктуры поверхности: наличие микрочастиц различных металлов в сплаве (Fe, C, Mn, P, S), микровключений окислов (окалины), неметаллических микровключений (частицы пыли), нарушений микроструктуры поверхности при ее очистке, внутренних механических напряжений;

– микроструктуры физико-химической неоднородности состава грунта, являющегося почвенным электролитом, т. е. наличия микровключений различной плотности, химического состава, концентрации.

Макрокоррозионные элементы возникают:

– из-за неоднородности макроструктуры поверхности при наличии макровключений – окарины, царапин, вмятин, наклепа, поперечных и продольных сварных швов, а также на торцевых частях деталей;

– из-за макроструктурной неоднородности физико-химических свойств почв (для протяженных магистральных трубопроводов это имеет большое, а в некоторых случаях решающее значение).

### **ВОПРОСЫ САМОКОНТРОЛЯ ПО ТЕМЕ**

1. Расскажите о сущности поляризационных явлений при электрохимической коррозии.
2. Каково влияние поляризационных явлений на коррозию металлов?
3. Что такое анодная поляризация?
4. Что такое катодная поляризация?
5. Что такое коррозионная диаграмма при электрохимической коррозии?
6. Каково назначение коррозионной диаграммы?
7. Какие существуют виды коррозионной диаграммы?

## ТЕМА 8. КОРРОЗИОННОЕ РАСТРЕСКИВАНИЕ МЕТАЛЛА ПОД НАПРЯЖЕНИЕМ

Широко распространено определение коррозии под напряжением как увеличение скорости коррозионного процесса под действием статических напряжений. Коррозионное растрескивание, как предельный случай коррозии под напряжением, представляет собой полное разрушение металла в результате одновременного воздействия на него напряжений и коррозии. Важно отличать коррозионное растрескивание от процесса коррозии, ускоряющегося при воздействии напряжений.

Очень интенсивная структурная коррозия может происходить в металлах и при отсутствии внешних приложенных напряжений, например, межкристаллитная коррозия некоторых алюминиевых сплавов или нержавеющей сталей. Роль напряжений заключается, главным образом, в разрушении ослабленных коррозией или хрупких границ зерен металла, что обеспечивает проникновение коррозионной среды в глубь металла. При таких условиях процесс развития трещин происходит до тех пор, пока не растрескавшаяся часть металла выдерживает приложенную нагрузку, после чего наступает механическое разрушение. Процесс трещинообразования сопровождается непрерывной потерей прочности материала по мере увеличения коррозионного разрушения.

Значительная часть аварий на трубопроводах связана с электрохимической коррозией (ЭХК), коррозионным растрескиванием под напряжением (КРН) и микробиологической коррозией (МБК). Системный анализ причин аварий, разработанный специалистами Иркутского государственного технического университета с использованием вероятностно-статистического метода, показал, что причиной аварий является одновременное действие многих факторов.

Изучение более 100 аварий магистральных трубопроводов, обусловленных ЭХК, МБК и КРН, а также результатов внутритрубной ультразвуковой дефектоскопии и гидравлических испытаний позволило сделать ряд важных выводов, касающихся устойчивости продуктовых трубопроводов.

Повреждение и последующее разрушение трубопровода высокого давления вследствие КРН происходит преимущественно в нижней части трубы; ЭХК возникает также в нижней или средней части трубопровода, однако местоположение коррозионных дефектов в значительной степени зависит от состояния изоляции, наличия пригрузов, залесенности трассы трубопровода, посторонних проводников, близости ЛЭП; 70 % аварий тру-

бопроводов высокого давления происходит вблизи КС со стороны нагнетания, что связано с высокой температурой газа и вибрациями трубы.

В результате исследований также было установлено, что наличие переменного уровня грунтовых вод в траншее под трубой способствует как КРН, так и ЭХК. Для старых трубопроводов характерна высокая вероятность повреждения изоляции в верхней части корнями растений, особенно в случае зарастания просеки лесом.

Большинство аварий, обусловленных КРН, произошло в непосредственной близости от станций катодной защиты (до 3 км), где потенциал поляризации превышает 1 В. Вероятность ЭХК, наоборот, существенно возрастает при снижении абсолютного уровня защитного потенциала до величины менее 0,8 В по медно-сульфатному электроду. Более 80 % аварий произошло на газопроводах со сроком службы более 10 лет.

### **8.1. Причины возникновения коррозионного растрескивания металла под напряжением**

Множество своеобразных коррозионных процессов возникает при сочетании физико-химического воздействия на металл коррозионной среды и различных дополнительных воздействий – механических, электрических, радиационных и других. Так, совместное действие на металл коррозионной среды и механических нагрузок вызывает коррозию под напряжением. В этом случае разрушение металла происходит в виде трещин. Такой коррозионный процесс называют еще и коррозионным растрескиванием под напряжением. Примеры такого разрушения сталей приведены на рис. 8.1 и 8.2.

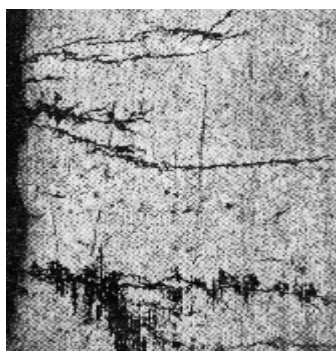


Рис. 8.1. Коррозионное растрескивание стали 12X18H10T в среде C3Cl6 с фазовой влагой (x120)

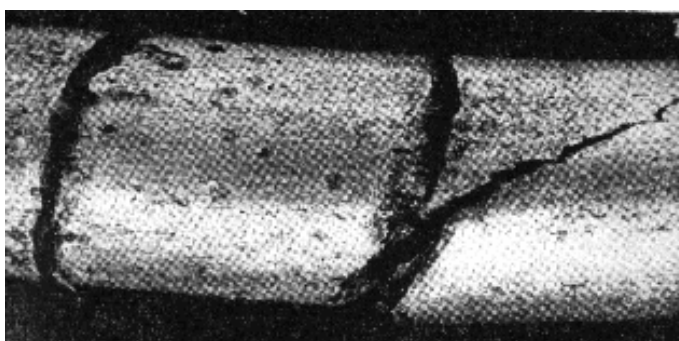


Рис. 8.2. Разрушение вследствие коррозионного растрескивания образца холоднотянутой высокопрочной стали С60 в среде инсектицида. Диаметр проволочного образца 5 мм



Эффект совместного действия коррозионной среды и механической нагрузки на металл превосходит эффекты, производимые каждым процессом (химическим и механическим) в отдельности.

Механические напряжения, способствующие образованию коррозионных трещин, могут возникать по разным причинам: при растяжении или сжатии деталей внешними (приложенными извне) нагрузками, вследствие проявления их внутренних напряжений, возникающих под действием термической обработки металла или в процессе электроосаждения в гальванических покрытиях как следствие процесса электрокристаллизации металла.

Важно отметить, что коррозионное растрескивание может иметь межкристаллитный или транскристаллитный характер, что можно обнаружить при травлении металлографического шлифа (рис. 8.3).

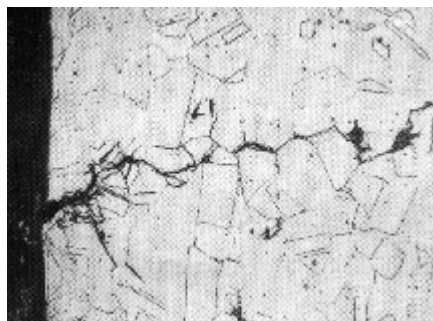


Рис. 8.3. Межкристаллитные трещины на образце хромо-марганцевой нержавеющей стали при коррозионных испытаниях в течение 200 ч при постоянной нагрузке (x200)

При приложении внешних знакопеременных нагрузок возникает своеобразный вид коррозионного процесса, вызывающий растрескивание металла; он именуется коррозионной усталостью.

Внешний ток также может воздействовать на корродирующий металл. Для многих металлов коррозионный процесс усиливается при протекании тока анодного направления через границу соприкосновения металла с коррозионной средой. Протекание катодного тока в некоторых случаях приводит к уменьшению скорости разрушения этих металлов. Однако есть металлы, для которых протекание и катодного тока сопровождается увеличением скорости разрушения. Эти металлы подвержены катодной коррозии.

В металле, подверженном коррозионному растрескиванию, при отсутствии внешних напряжений обычно происходит очень незначительное коррозионное разрушение, а при отсутствии коррозионной среды под воздействием напряжений почти не происходит изменения прочности или пластичности металла. Таким образом, в процессе коррозионного растрескивания, т. е. при одновременном воздействии статических напряжений и

коррозионной среды, наблюдается существенно большее ухудшение механических свойств металла, чем это имело бы место в результате отдельного, но аддитивного действия этих факторов.

Коррозионное растрескивание является характерным случаем, когда взаимодействуют химическая реакция и механические силы, что приводит к структурному разрушению. Такое разрушение носит хрупкий характер и возникает в обычных пластичных металлах, а также в медных, никелевых сплавах, нержавеющей стали и др. в присутствии определенной коррозионной среды. При исследовании процесса хрупкого разрушения в результате коррозионного растрескивания особое значение имеет исследование отдельного воздействия на металл напряжений и коррозионной среды, а также их одновременное воздействие. Однако в процессе коррозионного растрескивания первоочередное значение имеют следующие стадии: 1) зарождение и возникновение трещин; 2) последующее развитие коррозионных трещин. Обе стадии, как будет показано ниже, являются индивидуальными ступенями в процессе коррозионного растрескивания.

*Коррозионная среда.* Средами, в которых происходит коррозионное растрескивание металлов, являются такие, в которых процессы коррозии сильно локализованы обычно при отсутствии заметной общей поверхностной коррозии. Интенсивность локализованной коррозии может быть весьма значительной, в результате чего прогрессирует процесс развития очень узких углублений, достигая, вероятно, наибольшей величины на дне углублений, имеющих радиусы порядка одного межатомного расстояния. Тщательное изучение литературы показывает, что во многих случаях процесс начальной коррозии может иметь место и при отсутствии напряжений, хотя такое коррозионное разрушение может быть совсем незначительным. Некоторые вопросы, относящиеся к роли напряжений в развитии этих чувствительных зон в определенных системах сплавов, еще остаются неясными, хотя в общем случае процесс изучен. Кроме того, большинство экспериментальных работ показывает, что в том случае, когда начальные локализованные коррозионные углубления межкристаллитны, то при последующем растрескивании преобладает также межкристаллитное разрушение. Если начальная коррозия происходит внутри зерен металла, то последующее растрескивание имеет внутрикристаллитный характер. Нет определенных указаний о том, что межкристаллитная трещина будет развиваться из внутрикристаллитного коррозионного углубления, и наоборот. Смешанный тип растрескивания, который иногда наблюдается, может быть обусловлен побочным процессом, связанным с динамикой быстро развивающейся трещины.

При воздействии на материал коррозионной среды, которая влияет на склонность сплава к коррозионному растрескиванию и характер разрушения, основными факторами являются следующие:

- относительная разность потенциалов микроструктурных фаз, присутствующих в сплаве, что вызывает вероятность местного разрушения;
- поляризационные процессы на анодных и катодных участках;
- образование продуктов коррозии, которые оказывают влияние на коррозионный процесс.

*Структура и состав.* Если локализованная коррозия является важным фактором в общем процессе растрескивания, то вполне очевидно, что микроструктура металла должна иметь еще большее значение, определяющее вероятность возникновения такого коррозионного разрушения. Опыты со всей очевидностью показывают, что изменения в составе, термообработке, механической обработке и способах изготовления приводят к изменению микроструктуры, а, следовательно, влияют и на устойчивость металла против коррозионного растрескивания. Опыты показывают, что структура металла влияет не только на характер начального местного разрушения, но также определяет путь и скорость коррозионного растрескивания.

Кроме того, небольшие изменения в составе сплава, без какого-либо очевидного изменения микроструктуры, приводят к заметному изменению устойчивости сплава против коррозионного растрескивания. Например, чистая медь в аммиачных средах не подвержена растрескиванию, но примесь менее чем 0,1 % фосфора, мышьяка или сурьмы в однородном твердом растворе делает ее подверженной разрушению. Добавление 0,3 % хрома защищает от коррозионного растрескивания алюминиевый сплав марки 755, что важно в промышленном отношении и что еще раз подчеркивает значение изменений состава сплава на устойчивость против коррозионного растрескивания.

*Напряжения.* Для того чтобы произошел процесс коррозионного растрескивания, необходимо наличие поверхностных или внутренних растягивающих напряжений. Обычно встречающиеся на практике разрушения обусловлены наличием остаточных напряжений, возникающих при производстве и обработке металла, но в целях исследования не следует делать разграничения между остаточными напряжениями и напряжениями, возникшими в результате приложенных внешних нагрузок. Коррозионное растрескивание никогда не наблюдалось в результате действия поверхностных сжимающих напряжений; наоборот, сжимающие поверхностные на-

пряжения разрушения могут использоваться для защиты от коррозионного растрескивания.

При повышении величины приложенных напряжений уменьшается время до полного разрушения металла. Для коррозионного растрескивания обычно необходимы высокие напряжения, приближающиеся к пределу текучести, однако часто разрушение может наступить и при напряжениях, значительно меньших предела текучести. Для многих систем сплавов наблюдается какой-то «порог» или «предел» напряжений, т. е. напряжения, ниже которых коррозионное растрескивание не происходит за определенный период времени. Такая зависимость, наблюдавшаяся, например, при замедленном растрескивании сталей, указывает, что основную роль в процессе разрушения играют напряжения.

Имеются доказательства, что основное влияние при коррозионном растрескивании напряжения оказывают незадолго до полного разрушения, т. е. эффективность напряжений не сказывается до определенного периода времени, после чего наступает внезапное разрушение. Этот вывод в дальнейшем подчеркивается рядом наблюдений, в которых указывается на зависимость времени до полного разрушения от времени приложения напряжений. Показано, что время до полного разрушения не зависит от того, приложены ли напряжения в начале испытания или на последующих стадиях.

*Характер коррозионных трещин.* Коррозионные трещины развиваются в плоскости, перпендикулярной плоскости растягивающих напряжений, независимо от характера приложенных или остаточных напряжений. С точки зрения микроструктуры коррозионные трещины могут иметь как внутрикристаллитный, так и межкристаллитный характер. Можно предположить, что направление и характер развития трещин в металле до некоторой степени зависят от формы и размера зерен, поскольку эти факторы влияют на распределение внутренних напряжений.

Одно из наиболее важных исследований, относящихся к изучению характера развития трещин, устанавливает, что этот процесс не является непрерывным. На прерывистый характер развития трещин указано в работах Джильберта и Хаддена, Эделеану и Фармери. Обнаружено, что в алюминиево-магниевого сплавах развитие трещин является ступенчатым процессом, развивающимся путем ряда отдельных механических изломов. Более новое доказательство прерывистого характера развития трещин показано в кинофильме, подготовленном Престом, Бекком и Фонтана, занимающимся коррозионным растрескиванием магниевых сплавов (рис. 8.4, 8.5).



Рис. 8.4. Обнаруженное с помощью методов контроля коррозионное растрескивание в присутствии механических напряжений (внутренняя поверхность трубы)

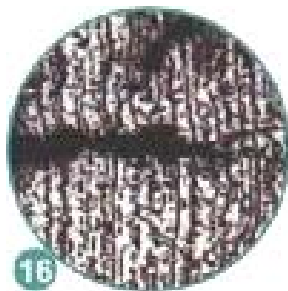


Рис. 8.5. Зона коррозионного растрескивания в присутствии механических напряжений (изображение со сканирующего электронного микроскопа с 50 кратным увеличением)

## **8.2. Методы борьбы с коррозионным растрескиванием металла под напряжением**

Наиболее эффективный метод повышения устойчивости металлов против коррозионного растрескивания состоит в использовании соответствующих конструктивных мероприятий и способов обработки, сокращающих до минимума величину остаточных напряжений. Если остаточные напряжения неизбежны, успешно может быть применена термообработка, снимающая эти напряжения. Если позволяют условия, может быть использована, например, дробеструйная обработка, вызывающая сжимающие поверхностные напряжения, которые впоследствии дают возможность нагружать материал, не вызывая напряженного состояния поверхности. Одним из методов, который получает все большее признание и связан с электрохимическим фактором процесса растрескивания, является применение катодной защиты.

Одним из интересных методов исследования взаимодействия напряжений и химических факторов является изучение зависимости величины катодного тока, необходимого для защиты, от величины механических напряжений. Кроме того, ряд исследований показывает, что начавшееся растрескивание может быть остановлено путем применения катодной защиты.

Вполне очевидно, что сплавы, основу которых составляют благородные металлы, являются наиболее устойчивыми против коррозионного растрескивания, так как легирующие компоненты таких сплавов всегда менее благородны. Кроме того, для таких сплавов ограничено число коррозионных сред, в которых может происходить растрескивание. С другой стороны, для такого очень активного металла, как магний, все легирующие компоненты более благородны, поэтому магниевые сплавы сильно подвержены коррозионному растрескиванию. Для магния даже вода является активной коррозионной средой.

Среди специальных групп сплавов, не подверженных коррозионному растрескиванию, можно отметить сплавы золота, палладия и платины.

Однако для сплавов серебра условия для коррозионного растрескивания более благоприятны. Во-первых, серебро часто используется в виде сплава с более благородными металлами (золото, палладий и платина); во-вторых, серебро быстро вступает в реакцию с сильными окислителями, такими, как азотная и хромовая кислоты, а также с соляной кислотой и хлорным железом. Предел устойчивости для этих сред лежит примерно при 40 ат. % Au, так что коррозионное растрескивание будет иметь место во всех сплавах с золотом, содержащих менее 58,5 вес. % золота. В связи с этим имеются многочисленные примеры коррозионного растрескивания сплавов серебра, содержащих золото и палладий, применяющихся в зубоврачебном деле. Коррозионное растрескивание этих сплавов наблюдалось после очистки их в соляной кислоте в процессе производства. С другой стороны, сплавы серебра, содержащие менее благородные компоненты, не подвержены коррозионному растрескиванию. Это подтвердилось при испытании однородных сплавов системы Au – Zn, содержащих 25 ат. % Zn, и сплавов системы Ag – Al, содержащих 13 ат. % Al. Образцы из этих сплавов, испытываемые под напряжением в 2 %-ном р-ре FeCl<sub>3</sub>, не подвергались коррозионному растрескиванию даже в течение продолжительного времени испытания.

Медные сплавы более подвержены коррозионному растрескиванию. Число более благородных легирующих компонентов для меди не меньше, чем для серебра, но основная опасность обусловлена тем, что в любой среде, содержащей хотя бы незначительное количество аммиака, происходит коррозионное растрескивание медных сплавов. Все сплавы, содержащие небольшое количество золота, используемые в производстве ювелирных изделий, являются сплавами на медной основе. Из всех используемых сплавов меди с золотом только один сплав, содержащий 75 вес. % золота,

не подвержен коррозионному растрескиванию. Для остальных сплавов их устойчивость зависит от коррозионной среды и предела устойчивости.

Предел устойчивости для сплавов системы Cu – Au в растворе аммиака составляет примерно 20 ат. % Au, так что сплавы, содержащие 50 вес. % золота, не подвержены коррозионному растрескиванию в этой среде. Но в 2 %-ном р-ре FeC<sub>3</sub> такие сплавы, содержащие меньше 35 ат. % Au, подвержены коррозионному растрескиванию. Поэтому в ювелирном деле следует применять сплавы, содержащие не менее 58,5 вес. % золота, с использованием их при возможно более низких напряжениях. Однако в случае технического использования, включающего наличие в сплаве внутренних напряжений и воздействие коррозионной среды (например, изготовление перьев для авторучек), такие сплавы недостаточно устойчивы. Но если часть меди в этих сплавах заменять серебром (по весу), как это часто делается на практике, то атомная доля золота в сплаве увеличивается и соответственно увеличивается сопротивление коррозионному растрескиванию.

Особое внимание следует уделить такому важному сплаву, как латунь, где медь легирована менее благородным компонентом (цинком) и поэтому, согласно правилам, не должна подвергаться коррозионному растрескиванию. Однако практически очень часто происходит сезонное растрескивание латуни. Тщательное исследование показывает, что коррозионное растрескивание латуни происходит только в аммиачных средах, тогда как раствор FeC<sub>3</sub>, концентрированные кислоты HCl и HNO<sub>3</sub> вызывают только общую поверхностную коррозию.

Это отклонение от правил вызвано особым поведением меди в аммиачной среде, в которой образуются комплексные ионы с медью, что вызывает характерный тип коррозии, не свойственной другим средам. В растворах цианистого калия также образуются комплексные ионы, но в отличие от аммиака эта среда не вызывает коррозионного растрескивания сплавов систем Cu – Au и Cu – Au, хотя она, подобно царской водке, вызывает коррозию золота. Все остальные технически пригодные металлы менее благородны, чем водород. Из всех технических металлов наименее благородным является магний, в результате чего все легирующие компоненты всегда более благородны, что и обуславливает сильную подверженность магниевых сплавов коррозионному растрескиванию. Даже вода, являющаяся для магния активной коррозионной средой, при наличии внутренних напряжений может вызвать коррозионное растрескивание магниевых сплавов. Поэтому использование таких сплавов в технике в значительной степени ограничено. В результате небольшой растворимости алюминия и цинка

в магнии сплавы магния с этими компонентами пересыщены при комнатной температуре, вследствие чего всегда приходится решать вопрос о том, преобладает ли совершенно однородное состояние сплава или в сплаве имеются субмикроскопические выделения второй фазы, вызывающие коррозионное растрескивание. Однако исследования, проводимые с магниевыми сплавами, содержащими примерно 1 ат. % Al и имеющими совершенно однородную структуру, показали, что, несмотря на отсутствие выделений второй фазы, происходит коррозионное растрескивание сплавов.

Более стойкими против коррозионного растрескивания являются алюминиевые сплавы, особенно если они легированы менее благородным элементом – магнием. Согласно общим правилам, коррозионному растрескиванию подвержены только те алюминиевые сплавы, которые содержат цинк и медь, а сплавы системы Al – Mg не растрескиваются даже в пересыщенном состоянии, что неоднократно подтверждалось исследованиями.

Правильность изложенных выше обобщенных гипотез, относящихся к взаимодействию электрохимических и механических факторов, вызывающих хрупкое разрушение пластичных металлов, подтверждается успешным применением их к различным системам сплавов. Новые представления о механизме и динамике процесса растрескивания и о характере границ зерен и субструктурных границ позволяют объяснить многие явления процесса более точно и подробно.

Изложенный механизм растрескивания подчеркивает необходимость рассмотрения различных систем сплавов с точки зрения изучения их структурных и электрохимических свойств, которые влияют на возникновение локальных коррозионных разрушений, и детализации тех факторов, которые влияют на образование и развитие трещины.

## **ВОПРОСЫ САМОКОНТРОЛЯ ПО ТЕМЕ**

1. Что означает коррозионное растрескивание металла под напряжением?
2. Каковы причины возникновения коррозионного растрескивания металла под напряжением?
3. Где наиболее часты случаи возникновения коррозионного растрескивания металла под напряжением?
4. Каков характер коррозионных трещин?
5. Какие существуют методы борьбы с коррозионным растрескиванием металла под напряжением?



**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**  
**К ВЫПОЛНЕНИЮ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ**  
**И ПРОВЕДЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ**

## Практическое занятие № 1. РАСЧЁТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТРУБОПРОВОДА

### Общие положения

Магистральные нефтегазопродуктопроводы подлежат комплексной защите от подземной коррозии. Комплексная защита осуществляется изоляционными покрытиями и катодной поляризацией. Назначение изоляционных покрытий – разъединение металлической поверхности и агрессивной среды. Одно из основных требований к изоляционным покрытиям – обеспечение сплошности. Однако в процессе строительства случаются отдельные повреждения изоляционного покрытия. В эксплуатационный период из-за старения изоляции вследствие повышенных механических воздействий грунта и трубопровода появляются новые сквозные дефекты в изоляции и расширяется площадь ранее возникших дефектов. Катодная поляризация обеспечивает сохранность металла при сквозных повреждениях изоляции.

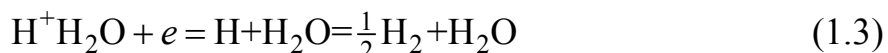
Подземная коррозия протекает в основном по электрохимическому механизму. При этом происходит переход атомов металла в раствор в виде гидратированных ионов с оставлением электронов в металле



Эта разность скоростей реакции, как в прямом, так и в обратном направлениях определяет скорость коррозии. Положительным направлением тока принято считать направление от металла в раствор. Поэтому электрод, с которого стекает положительный ток, называют анодом. На нем протекает реакция окисления. Переход атомов металла в раствор в виде гидратированных ионов тем легче, чем меньше электронов скапливается в металле. Поэтому для протекания анодной реакции необходима сопряженная с ней реакция катодного восстановления. В большинстве случаев подземной коррозии катодная реакция проходит в результате электровосстановления кислорода, так как грунты, как правило, относятся к нейтральной среде



В кислых средах катодная реакция протекает с разрядом иона водорода



В щелочных растворах катодная реакция с выделением водорода идет за счет восстановления водорода из молекул воды



Эта реакция имеет место при катодной защите, когда плотность катодного тока превышает предельную плотность тока по кислороду.

Эффективность катодной защиты оценивается по потенциалу. Трубопровод считается защищенным, если по всей его поверхности и непрерывно в процессе эксплуатации поддерживается защитный потенциал; ГОСТ 25812-85 регламентирует две величины защитных потенциалов: минимальный защитный и максимальный допустимый. Значениями этих потенциалов сверху и снизу ограничивается область защитных потенциалов.

Для трубопроводов с температурой транспортируемого продукта не более 293 К (20 °С), проложенных в грунтах с удельным электрическим сопротивлением не менее 10 Ом·м или содержанием водорастворимых солей не более 1 г на 1 кг грунта, минимальный поляризационный защитный потенциал относительно медно-сульфатного электрода сравнения (МСЭ) равен минус 0,85 В (с омической составляющей минус 0,90 В по МСЭ).

Для сооружений с температурой транспортируемого продукта не более 333 К (60 °С), непосредственно контактирующих с водной средой не менее 6 месяцев в году и в грунтах с удельным электрическим сопротивлением менее 10 Ом·м, максимальный допустимый поляризационный потенциал равен минус 1,10 В по МСЭ (с омической составляющей минус 1,2 В). Для других условий ГОСТ 25812-85 рекомендует применять защитные потенциалы, приведенные в табл. 1.1 и 1.2.

Все нефтегазопроводы подлежат электрохимической защите независимо от условий прокладки и эксплуатации. Элементы электрохимической защиты должны состоять из восстанавливаемых изделий с эксплуатационным сроком службы не менее 10 лет.

Для предохранения от почвенной коррозии применяются следующие виды защиты: катодная и протекторная или комбинационный способ.

Катодная защита осуществляется посредством использования источника постоянного тока, питаемого от линии сетевого энергоснабжения. Принципиальная схема катодной защиты приведена на рис. 1.1.

Источник постоянного тока – катодная сетевая станция, преобразующая переменный ток в постоянный. Она снабжена регулятором напряжения, позволяющим устанавливать необходимую силу защитного тока; устройствами для защиты схемы от перенапряжений, возникающих, например, во время грозы; устройствами для шунтирования токов высокой частоты, являющихся источником радиопомех. Серийно изготавливаемые катодные неавтоматические сетевые станции имеют параметры, приведенные в табл. 1.3. Требования к катодным станциям регламентирует ГОСТ 9.015-73.

Таблица 1.1

Рекомендуемые минимальные защитные потенциалы относительно МСЭ  
в зависимости от условий прокладки и эксплуатации

Условия применения катодной защиты	Минимальный защитный потенциал, В	
	поляризационный	с омической составляющей
При прокладке трубопровода в условиях возможной микробиологической коррозии; при наличии блуждающих токов промышленной частоты; на участках трубопроводов с температурой транспортируемого продукта выше 293 К (20 °С) до 333 К (60 °С); в грунтах с удельным сопротивлением менее 10 Ом·м или содержанием водорастворимых солей более 1 г на 1 кг грунта	-0,95	-1,00
На участках трубопроводов с температурой транспортируемого продукта выше 333 К (60 °С) до 353 К (80 °С)	-1,00	-1,10
На участках сооружений с температурой транспортируемого продукта выше 353 К (80 °С)	-1,05	-1,20

Таблица 1.2

Рекомендуемые максимальные допустимые защитные потенциалы  
относительно МСЭ в зависимости от условий эксплуатации и прокладки

Условия применения катодной защиты	Минимальный защитный потенциал, В	
	поляризационный	с омической составляющей
При прокладке трубопроводов с температурой транспортируемого продукта выше 333 К (60 °С) на участках с уровнем грунтовых вод не менее 6 мес. в году выше нижней образующей трубопровода и при удельном электрическом сопротивлении менее 10 Ом·м, при подводной прокладке трубопроводов с температурой транспортируемого продукта выше 333 К (60 °С)	-1,15	-1,5
При прокладке во всех других условиях трубопроводов:		
– с битумной изоляцией;	-1,15	-2,5
– с полимерной пленочной изоляцией	-1,15	-3,5

*Примечание.* Для трубопроводов из упрочненных сталей с пределом прочности 0,6 МПа (6 кгс/см<sup>2</sup>) и более не допускаются поляризационные потенциалы ниже минус 1,1 В по МСЭ.

Таблица 1.3

## Электрические параметры неавтоматических сетевых катодных станций

Наименование катодной станции	Тип катодной станции	Номинальная мощность, кВт	Номинальное выпрямленное напряжение, В	Номинальный выпрямленный ток, А	кпд, % не менее
Катодная сетевая станция	КСС-300	0,3	24/12	12,5/25	58
	КСС-600	0,6	24/12	25/50	61
	КСС-1200	1,2	24/12	50/100	61
Станция катодной защиты модернизированная	СКЗМ-2,0	2,0	96/48	21/42	0,73
	СКЗМ-3,0	3,0	96/48	31/62	0,73
	СКЗМ-5,0	5,0	96/48	52/104	0,73
Тиристорная станция катодной защиты	ТСКЗ-1,5М	1,5	48/24	33/66	-
	ТСКЗ-3М	3,0	96/48	31/62	-
	ТСКЗ-5М	5,0	96/48	52/104	-

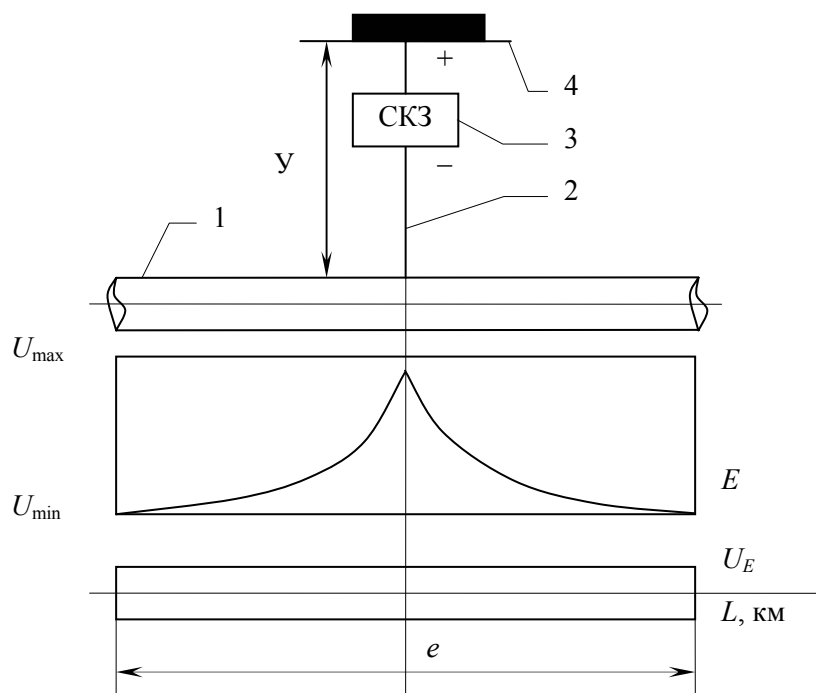


Рис. 1.1. Принципиальная схема катодной защиты:

1 – трубопровод; 2 – дренажный кабель; 3 – катодная станция; 4 – анодное заземление;  
 $U_{max}$  – максимальный защитный потенциал;  $U_{min}$  – минимальный защитный потенциал;  
 $U_E$  – естественный потенциал трубопровода;  $y$  – удаление анодного заземления от трубопровода

В условиях нестабильного электропитания и изменения сопротивления анодного заземления в результате воздействия погодных условий применяются катодные станции с автоматическим поддержанием силы защитного тока, типы и параметры которых приведены в табл. 1.4.

В зонах действия блуждающих токов, где потенциалы нестабильны, а также в условиях изменения электрических параметров трубопровода из-за сезонных колебаний уровня грунтовых вод, влажности грунта и т.д. используются катодные станции с автоматическим поддержанием защитного потенциала (табл. 1.5).

Таблица 1.4

Электрические параметры катодных станций с автоматическим регулированием силы защитного тока

Наименование катодной станции	Тип катодной станции	Номинальная мощность, кВт	Номинальное выпрямленное напряжение, В	Номинальный выпрямленный ток, А	кпд, %, не менее
Автоматический регулятор тока защиты	АРТЗ-0,6	0,6	48/24	12,5/25	80
	АРТЗ-1,2	1,2	48/24	25/50	80
	АРТЗ-2,0	2,0	96/48	21/42	80
	АРТЗ-3,0	3,0	96/48	31/62	80
	АРТЗ-5,0	5,0	96/48	52/104	80
Преобразователь сетевой катодный	ПСК-М-0,3	0,3	24/12	12,5/25	60
	ПСК-М-0,6	0,6	48/24	12,5/25	63
	ПСК-М-1,2	1,2	48/24	25/50	63
	ПСК-М-2	2,0	96/48	21/42	65
	ПСК-М-3	3,0	96/48	31/62	67
	ПСК-М-5	5,0	96/48	52/104	68

Таблица 1.5

Электрические параметры катодных станций с автоматическим регулированием защитного потенциала

Наименование катодной станции	Тип катодной станции	Номинальная мощность, кВт	Номинальное выпрямленное напряжение, В	Номинальный выпрямленный ток, А	кпд % не менее
Автоматический регулятор потенциала защиты	АРПЗ-1,2	1,2	48/24	25/50	78
	АРПЗ-2,0	2,0	96/48	21/42	78
	АРПЗ-3,0	3,0	96/48	31/62	78
	АРПЗ-5,0	5,0	96/48	52/104	78
Агрегат ТДЕ 9	ТДЕ-0,6	0,6	48/24	12,5/25	63
	ТДЕ-1,2	1,2	48/24	25/50	63
	ТДЕ-2,0	2,0	96/48	21/42	65
	ТДЕ-3,0	3,0	96/48	31/62	67
	ТДЕ-5,0	5,0	96/48	52/104	68
Преобразователь автоматический для катодной защиты	ПАСКМ-0,6	0,6	48/24	12,5/25	63
	ПАСКМ-1,2	1,2	48/24	25/50	63
	ПАСКМ-2,0	2,0	96/48	21/42	65
	ПАСКМ-3,0	3,0	96/48	31/62	67
	ПАСКМ-5,0	5,0	96/48	52/104	68

*Примечание.* ТД – вид применяемых вентилях: тиристоры, диоды; Е – способ охлаждения: естественное воздушное; 9 – класс перегрузок.

## Задание для расчета электрических параметров трубопровода

В таблице 1.6 даны исходные данные для расчета электрических параметров трубопровода. Вариант расчета преподаватель назначает индивидуально.

Таблица 1.6

Исходные данные для расчета электрических параметров трубопровода

№ вар.	Диаметр трубопроводов, мм	Толщина стенки трубопровода, мм	Марка стали	Дополнительные данные
1	146	7	15ГСТЮ	Температура транспортируемого продукта 55 °С. Характеристика изоляционного покрытия: для четных вариантов – на основе битума, для нечетных вариантов – полимерная изоляция
2	152	7	17ГС	
3	159	7	18Г2	
4	163	7	08Г2СФ	
5	180	7,5	18Г2САФ	
6	194	7,5	18ХГ2САФ	
7	219	7,5	Ст.3	
8	245	8	15ГСТЮ	
9	273	8	17ГС	
10	299	8	18Г2	
11	325	8	08Г2СФ	
12	377	8,5	18Г2САФ	
13	426	9	18ХГ2САФ	
14	530	9	Ст.3	
15	720	9,5	18Г2	
16	820	10	08Г2СФ	
17	1020	12	17ГС	
18	1220	14	18Г2САФ	
19	1420	16	17ГС	
20	1620	17	Ст.3	

## Расчет электрических параметров трубопровода

К электрическим параметрам трубопровода относятся:

- продольное сопротивление трубопровода;
- переходное сопротивление труба – земля;
- постоянная распространения тока вдоль трубопровода;
- входное и характеристическое сопротивление трубопровода.

Продольное сопротивление трубопровода представляет собой сопротивление единицы его длины и рассчитывается по формуле

$$R_T = \frac{\rho_T}{\pi(D_T - \delta_T)\delta_T}, \text{ Ом/м}, \quad (1.5)$$

где  $\rho_T$  – удельное сопротивление материала трубы, Ом·мм<sup>2</sup>/м;  $D_T$  – диаметр трубопровода, мм;  $\delta_T$  – толщина стенки трубопровода, мм.

Для стальных трубопроводов, широко встречающихся в практике строительства, продольное сопротивление определяют по табл. 1.7 и 1.8.

Таблица 1.7

Продольное сопротивление трубопровода  $10^{-6}$  (Ом/м) при толщине стенки менее 10 мм

Диаметр трубопровода, мм	4	5	5,5	6	6,5
146	137	111	101	92,6	86,1
152	132	106	98,8	89,1	82,5
159	126	101	92,4	85,0	78,7
168	119	95,7	87,3	80,3	74,3
180	111	89,2	81,3	74,7	69,2
194	103	82,6	75,3	69,2	64,0
219	90,7	73,2	66,5	61,1	56,5
245	80,9	65,0	59,2	54,5	50,3
273	72,5	58,2	53,0	48,7	45,0
299	66,1	53,1	48,3	44,4	41,0
325	60,8	48,8	44,4	40,8	37,7
377	52,3	41,9	38,2	35,1	32,4
426	46,2	37,1	33,7	31,0	28,6
530		29,7	27,1	24,8	22,9
720					16,8
820					
1020					

Таблица 1.8

Продольное сопротивление трубопровода  $10^{-6}$  (Ом/м) при толщине стенки более 10 мм

Диаметр трубопровода, мм																
	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12	12,5	14	15	16	17
146	80,2	75,1	70,7													
152	76,9	72,0	67,7													
159	73,3	68,7	64,6													
168	69,2	64,8	61,0													
180	64,4	60,3	56,7													
194	59,6	55,8	52,4													
219	52,6	49,2	46,2													
245	46,8	43,8	41,1													
273	41,9	39,2	36,8													
299	38,2	35,7	33,5													
325	35,1	32,8	30,8													
377	30,1	28,2	26,4	24,9												
426	26,6	24,9	23,3	22,0	20,8											
530	21,3	19,9	18,7	17,6	16,6											
720	15,6	14,6	13,7	12,9	12,2	11,6	11,0	10,5	10,0							
820		12,8	12,0	11,3	10,7	10,1	9,63	9,18	8,77	8,37						
1020					8,58	8,13	7,72	7,36	7,03	6,73	6,45	6,20	5,54	5,18	4,86	
1220									5,87	5,61	5,38	5,17	4,62	4,32	4,05	3,82
1420													3,96	3,70	3,47	3,27
1620													3,47	3,24	3,04	2,86



В таблице 1.8 использовано удельное электрическое сопротивление, равное  $0,245 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$  при  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Если температура трубопровода отличается от  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  то необходимо скорректировать рассчитанное по формуле (1.5) или найденное по табл. 1.8 значение продольного сопротивления по формуле

$$R_{Tt} = R_{T20} [1 + \alpha_{20} (t - 20)], \text{ Ом/м}, \quad (1.6)$$

где  $R_{Tt}$  и  $R_{T20}$  – продольное сопротивление трубопровода соответственно при температуре  $t$  ( $^\circ\text{C}$ ) и  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , Ом/м;  $\alpha_{20}$  – температурный коэффициент,  $1/^\circ\text{C}$ , средняя величина для трубных сталей равна  $0,0035 \text{ } 1/^\circ\text{C}$ .

В табл. 1.9 приведены значения удельного электрического сопротивления различных марок стали.

Таблица 1.9

Удельное электрическое сопротивление различных марок стали

Марка стали	Удельное электрическое сопротивление, Ом·мм <sup>2</sup> /м при 20 °С
15ГСТЮ	0,281
17ГС	0,247
18Г2	0,218
08Г2СФ	0,243
18Г2САФ	0,266
18ХГ2САФ	0,260
Ст.3	0,235

Переходное сопротивление труба – земля представляет собой отношение смещения разности потенциалов труба – земля (наложенная разность потенциалов)  $U_{ТЗ}$  к вызвавшей это смещение плотности тока  $j$ .

Переходное сопротивление единицы длины трубопровода имеет размерность Ом·м. Эта величина используется в расчетах параметров катодной защиты. Переходное сопротивление единицы внешней поверхности трубопровода (размерность Ом·м<sup>2</sup>) применяется для оценки качества изоляционного покрытия.

По данным обследования состояния большого количества магистральных трубопроводов и обработки результатов измерений на них современными методами математической статистики и теории вероятностей начальное значение переходного сопротивления может быть принято:

- для трубопроводов, изолированных покрытиями на основе битума,  $R'_{ПН} = 3000 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2$ ;
- для трубопроводов с полимерным покрытием  $R'_{ПН} = 5000 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2$ .

Указанные значения переходного сопротивления достигаются при условии выполнения требований пооперационного технологического контроля к изоляционно-укладочным работам, устранения дефектов в изоляции и осуществления приемки законченных строительством участков трубопроводов по методу катодной поляризации.

Переходное сопротивление труба – земля в процессе эксплуатации под воздействием грунта, температуры и других факторов уменьшается во времени в соответствии со следующей закономерностью

$$R'_{II}(t) = R'_{IIH} e^{-\gamma t}, \quad (1.7)$$

где  $R'_{II}(t)$  – переходное сопротивление в момент времени  $t$ , Ом·м<sup>2</sup>;  $R'_{IIH}$  – начальное переходное сопротивление (после завершения процесса влагонасыщения покрытия), Ом·м<sup>2</sup>;  $\gamma$  – коэффициент, характеризующий скорость уменьшения переходного сопротивления. Величина  $\gamma$  для  $t \leq 20$  лет равна 0,125 1/год.

Переходное сопротивление труба – земля единицы трубопровода  $R_{II}$  связано с переходным сопротивлением единицы площади  $R'_{II}$  следующим выражением

$$R_{II} = \frac{R'_{II}}{\pi D_T}, \quad (1.8)$$

где  $D_T$  – диаметр трубопровода, м.

Постоянная распространения тока вдоль трубопровода  $\alpha$  является основным параметром, характеризующим длину защитной зоны. С уменьшением величины этой постоянной длина защитной зоны увеличивается

$$\alpha_H = \sqrt{\frac{R_T}{R_{II}}}, \quad 1/\text{м} \quad (1.9)$$

Вследствие того, что переходное сопротивление труба – земля зависит от времени, постоянная распространения тока также зависит от этого фактора

$$\alpha(t) = \sqrt{\frac{R_T}{R_{II}(t)}} = \alpha_H e^{-0,5\gamma t}, \quad (1.10)$$

где  $\alpha_H$  – постоянная распространения в начальный период эксплуатации.

Характеристическое сопротивление трубопровода  $z$  является основным параметром, определяющим силу защитного тока. Чем выше характеристическое сопротивление, тем меньше сила защитного тока

$$z = \sqrt{R_T \cdot R_{II}}, \text{ Ом} \quad (1.11)$$

С учетом изменения переходного сопротивления во времени

$$z = \sqrt{R_T \cdot R_{II}(t)} = z_{II} e^{-0,5\gamma t}, \quad (1.12)$$

Входное сопротивление трубопровода определяется по формуле

$$z_B = \frac{z_{II} \cdot z_{Л}}{z_{II} + z_{Л}}, \text{ Ом} \quad (1.13)$$

где  $z_{II}$ ,  $z_{Л}$  – характеристическое сопротивление соответственно правого и левого плеча трубопровода, Ом.

Если  $z_{II} = z_{Л}$ , то

$$z_{BH} = \frac{\sqrt{R_T \cdot R_{II}}}{2}, \text{ Ом}, \quad (1.14)$$

а с учетом фактора времени

$$z_B(t) = \frac{\sqrt{R_T \cdot R_{II}(t)}}{2} = z_{BH} e^{-0,5\gamma t}. \quad (1.15)$$

## Практическое занятие № 2.

### РАСЧЁТ КАТОДНОЙ ЗАЩИТЫ МАГИСТРАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДА

Требуется определить число катодных станций, их мощность, тип и срок службы анодных заземлителей при антикоррозионной защите стального магистрального изолированного трубопровода протяженностью  $L$  (км), наружным диаметром  $D$  (мм), толщиной стенки  $\delta$  (мм). Трубопровод уложен в грунтах с удельным электрическим сопротивлением: на длине  $l_1$  (км) –  $\rho_{ГР1}$  (Ом·м); на длине  $l_2$  (км) –  $\rho_{ГР2}$  (Ом·м); на длине  $l_3$  (км) –  $\rho_{ГР3}$  (Ом·м); на длине  $l_4$  (км) –  $\rho_{ГР4}$  (Ом·м). Электрическое сопротивление изоляционного покрытия на единице длины трубопровода на этих участках соответственно  $R_{ИЗ1}$ ,  $R_{ИЗ2}$ ,  $R_{ИЗ3}$ ,  $R_{ИЗ4}$  (Ом·м); конструкцию анодного заземлителя и его расположение относительно трубопровода и СКЗ, а также наружный диаметр и толщину стенки трубопровода принять по практическому занятию № 1. Расстояние от СКЗ до трубопровода  $l_{СТ}$  принять 10 м. В качестве соединительного принять алюминиевый провод. Исходные данные приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

## Варианты к практическому занятию № 2

№ вар	$L$	$\frac{l_1}{L}$	$\rho_{ГР1}$	$R_{ИЗ1}$	$\frac{l_2}{L}$	$\rho_{ГР2}$	$R_{ИЗ2}$	$\frac{l_3}{L}$	$\rho_{ГР3}$	$R_{ИЗ3}$	$\frac{l_4}{L}$	$\rho_{ГР4}$	$R_{ИЗ4}$
1	100	0,1	5	2500	0,2	15	1800	0,4	50	1500	0,3	100	1200
2	150	0,15	7	2400	0,25	17	1700	0,4	45	1400	0,2	120	1000
3	200	0,15	8	2300	0,25	20	1500	0,4	40	1600	0,2	90	1100
4	250	0,05	4	2700	0,15	25	1600	0,55	35	2000	0,2	100	1400
5	300	0,15	10	2500	0,15	25	1800	0,5	50	1300	0,2	120	1000
6	350	0,15	10	2500	0,15	25	1800	0,5	50	1300	0,2	100	900
7	400	0,15	10	2700	0,15	26	1800	0,5	50	1300	0,2	100	800
8	450	0,15	10	2700	0,15	27	1800	0,5	55	1300	0,2	105	750
9	500	0,15	10	2600	0,15	28	1900	0,5	60	1300	0,2	110	750
10	550	0,15	10	2600	0,15	29	1900	0,5	65	1300	0,2	115	800
11	600	0,15	10	2500	0,15	30	1900	0,5	60	1300	0,2	120	800
12	650	0,15	10	2500	0,15	29	1800	0,5	55	1300	0,2	115	800
13	700	0,15	10	2500	0,15	28	1800	0,5	50	1300	0,2	110	800
14	750	0,15	10	2400	0,15	27	1800	0,5	55	1300	0,2	105	800
15	800	0,15	10	2400	0,15	25	1700	0,5	60	1300	0,2	100	800
16	850	0,15	10	2700	0,15	24	1700	0,5	65	1300	0,2	105	800
17	900	0,15	10	2700	0,15	22	1700	0,5	60	1300	0,2	110	800
18	850	0,15	10	2700	0,15	21	1700	0,5	55	1300	0,2	115	800
19	350	0,15	10	3700	0,15	20	1800	0,5	50	1300	0,2	120	800
20	400	0,15	10	2800	0,15	21	1800	0,5	50	1300	0,2	125	800
21	500	0,15	10	2800	0,15	22	1800	0,5	55	1300	0,2	120	800
22	550	0,15	10	2800	0,15	23	1800	0,5	60	1300	0,2	115	800
23	600	0,15	10	2700	0,15	24	1700	0,5	55	1300	0,2	110	800

**Решение**

1. Определение расчетных значений защитного потенциала (см. задание № 1)

$$E_{\min, \max} = E_{\text{защ}(\max, \min)} - E_{ECT}, \text{ В}$$

2. Определение среднего удельного электрического сопротивления грунтов на трассе трубопровода

$$\rho_{\text{гр.ср.}} = \frac{\sum \rho_{\text{гр.}i} l_i}{L}, \text{ Ом}\cdot\text{м}$$

3. Определение среднего значения электрического сопротивления изоляционного покрытия на единице длины трубопровода

$$R_{ИЗ.СР.} = \frac{L}{\sum \frac{l_i}{R_{ИЗ.i}}}, \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

4. Определение электрического сопротивления единицы длины трубопровода

$$R = \frac{\rho}{\pi D \delta}, \text{ Ом/м}$$

Для стали удельное электросопротивление

$$\rho = 0,135, \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$$

5. Определение постоянной распределения защитного потенциала и тока по длине трубопровода

$$\alpha = \sqrt{\frac{R}{R_{ИЗ.СР.}}}, \frac{1}{\text{м}}$$

6. Определение длины участка трубопровода, защищаемого одной СКЗ

$$l = \frac{2}{\alpha} \operatorname{arcch} \frac{E_{\max}}{E_{\min}}, \text{ м,}$$

где  $\operatorname{ch} \frac{E_{\max}}{E_{\min}}$  – гиперболический косинус (прил. 4).

7. Определение числа катодных станций

$$N = \frac{L}{l}, \text{ компл.}$$

8. Определение сопротивления растеканию тока с анодного заземлителя  $R_A$  (Ом) (см. задание № 1).

9. Определение сопротивления соединительных проводов  $R_{ГР}$  (Ом) (см. задание № 1).

10. Определение величины тока в цепи СКЗ

$$I_{ДР} = \frac{2\alpha |E_{\max}| \operatorname{th} \left( \frac{\alpha l}{2} \right)}{R}, \text{ А}$$

или

$$I_{ДР} = \frac{2|E_{\max}|}{\alpha R_{ИЗ.СР.} + \frac{\rho_{ГР.СР.}}{\pi l_{ГР}}}, \text{ А}$$

Для дальнейших расчетов принимаем наибольшие значения величин тока в цепи СКЗ, полученные по этим формулам.

11. Определение напряжения на выходе СКЗ

$$U = I_{ДР} (R_A - R_{ГР}) + |E_{\max}| - |E_{\min}|, \text{ В}$$

12. Определение требуемой мощности СКЗ

$$P = I_{ДР} \cdot U, \text{ Вт}$$

13. Выбор типа СКЗ производится с учетом определенных значений мощности  $P$ , тока  $I_{ДР}$  и напряжения  $U$  в соответствии с табл. 2.2 основных электрических параметров катодных станций.

Таблица 2.2

Типы СКЗ

№ пп	Тип станции	Модификация	Номинальная мощность	Пределы регулируемого напряжения, В		Номинальный ток, А	
				I	II	I	II
1	СКСУ- 1200	СКСУ-1200/48	1200	6-24	24-48	50	25
		СКСУ-1200/24	1200	3-12	12-24	100	50
2	СКСУ- 600	СКСУ-600/48	600	6-24	24-48	25	12,5
		СКСУ-600/24	600	3-12	12-24	50	25
3	СКСУ- 300	СКСУ-300/48	300	6-24	24-48	12,5	6,25
		СКСУ-300/24	300	3-12	12-24	25	12,5
4	СКСУ- 150	СКСУ-150/48	150	6-24	24-48	6,25	3,125
		СКСУ-150/24	150	3-12	12-24	12,5	6,25

14. Определение срока службы анодного заземления

а) определение веса анодного заземления

$$G = \pi d \delta_{A3} (nl_B + l_{Г}) \gamma, \text{ кг},$$

где  $\gamma = 8500 \text{ кг/м}^3$ ;

б) определение поверхности анодного заземления

$$S = \pi d (nl_B + l_{Г}), \text{ см}^2;$$

в) определение плотности защитного тока на поверхности анодного заземления

$$j = \frac{I_{ДР} \cdot 1000}{S}, \text{ мА/см}^2;$$

г) срок службы анодного заземления

$$T = 0,1096 \frac{G}{I_{ДР}} K_{ЭФ}, \text{ лет},$$

где  $K_{ЭФ} \left( \frac{\text{А}}{\text{кг}} \right) \text{ лет}$  – коэффициент эффективности анодного растворения заземлителя (принимается по табл. 2.3).

Таблица 2.3

Коэффициент эффективности анодного растворения заземлителя

$\frac{K_{эф},}{\frac{А}{кг} \cdot \text{лет}}$	3,3	5,8	9,2	15,0	23,3	30,7	35,0	33,3	24,2	21,7	16,7	13,3	12,5
$\frac{j,}{\frac{мА}{см^2}}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3

### 15. Уточнение конструкции анодного заземления.

Срок службы анодного заземления рекомендуется назначать в пределах 10 – 15 лет. В том случае, если принятая конструкция анодного заземления не обеспечивает выполнение этого условия, необходимо изменить его конструкцию.

Корректировку срока службы анодного заземления к действующим рекомендациям можно осуществить за счет изменения толщины стенки труб, из которых выполнен заземлитель, до величины

$$\delta'_{AZ} = \delta_{AZ} \frac{(10-15)}{T}, \text{ мм}$$

В том случае, если такое мероприятие практически неосуществимо, необходимо изменить габаритные размеры анодного заземления путем изменения диаметра труб и их числа. Срок службы измененного анодного заземления необходимо определить по изложенной методике (пп. 8 – 14).

### Практическое занятие № 3.

## РАСЧЕТ ПРОТИВОКОРРОЗИОННОЙ ЗАЩИТЫ ИЗОЛИРОВАННОГО ТРУБОПРОВОДА С ПОМОЩЬЮ ОДНОЙ СТАНЦИИ КАТОДНОЙ ЗАЩИТЫ

Требуется рассчитать мощность источника тока станции катодной защиты для стального трубопровода длиной  $L$  (км), наружным диаметром  $D$  (мм) с толщиной стенки  $\delta$  (мм), если сопротивление изоляционного покрытия на единице длины трубопровода  $R_{ИЗ}$  (Ом·м), а удельное электрическое сопротивление почвы  $\rho_{ГР}$  (Ом·м) станция расположена на расстоянии  $l_{ПР}$  (м) от анодного заземления. Анодное заземление состоит из  $n$  вертикальных стальных труб диаметром  $d$  (мм), толщиной стенки  $\delta_{AZ}$  (мм) и длиной  $l_B$  (м) каждая, соединенных горизонтальной магистралью того же диаметра длиной  $l_G$  (м). Глубина заложения вертикальных труб заземлителя  $h$  (м). Расстояние от СКЗ до трубопровода  $l_{СТ}$  принять 10 м. Исходные данные приведены в табл. 3.1. Схема защиты трубопровода СКЗ приведена на рис. 3.1.

Таблица 3.1

## Исходные данные

№ вар.	$L$ , км	$D$ , мм	$\delta$ , мм	$R_{ИЗ}$ , Ом·м	$\rho_{ГР}$ , Ом·м	$l_{ПР}$ , м	$n$ , шт	$d$ , мм	$l_B$ , м	$l_G$ , м	$h$ , м	$\delta_{АЗ}$ , мм
1	10	273	6	1500	10	100	2	75	2	2	3,0	3,0
2	8	325	7	1200	20	150	3	75	3	6	4,0	3,0
3	15	377	8	1700	30	200	5	100	4	16	4,5	4,0
4	12	426	7	1800	40	250	5	100	5	20	5,5	4,0
5	14	529	8	1900	50	300	5	100	6	24	6,5	4,0
6	12	630	9	1300	60	350	10	75	6	54	6,5	4,0
7	20	720	8	2100	70	400	10	75	5	45	6,0	4,0
8	19	820	10	1400	80	450	10	75	4	36	5,0	4,0
9	25	1020	12	1600	90	500	15	50	6	30	6,5	4,0
10	35	1220	16	1500	100	500	15	50	5	35	5,5	4,0
11	30	1020	14	1800	90	450	15	50	4	40	5,5	4,0
12	25	820	12	2200	80	400	10	75	3	27	4,0	4,0
13	20	720	10	1400	70	350	10	75	3	54	3,5	4,0
14	15	630	10	1600	60	300	5	100	4	48	4,5	4,0
15	12	529	9	2050	50	250	5	100	3	24	4,0	4,0
16	12	426	6	1400	40	200	5	100	2	24	3,0	4,0
17	10	377	6	2150	30	150	3	150	2	12	3,0	5,0
18	15	325	9	1900	20	100	3	100	3	18	4,0	5,0
19	10	273	8	1800	10	75	3	150	2	12	3,0	5,0
20	12	219	7	2500	5	50	2	100	4	4	4,5	4,0
21	16	325	10	1900	10	100	3	100	4	8	5,0	4,0
22	19	377	10	2400	15	150	3	100	3	6	4,0	4,0
23	21	529	10	1800	20	200	5	100	3	24	3,5	4,0

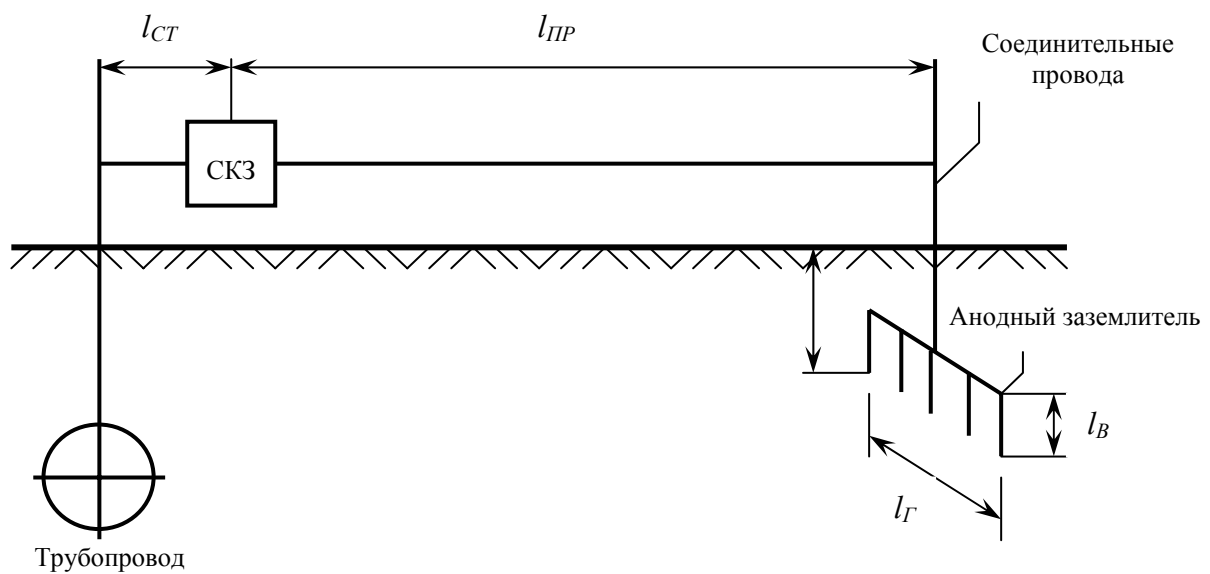


Рис. 3.1. Схема защиты трубопровода СКЗ



## Решение

1. Определение электрического сопротивления единицы длины трубопровода

$$R = \frac{\rho}{\pi D \delta}, \text{ Ом/м}$$

Для стали удельное электросопротивление

$$\rho = 0,135 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{м}$$

2. Определение постоянной распределения защитного потенциала по длине трубопровода

$$\alpha = \sqrt{\frac{R}{R_{из}}}, \text{ 1/м}$$

3. Проверка условия применимости расчетных формул «станции бесконечной длины» для расчета защиты трубопровода с помощью одной СКЗ.

При расположении одной СКЗ посередине трубопровода, подлежащего защите, длина трубопровода должна удовлетворять условию

$$L \leq \frac{2}{\alpha} \ln \frac{E_{\max}}{E_{\min}}, \text{ м,}$$

где  $E_{\max}$  и  $E_{\min}$  – соответственно максимальное и минимальное расчетные значения защитных потенциалов

$$E_{\max, \min} = E_{\text{защ}(\max, \min)} - E_{ECT}, \text{ В,}$$

где  $E_{ECT}$  – естественные потенциал сооружения на почве. Для стальных трубопроводов принято  $E_{ECT} = -0,55$  В по МСЭ;  $E_{\text{защ}(\max, \min)}$  – максимальный (минимальный) защитный потенциал.

Для стальных трубопроводов значения защитных потенциалов приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Значения защитных потенциалов

Характеристика изоляционного покрытия	Значения потенциала МСЭ $E_{\text{защ}(\max, \min)}$		Расчетный потенциал $E_{\max, \min}$	
	max, В	min, В	max, В	min, В
Битумное без нарушения	-1,22	-0,87	-0,67	-0,32
Битумное с частичным нарушением	-1,52	-0,87	-0,97	-0,32
Без покрытия	-1,85	-0,87	-1,30	-0,32

В соответствии с этим расчетные формулы «станции бесконечной длины» можно применять для стальных трубопроводов с нарушенной битумной изоляцией при условии

$$L \leq \frac{1,48}{\alpha}, \text{ м}$$

4. Определение расчетного значения защитного потенциала в точке дренажа

$$E_{ДР} = E_{\min} \cdot e^{\frac{\alpha L}{2}}, \text{ В}$$

5. Определение тока в цепи защиты

$$I_{ДР} = \frac{2a|E_{ДР}|}{R}, \text{ А}$$

6. Определение сопротивления растеканию тока с вертикальных стержней анодного заземлителя

$$R_B = \frac{0,366\rho_{ГР}}{nl_B\eta_B} \left[ lq \frac{2l_B}{d} + \frac{1}{2} lq \frac{4h - l_B}{4h - 3l_B} \right], \text{ Ом},$$

где  $\eta_B$  – коэффициент экранирования (прил. 1).

7. Определение сопротивления растекания тока с горизонтальной шины анодного заземления

$$R_{Г} = \frac{0,366\rho_{ГР}\varphi}{l_{Г}\eta_{Г}} \left[ lq \frac{l_{Г}^2}{d(h - l_B)} \right], \text{ Ом}$$

8. Определение общего сопротивления всей системы анодного заземления

$$R_A = \frac{R_B R_{Г}}{R_B + R_{Г}}, \text{ Ом}$$

9. Выбор сечения проводов

В качестве соединительного принять медный провод

$$S = \frac{\rho_{ПП}(l_{СТ} + l_{ПП})}{0,2R_A}, \text{ мм}^2$$

Удельное сопротивление материала медных проводов

$$\rho_{ПП} = 0,0175, \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{м}$$

Полученное значение  $S'$  округляем в большую сторону до ближайшего стандартного значения  $S$  (прил. 3).

10. Определение сопротивления соединительных проводов

$$R_{ПП} = \rho_{ПП} \frac{l_{СТ} + l_{ПП}}{S}, \text{ Ом}$$

11. Определение мощности СКЗ

$$P = I_{ДР}(R_A + R_{ПП}) + I_{ДР}E_{ДР}, \text{ Вт}$$

## Практическое занятие № 4. РАСЧЕТ ПРОТИВОКОРРОЗИОННОЙ ЗАЩИТЫ ИЗОЛИРОВАННОГО ТРУБОПРОВОДА С ПОМОЩЬЮ ОДИНОЧНЫХ ПРОТЕКТОРОВ

Для защиты магистрального нефтепровода, характеристика которого приведена в практическом занятии № 3, определить число протекторов из условия равномерного распределения их по трассе нефтепровода. Определить срок службы протекторов.

К установке принять протекторы типа ПМ-10 из магниевого сплава МЛ-16 и соединительный провод типа ПВ-10. Глубину заложения протектора принять  $h = 2,0$  м.

Схема установки протектора (рис. 4.1). Типы и размеры протекторов (табл. 4.1).

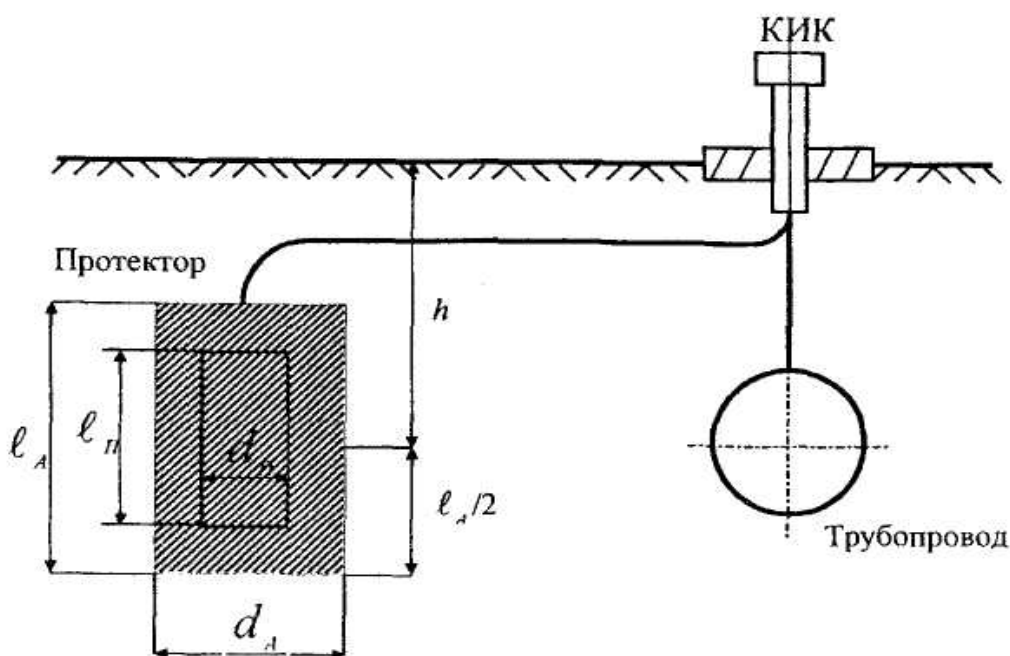
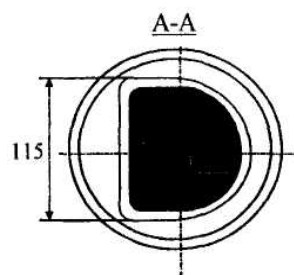
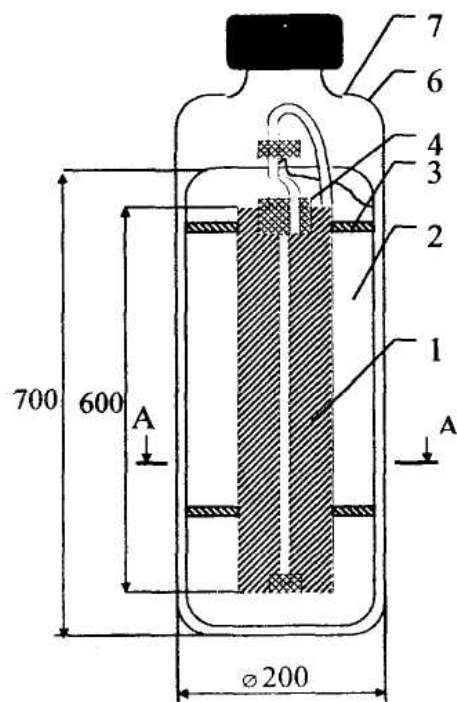


Рис. 4.1. Схема установки протектора

Таблица 4.1

Типы и размеры протекторов

Тип	Размеры, мм		Вес, кг (округленно)
	диаметр	высота	
ПМ-5	95	500	5
ПМ-10	100	600	10
ПМ-20	150	800	20



1. Протектор магниевый
2. Порошкообразный активатор
3. Распорные шайбы
4. Битумная изоляция
5. Изолированный провод
6. Хлопчатобумажный мешок
7. Бумажный мешок

$$d_{\Pi} = 100 \text{ мм}; \quad d_A = 200 \text{ мм}$$

$$l_{\Pi} = 600 \text{ мм}; \quad l_A = 700 \text{ мм}$$

Рис. 4.2. Протектор ПМ-10 У/2 с порошкообразным активатором

Вместо магния в протекторах может использоваться другой металл (табл. 4.2).

Таблица 4.2

Характеристики гальванических анодов

Гальванический анод	Удельный вес, г/см <sup>3</sup>	Выход тока, А · ч/кг		Эл. хим. экв., кг/А · год		Потенциал, В по МСЭ
		теор.	действ.	теор.	действ.	
Цинковый	7,0	820	737	1,07	1,19	-1,1
Магниевый	1,73	2200	1080	3,95	8,05	-1,7
Алюминиевый	2,92	2870	1120	2,95	7,57	-1,1

### Решение

1. Определение расчетных значений потенциала

а) минимальный защитный потенциал на трубопроводе (по МСЭ)

$$E_{\min} = -0,87 \text{ В}$$

б) потенциал протектора до подключения его к трубопроводу (по МСЭ)

$$E_{\Pi} = -1,7 \text{ В}$$

2. Определить сопротивление растеканию тока с вертикального протектора

$$R_{II} = \frac{0,366\rho_{GP}}{l_A} \left( \frac{\operatorname{Iq} \frac{l_A}{d_A}}{2\operatorname{Iq} \frac{4l_A}{d_A}} \operatorname{Iq} \left[ \frac{4l_A^2(4h+l_A)}{d_A^2(4h-l_A)} \right] + \frac{\rho_A}{\rho_{GP.CP.}} \operatorname{Iq} \frac{d_A}{d_{II}} \right), \text{ Ом}$$

Принимаем удельное сопротивление активатора (засыпки)  $\rho_A = 2,0 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ .

3. Определение длины участка трубопровода, защищаемого одним протектором.

Искомую длину  $L$  можно определить из уравнения

$$ch \frac{\alpha L}{2} + \frac{2R_{II}}{\sqrt{RR_{ИЗ.СР.}}} sh \frac{\alpha L}{2} = \frac{E_{II}}{E_{\min}},$$

если ввести замену

$$ch \frac{\alpha L}{2} = \frac{1}{2} \left( e^{\frac{\alpha L}{2}} + e^{-\frac{\alpha L}{2}} \right) \quad sh \frac{\alpha L}{2} = \frac{1}{2} \left( e^{\frac{\alpha L}{2}} - e^{-\frac{\alpha L}{2}} \right).$$

Тогда

$$L = \frac{2}{\alpha} \ln \frac{\frac{E_{II}}{E_{\min}} + \sqrt{\left( \frac{E_{II}}{E_{\min}} \right)^2 + \frac{4R_{II}^2}{RR_{ИЗ.СР.}} - 1}}{\frac{2R_{II}}{\sqrt{RR_{ИЗ.СР.}}} + 1}, \text{ м}$$

где значения  $\alpha$  и  $R_{ИЗ.СР.}$  соответствуют вычисленным в практическом задании № 3.

4. Определение числа протекторов

$$N = \frac{L_{TP}}{L}, \text{ шт}$$

5. Определение эффективного сопротивления растеканию тока защищаемого участка трубопровода длиной  $L$

$$R_{TP} = \frac{\sqrt{RR_{ИЗ.СР.}}}{3\operatorname{th} \frac{\alpha L}{2}}, \text{ Ом}$$

Здесь значения гиперболического тангенса  $\operatorname{th} \frac{\alpha L}{2}$  определяется по таблицам (прил. 4) или по формуле

$$\operatorname{th} \frac{\alpha L}{2} = \frac{e^{\alpha L} - 1}{e^{\alpha L} + 1}$$

6. Определение потенциала протектора после подключения его к трубопроводу

$$E_0 = E_{II} \frac{R_{TP}}{R_{II} + R_{TP}}, \text{ А}$$

## 7. Определение тока протектора

$$I_{II} = \frac{E_0 - E_{ECT}}{R_{TP} + R_{II}}, \text{ А}$$

или

$$I_{II} = \frac{2(E_{II} - E_{ECT})}{2R_{II} + 2\alpha R_{ИЗ.СР.} + \frac{\rho_{ГР.СР.}}{\pi l_{II}}}, \text{ А,}$$

где  $E_{ECT} = -0,55 \text{ В}$  – естественный потенциал трубопровода по МСЭ.

Для дальнейших расчетов принимаем наибольшее значение величины тока, полученные по этим формулам.

## 8. Определение срока службы протектора

$$T = \frac{G\eta_{II}\eta_{II}}{ql_{II}}, \text{ лет}$$

где  $G$  – вес протектора, кг;  $q$  – теоретический электрохимический эквивалент, кг/А·год;  $\eta_{II}$  – коэффициент использования протектора ( $\eta_{II} = 0,95$ );  $\eta_{II}$  – КПД протектора, определяется в зависимости от анодной плотности тока по графику (рис. 4.3).

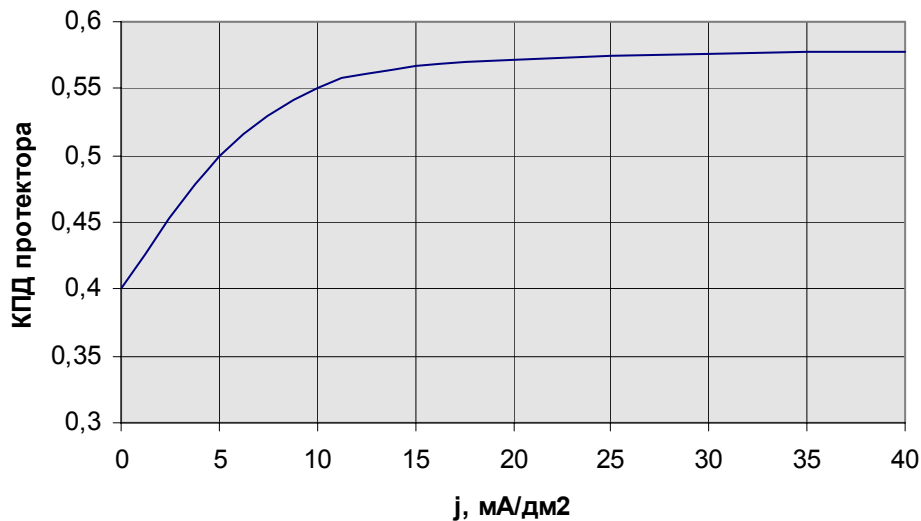


Рис. 4.3. Зависимость коэффициента полезного действия  $\eta_{II}$  магниевого протектора от анодной плотности тока

Для упакованных протекторов типа ППА-5 или ПМ-10У срок службы определить также из следующего приближенного выражения

$$T = \frac{1,14}{I_{II}}, \text{ лет}$$

**Практическое занятие № 5.**  
**РАСЧЁТ ЗАЩИТЫ ДНИЩА РЕЗЕРВУАРА ТИПА РВС**  
**ОДИНОЧНЫМИ ПРОТЕКТОРНЫМИ УСТАНОВКАМИ**

Требуется определить необходимое количество протекторов типа ПМ-10 У/2 и срок их службы для защиты днища резервуара типа РВС диаметром  $D$  (м), расположенного на площадке со средним удельным сопротивлением грунтов  $\rho_{ГР}$  (Ом·м). Защитную плотность тока принять  $j$  (мА/м<sup>2</sup>). Расстояние от протекторов до резервуара  $\ell_{ПР}$  принять 5 м. Характеристику протекторов принять по практическому заданию № 4. Соединительный провод ПВ-10. Схема установки приведена на рис. 5.1. Исходные данные указаны в табл. 5.1.

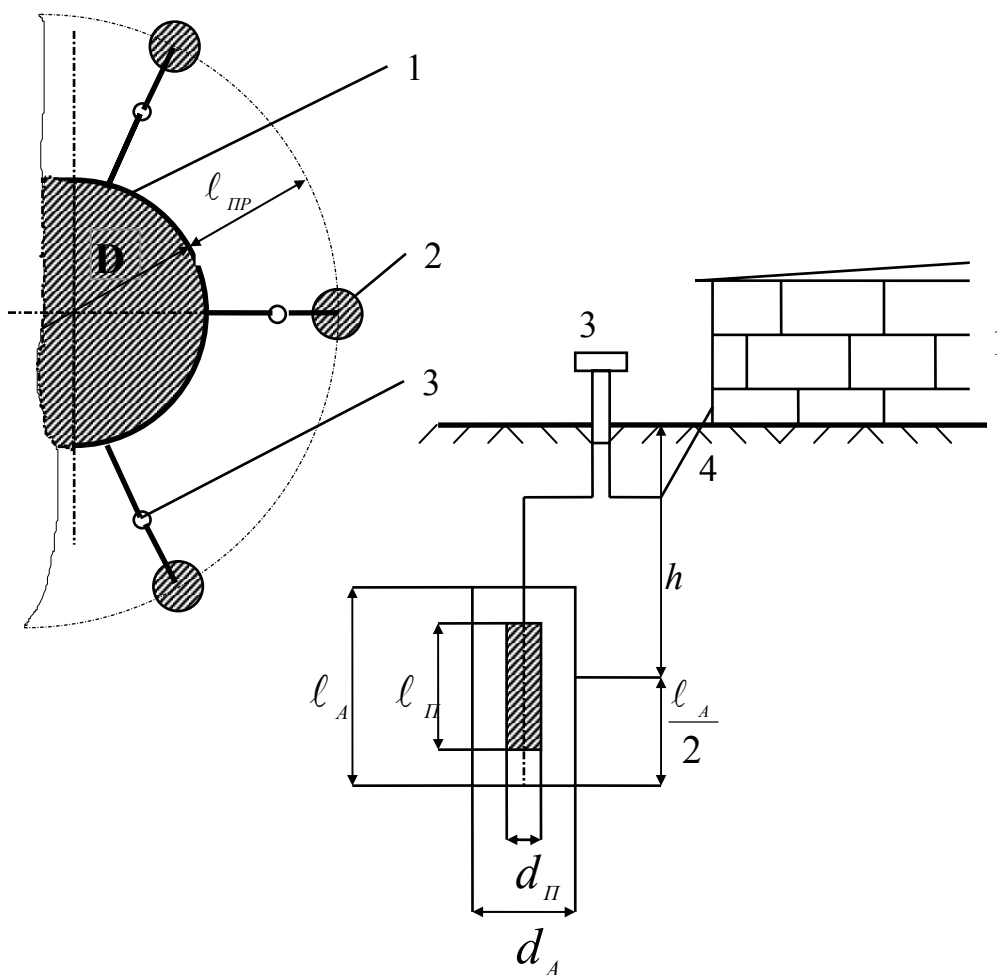


Рис. 5.1. Схема установки протекторов:  
 1 – резервуар; 2 – протектор; 3 – контрольно-измерительная колонка;  
 4 – соединительный провод

## Варианты к практическому занятию

№ варианта	$D$ , м	$\rho_{ГР}$ , Ом·м	$\rho_A$ , Ом·м	$j$ , мА/м <sup>2</sup>
1	5	20	0,5	1,0
2	10	20	0,5	1,0
3	15	20	0,5	1,0
4	20	20	1,0	1,0
5	25	20	1,0	1,0
6	30	50	1,0	0,5
7	25	50	1,5	0,5
8	20	50	1,5	0,5
9	15	50	1,5	0,5
10	10	50	2,0	0,5
11	5	75	2,0	0,5
12	10	75	2,0	0,75
13	15	75	1,5	0,75
14	20	75	1,5	0,75
15	25	75	1,5	0,75
16	30	100	1,0	0,75
17	25	100	1,0	0,5
18	20	100	1,0	0,5
19	15	100	0,5	0,5
20	10	100	0,5	0,5
21	5	30	0,5	0,5
22	10	30	1,0	0,25
23	15	30	1,0	0,25

**Решение**

1. Определение силы тока, требуемой для защиты всего днища резервуара

$$I = 0,785 j D^2, \text{ А}$$

2. Определение переходного сопротивление «резервуар – грунт»

$$R_{ГР} = \frac{\rho_{ГР}}{2D}, \text{ Ом}$$

3. Определение сопротивления растеканию тока с протектора  $R_{П}$ , Ом

$$R_{П} = \frac{0,366 \rho_{ГР}}{n l_B \eta_B} \left[ \lg \frac{2l_B}{d} + \frac{1}{2} \lg \frac{4h - l_B}{4h - 3l_B} \right], \text{ Ом},$$

где  $\eta_B$  – коэффициент экранирования (прил. 5).

4. Определение сопротивления соединительных проводов

$$R_{ПП} = \rho \frac{\ell_{ПП}}{S_{ПП}}, \text{ Ом}$$

Для провода ПВ-10:  $S_{ПП} = 10 \text{ мм}^2$ ;  $\rho = 0,0175 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$



### 5. Определение ориентировочного числа протекторов

$$N' = \frac{I(R_{II} + R_{IIР})}{E_{II} - E_{ECT} - IR_{PIГ}}$$

где  $E_{II} = 1,7$  В – абсолютное значение потенциала протектора по МСЭ до подключения к резервуару;  $E_{ECT} = 0,55$  В – абсолютное значение потенциала и резервуара по МСЭ до подключения протектора.

6. Уточнение числа протекторов с учётом влияния их взаимного экранирования

$$N = \frac{N'}{\eta_B}$$

где  $\eta_B$  – коэффициент экранирования, определяется по графику (прил. 5)

$$a = \frac{\pi(D + \ell_{IIР})}{N'}$$

Полученное число  $N$  округляется до ближайшего целого числа.

### 7. Определение срока службы протекторов

$$T = \frac{GN\eta_{II}\eta_{II}}{qI}, \text{ лет}$$

### Пример

Требуется определить необходимое количество протекторов типа ПМ-10 У/2 и срок их службы для защиты днища резервуара типа РВС диаметром  $D$  (м), расположенного на площадке со средним удельным сопротивлением грунтов  $\rho_{ГР}$  (Ом·м). Защитную плотность тока принять  $j$  (мА/м<sup>2</sup>). Расстояние от протекторов до резервуара  $\ell_{IIР}$  принять 5 м. Характеристику протекторов принять по практическому заданию № 4. Соединительный провод ПВ-10. Исходные данные выпишем в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Исходные данные

$D$ , мм	$\rho_{ГР}$ , Ом·м	$\ell_{IIР}$ , м	$d_A$ , мм	$\ell_A$ , мм	$d_{II}$ , мм	$\ell_{II}$ , мм	$h$ , м	$j$ , мА/м <sup>2</sup>	$\rho_A$ , Ом·м
15	75	5	200	700	100	600	2	0,75	1,5

### Решение

1. Определение силы тока, требуемой для защиты всего днища резервуара

$$I = 0,785 jD^2, \text{ А}$$

$$I = 0,785 \cdot 0,75 \cdot 10^{-3} \cdot 15^2 = 0,13, \text{ А}$$

2. Определение переходного сопротивления «резервуар – грунт»

$$R_{ГР} = \frac{\rho_{ГР}}{2D}, \text{ Ом}$$

$$R_{ГР} = \frac{75}{2 \cdot 15} = 2,5, \text{ Ом}$$

3. Определение сопротивления растеканию тока с протектора  $R_{II}$ , Ом

$$R_{II} = \frac{0,366 \cdot \rho_{ГР.СР.}}{\ell_A} \left( \frac{\lg \frac{\ell_A}{d_A}}{2 \lg \frac{4\ell_A}{d_A}} \lg \left[ \frac{4\ell_A^2 (4h + \ell_A)}{d_A^2 (4h - \ell_A)} \right] + \frac{\rho_A}{\rho_{ГР.СР.}} \lg \frac{d_A}{d_{II}} \right), \text{ Ом}$$

$$R_{II} = \frac{0,366 \cdot 75}{700 \cdot 10^{-3}} \left( \frac{\lg \frac{700 \cdot 10^{-3}}{200 \cdot 10^{-3}}}{2 \lg \frac{4 \cdot 700 \cdot 10^{-3}}{200 \cdot 10^{-3}}} \lg \left[ \frac{4(700 \cdot 10^{-3})^2 (4 \cdot 2 + 700 \cdot 10^{-3})}{(200 \cdot 10^{-3})^2 (4 \cdot 2 - 700 \cdot 10^{-3})} \right] + \frac{1,5}{75} \lg \frac{200}{100} \right) = 16,57, \text{ Ом}$$

4. Определение сопротивления соединительных проводов

$$R_{ПП} = \rho \frac{\ell_{ПП}}{S_{ПП}}, \text{ Ом}$$

$$R_{ПП} = 0,0175 \frac{5}{10} = 8,75 \cdot 10^{-3}, \text{ Ом}$$

Для провода ПВ-10:  $S_{ПП} = 10 \text{ мм}^2$ ;  $\rho = 0,0175 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$

5. Определение ориентировочного числа протекторов

$$N' = \frac{I(R_{II} + R_{ПП})}{E_{II} - E_{ECT} - IR_{ПГ}}$$

$$N' = \frac{0,13(16,57 + 8,75 \cdot 10^{-3})}{1,7 - 0,55 - 0,13 \cdot 2,5} = 2,6 \approx 3$$

где  $E_{II} = 1,7$  В – абсолютное значение потенциала протектора по МСЭ до подключения к резервуару;  $E_{ECT} = 0,55$  В – абсолютное значение потенциала и резервуара по МСЭ до подключения протектора.

6. Уточнение числа протекторов с учётом влияния их взаимного экранирования

$$N = \frac{N'}{\eta_B} \quad N = \frac{2,6}{0,9} = 2,9$$

где  $\eta_B = 0,9$  – коэффициент экранирования определяется по графику (прил. 5).

$$\text{Здесь } a = \frac{\pi(D + \ell_{PP})}{N'}, \text{ м; } a = \frac{3,14(15 + 5)}{2,6} = 24,2, \text{ м, причем } N' \text{ ис-}$$

пользуем целое.

Полученное число  $N$  округляем до ближайшего целого числа.  $N = 3$ .

7. Определение срока службы протекторов

$$T = \frac{GN\eta_{II}\eta_{II}}{qI}, \text{ год}$$

$$T = \frac{10 \cdot 3 \cdot 0,95 \cdot 0,4}{3,95 \cdot 0,13} = 22,2, \text{ года}$$

где  $G = 10$  кг – вес протектора;  $q = 3,95$  кг/А·год – теоретический электрохимический эквивалент;  $\eta_{II} = 0,95$  – коэффициент использования протектора;  $\eta_{II} = 0,4$  – КПД протектора определяется в зависимости от анодной плотности тока ( $j = 0,75$  мА/м<sup>2</sup>).

### **Практическое занятие № 6. РАСЧЁТ ЗАЩИТЫ ДНИЩА РЕЗЕРВУАРА ТИПА РВС ГРУППОВОЙ ПРОТЕКТОРНОЙ УСТАНОВКОЙ**

Требуется определить количество протекторов в групповой протекторной установке для защиты днища резервуара типа РВС диаметром  $D$ , м, расположенного на площадке со средним удельным сопротивлением грунтов  $\rho_{ГР}$ , Ом·м. Защитную плотность тока  $j$ , мА/м<sup>2</sup> принять по практическому занятию № 5. Расстояние от протекторной установки до резервуара  $\ell_{PP}$  принять 5 м. Соединительный провод марки ПВ-10. Характеристику протекторов принять по практическому занятию № 4. Схема установки приведена на рис. 6.1. Исходные данные указаны в табл. 6.1.

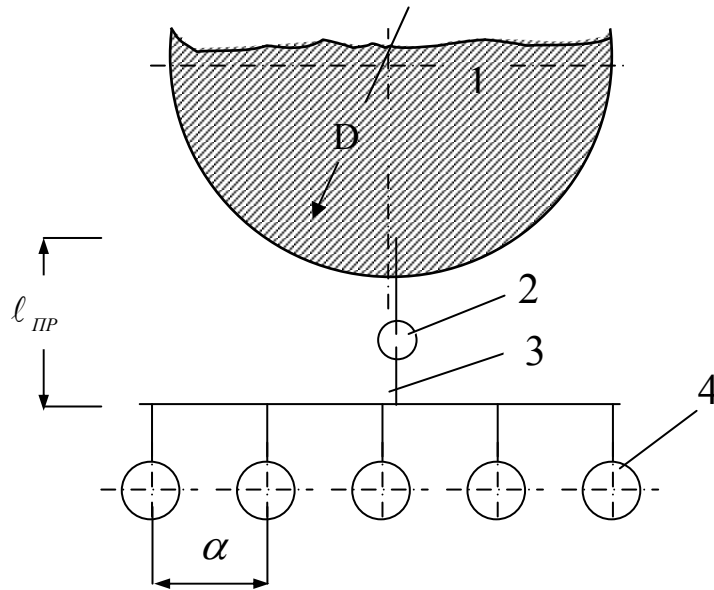


Рис. 6.1. Схема установки:  
 1 – резервуар; 2 – контрольно-измерительная колонка;  
 3 – соединительный провод; 4 – протектор

Таблица 6.1

Исходные данные

№ варианта	$D$ , м	$\rho_{ГР}$ , Ом·м	$j$ , мА/м <sup>2</sup>	$\rho_A$ , Ом·м
1	38	20	1,0	0,5
2	35	20	1,0	0,5
3	40	20	1,0	0,5
4	42	20	1,0	1,0
5	50	20	1,0	1,0
6	34	50	0,5	1,0
7	36	50	0,5	1,5
8	56	50	0,5	1,5
9	34	50	0,5	1,5
10	40	50	0,5	2,0
11	46	75	0,5	2,0
12	64	75	0,75	2,0
13	70	75	0,75	1,5
14	46	75	0,75	1,5
15	60	75	0,75	1,5
16	48	100	0,75	1,0
17	34	100	0,5	1,0
18	46	100	0,5	1,0
19	64	100	0,5	0,5
20	42	100	0,5	0,5

1. Количество протекторов должно быть таким, чтобы обеспечить минимально допустимую плотность защитного тока  $j_n$ , определяемую в зависимости от удельного электрического сопротивления грунта и переходного сопротивления изоляции.

Переходное сопротивление определяется по формуле

$$R_0 = R_{PГ} \cdot F_p, \quad (6.1)$$

где  $R_{PГ}$  – сопротивление на границе «резервуар – грунт», определяемое либо непосредственно с помощью измерителя заземления типа МС-08, либо по приближенной формуле

$$R_{PГ} = \frac{3 \cdot r_{r.sp}}{D_p \cdot (D_p + B)}, \quad (6.2)$$

$F_p$  – площадь днища резервуара диаметром  $D_p$ ;  $B$  – расстояние между протектором и резервуаром (выбирается исходя из местных условий в пределах 5 – 10 м).

Площадь днища резервуара

$$F_p = \frac{\pi \cdot D_p^2}{4}$$

2. Необходимая величина защитного тока определяется по формуле:

$$I_3 = j_n \cdot F_p, \text{ А} \quad (6.3)$$

Резервуар будет полностью защищен от коррозии, если будет выполняться неравенство

$$I_3 \cdot R_{PГ} \leq |E_n| - |E_{есm}| \quad (6.4)$$

Если условие не выполняется, то полная защита резервуара от коррозии с помощью протекторов не может быть осуществлена.

3. Сопротивление растеканию тока с групповой протекторной установки  $R_{ПГ}$

$$R_{ПГ} = \frac{R_n}{N_{П} \cdot \eta_{эн}}, \quad (6.5)$$

где  $R_n$  – сопротивление растеканию одиночного протектора.

Сопротивление растеканию тока с протектора определяется по формуле

$$R_n = \frac{0,366 \cdot \rho_{zp}}{l_A} \cdot \left( \frac{\lg \frac{l_A}{d_A}}{2 \cdot \lg \frac{4 \cdot l_A}{d_A}} \cdot \lg \left[ \frac{4 \cdot l_A^2 (4 \cdot h + l_A)}{d_A^2 \cdot (4 \cdot h - l_A)} \right] + \frac{\rho_A}{\rho_{zp}} \cdot \lg \frac{d_A}{d_{П}} \right), \quad (6.6)$$

где  $\rho_A$  – удельное сопротивление активатора (засыпки).

Ориентировочное число протекторов определяется по формуле

$$N_{\text{ПО}} = \frac{R_{n1} \cdot I_3}{|E_n| - |E_{\text{есм}}| - I_3 \cdot R_{\text{РГ}}}, \quad (6.7)$$

Окончательное число протекторов, необходимых для защиты резервуара, определяется по формуле

$$N_{\text{П}} = \frac{N_{\text{ПО}}}{\eta_{\text{эн}}} \quad (6.8)$$

Коэффициент экранирования  $\eta_{\text{эн}}$  определяется по графику (рис. 4.3) с учетом выражения

$$a = \frac{\pi \cdot (D + l_{\text{ПР}})}{N_{\text{ПО}}}$$

По графику (рис 4.3) определяется и кпд протектора.

Анодная плотность тока определяется по формуле

$$j_a = \frac{10 \cdot I_n}{N_{\text{П}} \cdot d_{\text{П}} (\text{П} \cdot l_{\text{П}} + 1,57 \cdot d_{\text{П}})}, \text{ мА/дм}^2, \quad (6.9)$$

где  $d_n$  – диаметр протектора, м;  $L_n$  – длина протектора, м.

Сила тока протектора определяется по формуле

$$I_{n1} = \frac{|E_n| - |E_{\text{есм}}|}{R_{\text{РГ}} + R_n} \quad (6.10)$$

Обычно определение числа протекторов, необходимых для защиты, производится методом последовательных приближений. Сначала находят ориентировочное число протекторов во всех группах с учетом эффекта экранирования по формуле

$$N_{\text{ПО}} = 1,4 \cdot \frac{I_3}{I_{n1}}, \quad (6.11)$$

Расчетную величину  $N_{\text{ПО}}$  округляют до ближайшего целого числа  $N'_{\text{ПО}}$ . Затем, задав ориентировочное количество протекторов в одной группе  $N_1$ , находят число протекторных установок по зависимости

$$n = \frac{N_{\text{ПО}}}{N_1} \quad (6.12)$$

Сила тока групповой протекторной установки определяется по формуле

$$I_{\text{ПГ}} = n \frac{|E_n| - |E_{\text{есм}}|}{R_{\text{РГ}} + R_{\text{ПГ}}}, \quad (6.13)$$

Уточненное количество протекторов в группе определяется по формуле

$$N_K = \frac{I_3 \cdot N_1}{I_{ПГ} \cdot n} \quad (6.14)$$

Отклонение уточненного количества протекторов от первоначально-го принятого значения должно находиться в пределах 10 %

$$\frac{N_K \cdot N_1}{N_1} \cdot 100 \% < 10 \%$$

Если уточненное количество протекторов в группе отличается от первоначального принятого значения более чем на 10 %, то весь расчет необходимо повторить, задав  $N_1 = N_K$ .

4. Во избежание повреждения изоляционного слоя покрытия солями растворяющегося протектора они должны располагаться на расстоянии

$$y \geq \frac{I_{ПГ} \cdot r_{r.cр}}{2 \cdot \Pi \cdot (u_0 - I_{ПГ} \cdot R_{ПГ})} \geq 3 \text{ м}, \quad (6.15)$$

где  $u_0$  – максимальная наложенная разность потенциалов (для магниевых протекторов  $u_0 = 1,15 \text{ В}$ ).

5. Срок службы протекторной установки определяется по формуле

$$\tau_{ПУ} = \frac{G_{П} \cdot \eta_{П} \cdot N_{П} \cdot \eta_u}{I_{П} \cdot q_{П}}, \quad (6.16)$$

где  $G_{П}$  – масса протектора, кг;  $\eta_{П}$  – коэффициент использования протектора ( $\eta_{П} = 0,95$ );  $\eta_u$  – КПД протектора, определяемый в зависимости от анодной плотности тока;  $q_{П}$  – электрохимический эквивалент материала протектора (для магниевых протекторов  $q_{П} = 3,95 \text{ кг/А} \cdot \text{год}$ ).

Срок службы протекторной установки должен составлять 10 – 15 лет.

### **Пример расчета**

Произведем расчет защиты днища резервуара типа РВС-20000 групповыми протекторными установками.

Используем протекторы ПМ-20. Длина протектора – 800 мм; диаметр – 150 мм; масса – 20 кг.

Рассчитаем площадь днища резервуара через его диаметр

$$F_p = \frac{3,14 \cdot 40^2}{4} = 1256 \text{ м}^2$$

Сопротивление «резервуар – грунт» определим по формуле (6.2)

$$R_{ПГ} = \frac{3 \cdot 20}{40 \cdot (40 + 5)} = 0,033 \text{ Ом}$$

Переходное сопротивление изоляции дна резервуара находим по формуле (6.1)

$$R_0 = 0,033 \cdot 1256 = 41,448 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$$

Принимаем величину защитной плотности тока, соответствующую

$$\rho_{cp} = 20 \text{ Ом} \cdot \text{м}; \quad R_0 = 41,448 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2; \quad j_n = 0,003 \text{ А/м}^2.$$

Необходимая величина защитного тока определяется по формуле

$$I_3 = j_n \cdot F_P.$$

Сила тока, необходимая для защиты резервуара от коррозии

$$I_3 = 0,003 \cdot 1256 = 3,768 \text{ А}.$$

Резервуар будет полностью защищен от коррозии, если выполняется неравенство

$$I_3 \cdot R_{PT} \leq |E_n| - |E_{ecm}|,$$

Если условие не выполняется, то полная защита резервуара от коррозии с помощью протекторов не может быть осуществлена.

Выполним проверку условия (6.4)

$$I_3 \cdot R_{PT} = 3,768 \cdot 0,033 = 0,1243 \text{ В}.$$

Так как  $|E_n| - |E_{ecm}| = 1,7 - 0,55 = 1,15 > 0,1243 \text{ В}$ , то резервуар от коррозии защищен.

Сопротивление растеканию тока с групповой протекторной установки  $R_{III}$

$$R_{III} = \frac{R_n}{N_{II} \cdot \eta_{эн}},$$

где  $R_n$  – сопротивление растеканию с одиночного протектора

Сопротивление растеканию тока с протектора по формуле

$$R_n = \frac{0,366 \cdot \rho_{cp}}{l_A} \cdot \left( \frac{\lg \frac{l_A}{d_A}}{2 \cdot \lg \frac{4 \cdot l_A}{d_A}} \cdot \lg \left[ \frac{4 \cdot l_A^2 (4 \cdot h + l_A)}{d_A^2 \cdot (4 \cdot h - l_A)} \right] + \frac{\rho_A}{\rho_{cp}} \cdot \lg \frac{d_A}{d_{II}} \right),$$

где  $\rho_A$  – удельное сопротивление активатора (засыпки),  $\rho_A = 2,0 \text{ Ом}$ ,  $l_A = 900 \text{ мм}$ ,  $d_A = 250 \text{ мм}$ .

Сопротивление растеканию тока с протектора по формуле (6.6)

$$R_n = \frac{0,366 \cdot 20}{0,9} \cdot \left( \frac{\lg \frac{0,9}{0,25}}{2 \cdot \lg \frac{4 \cdot 0,9}{0,25}} \cdot \lg \left[ \frac{4 \cdot 0,9^2 \cdot (4 \cdot 0,8 + 0,9)}{0,25^2 \cdot (4 \cdot 0,8 - 0,9)} \right] + \frac{2}{20} \cdot \lg \frac{0,25}{0,15} \right) = 4,019 \text{ Ом}$$



Ориентировочное число протекторов находим по формуле (6.7)

$$N_{ПО} = \frac{4,019 \cdot 3,768}{1,7 - 0,55 - 3,768 \cdot 0,033} = 14,7$$

Округляем данное количество до  $N_{ПО} = 15$ .

Окончательное число протекторов, необходимых для защиты резервуара, определяется по формуле

$$N_{П} = \frac{N_{ПО}}{\eta_{эн}}$$

Для ориентировочного количества протекторов по прил. 5 находим коэффициент экранирования  $\eta_{эн}$

$$a = \frac{\pi \cdot (D + l_{ПР})}{N_{ПО}}$$

$$a = \frac{\pi \cdot (40 + 5)}{15} = 9,42$$

$$\eta_{эн} = 0,7$$

Окончательное число протекторов находим по формуле (6.8)

$$N_{П} = \frac{15}{0,7} = 22$$

Определим анодную плотность тока по формуле (6.9)

$$j_a = \frac{10 \cdot 3,768}{22 \cdot 0,15(3,14 \cdot 0,8 + 1,57 \cdot 0,150)} = 4,54 \text{ мА/дм}^2$$

По графику (рис. 4.3) находим КПД протектора  $\eta_{П} = 0,459$ .

Срок службы протекторной установки определяется по формуле

$$\tau_{ПУ} = \frac{G_{П} \cdot \eta_{П} \cdot N_{П} \cdot \eta_u}{I_3 \cdot q_{П}}, \quad (6.16)$$

где  $G_{П}$  – масса протектора, кг;  $\eta_{П}$  – коэффициент использования протектора ( $\eta_{П} = 0,95$ );  $\eta_{П}$  – КПД протектора, определяемый в зависимости от анодной плотности тока;  $q_{П}$  – электрохимический эквивалент материала протектора (для магниевых протекторов  $q_{П} = 3,95 \frac{\text{кг}}{\text{А} \cdot \text{год}}$ ).

Срок службы протекторов находим по формуле (6.16)

$$\tau_{ПУ} = \frac{10 \cdot 41 \cdot 0,95 \cdot 0,459}{3,768 \cdot 3,95} = 12,01 \text{ лет.}$$

## **Лабораторная работа № 1.** **ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРОЗИОННОЙ АКТИВНОСТИ ГРУНТА**

**Цель работы:** освоение методики определения удельного сопротивления грунта, приобретение навыков инструментального замера его величины; исследование зависимости коррозионной активности от вида грунта.

### **ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ**

Основные факторы, определяющие коррозионную активность грунта:

- состав и концентрация входящих веществ;
- влажность;
- характер проникновения воздуха;
- структура;
- наличие бактерий, активизирующих развитие процессов коррозии;
- температура и удельное сопротивление.

Из известных грунтов наибольшей коррозионной активностью обладают глинистые, песчаные, торфянистые и др. Состав и концентрация веществ, растворимых в грунте, определяют свойства почвенного электролита. В значительной мере степень коррозионной активности грунта определяется величиной рН, от которой зависит плотность пленок, возникающих на поверхности металла.

Опасность коррозии зависит от насыщения грунта водой. Наиболее сильная коррозия происходит в грунте, имеющем влажность 30 %. Это обусловлено более быстрой диффузией кислорода в грунтах, не насыщенных водой, т.е. при рыхлых и пористых, тогда как при влажности больше 30 % кислород быстро растворяется и скорость диффузии его замедляется.

Процесс коррозии в грунте развивается быстро при проникновении воздуха, так как кислород воздуха способствует микробиологическим процессам. Размеры частиц грунта влияют на его воздухопроницаемость. Песчаные грунты вследствие высокой воздухопроницаемости обладают обычно окислительными свойствами, а глинистые – восстановительными. В результате неравномерного проникновения воздуха к трубе по её длине возникают гальванические пары. Катодными участками этих пар, как правило, будут хорошо аэрируемые участки, а анодными – мало аэрируемые.

Удельное сопротивление грунта обуславливается содержанием в нем влаги и солей. Кроме того, оно зависит от величины и состава частиц грунта.

Однако полная характеристика коррозионного процесса не всегда может быть дана на основе анализа удельного сопротивления грунта. Так,

коррозия стальных или свинцовых конструкций в песчаных грунтах, обладающих высоким удельным сопротивлением, должна быть малой, а в грунтах с низким удельным сопротивлением – большой. Однако свинец корродирует слабее в грунтах с малым удельным сопротивлением вследствие образования на его поверхности довольно устойчивой пленки из солей.

Таким образом, интенсивность коррозии зависит от всех рассмотренных выше факторов, которые могут проявляться как отдельно, так и в совокупности.

Экспериментально установим зависимость удельного сопротивления грунта от типа грунта и рассмотрим, как это влияет на степень его коррозионной активности.

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ**

**Приборы и материалы:** прибор М416; разные виды грунта; три стальных электрода; соединительные провода.

### **МЕТОДИКА РАБОТЫ С ПРИБОРОМ М416**

Измеритель сопротивления заземления М416 предназначен для измерения удельного сопротивления грунта.

Предел измерения от 0,1 до 1000 Ом

Прибор имеет четыре диапазона измерения:

0,1 – 10 Ом; 0,5 – 50 Ом; 2 – 200 Ом; 10 – 1000 Ом.

На лицевой панели прибора расположены органы управления: ручка переключателя пределов и реохорда, кнопка включения, четыре зажима для подключения измеряемого объекта.

При подготовке прибора к работе установите прибор на ровной поверхности. Откройте крышку. Установите переключатель в положение «КОНТРОЛЬ 5 Ω», нажав кнопку, и вращением ручки «РЕОХОРД», добейтесь установления стрелки индикатора на нулевую отметку. На шкале реохорда при этом должно быть показание  $5 \pm 0,3$  Ом. Прибор рассчитан для работы при напряжении источника питания от 3,8 до 4,8 В.

### **ПОРЯДОК РАБОТЫ**

Определение удельного сопротивления грунта проводится по схеме, изображенной на рис. 1.1.

К зажимам 1 присоединяются электроды 2 в виде металлических стержней.

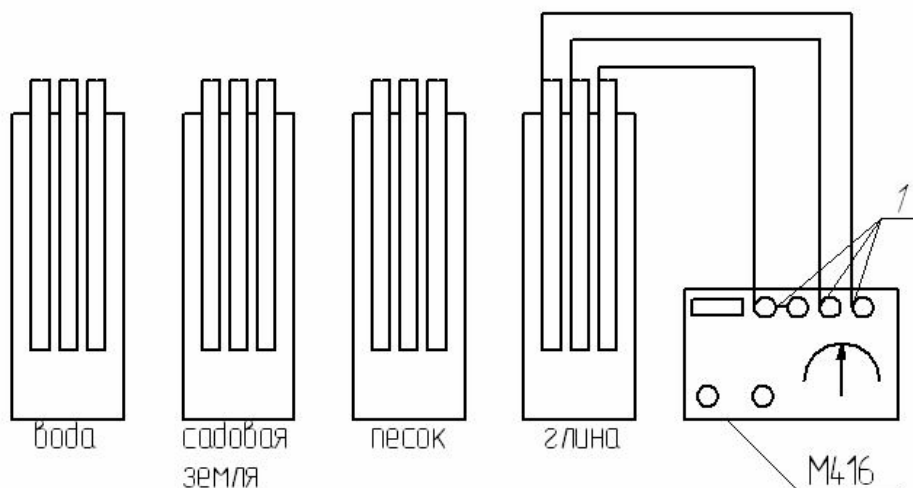


Рис. 1.1 Схема замера удельного сопротивления грунта

Удельное сопротивление измеряется для четырех видов грунта.

Измерение проводится в следующем порядке:

- а) переключатель В1 установите в положение «х1»;
- б) нажмите кнопку и, вращая ручку «РЕОХОРД», добейтесь максимального приближения стрелки индикатора к нулю;
- в) результат измерения равен произведению показания шкалы реохорда на множитель. Если измеряемое сопротивление окажется больше 10 Ом, переключатель установите в положение «х5», «х20» или «х100» и повторите операцию «б». Результат измерения равен произведению показателя шкалы на соответствующий множитель.

Удельное сопротивление грунта на глубине забивки трубы подсчитывается по формуле

$$\rho = 2,73R \frac{L}{\lg \frac{4L}{d}}, \text{ Ом}\cdot\text{м}, \quad (1.1)$$

где  $R$  – сопротивление, измеренное измерителем заземления, Ом;  $L$  – глубина забивки трубы, м;  $d$  – диаметр трубы, м.

Результаты измерений необходимо занести в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Замеры удельного сопротивления грунтов

№ п/п	Вид грунта	Глубина заложения $L$ , м	Диаметр электрода $d$ , м	Сопротивление $R$ , Ом	Удельное сопротивление $\rho$ , Ом·м	Степень коррозионной активности
1	Вода					
2	Песок					
3	Садовая земля					
4	Глина					

В зависимости от измеренного удельного сопротивления грунта определяем по табл. 1.2 степень коррозионной активности.

Таблица 1.2

Степень коррозионной активности грунта

Удельное сопротивление грунта $\rho$ , Ом·м	Степень коррозионной активности грунта
более 100	низкая
100 – 20	средняя
20 – 10	повышенная
10 – 5	высокая
менее 5	особо высокая

На основании полученных данных сделайте вывод.

## **Лабораторная работа № 2. ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ КОРРОЗИИ МЕТАЛЛОВ**

**Цель работы:** определение потенциала металлов. Изучение закона Фарадея, выбор металла протектора.

### **ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ**

Большинство наземных и все подземные металлические сооружения корродируют по электрическому механизму с образованием на поверхности их микро- и макрогальванических пар.

Характер работы гальванических элементов определяется физико-химическими процессами, происходящими между металлом и средой, окружающей его, а также с природой самого металла. Ознакомимся с некоторыми понятиями (например, электролит, потенциал, поляризация, активность металлов и др.), характеризующими процесс электрохимической коррозии.

Электрохимическая коррозия – самопроизвольное разрушение металлических материалов в результате физико-химического взаимодействия их с окружающей средой.

Этот вид коррозии наиболее распространен и наблюдается при взаимодействии металлов с жидкими электролитами: водой, водными растворами солей, кислот и щелочей, расплавленными солями и щелочами.

При погружении электролита, выполненного из любого металла, в раствор электролита на границе между поверхностью их соприкосновения возникает определенная разность потенциалов, которая связана с образованием двойного электрического слоя. Двойной электрический слой – это поверхность раздела между электродом и электролитом, в котором металл заряжается отрицательно, а раствор – положительно.

Обозначим потенциал металла  $V_{me}$ , а потенциал раствора  $V_p$ . Разность потенциалов в двойном электрическом слое  $V_{me} - V_p$  носит название электродного потенциала металла. Потенциал металла, опущенного в нормальный раствор собственной соли, носит название нормального потенциала металла.

Практически потенциал металла измерить нельзя. Поэтому измеряют ЭДС гальванического элемента, в котором одним из электродов является интересующий нас металл, а вторым – электрод сравнения. За электрод сравнения принят стандартный водородный электрод, потенциал которого условно принят равным нулю (рис. 2.1).

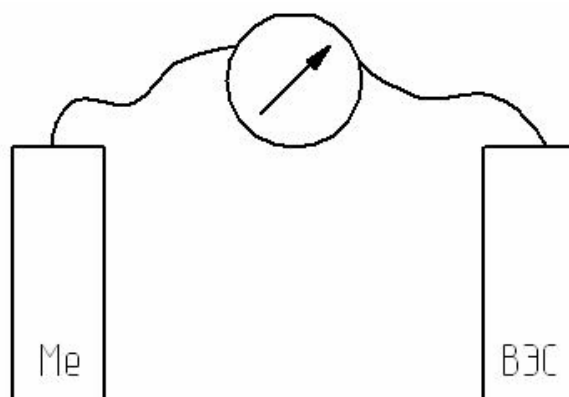


Рис. 2.1. Потенциальная схема измерения нормального сопротивления материала

Водородный электрод сравнения представляет собой платиновую пластинку, погруженную в сосуд с раствором серной кислоты. В сосуд подается водород, который частично поглощается пластиной и адсорбируется на ней. Поглощенный водород ведет себя как металл, отдавая свои ионы в раствор.

Нормальные потенциалы всех металлов измерены и составлен электрохимический ряд напряжений, в котором металл с более электроотрицательным потенциалом (стоящим слева в ряду) является анодом по отношению к правостоящему металлу, который, является катодом (табл. 2.1.).

Таблица 2.1

## Электрохимический ряд напряжений некоторых элементов

Электродный процесс	$\varphi$ , В	Электродный процесс	$\varphi$ , В
Na/Na <sup>+</sup>	-2,710	Pb/Pb <sup>+2</sup> +2e	-0,126
Mg/Mg <sup>2+</sup> +2e	-2,363	H <sub>2</sub> /2H <sup>+</sup> +2e	0,000
Al/Al <sup>3+</sup> +3e	-1,663	Sn <sup>2</sup> /Sn <sup>4+</sup> +2e	0,130
Mn/Mn <sup>2+</sup> +2e	-1,180	Cu/Cu <sup>2+</sup> +2e	0,340
Zn/Zn <sup>2+</sup> +2e	-0,761	Fe <sup>2</sup> /Fe <sup>3+</sup> +e	0,770
Fe/Fe <sup>2+</sup> +2e	-0,440	Ag/Ag <sup>+</sup> +e	0,800
Ni/Ni <sup>2+</sup> +2e	-0,230	Pt/Pt <sup>2+</sup> +2e	1,188
Sn/Sn <sup>2+</sup> +2e	-0,140	Au/Au <sup>+</sup> +e	1,691

Практически было установлено, что потенциалы металлов, нагруженных электрическим током, отличаются от потенциалов металлов, не нагруженных электрическим током. Потенциал анода при замыкании гальванической цепи смещается в более электроположительную сторону, а потенциал катода – в более электроотрицательную. Такой потенциал носит название поляризации анода и катода.

Причины поляризации:

а) анодной – отставание скорости перехода ионов металла в раствор от скорости электронов во внешней цепи;

– отставание скорости диффузии (металла в глубь раствора) от перетока электронов;

– возникновение на металле окисной пленки, которая препятствует переходу ионов металла в раствор; при этом потенциал анода смещается в сторону более положительных значений;

б) катодной – отставание скорости диффузии деполяризаторов ( $Me^+$ ,  $H^+$ ,  $O_2$ ) из объема электролита к катодной поверхности от скорости накопления электродов на катоде.

– замедленность катодной деполяризационной реакции  $O + ne = [O_{ne}]$ , которая приводит к смещению потенциалов анода в более отрицательную сторону (рис. 2.2).

Таким образом, поляризация уменьшает скорость коррозии, т. к. сила тока в цепи коррозионного гальванического элемента уменьшается.

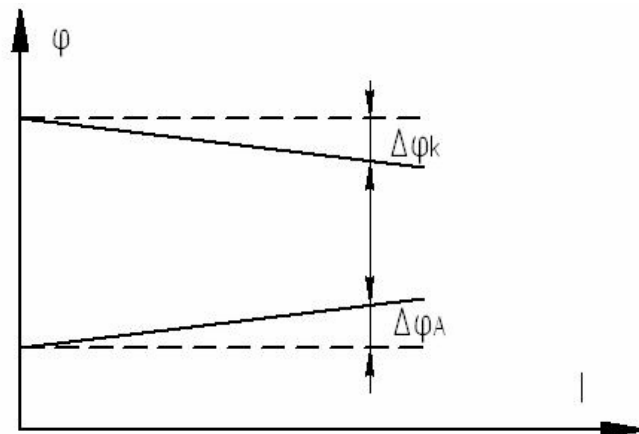


Рис. 2.2. Поляризационные кривые:  
 $\Delta\varphi_K$  – поляризуемость катода;  $\Delta\varphi_A$  – поляризуемость анода;  
 $I$  – сила тока

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### Описание установки:

Лабораторная установка для определения потенциалов металла и коррозионных процессов состоит из стеклянной емкости с водой 1, в которой установлены электроды Zn, Fe, Cu в виде пластинок и медно-сульфатный электрод сравнения (МСЭ).

Для измерения потенциала металла и силы тока используется милливольтамперметр.

### ПОРЯДОК РАБОТЫ

Собрать лабораторную установку согласно схеме, приведенной на рис. 2.3.

Очистить электроды от грязи и продуктов коррозии.

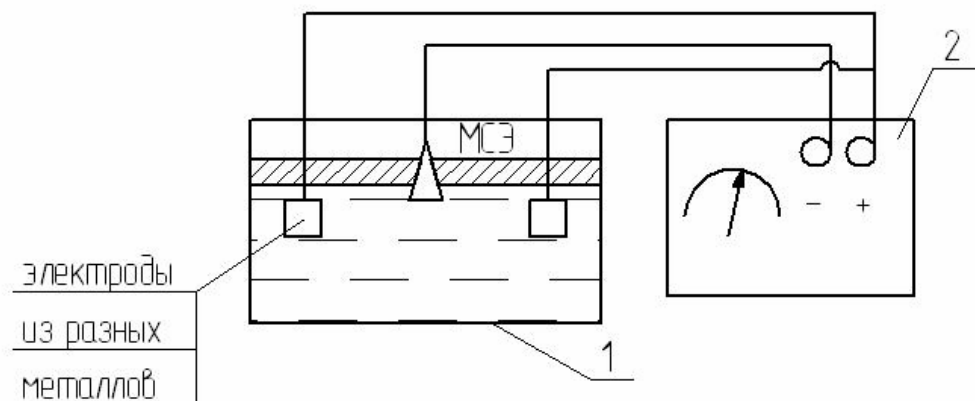


Рис. 2.3. Принципиальная схема лабораторной установки



Установить электроды, а также МСЭ в емкость с водой (см. рис. 2.3).

Для измерения потенциалов металлов необходимо составить гальваническую пару, в которой одним электродом будет один из трех металлов (Zn, Cu, Fe), вторым – МСЭ.

Для измерения потенциала каждой пары подключить клемму МСЭ к отрицательной клемме милливольтметра, а металлического электрода – к положительной клемме.

По значениям потенциалов электродов составить электрохимический ряд напряжений и оценить их коррозионную активность.

Составить гальванические пары Zn/Fe, Fe/Cu, Cu/Zn. Затем (по очереди) подключить к клемме милливольтметра и определить силу тока и его направление.

По полученным результатам (для каждой пары) определить, какой из металлов будет выполнять функцию анода, а какой – катода.

По величине тока (для каждой пары) определить время полного разрушения электрода-анода (вес анода устанавливается преподавателем) по формуле

$$\tau = \frac{Q \cdot n \cdot F}{A \cdot I}, \text{ с} \quad (2.1)$$

где  $Q$  – вес анода;  $n$  – валентность металла-анода;  $F = 96500 \text{ k}$  (число Фарадея);  $A$  – атомная масса металла-анода, г/моль;  $I$  – значение силы тока данной пары, А.

Полученные результаты и наблюдения записываются в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Значения потенциала электродов и силы тока гальванических пар

Результаты измерения						
потенциалов			токов			
наименование электр.	значение потенциала	сравнительная коррозионная активность*	гальванические пары	значение силы тока	направление тока	время разрушения анода, мин
Zn			Zn/Cu			
Fe			Cu/Zn			
Cu			Fe/Zn			

\* оценка активная, малоактивная, неактивная.

### Оформление работы:

1. Составить конспект работы.
2. Зарисовать схему лабораторной установки.
3. Сделать выводы о проделанной работе.

## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Виды коррозии. Сформулируйте механизм химической и электрохимической коррозии.
2. Какие жидкости являются электролитами для подземных сооружений?
3. Расскажите о механизме возникновения двойного электрического слоя.
4. Дать определение электродного, нормального естественного потенциала металла.
5. Как определяется нормальный электродный потенциал? Написать закон Фарадея.
6. Объясните, почему железо сильно корродирует, а золото – нет?
7. Имеются гальванические пары Zn/Cu, Cu/Fe, Mg/Au, Ni/Fe. Определите, какой из материалов каждой пары является анодом.
8. Нарисуйте и объясните работу гальванического элемента.

### Лабораторная работа № 3.

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ УЧАСТКА ТРУБОПРОВОДА, ЗАЩИЩАЕМОГО СТАНЦИЕЙ КАТОДНОЙ ЗАЩИТЫ

**Цель работы:** определить длину защитной зоны трубопровода при катодной защите магистральных трубопроводов.

В ходе работы студент знакомится с особенностями устройства и эксплуатации станции катодной защиты.

#### ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Основным принципом катодной защиты является катодная поляризация защищаемой поверхности с приданием ей отрицательного потенциала относительно окружающей среды при помощи какого-либо внешнего источника постоянного тока.

Принципиальная схема катодной защиты приведена на рис. 3.1.

Положительный полюс источника постоянного тока 4 присоединяется к специальному металлическому заземлению 5 (аноду) с помощью дренажного кабеля 3, а отрицательный полюс – к защищаемому трубопроводу 1 в дренажной точке 2 (точке присоединения соединительного кабеля).

Таким образом, защищаемое сооружение становится катодом, а металлическое заземление – анодом. Анод разрушается, в то время как трубопровод остается защищенным. О степени защищенности подземного металлического трубопровода судят по величине наложенной разности потенциалов труба – грунт.

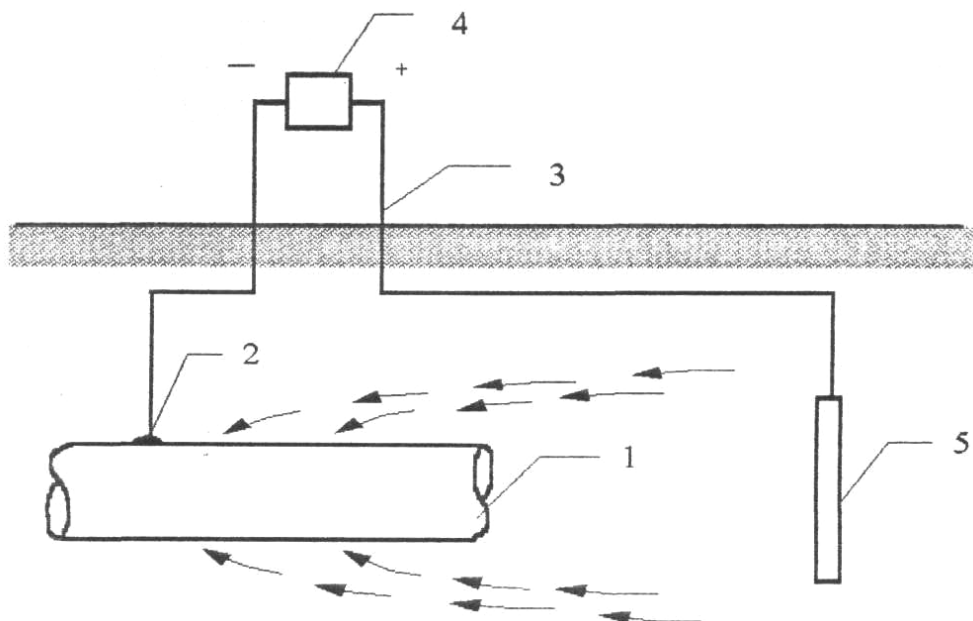


Рис. 3.1. Принципиальная схема катодной защиты магистральных трубопроводов

Величина наложенной разности потенциалов труба-грунт равна

$$U_H = U_X^{CKЗ} - U_X \quad (3.1)$$

где  $U_H$  – величина наложенной разности потенциалов труба – грунт в рассматриваемой точке защищаемого трубопровода, измеренная относительно медно-сульфатного поляризующего электрода сравнения (МСЭ);  $U_X^{CKЗ}$  – величина разности потенциалов труба – грунт, измеренная в той же точке трубопровода при включенной станции катодной защиты относительно того же медно-сульфатного электрода сравнения;  $U_X$  – естественная разность потенциалов труба – грунт, измеренная в точке X без включенной станции катодной защиты, относительно той же МСЭ.

Изменение величины наложенной разности потенциалов труба – грунт защищаемого магистрального трубопровода различно для случая, когда имеет место отдельная одиночная станция на защищаемом трубопроводе и когда на трубопроводе расположено рядом несколько станций катодной защиты.

При отдельно расположенной станции катодной защиты на магистральном трубопроводе, которая создает так называемый защищаемый участок «бесконечной длины», изменение наложенной разности потенциалов труба – грунт вдоль защищаемого трубопровода происходит до экспоненциальной зависимости, как показано на рис. 3.2.

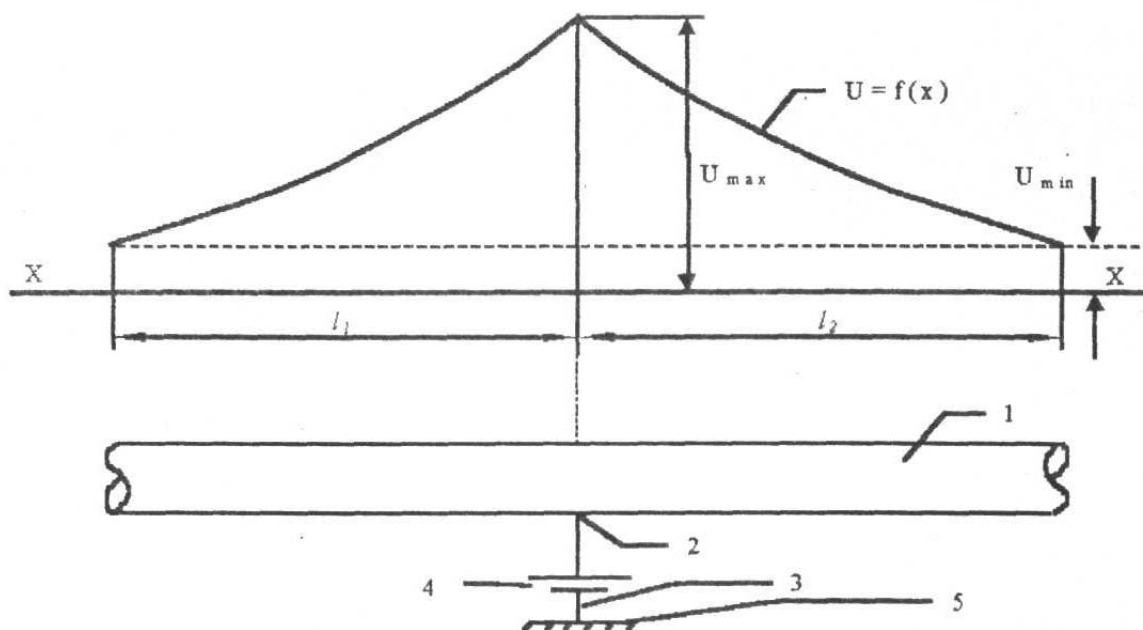


Рис. 3.2. График изменения кривой наложенной разности потенциалов для участка «бесконечной длины» (обозначения те же, что и на рис.3.1)

Для участка «бесконечной длины» кривая изменения наложенной разности потенциалов от максимального своего значения в точке дренажа 2, достигнув своего минимального значения в точке 1, продолжает снижаться, асимптотически приближаясь к нулю в бесконечности, откуда и происходит название этого случая.

Другой случай имеет место, когда рядом, вдоль защищаемого трубопровода, расположено несколько станций катодной защиты, каждая из которых влияет на распределение потенциала соседней станции, заметно сокращая непроизводительные расходы тока. График изменения наложенной разности потенциалов представлен на рис. 3.3. В этом случае кривая распределения потенциалов определяется линией гиперболического косинуса. Этот участок в отличие от первого носит название участка «конечной длины». Две встречные цепи тока как бы «отжимают» обратно ток, распределяемый с соседней станции.

В лабораторной работе рассмотрен только первый случай, для которого наложенный потенциал в любой точке защищаемого участка определяется по формуле

$$U_{HX} = U_{\max} \cdot e^{-kX}, \quad (3.2)$$

где  $U_{HX}$  – наложенная разность потенциалов в рассматриваемой точке на расстоянии  $X$  от точки дренажа относительно МСЭ;  $U_{\max}$  – максимально на-

ложенная разность потенциалов в точке дренажа также относительно МСЭ;  
 $k$  – коэффициент затухания наложенной разности потенциалов

$$k = \sqrt{\frac{R_{TP}}{R_{ИЗ}}}, \quad (3.3)$$

где  $R_{TP}$  – продольное сопротивление единицы длины трубопровода

$$R_{TP} = \rho \cdot \frac{1}{S} = \rho \cdot \frac{4}{\pi \cdot D^2}; \quad (3.4)$$

$\rho$  – удельное электрическое сопротивление материала трубопровода,  
 $\rho = 0,245 \text{ (Ом} \cdot \text{мм}^2\text{)}/\text{м}$ ;  $D$  – внешний диаметр трубопровода;  $R_{ИЗ}$  – сопротивление единицы длины изоляционного покрытия

$$R_{ИЗ} = \rho_{ИЗ} \cdot \frac{\delta_{ИЗ}}{\pi \cdot D_{ИЗ}} \quad (3.5)$$

$\rho_{ИЗ}$  – удельное электрическое сопротивление материала изоляционного покрытия;  $\delta_{ИЗ}$  – толщина слоя изоляционного покрытия;  $D_{ИЗ}$  – средний диаметр изоляционного покрытия.

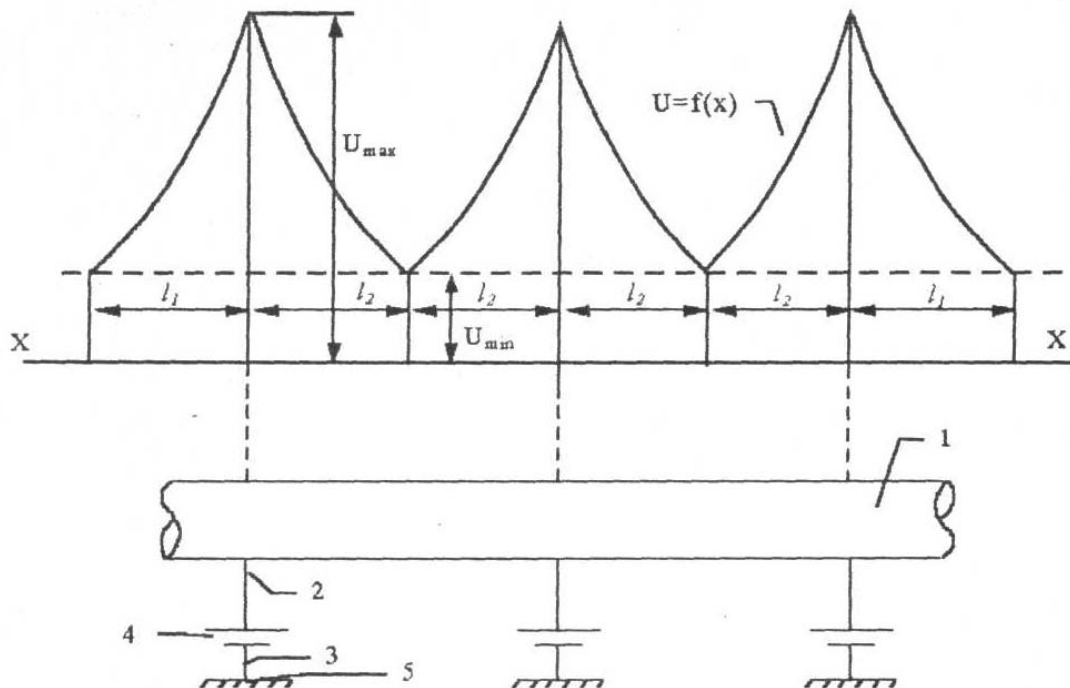


Рис. 3.3. График изменения кривой наложенной разности потенциалов для участка «конечной длины»

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### Приборы и материалы:

1. Модель трубопровода в среде электролита.
2. Катодная станция сетевая СКЗТ-3000.
3. Милливольтамперметр М-231 или прибор УКИГС-56.
4. Медно-сульфатный неполяризующийся электрод сравнения.

### ПОРЯДОК РАБОТЫ

Работа проводится путем измерения потенциала труба – грунт на модели трубопровода (рис. 3.3).

Трубопровод 1, выполненный в виде провода высокого омического сопротивления, укреплен в ящике из плексигласа, в который залита водопроводная вода, имитирующая электролит.

Трубопровод оборудован сетевой катодной станцией 4, подключаемой к сети переменного тока с напряжением 220 В. Отрицательный полюс сетевой катодной станции подключен в точке дренажа 2 к трубопроводу, а положительный – к анодному заземлению 5, выполненному из медной пластины и погруженной в раствор электролита.

На трубопроводе имеется пять выводов 8, расположенных на различных расстояниях  $x$  от точки дренажа, в которых с помощью милливольтамперметра 7 и медно-сульфатного электрода 6 измеряется потенциал труба – грунт.

Сначала измеряется естественный потенциал труба – грунт (как при прямом ходе, так и при обратном) без включенной станции катодной защиты  $U_K^0$ . Затем включается станция катодной защиты и вновь в тех же точках измеряется потенциал труба – грунт  $U_K^{CKЗ}$  (измерение производят также дважды, как при прямом ходе, так и при обратном). Результаты измерений записываются в табл. 3.1, после чего вычисляются среднеарифметические значения потенциалов труба – грунт  $U_K^0$  и  $U_K^{CKЗ}$ .

На миллиметровой бумаге в системе координат  $(U, x)$  по полученным значениям строится график наложенного потенциала и проводится прямая естественного потенциала. Отмечается точка их пересечения, которая и символизирует границу защитной зоны станции катодной защиты.

Результаты работы оформляются каждым студентом в специальной тетради (табл. 3.1).

Таблица 3.1

## Результаты выполненных измерений и вычислений

Расстояние от точки дренажа $x$ , см	Результаты измерений				Среднее значение $U_{ХСР}^E$ , В	Среднее значение $U_{ХСР}^{СКЗ}$ , В	Наложённая разность потенциалов труба – грунт $U_{HX} = U_X^{СКЗ} - U_X^E$
	при прямом ходе		при обратном ходе				
	показание прибора $U_X^E$ , В	показание прибора $U_X^{СКЗ}$ , В	показание прибора $U_X^E$ , В	показание прибора $U_X^{СКЗ}$ , В			
0							
30							
60							
90							
120							
150							

**Лабораторная работа № 4.**  
**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ЗАТУХАНИЯ**  
**НАЛОЖЕННОГО ПОТЕНЦИАЛА ПРИ КАТОДНОЙ ЗАЩИТЕ**  
**МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ**

**Цель работы:** определить коэффициент затухания наложенного потенциала при катодной защите магистральных трубопроводов.

В ходе работы студент знакомится с особенностями устройства и эксплуатации катодной защиты

### ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Основным принципом катодной защиты является катодная поляризация защищаемой поверхности с приданием ей отрицательного потенциала относительно окружающей среды при помощи какого-либо внешнего источника постоянного тока.

Модель трубопровода в среде электролита приведена на рис. 4.1.

Положительный полюс источника постоянного тока 4 присоединяется к специальному металлическому заземлению 5 (аноду) с помощью дренажного кабеля 3, а отрицательный полюс – к защищаемому трубопроводу 1 в дренажной точке 2 (точке присоединения соединительного кабеля).

Таким образом, защищаемое сооружение становится катодом, а металлическое заземление анодом. Анод разрушается, в то время как трубопровод остается защищенным. О степени защищенности подземного металлического трубопровода судят по величине наложенной разности потенциалов труба – грунт.

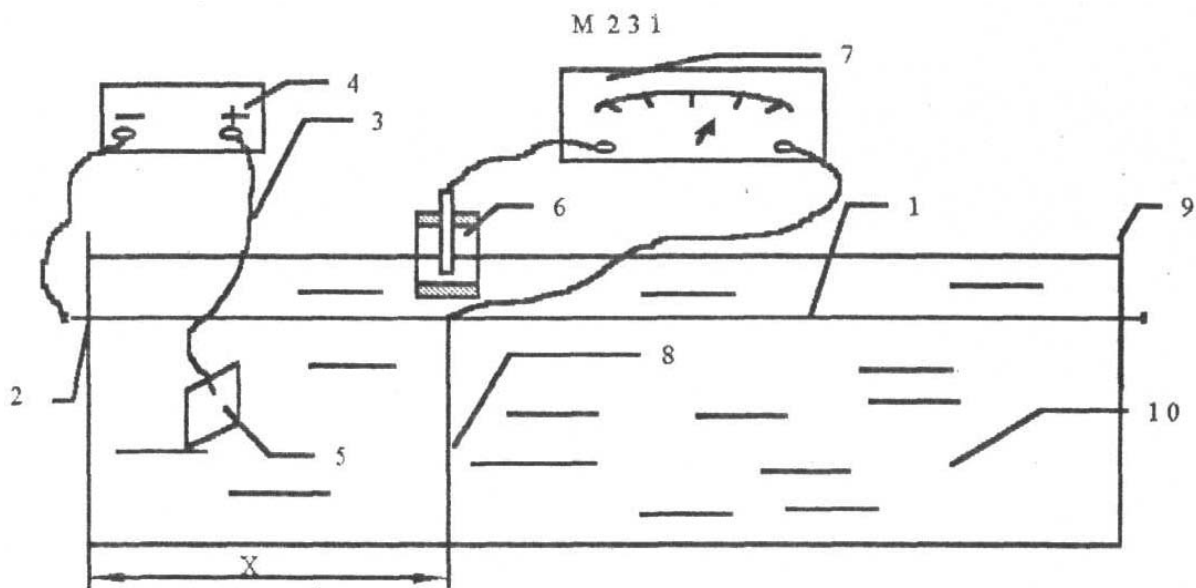


Рис. 4.1. Модель трубопровода в среде электролита:  
 1 – защищаемый трубопровод; 2 – точка дренажа; 3 – соединительный (дренажный) кабель;  
 4 – станция катодной защиты; 5 – анодное заземление; 6 – медно-сульфатный неполяризующийся электрод; 7 – миллиамперметр; 8 – место измерения наложенного потенциала; 9 – ящик из плексигласа; 10 – раствор электролита

Величина наложенной разности потенциалов труба – грунт равна

$$U_H = U_X^{CKЗ} - U_X, \quad (4.1)$$

где  $U_H$  – величина наложенной разности потенциалов труба – грунт в рассматриваемой точке защищаемого трубопровода, измеренная относительно медно-сульфатного электрода сравнения;  $U_X^{CKЗ}$  – величина разности потенциалов труба – грунт, измеренная в той же точке трубопровода при включенной станции катодной защиты относительно того же медно-сульфатного электрода сравнения;  $U_X$  – естественная разность потенциалов труба – грунт, измеренная в точке X без включенной станции катодной защиты относительно той же установки МСЭ.

Наложённый потенциал в любой точке защищаемого участка трубопровода определяется по формуле

$$U_{HX} = U_{\max} \cdot e^{-kX} \quad (4.2)$$

где  $U_{HX}$  – наложенная разность потенциалов в рассматриваемой точке на расстоянии X от точки дренажа относительно МСЭ;  $U_{\max}$  – максимальная наложенная разность потенциалов в точке дренажа также относительно МСЭ; k – коэффициент затухания наложенной разности потенциалов



$$k = \sqrt{\frac{R_{TP}}{R_{ИЗ}}}, \quad (4.3)$$

где  $R_{TP}$  – продольное сопротивление единицы длины трубопровода

$$R_{TP} = \rho \cdot \frac{1}{S} = \rho \cdot \frac{4}{\pi \cdot D^2}; \quad (4.4)$$

$\rho$  – удельное электрическое сопротивление материала трубопровода

$$\rho = 0,245 \text{ (Ом} \cdot \text{мм}^2\text{)/м};$$

$D$  – внешний диаметр трубопровода;  $R_{ИЗ}$  – сопротивление единицы длины изоляционного покрытия

$$R_{ИЗ} = \rho_{ИЗ} \cdot \frac{\delta_{ИЗ}}{\pi \cdot D_{ИЗ}}, \quad (4.5)$$

$\rho_{ИЗ}$  – удельное электрическое сопротивление материала изоляционного покрытия;  $\delta_{ИЗ}$  – толщина слоя изоляционного покрытия;  $D_{ИЗ}$  – средний диаметр изоляционного покрытия.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### Приборы и материалы:

1. Модель трубопровода в среде электролита.
2. Катодная станция сетевая СКЗТ-3000.
3. Милливольтамперметр М-231 или прибор УКИГС-56.
4. Медно-сульфатный неполяризующийся электрод сравнения.

## ПОРЯДОК РАБОТЫ

В работе проводится измерение потенциала труба – грунт на модели трубопровода (см. рис. 4.1).

Трубопровод 1, выполненный в виде проводки высокого омического сопротивления, укреплен в ящике из плексигласа, в который залита водопроводная вода, имитирующая электролит.

Трубопровод оборудован сетевой катодной станцией 4, подключаемой к сети переменного тока с напряжением 220 В. Отрицательный полюс сетевой катодной станции подключен в точке дренажа 2 к трубопроводу, а положительный – к анодному заземлению 5, выполненному из медной пластины и погруженному в раствор электролита.

На трубопроводе имеется пять выводов 8, расположенных на различных расстояниях  $X$  от точки дренажа, в которых с помощью милливольтметра 7 и медно-сульфатного электрода 6 измеряется потенциал труба – грунт.

Сначала измеряется естественный потенциал труба – грунт (как при прямом ходе, так и при обратном) без включенной станции катодной защиты  $U_K^0$ . Затем включается станция катодной защиты и вновь в тех же точках измеряется потенциал труба – грунт  $U_K^{CK3}$  (измерение производят так же дважды, как при прямом ходе, так и при обратном). Результаты измерений записывают в табл. 4.1, после чего вычисляют среднеарифметические значения потенциалов труба – грунт  $U_K^0$  и  $U_K^{CK3}$ .

### ОФОРМЛЕНИЕ РАБОТЫ

Величина коэффициента затухания подсчитывается по формуле

$$k = \frac{1}{X} \cdot 2,3 \cdot \lg \frac{U_{\max}}{U_{HX}}, \quad (4.6)$$

где  $U_{\max}$  – величина наложенной разности потенциалов в точке дренажа 2. Величина  $k$  определяется для каждой из пяти точек, после чего вычисляется среднее значение  $k$ .

После определения величины  $k$  для каждого участка из формулы

$$k = \sqrt{\frac{R_{TP}}{R_{ИЗ}}}$$

определяется также значение  $R_{ИЗ}$  для каждого участка и величина  $R_{ИЗ}$  средняя. Результаты работы оформляются каждым студентом в специальной тетради (табл. 4.1).

Таблица 4.1

Результаты выполненных измерений и вычислений

Расстояние от точки дренажа $x$ , см	Результаты измерений				Среднее значение $U_{Xcp}^E$ , В	Среднее значение $U_{Xcp}^{CK3}$ , В	Наложённая разность потенциалов труба – грунт $U_{HX} = U_X^{CK3} - U_X^E$
	при прямом ходе		при обратном ходе				
	показание прибора $U_X^E$ , В	показание прибора $U_X^{CK3}$ , В	показание прибора $U_X^E$ , В	показание прибора $U_X^{CK3}$ , В			
0							
30							
60							
90							
120							
150							

## Лабораторная работа № 5. ПРОТЕКТОРНАЯ ЗАЩИТА МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

**Цель работы:** изучить защитное действие гальванических анодов (протекторов) при электрохимической коррозии магистральных трубопроводов.

### ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Протекторная защита (при помощи гальванических средств) является одной из разновидностей катодной защиты. Ее существенной особенностью является отсутствие в защитной системе специального источника постоянного тока. Необходимый для осуществления защиты ток получается путем создания гальванического элемента, в котором роль катода выполняет металл защищаемого сооружения, а роль анода – более электроотрицательный металл, чем защищаемый. Принципиальная схема протекторной защиты приведена на рис. 5.1.

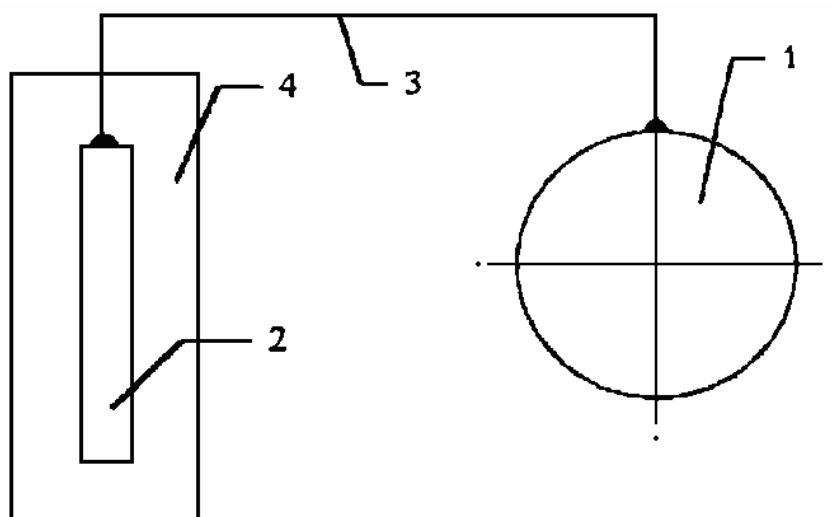


Рис. 5.1. Схема протекторной защиты магистральных газопроводов:  
1 – защищаемый трубопровод; 2 – протектор; 3 – соединительный изолированный кабель;  
4 – слой активатора

При протекторной защите магистральных трубопроводов энергоотдача в гальваническом элементе (труба – протектор) сравнительно невелика, благодаря чему гальванические аноды приходится часто располагать вдоль защищаемого трубопровода.

Как следует из принципа протекторной защиты, в качестве материалов для анодов, образующих с защищаемым металлом гальванический элемент, могут быть взяты металлы более электроотрицательные, чем защищаемый.

Широкое применение в протекторной защите магистральных трубопроводов получили металлы: цинк, магний, алюминий и их сплавы. Характеристика этих металлов приведена в табл. 5.1.

Распространение получили протекторы МГА-1, 2, 3, 4, 6, 7, 8.

Таблица 5.1

Основные физико-химические свойства магния, цинка, алюминия и железа

Показатели	Магний	Цинк	Алюминий	Железо
Атомный вес	24,32	65,38	26,97	55,83
Валентность	2	2	3	2 и 3
Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,74	7,10	2,70	7,87
Температура плавления, °С	650	420	659	1599
Электрохимический эквивалент, а·ч/кг	2200	820	2980	960
Нормальный потенциал металла С (по водородному электроду), В	-2,34	-0,76	-1,67	-0,44

Эксплуатация гальванических анодов показала, что на их поверхности во многих случаях образуются защитные пленки, снижающие их электродный потенциал, из-за чего резко снижается их защитное действие. Для устранения этого недостатка гальванические аноды окружают слоем активатора, представляющего из себя сплав сернокислых солей магния, натрия, кальция и глины.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### Приборы и материалы:

1. Модель трубопровода, оборудованного протекторной защитой (рис. 5.2).
2. Милливольтамперметр М-231 (или прибор УКИП-56).
3. Медно-сульфатный неполяризуемый электрод.

## ПОРЯДОК РАБОТЫ

Работа проводится в несколько этапов.

1. Определяется естественный потенциал труба – грунт на расстоянии  $X$  от протектора (таких точек 5). На данном этапе протекторы должны быть вынуты из плексигласового ящика.

2. В плексигласовый ящик опускается только один левый протектор, после чего производится замер потенциала труба – земля в тех же точках, что и в первом случае.

3. Левый протектор из плексигласового ящика вынимается, а опускается правый протектор и вновь в тех же точках производится замер потенциала труба – грунт.

4. Опускаются оба протектора, и снова производится замер потенциала труба – грунт.

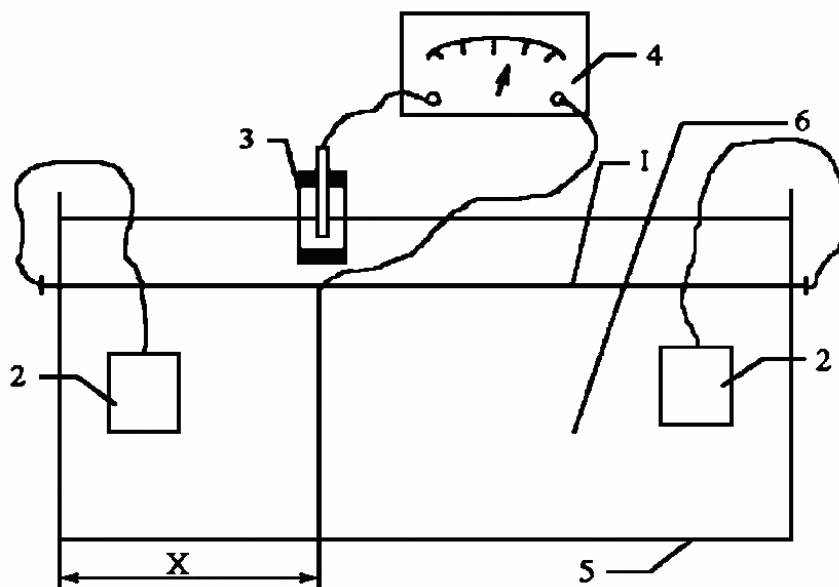


Рис. 5.2. Модель протекторной защиты магистрального трубопровода:  
 1 – защищаемый трубопровод; 2 – протектор типа МГЛ-5; 3 – медно-сульфатный неполяризующийся электрод; 4 – милливольтметр М-231;  
 5 – ящик из плексигласа; 6 – электролит

## ОФОРМЛЕНИЕ РАБОТЫ

Результаты замеров записываются в табл. 5.2.

По результатам табл. 5.2 строятся графики.

При построении графиков учитываются средние значения потенциалов труба – грунт. Затем определяется взаимное влияние двух протекторов на защитное действие магистрального трубопровода.

Для этого на графике определяется значение потенциала труба – грунт на пересечении двух кривых  $U_{Xcp}^{III} = f(X)$  и  $U_{Xcp}^{IIII} = f(X)$ . Допустим, значение этого потенциала будет равно  $U_{X1}$ . Затем определяется значение потенциала от действия двух протекторов  $U_{X1}^{2II}$ . Взаимное влияние в процентах определяется по формуле

$$B = \frac{U_{X1}^{2II} - U_{X1}}{U_{X1}} \cdot 100 \quad (5.1)$$

Аналогичные вычисления производятся для точек  $X_2, X_3, X_4, X_5$ .

Таблица результатов

№ точек измерения	Показание приборов $U_X^E$	Показание приборов $U_X^{II}$	Показание приборов $U_X^{III}$	Показание приборов $U_X^{2II}$	Показание приборов $U_X^E$	Показание приборов $U_X^{II}$	Показание приборов $U_X^{III}$	Показание приборов $U_X^{2II}$

В табл. 5.2:

$U_X^E$  – потенциал труба – земля при вынутых протекторах;

$U_X^{II}$  – потенциал труба – земля при опущенном левом протекторе;

$U_X^{III}$  – потенциал труба – земля при опущенном правом протекторе;

$U_X^{2II}$  – потенциал труба – земля при обоих опущенных протекторах.

### **Лабораторная работа № 6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ, РАСХОДУЕМОЙ СТАНЦИЕЙ КАТОДНОЙ ЗАЩИТЫ**

#### **ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ**

Катодная станция представляет собой источник постоянного тока, используемый для катодной поляризации трубопровода, уложенного в грунте, при его катодной защите от коррозии. Сетевая катодная станция подключается к сети переменного тока. Переменный ток поступает в первичную обмотку входного трансформатора. Вторичная обмотка трансформатора имеет обычно несколько отводов, что позволяет регулировать напряжение, снимаемое с нее. Пониженное напряжение с вторичной обмотки подается на двухполупериодный выпрямитель. Выпрямляемое напряжение подается в цепь катодной защиты овода. В зависимости от состояния наружной изоляции трубопровода, длины защищаемого участка и удельного омического сопротивления грунта мощность, затрачиваемая катодной станцией, меняется.

Если известны величина постоянного тока, расходуемого катодной станцией, и его напряжение, то мощность можно определить по выражению

$$N = I \cdot U, \quad (6.1)$$

где  $N$  – расходуемая мощность, Вт;  $I$  – ток катодной станции, А;  $U$  – напряжение на выходе катодной станции, В.

Станция катодной защиты предназначена для электрохимической (катодной) защиты трубопроводов и других подземных сооружений от коррозии.

Надёжная работа станции обеспечивается в диапазоне температур воздуха от  $-40$  до  $+45$  °С и относительной влажности воздуха до 98 % при температуре  $+25$  °С.

Основные технические характеристики СКЗ приведены в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Основные технические характеристики  
станции катодной защиты

Наименование параметров	Единица измерения	Норма
Диапазон регулирования защитного тока	А	0 – 60
Диапазон регулирования выходного напряжения	В	1 – 48
Нормальное напряжение питающей сети	В	220
Максимальная потребляющая мощность	ВА	1,6
Габаритные размеры	мм	450 × 400 × 750
Масса	кг	42

Защита от перегрузок и коротких замыканий в нагрузке осуществляется плавкими предохранителями.

Защита от грозовых перенапряжений со стороны питающей сети осуществляется вентильными разрядниками.

Учёт потребляемой электроэнергии производится при помощи счетчика.

Сопротивление изоляции всех токоведущих частей относительно корпуса и между собой при температуре  $+20$  °С и относительной влажности 80 % составляет не менее 40 МОм.

Для щита катодной станции применена корпусная металлоконструкция, обеспечивающая степень защиты IP23 по ГОСТ 14254-80. Ввод питающего и отводящих кабелей производится через патрубки в днище корпуса. Для эффективной вентиляции в днище и боковых стенках предусмотрены жалюзи. Приборы контроля тока и напряжения, выключатель, потенциометр схемы регулирования находятся на внутренней поворотной панели, имеющей окно для считывания показаний счётчика электроэнергии.

При включении выключателя S1 напряжение сети через предохранители F1 и F2 подается на первичную обмотку TVI. Со вторичной обмотки напряжение подаётся на вход регулируемого выпрямителя, собранного на диодах VD1 и VD2 и тиристорах VS1 и VS2. Регулирование выходного напряжения производится изменением сопротивления резистора R1. При этом за счет изменения постоянной времени цепи R1, R2, C3 изменяется фаза фор-

мирования импульса управления, подаваемого на управляющие электроды тиристоров и, соответственно, угол открывания одного из тиристоров, т. к. второй тиристор в данном полупериоде заперт обратным напряжением. В следующем полупериоде откроется второй тиристор, а первый будет заперт обратным напряжением и воздействие импульса управления не приведёт к его открытию.

Станция поставляется включенной на диапазон 1 напряжений 1 – 20 В и токов 0 – 60 А. Для переключения в диапазон 2 напряжений 10 – 40 В и токов 0 – 30 А необходимо перестановкой перемычек на трансформаторе соединить вторичные обмотки последовательно.

При подготовке станции катодной защиты и включению и в процессе эксплуатации необходимо соблюдать следующие меры безопасности. Перед включением СКЗ необходимо убедиться в отсутствии внешних повреждений, надёжности контактных соединений и заземления. К обслуживанию и ремонту катодных станций допускаются лица, прошедшие специальный инструктаж и изучившие техническое описание и инструкцию по эксплуатации.

При техническом обслуживании и ремонте запрещается производить любые работы, связанные с прикосновением к токоведущим частям без отключения напряжения.

Запрещается включение станции без тщательного осмотра и проверки элементов, если произошло самопроизвольное отключение вследствие перегрузки или неисправности.

Схема установки приведена на рис. 6.1.

## **ПОРЯДОК РАБОТЫ**

Работа проводится на сетевой катодной станции, в качестве которой используются станция катодной защиты СКЗТ-3000 и модель трубопровода длиной 2 м, оборудованного катодной защитой. Катодная станция подключается к трубопроводу и анодному заземлению. Затем проводится включение катодной станции в сеть переменного тока. После того как режим работы катодной станции установится, производят измерение напряжения на выходе катодной станции по вольтметру, вмонтированному в корпус станции СКЗТ-3000. Величину постоянного тока, расходуемого станцией на катодную защиту модели трубопровода, измеряют при помощи микроамперметра, включаемого последовательно в цепь катодной защиты. Принципиальная схема сетевой катодной станции и схема включения измерительных приборов показаны на рис. 6.2.



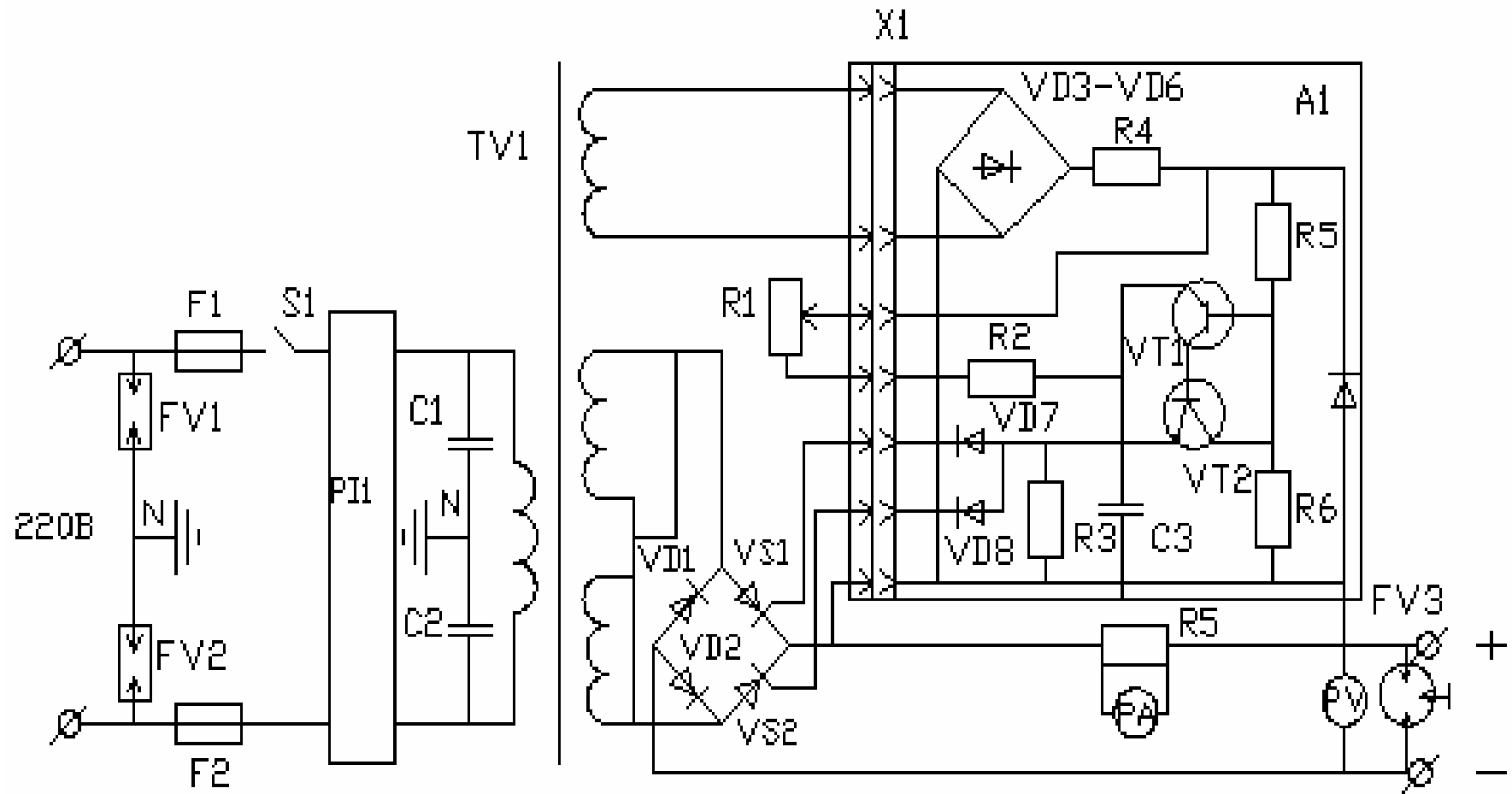


Рис. 6.1. Электрическая схема станции катодной защиты

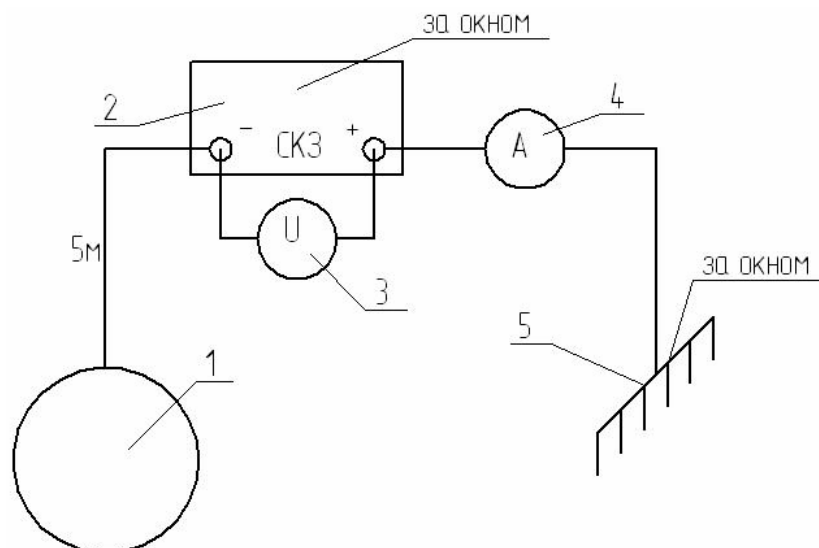


Рис. 6.2. Схема катодной защиты:  
 1 – трубопровод; 2 – СКЗ; 3 – вольтметр; 4 – амперметр; 5 – анодное заземление

Измерения напряжения и величины постоянного тока повторяют три раза с интервалом 5 мин, после чего определяют их среднее значение. Затем подсчитывается полезная мощность, расходуемая катодной станцией.

### ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ

Открыть дверь, отключив станцию, обесточить питающую линию. Очистить элементы преобразователя (охлаждители, диоды, тиристоры и т.д.) от пыли и грязи. Проверить состояние контактных соединений и надежность крепления всех элементов. Проверить состояние изоляции всех проводов внутри станции, а также питающего и отходящих кабелей и надежность заземления. Включить станцию, убедиться в работоспособности тиристорного регулятора, установить необходимый защитный потенциал.

### ОФОРМЛЕНИЕ РАБОТЫ

Результаты работы заносят в тетрадь в виде схемы сетевой катодной станции с указанием схемы подключения измерительных приборов. Результаты замеров заносят в табл. 6.2.

Таблица 6.2

Таблица результатов

№ замера	Напряжение, В	Сила тока, А	Разность потенциалов

## ИТОГОВЫЙ КОНТРОЛЬ

1. Значение борьбы с коррозией для систем трубопроводного транспорта.
2. Коррозия. Классификация процессов коррозии.
3. Виды коррозионных разрушений металлических сооружений объектов трубопроводного транспорта.
4. Влияние образующихся на поверхности металла окислов на процесс коррозии.
5. Коррозия металлов в неэлектролитах.
6. Газовая коррозия.
7. Электрохимическая коррозия. Механизм электрохимической коррозии.
8. Схема коррозионного процесса при электрохимической коррозии.
9. Почва как коррозионная среда.
10. Классификация почв.
11. Удельное электрическое сопротивление почвы.
12. Почвенная коррозия подземных металлических трубопроводов.
13. Современные системы защиты объектов трубопроводного транспорта от коррозии.
14. Противокоррозионные покрытия.
15. Изоляционные покрытия на основе битума.
16. Требования, предъявляемые к покрытиям на основе битума.
17. Изоляционные покрытия на основе полимерных материалов.
18. Требования, предъявляемые к покрытиям на основе полимерных материалов.
19. Конструкции изоляционных покрытий.
20. Типы катодных станций.
21. Принцип работы катодных станций.
22. Системы катодной защиты трубопроводов.
23. Требования к катодной защите сооружений.
24. Протекторная защита. Принципиальная схема.
25. Типы протекторов.
26. Требования к протекторной защите.

**Примечание.** Итоговый контроль предполагает наличие всех выполненных и защищённых практических и лабораторных работ и экзамен.

## ЛИТЕРАТУРА

### *Основная*

1. Волков Б.Г. , Тесов Н.И., Шуванов В.В. Справочник по защите подземных металлических сооружений от коррозии. – Л.: Недра. 1975.
2. Дизенко Е.И. и др. Противокоррозионная защита трубопроводов и резервуаров: Учеб. – М.: Недра, 1978.
3. Зиневич А.М., Глазков В.И., Котик В.Г. Защита трубопроводов и резервуаров от коррозии. – М.: Недра, 1975.
4. Коррозия углеродистой стали в естественных условиях в различных почвенно-климатических зонах страны / А.Ф. Марченко, В.Ф. Храмина, А.В. Николаева и др. – Тр. ВНИИСТА. – 1974. – Вып. 30.
5. ГОСТ 25812-85. Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии.

### *Дополнительная*

1. Борисов Б.И. Защитная способность изоляционных покрытий подземных трубопроводов. – М.: Недра, 1987.
2. Горелик М.Б., Иоффе Э.И., Сурис М.А. Защита газовых сетей от блуждающих токов. – М.: Недра, 1979.
3. Коррозия металла с ПВХ покрытием под действием биогенного сероводорода / Г.М. Могильницкий, А.М. Зиневич, Б.И. Борисов и др. – М.: Недра, 1980.
4. Котик В.Г. Катодная защита магистральных трубопроводов. – М.: Недра, 1964.
5. Правила технической эксплуатации. Магистральные газопроводы. – М.: Недра, 1989.
6. Справочник по проектированию магистральных трубопроводов / Под ред. А.К. Дерцакяна). – М.: Недра, 1977.
7. Чигал В. Межкристаллитная коррозия сталей и сплавов. – Л.: Химия, 1969.
8. Глазков В.И., Котик В.Г. и др. Защита от коррозии протяженных металлических сооружений. – М.: Недра, 1968.
9. Жук Н.П. Курс коррозии и защиты металлов. – М.: Metallurgy, 1985.
10. Герасименко А. А. Защита от коррозии, старения и биоповреждений машин, оборудования и сооружений: Справочник. Т. 1. – М.: Машиностроение, 1987.

## **ПРИЛОЖЕНИЯ**



Приложение 1

Коэффициенты экранирования вертикальных трубчатых заземлителей,  
размещенных в ряд, без учета влияния соединительной полосы  $\eta_B$

Число труб, шт	Отношение расстояния между трубами к длине трубы		
	$\frac{l_{\Gamma}}{n-1}l_B = 1$	$\frac{l_{\Gamma}}{n-1}l_B = 2$	$\frac{l_{\Gamma}}{n-1}l_B = 3$
2	0,84 – 0,87	0,90 – 0,92	0,93 – 0,95
3	0,76 – 0,80	0,85 – 0,88	0,90 – 0,92
5	0,67 – 0,72	0,79 – 0,83	0,85 – 0,88
10	0,56 – 0,62	0,72 – 0,77	0,79 – 0,83
15	0,51 – 0,56	0,66 – 0,73	0,76 – 0,80
20	0,47 – 0,50	0,65 – 0,70	0,74 – 0,79
50	0,38 – 0,43	0,56 – 0,63	0,68 – 0,74

Примечание. Наименьшие значения  $\eta_B$  соответствуют  $\frac{l_B}{d} = 20$ ; наибольшие  $\frac{l_B}{d} = 68$ ,  
где  $d$  – диаметр заземлителя.

## Приложение 2

Коэффициенты экранирования для горизонтальной рабочей шины  
анодного заземления, состоящего из расположенных в ряд вертикальных  
трубчатых электродов, объединённых шиной в земле  $\eta_{\Gamma}$

$\ell_{\Gamma} / (n-1)\ell_B$	Количество вертикальных труб							
	3	4	5	8	10	20	30	50
1	0,81	0,77	0,74	0,67	0,62	0,42	0,31	0,20
2	0,91	0,89	0,86	0,79	0,75	0,56	0,46	0,34
3	0,94	0,92	0,90	0,85	0,82	0,68	0,58	0,47



## Основные данные линии электропередач

Марка провода	Число и диаметр проволок, мм	Фактическое сечение, мм <sup>2</sup>
Медные провода		
М-4	1×2,2	3,8
М-6	1×2,7	5,72
М-10	1×3,5	9,6
М-16	1×4,7	15,89
М-25	7×2,1	24,25
М-35	7×2,5	34,36
М-50	7×3,0	49,48
М-60	12×2,5	59,0
М-70	19×2,12	67,0
Алюминиевые провода		
А-16	7×1,70	15,89
А-25	7×2,10	24,25
А-35	7×2,50	34,36
А-50	7×3,00	49,48
А-70	7×3,54	68,90
А-95	7×4,15	94,90
А120	19×2,80	117,0
Стальные провода		
а) одножильные		
Ж-4	1×4	12,5
Ж-5	1×5	19,6
Ж-6	1×6	28,3
б) многожильные		
ПС-25	5×2,5	24,6
ПС-35	7×2,6	37,2
ПС-50	12×2,3	49,5
ПС-70	19×2,3	78,8
ПС-95	37×1,8	94,0

## Таблицы показательной и гиперболических функций

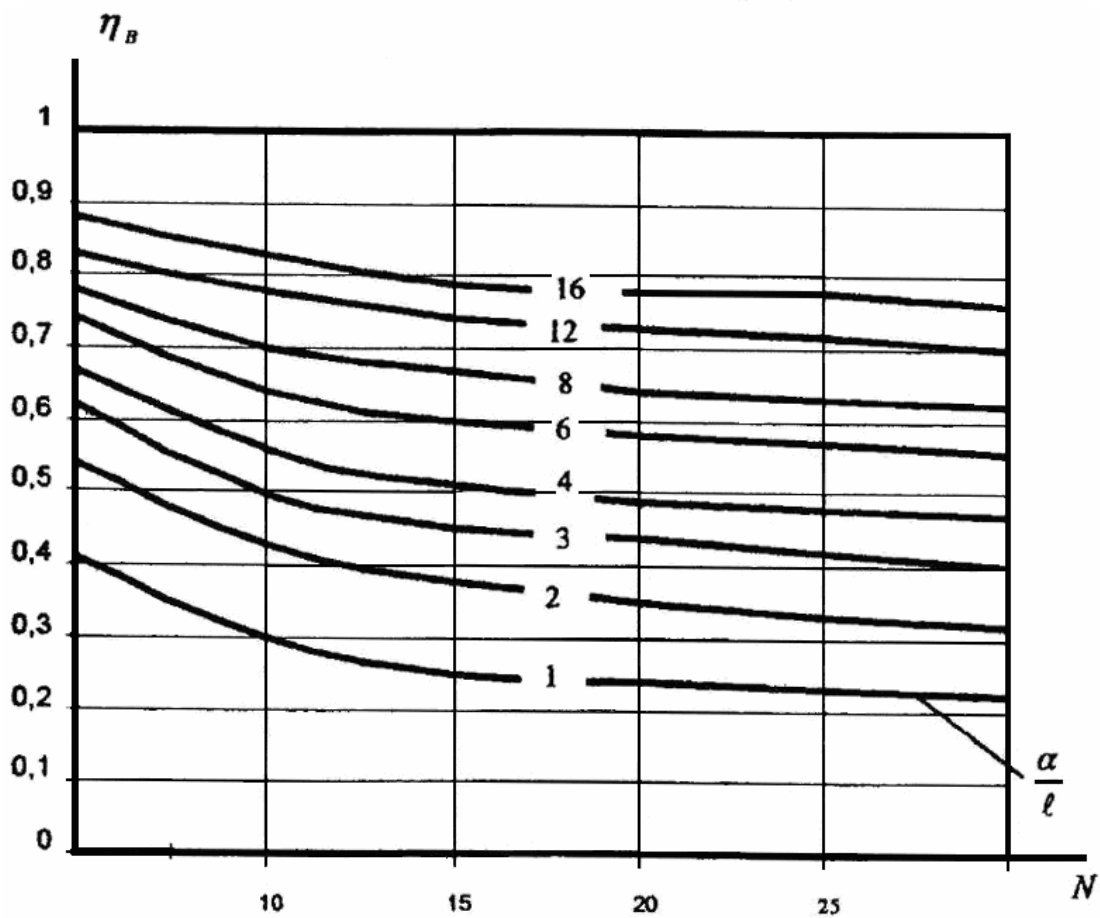
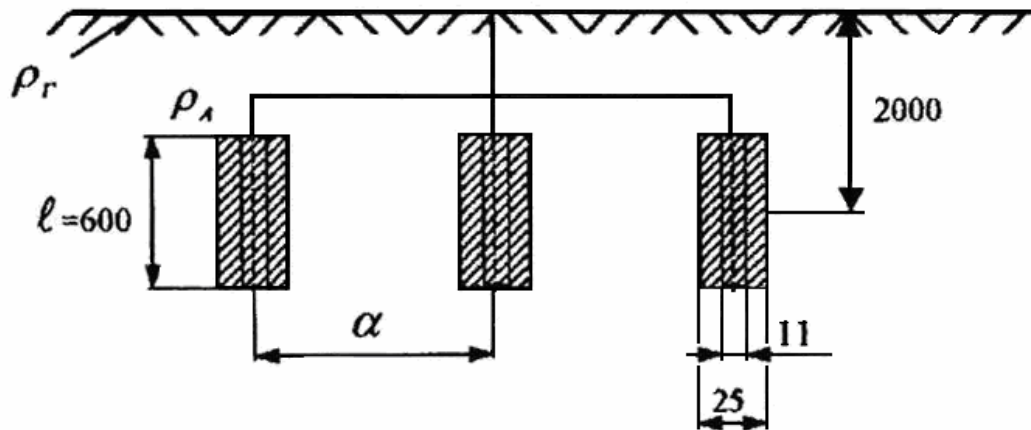
$x$	$e^x$	$\operatorname{ch} x$	$\operatorname{th} x$
0,00	1,0000	1,0000	0,0000
0,01	1,0100	1,0001	0,0100
0,02	1,0202	1,0002	0,0200
0,03	1,0304	1,0005	0,0300
0,04	1,0408	1,0008	0,0400
0,05	1,0513	1,0012	0,0500
0,06	1,0618	1,0018	0,0599
0,07	1,0725	1,0025	0,0699
0,08	1,0833	1,0032	0,0798
0,09	1,0942	1,0041	0,0898
0,10	1,1052	1,0050	0,0997
0,11	1,1163	1,0061	0,1096
0,12	1,1275	1,0072	0,1194
0,13	1,1388	1,0085	0,1293
0,14	1,1503	1,0098	0,1391
0,15	1,1618	1,0113	0,1489
0,16	1,1735	1,0128	0,1587
0,17	1,1853	1,0145	0,1684
0,18	1,1972	1,0162	0,1781
0,19	1,2093	1,0181	0,1878
0,20	1,2214	1,0201	0,1974
0,21	1,2337	1,0221	0,2070
0,22	1,2461	1,0243	0,2165
0,23	1,2586	1,0260	0,2260
0,24	1,2713	1,0289	0,2355
0,25	1,2840	1,0344	0,2449
0,26	1,2969	1,0340	0,2543
0,27	1,3100	1,0367	0,2636
0,28	1,3231	1,0395	0,2729
0,29	1,3364	1,0424	0,2821
0,30	1,3499	1,0453	0,2913
0,31	1,3634	1,0484	0,3004
0,32	1,3771	1,0516	0,3095
0,33	1,3910	1,0550	0,3185
0,34	1,4050	1,0584	0,3275
0,35	1,4191	1,0619	0,3364
0,36	1,4333	1,0655	0,3452
0,37	1,4477	1,0692	0,3540
0,38	1,4623	1,0731	0,3627
0,39	1,4770	1,0770	0,3714
0,40	1,4918	1,0811	0,3800
0,41	1,5069	1,0852	0,3885
0,42	1,5220	1,0895	0,3969

$x$	$e^x$	$\operatorname{ch} x$	$\operatorname{th} x$
0,43	1,5373	1,0939	0,4053
0,44	1,5527	0,0984	0,4136
0,45	1,5683	1,1030	0,4219
0,46	1,5841	1,1077	0,4301
0,47	1,6000	1,1125	0,4382
0,48	1,6161	1,1174	0,4462
0,49	1,6323	1,1225	0,4542
0,50	1,6487	1,1276	0,4621
0,51	1,6653	1,1329	0,4700
0,52	1,6820	1,1383	0,4777
0,53	1,6989	1,1438	0,4854
0,54	1,7160	1,1494	0,4930
0,55	1,7333	1,1551	0,5005
0,56	1,7507	1,1609	0,5080
0,57	1,7683	1,1669	0,5154
0,58	1,7860	1,1730	0,5227
0,59	1,8040	1,1792	0,5299
0,60	1,8221	1,1855	0,5371
0,61	1,8404	1,1919	0,5441
0,62	1,8589	1,1984	0,5511
0,63	1,8776	1,2051	0,5581
0,64	1,8964	1,2119	0,5649
0,65	1,9155	1,2180	0,5717
0,66	1,9348	1,2258	0,5784
0,67	1,9542	1,2330	0,5850
0,68	1,9739	1,2403	0,5915
0,69	1,9937	1,2477	0,5980
0,70	2,0138	1,2552	0,6044
0,71	2,0340	1,2628	0,6107
0,72	2,0544	1,2706	0,6169
0,73	2,0751	1,2785	0,6231
0,74	2,0959	1,2865	0,6292
0,75	2,1170	1,2947	0,6352
0,76	2,1383	1,3030	0,6411
0,77	2,1598	1,3114	0,6469
0,78	2,1815	1,3199	0,6527
0,79	2,2034	1,3286	0,6584
0,80	2,2255	1,3374	0,6640
0,81	2,2479	1,3464	0,6696
0,82	2,2705	1,3555	0,6751
0,83	2,2933	1,3647	0,6805
0,84	2,3164	1,3740	0,6858
0,85	2,3397	1,3835	0,6911
0,86	2,3632	1,3932	0,6963
0,87	2,3869	1,4029	0,7014
0,88	2,4109	1,4128	0,7064

$x$	$e^x$	$\text{ch } x$	$\text{th } x$
0,89	2,4351	1,4229	0,7114
0,90	2,4596	1,4331	0,7163
0,91	2,4843	1,4434	0,7211
0,92	2,5093	1,4539	0,7259
0,93	2,5349	1,4645	0,7306
0,94	2,5600	1,4753	0,7352
0,95	2,5857	1,4862	0,7398
0,96	2,6117	1,4973	0,7443
0,97	2,6379	1,5085	0,7487
0,98	2,6645	1,5199	0,7531
0,99	2,6912	1,5314	0,7574
1,00	2,7183	1,5431	0,7616
1,01	2,7456	1,5549	0,7658
1,02	2,7732	1,5669	0,7699
1,03	2,8011	1,5790	0,7739
1,04	2,8292	1,5913	0,7779
1,05	2,8577	1,6038	0,7818
1,06	2,8864	1,6264	0,7857
1,07	2,9154	1,6292	0,7895
1,08	2,9447	1,6421	0,7932
1,09	2,9743	1,6552	0,7969
1,10	3,0042	1,6685	0,8005
1,11	3,0344	1,6820	0,8041
1,12	3,0649	1,6956	0,8076
1,13	3,0957	1,7093	0,8110
1,14	3,1268	1,7233	0,8144
1,15	3,1582	1,7374	0,8178
1,16	3,1899	1,7517	0,8210
1,17	3,2220	1,7662	0,8243
1,18	3,2544	1,7808	0,8275
1,19	3,2871	1,7957	0,8306
1,20	3,3201	1,8107	0,8337
1,21	3,3536	1,8258	0,8367
1,22	3,3872	1,8412	0,8397
1,23	3,4212	1,8568	0,8426
1,24	3,4556	1,8725	0,8455
1,25	3,4903	1,8884	0,8483
1,26	3,5254	1,9045	0,8511
1,27	3,5609	1,9208	0,8538
1,28	3,5966	1,9373	0,8565
1,29	3,6328	1,9540	0,8591
1,30	3,6693	1,9709	0,8617
1,31	3,7062	1,9880	0,8643
1,32	3,7434	2,0053	0,8668
1,33	3,7810	2,0228	0,8693
1,34	3,8190	2,0404	0,8717

$x$	$e^x$	$\text{ch } x$	$\text{th } x$
1,35	3,8574	2,0583	0,8741
1,36	3,8962	2,0764	0,8764
1,37	3,9354	2,0947	0,8788
1,38	3,9749	2,1132	0,8810
1,39	4,0149	2,1320	0,8832
1,40	4,0552	2,1509	0,8854
1,41	4,0960	2,1701	0,8875
1,42	4,1371	2,1894	0,8896
1,43	4,1787	2,2090	0,8917
1,44	4,2207	2,2288	0,8937
1,45	4,2631	2,2488	0,8957
1,46	4,3060	2,2691	0,8977
1,47	4,3492	2,3103	0,8996
1,48	4,3930	2,3103	0,0915
1,49	4,4371	2,3312	0,9033
1,50	4,4817	2,3524	0,9052
1,51	4,5267	2,3738	0,9069
1,52	4,5722	2,3955	0,9087
1,53	4,6182	2,4174	0,9104
1,54	4,6646	2,4395	0,9121
1,55	4,7115	2,4619	0,9138
1,56	4,7588	2,4845	0,9154
1,57	4,8067	2,5074	0,9170
1,60	4,9530	2,5775	0,9217
1,70	5,4740	2,8283	0,9354
1,80	6,0497	3,1075	0,9468
1,90	6,6859	3,4177	0,9562
2,00	7,3891	3,7622	0,9640
2,10	8,1662	4,1443	0,9705
2,20	9,0250	4,5679	0,9757
2,30	9,9742	5,0372	0,9801
2,40	11,0232	5,5570	0,9837
2,50	12,1825	6,1323	0,9866
2,60	13,4637	6,7690	0,9890
2,70	14,8797	7,4735	0,9910
2,80	16,4447	8,2527	0,9926
2,90	18,1742	9,1146	0,9940
3,00	20,0855	10,0677	0,9951
3,10	22,1980	11,1115	0,9960
3,20	24,5325	12,2867	0,9967
3,30	27,1126	13,5748	0,9973
3,40	29,9641	14,9987	0,9978
3,50	33,1155	16,5728	0,9982
3,60	36,5983	18,3128	0,9985
3,70	40,4473	20,2360	0,9988
3,80	44,7012	22,3618	0,9990

$x$	$e^x$	$\text{ch } x$	$\text{th } x$
3,90	49,4025	24,7114	0,9992
4,00	54,5982	27,3082	0,9993
4,10	60,3401	30,1784	0,9995
4,20	66,6863	33,3507	0,9996
4,30	73,6998	36,8567	0,9996
4,40	81,4509	40,7316	0,9997
4,50	90,0171	45,0141	0,9998
4,60	99,4843	49,7472	0,9998
4,70	109,9472	54,9781	0,9998
4,80	121,5104	60,7593	0,9999
4,90	134,2898	67,1486	0,9999
5,00	148,4132	74,2099	0,9999
5,10	164,0219	82,0140	0,9999
5,20	181,2722	90,6380	0,9999
5,30	200,3368	100,1709	0,9999
5,40	221,4064	110,7055	1,0000
5,50	244,6923	122,3480	1,0000
5,60	270,4264	135,2150	1,0000
5,70	298,8674	149,4354	1,0000
6,00	403,4288	201,7156	1,0000



Зависимость коэффициента экранирования вертикальных упакованных протекторов  $\eta_e$  от числа анодов  $N$  при различных  $\alpha/\ell$

Если необходимого значения  $\alpha/\ell$  нет, то следует принимать ближайшее наибольшее или наименьшее значение.

*Учебное издание*

**СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ  
ОБЪЕКТОВ ТРУБОПРОВОДНОГО ТРАНСПОРТА**

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС  
для студентов специальности 1-70 05 01  
«Проектирование, сооружение и эксплуатация  
газонефтепроводов и газонефтехранилищ»**

Составители:

**КЛЫШКО Ираида Николаевна,  
КУЛЬБЕЙ Андрей Геннадьевич**

Редактор *Г.А. Тарасова*

Дизайн обложки *И.С. Васильевой*

---

Подписано в печать 25.10.06. Формат 60x84 1/16. Гарнитура Таймс. Бумага офсетная.  
Печать трафаретная. Усл. печ. л. 12,76. Уч.-изд. л. 13,02. Тираж 50. Заказ 1306

---

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Учреждение образования «Полоцкий государственный университет»

ЛИ № 02330/0133020 от 30.04.04    ЛП № 02330/0133128 от 27.05.04

211440 г. Новополоцк, ул. Блохина, 29