

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Владимирский государственный университет  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

Л. В. РОМАНОВА А. Н. СТАРИКОВ

# ЗАЩИТА ТРУБОПРОВОДОВ ОТ КОРРОЗИИ

Учебное пособие



Владимир 2023

УДК 621.644

ББК 39.7

Р69

Рецензенты:

Доктор технических наук  
профессор кафедры автоматизации, мехатроники и робототехники  
Владимирского государственного университета  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых  
*О. В. Веселов*

Кандидат технических наук  
генеральный директор ООО «Рарок»  
*А. В. Власов*

Издается по решению редакционно-издательского совета ВлГУ

**Романова, Л. В.** Защита трубопроводов от коррозии : учеб.  
Р69 пособие / Л. В. Романова, А. Н. Стариков ; Владим. гос. ун-т им.  
А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2023. – 111 с.  
ISBN 978-5-9984-1551-7

Рассмотрены основные способы защиты трубопроводов от коррозии, законодательная база по этому вопросу, технология проведения работ, применяемые материалы и методы. Проанализированы основные виды коррозии, критерии, характеристики, приборная база и мероприятия по активной и пассивной защите. Приведен расчетный аппарат по обеспечению требуемых характеристик катодной и электродренажной защиты, даны примеры применения приводимых теоретических основ и методов защиты как при проектировании, так и эксплуатации.

Предназначено для студентов бакалавриата всех форм обучения по направлению подготовки 08.03.01 – Строительство, профиль подготовки «Теплогазоснабжение и вентиляция», может быть полезно широкому кругу инженеров, аспирантов, технических специалистов.

Рекомендовано для формирования профессиональных компетенций в соответствии с ФГОС ВО 4++.

Ил. 34. Табл. 7. Библиогр.: 53 назв.

УДК 621.644

ББК 39.7

ISBN 978-5-9984-1551-7

© ВлГУ, 2023

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
Тема 1. МЕХАНИЗМ КОРРОЗИИ.....	9
1.1. Электрохимический механизм растворения металлов в электролитах .....	9
1.2. Движущая сила коррозии. ....	12
Контрольные вопросы.....	13
Тема 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ КОРРОЗИИ.....	15
2.1. Гальванические микронеоднородности .....	15
2.2. Коррозионные макропары .....	16
Контрольные вопросы.....	19
Тема 3. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ КОРРОЗИЯ .....	19
3.1. Потенциал и ток коррозии. ....	19
3.2. Ряд напряжений. ....	23
3.3. Основные способы защиты от электрохимической коррозии.....	23
Контрольные вопросы.....	25
Тема 4. КОРРОЗИЯ В ГРУНТЕ .....	25
4.1. Коррозионная активность грунтов и методы ее определения.....	25
4.2. Критерии опасности коррозии подземных стальных трубопроводов .....	26
4.3. Жесткость воды .....	28
Контрольные вопросы.....	29
Тема 5. РАСПРОСТРАНЕННЫЕ ВИДЫ КОРРОЗИИ И МЕРЫ ПО ИХ ПРЕДОТВРАЩЕНИЮ .....	30
5.1. Кавитационные повреждения.....	31
5.2. Щелевая коррозия .....	32
5.3. Эрозионная коррозия .....	34
5.4. Коррозионная усталость .....	36
5.5. Фреттинг-коррозия .....	38
5.6. Контактная коррозия.....	39
5.7. Высокотемпературная коррозия .....	41
5.8. Водородное разрушение .....	42
5.9. Межкристаллитная коррозия.....	43
5.10. Микробиологическая коррозия .....	44
5.11. Питтинг (точечная коррозия) .....	45

5.12. Селективная коррозия .....	46
5.13. Коррозия блуждающими токами (электролиз) .....	47
5.14. Коррозионное растрескивание .....	48
5.15. Термоконтактная коррозия .....	51
5.16. Равномерная коррозия.....	52
Контрольные вопросы.....	53
Тема 6. ПАССИВНАЯ ЗАЩИТА .....	54
6.1. Металлические покрытия .....	56
6.2. Неорганические покрытия.....	58
6.3. Лакокрасочные и полимерные покрытия.....	59
6.4. Изоляция на основе битумных мастик .....	69
6.5. Комбинированные покрытия.....	72
6.6. Контроль качества изоляционных покрытий.....	73
6.7. Охрана труда и техника безопасности при изоляционных работах.....	74
Контрольные вопросы.....	75
Тема 7. АКТИВНАЯ ЗАЩИТА.....	75
7.1. Протекторная защита.....	77
7.2. Катодная защита .....	81
7.3. Электродренажная защита.....	83
7.4. Прочие виды защиты.....	87
Контрольные вопросы.....	88
Тема 8. ЭКСПЛУАТАЦИЯ, КОНТРОЛЬ И ОБСЛУЖИВАНИЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ .....	89
8.1. Приборы контроля за состоянием системы электрохимической защиты .....	89
8.2. Эксплуатация средств защиты трубопроводов от электрохимических загрязнений .....	98
Контрольные вопросы.....	100
ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ .....	101
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	104
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	105
СПИСОК ТЕРМИНОЛОГИЧЕСКИХ СОКРАЩЕНИЙ .....	110

## ВВЕДЕНИЕ

Системы жизнеобеспечения жилых, социальных и промышленных объектов подвергаются коррозии, которая наносит огромный ущерб инженерным системам, а также снижает их устойчивость к коррозии и способствует аварийным ситуациям.

В таблице представлены элементы систем ТГВ и ВВ.

### Системы жизнеобеспечения ТГВ, ВВ

Теплогазоснабжение	Водоснабжение и водоотведение
Источники энергии – топливо (ИЭ-Т) Газоснабжение – Г (СГРГП) Источники тепла – ИТ (ТГУ) Теплоснабжение – горячее водоснабжение (Т-ГВС) Отопление – О Вентиляция и кондиционирование – ВК Системы защиты от коррозии – СЭХЗ	Источник энергии – «вода, сточные воды» (ИЭ-В+СВ) Водоснабжение поселений – ВП Водоотведение поселений – ВоП Водоснабжение промышленных предприятий – ВПП Водоотведение промышленных предприятий – ВоПП Оборотное водоснабжение – ОВС Системы пожаротушения – СПТ Системы защиты от коррозии – СЭХЗ

Все элементы систем связаны с трубопроводным транспортом, который и требуется защищать.

Источники энергии и ресурсы:

– невозобновляемые: нефть, уголь, газ, лес, торф, атомная энергия. От неправильной организации потребления возможны появление коррозии и ее интенсификация;

– возобновляемые: солнце, ветер, энергия рек, морей и океанов, тепло земли (энергия раскаленных камней, нагретой воды);

– газоснабжение: большинство газопроводов выполнены из металла, поэтому подвержены коррозии;

– источники тепла: котельные, печи и агрегаты, где может происходить коррозия металлических труб и оборудования, а также процесс интенсифицирования продуктами сгорания  $CO_x$  и  $NO_x$ ;

– теплоснабжение: чаще всего трубопроводы выполнены из металла, поэтому возможна внутренняя и наружная его коррозия, которая усугубляется высокими температурой и давлением;

– системы горячего водоснабжения: в них происходит внутренняя и наружная коррозия труб запорно-регулирующей арматуры и аппаратуры, поэтому нередко применяют пластик;

– отопление: возможна коррозия труб и отопительных приборов;

– системы вентиляции и кондиционирования подвержены внутренней и наружной коррозии воздуховодов, креплений и оборудования;

– система защиты трубопроводов и инертных систем от коррозии.

Системы жизнеобеспечения подвержены коррозии, поэтому все стадии производства: разработка технических условий, проектирование строительно-монтажных, пуско-наладочных и эксплуатационных работ должны предусматривать комплекс мероприятий по защите от коррозии с учетом нормативных требований и местных условий.

На сегодняшний день защита трубопроводов от коррозии возможна с применением целого комплекса мероприятий, направленных на увеличение срока службы конструкций. Все известные способы защиты от коррозии классифицируются на четыре группы:

– пассивная защита;

– введение в материал составляющих, которые увеличивают устойчивость к коррозии;

– воздействие на окружающую среду;

– активная защита.

Рассмотрению данных вопросов и посвящено учебное пособие.

## **Нормативные документы в области защиты трубопроводов от коррозии**

Контроль технического состояния (КТС) газопроводов производится в соответствии с РД-33.040.99-КТН-210-10 «Положение по эксплуатации, техническому обслуживанию и ремонту вдоль трассовых линий электропередач и средств электрохимической защиты линейной

части магистральных газонефтепроводов» и РД-29.020.00-КТН-087-10 «Положение о системе технического обслуживания и ремонта энергетического оборудования магистральных газонефтепроводов на давление до 10 МПа».

Контроль технического состояния (контроль) – это проверка соответствия значений параметров объекта требованиям технической документации и определение на этой основе одного из заданных видов технического состояния в данный момент времени.

Измерение потенциала «труба – земля» по всей длине нефтепровода проводится в период максимального увлажнения почвы:

- весной со сроком окончания замеров до 1 июня;
- осенью со сроком окончания замеров до 1 октября.

Сроки ежегодных сезонных измерений потенциала «труба – земля» могут быть смещены в зависимости от климатических условий региона.

Измерения должны производиться только в местах установки контрольно-измерительных пунктов (КИП). Запрещается косвенное определение потенциала (при отсутствии КИП) по данным потенциалов в соседних точках измерения. Потенциалы в местах расположения установок электрохимической защиты (ЭХЗ) измеряются при включенной и отключенной системах катодной защиты (СКЗ). На КИПах, оборудованных неполяризующимися электродами сравнения, измеряют поляризационный потенциал. Результаты измерений заносят в таблицу. По результатам измерений составляют графики уровня защитного потенциала и далее выполняют анализ эффективности работы средств электрохимической защиты.

Одновременно при измерениях защитного потенциала нефтепровода производятся измерения защитного потенциала кожуха, переходного сопротивления и сопротивления цепи «кожух – труба» на переходах нефтепровода под автомобильными и железными дорогами [39].

При изменении плотности тока и интенсивности движения поездов в зонах опасного влияния блуждающих токов измеряется среднечасовая величина тока систем дренажной защиты. Среднечасовой ток

всех установок системы дренажной защиты, находящихся в зоне действия одной тяговой подстанции электрифицированной железной дороги, не должен превышать 20 % общей среднечасовой токовой нагрузки этой подстанции. При превышении среднечасового тока более 20 % выполняют дополнительное измерение потенциала «труба – земля».

Для анализа состояния защитного изоляционного покрытия нефтепровода необходима ежегодная интегральная оценка его качества. При снижении качества защитного покрытия проводят детальное обследование участков с неудовлетворительным качеством изоляции. По результатам анализа принимается решение по обеспечению защитного потенциала на этом участке.

Объекты защиты (на примере систем водоснабжения и водоотведения):

- источник энергии – вода и стоки;
- водоснабжение городов и населенных пунктов;
- водоснабжение предприятий;
- водоотведение в поселениях;
- водоотведение на промышленных предприятиях;
- системы пожарных трубопроводов.

Виды деятельности по обеспечению коррозионной защиты:

- технические условия;
- проектные работы;
- строительно-монтажные работы;
- эксплуатационные работы;
- экспертные работы;
- научно-исследовательские работы (НИР) и опытно-конструкторские работы (ОКР);
- научно-педагогическая работа.

## Тема 1. МЕХАНИЗМ КОРРОЗИИ

Первопричиной коррозии металлов, в том числе и электрохимической, является их термодинамическая неустойчивость. При взаимодействии с электролитами металлы самопроизвольно растворяются, переходя в более устойчивое окисленное (ионное) состояние.

Химический механизм растворения металлов в электролитах происходит на одном и том же участке поверхности в одну стадию, независимо от потенциала металла и химической реакции без участия свободных электронов, когда металл, отдавая окислителю валентные электроны, вступает с ним в химическое соединение или образует ионы (может иметь место и в электролитах).

### 1.1. Электрохимический механизм растворения металлов в электролитах

Протекает с участием свободных электронов электрохимической реакции, при которой ионизация атомов металла и восстановление окислительного компонента коррозионной среды проходят не в одном акте и их скорости зависят от величины электродного потенциала металла; имеет место в подавляющем большинстве случаев коррозии металлов в электролитах и является, таким образом, преобладающим.

#### *Гальвано-, микро- и макропары*

Протекание электрохимической коррозии обычно характеризуется локализацией анодного и катодного процессов на различных участках корродирующей поверхности металла, что приводит к неравномерному или местному характеру коррозионного разрушения. Эти отличающиеся по своим физическим и химическим свойствам участки являются в зависимости от их размеров короткозамкнутыми *макрогальваническими* (имеющими размеры, хорошо различимые невооруженным глазом) или *микрогальваническими* (обнаруживаемыми лишь при помощи микроскопа) элементами (рис. 1.1).

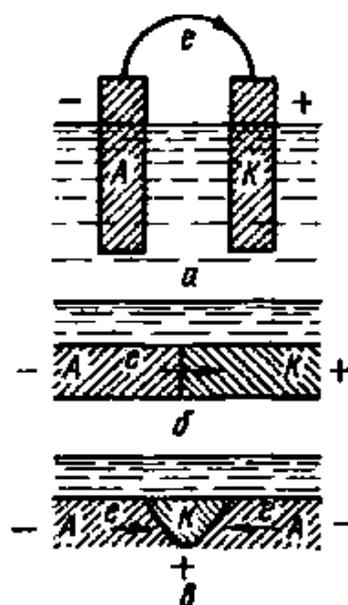


Рис. 1.1. Схема гальванических элементов: а – обычный элемент; б – модель коррозионного элемента; в – коррозионный элемент; А – анод; К – катод; e – электроны

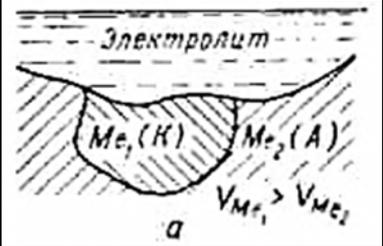
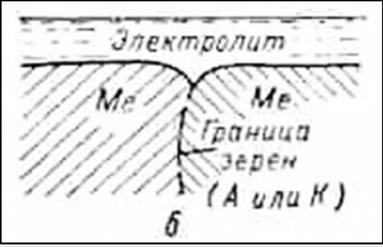
Таким образом, электрохимическая коррозия металлов напоминает работу гальванического элемента, в котором отрицательный электрод (например, цинк) растворяется, когда он соединен проводником со вторым электродом, на котором восстанавливаются ионы водорода или другие вещества. Поэтому ее можно рассматривать как результат работы большого числа коррозионных гальванических элементов на корродирующей поверхности металла, соприкасающейся с электролитом.

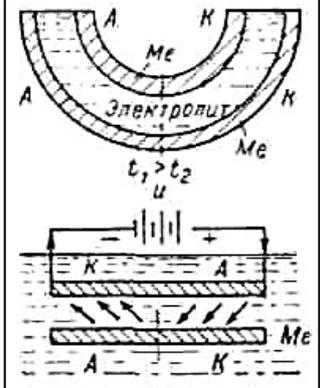
### **Коррозионные гальванические элементы и причины их возникновения**

Поверхность корродирующего металла представляет собой обычно *многоэлектродный*, т. е. состоящий из нескольких (более двух) отличающихся друг от друга электродов, *гальванический элемент*. В первом приближении эту поверхность можно рассматривать как *двухэлектродную систему*, т. е. состоящую из участков двух видов — анодных (одного сорта) и катодных (тоже одного сорта).

Причины возникновения электрохимической гетерогенности (неоднородности) поверхности раздела металл – электролит представлены в таблице.

Схемы коррозионных процессов

Общая причина возникновения гетерогенности	Конкретная причина возникновения гетерогенности	Схематичное изображение гетерогенности
Неоднородность металлической фазы	Макро- и микровключения; неоднородность сплава	
	Наличие границ блоков и зерен кристаллов; анизотропность металлического кристалла	

Общая причина возникновения гетерогенности	Конкретная причина возникновения гетерогенности	Схематичное изображение гетерогенности
Неоднородность поверхности металла	Макро- и микропоры в окисной пленке. Неравномерное распределение на поверхности металла вторичных продуктов коррозии	
Неоднородность защитных пленок на поверхности металла	Различие температуры. Неравномерное распределение лучистой энергии	
Неоднородность физических условий	Неравномерное наложение внешнего электрического поля	

Таким образом, электрохимическая гетерогенность поверхности корродирующего металла приводит к дифференциации последней на анодные (с более отрицательным электродным потенциалом  $\varphi_a$ ) и катодные (с более положительным электродным потенциалом  $\varphi_k$ ) участки. Степень гетерогенности этой поверхности характеризуется разностью электродных потенциалов анодных и катодных участков:  $\varphi_a - \varphi_k$ .

Считается, что основными элементами электрохимической коррозии являются гальваническая неоднородность и образование на поверхности большого количества микроанодов. Однако, как показала практика, разрушается и однородно чистый металл. Мнение специалистов разделилось на теорию микрогальванических элементов и теорию гомогенного растворения.

Эти теории не противоречат друг другу, и основной причиной стало наличие воды и кислорода.

Молекулы воды имеют особенность: ее дипольные свойства (несмотря на уравновешенность зарядов  $H^+$  и  $OH^-$ ) внутри молекулы полярно заряжены и способны притягиваться к положительно или отрицательно заряженным ионам окружающей среды, к ионам железа. В

приведенной таблице представлены этапы развития коррозионного процесса при участии воды и кислорода.

Атомы металла образуют кристаллическую решетку, в пространстве которой свободно перемещаются электроны (валентные электроны). Например, молекулы воды находятся на самой поверхности металла, а лучше – на вершине гребня или неравномерности поверхности. Тогда они вступают в электронное взаимодействие с ионами металла. В силу своей подвижности молекула воды способна проникнуть сквозь решетку и отделить ион.

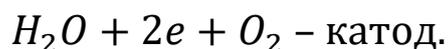
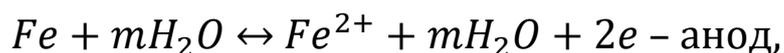
В данной ситуации возникает ток обмена и формируется двойной электронный слой. Его внешней обкладкой являются гидратированные ионы металла (ржавчина) и внутренние электроны. Таким образом, для безостановочного протекания процесса разрушения достаточно *воды и кислорода*.

## 1.2. Движущая сила коррозии

При коррозии образуются линии тока, формируемые электронами, ищущими кислород; они движутся в области, где имеется избыток кислорода. В области избытка кислорода протекают в основном катодные (восстановительные) процессы, процессы с потреблением электронов (это не приводит к уменьшению массы металла), а в другой части поверхности – анодные, т. е. окислительные процессы, сопровождающиеся выносом металла. Таким образом, этот процесс можно определить как процесс коррозионно-гальванической пары. Например, трубопровод с кусочно-неоднородной поверхностью в неоднородных грунтах.

Между катодом и анодом коррозионной пары возникает ток. При этом он будет стекать с анода в окружающую среду и натекает на катод. Следовательно, анодный ток – это ток, стекающий с металлической поверхности, катодный – ток, натекающий на нее (см. таблицу).

В первом приближении процесс описывается следующим образом:



Реакция на катоде с участием кислорода идет с образованием ионов гидроксила, что, в свою очередь, вызывает выпадение всевоз-

можных осадков. Так, ион Fe, возникающий на соседнем аноде, вступает в связь с OH, Fe(OH)<sub>2</sub>, который затем переходит в устойчивое соединение Fe(OH)<sub>3</sub>, и далее переходит в набор окислов Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, что представляет собой конечный продукт совместной реакции – ржавчину.

### ***Основные положения при защите металлических городских газопроводов***

1. Все организации, проводящие весь цикл работ, должны иметь лицензию и руководствоваться ГОСТ 9.602-89. В грунтах низкой и средней коррозионной активности при отсутствии блуждающих токов необходимо иметь защиту *усиленной изоляцией*, а при наличии блуждающих токов – средства электрохимической защиты.

2. Мероприятия по защите трубопроводов от коррозии должны быть предусмотрены проектом защиты, который разрабатывается одновременно с проектом строительства или реконструкции трубопровода. Проект защиты разрабатывается на основании данных о коррозионной агрессивности грунтов и наличии блуждающих токов, которые могут быть получены при проведении изыскательских работ. Проектные защиты осуществляются на основе технических условий.

3. Все виды защиты от коррозии должны быть введены в эксплуатацию до сдачи газопроводов (допускается работа без защиты в зоне блуждающих токов сроком не более 1 месяца, в остальных случаях – 6 месяцев).

4. Основные работы по контролю за коррозионным состоянием трубопроводов осуществляет эксплуатационная организация.

В состав эксплуатационных организаций входит систематизированное подразделение (служба), основными функциями которого являются:

– оценка опасности коррозии подземных стальных трубопроводов (ПСТ), включая электрические изменения, полевые и лабораторные условия для определения коррозионной активности грунтов на трассе трубопроводов и влияния блуждающих токов (постоянных и переменных);

– обследование коррозионного состояния трубопроводов при их освидетельствовании, плановых и аварийных раскопках трубопроводов;

- регистрация и анализ причин коррозионных отказов трубопроводов;
- выдача технических условий на проектирование ЭХЗ действующих, реконструируемых и вновь сооружаемых трубопроводов со специализированными проектными организациями, имеющими лицензию;
- согласование проектов ЭХЗ;
- осуществление технадзора за ведением СМР по противокоррозионной защите;
- приемка в эксплуатацию защитных покрытий и установок;
- эксплуатационное обслуживание установок ЭХЗ с проведением регламентных работ в сроки и объемы, установленные производственными и нормативно-техническими документами и инструкцией;
- ремонт защитных покрытий и установок ЭХЗ силами специальных организаций;
- ведение и хранение технической документации по защите трубопроводов от коррозии;
- подразделения по защите от коррозии должны иметь постоянный штат сотрудников и техническое оснащение специальными приборами, аппаратурой, оборудованием и т. д.;
- мероприятие по ограничению утечки тока в земле осуществляется организациями, в ведении которых находятся сооружения, в соответствии с инструкцией «Защита железнодорожных подземных сооружений от коррозии блуждающими токами», МПС, 1999 г.

При наличии договоренности между организациями – владельцами различных трубопроводов возможно устройство совместной защиты. При этом объединяются в единую систему ЭХЗ трубопроводы различного назначения. Если договоренности нет или совместная защита нецелесообразна, то при проектировании и наладке ЭХЗ необходимо предусматривать устранение ее вредного влияния на смежные сооружения.

Вредным влиянием ЭХЗ на соседние металлические сооружения следует считать:

- уменьшение потенциала по абсолютной величине;
- появление опасности коррозии на соседних подземных металлических сооружениях, ранее не требующих защиты от нее;

- смещение в любую сторону от стационарного значения потенциала на кабелях связи, не защищенных катодной поляризацией;
- оборудование и приборы, применяемые при защите, должны быть сертифицированы.

### **Контрольные вопросы**

1. Что такое гальвано-, микро- и макропары?
2. Охарактеризуйте коррозионные гальванические элементы. В чем причины их возникновения?
3. В чем заключается химический принцип коррозии?
4. Что лежит в основе основных положений при защите металлических городских газопроводов?
5. Какие функции выполняют подразделения, отвечающие за защиту от коррозии?

## **Тема 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ КОРРОЗИИ**

### **2.1. Гальванические микронеоднородности**

В таблице приведенной в предыдущей теме представлены вероятные причины возникновения гальванических элементов небольшого размера (коррозионных микропар).

Структурная неоднородность металла представляет собой вкрапления и кристаллиты легирующих добавок. Анодом будут служить металлические включения, имеющие менее благородные свойства, например Fe, Zn – анод, Fe, Cu – катод.

О степени благородства металла судят по его электронному потенциалу: чем он больше, тем более благородный металл. Так, например:  $\varphi_{\text{Fe}} = -0,34 \text{ В}$ ;  $\varphi_{\text{Cu}} = +0,05 \text{ В}$ ;  $\varphi_{\text{Au}} = +1,42 \text{ В}$ .

Структурная неоднородность вызывает межкристаллическую коррозию, что характерно для высокоагрессивных металлов в высокоагрессивных средах, и питтинговую коррозию (вид булавоочных коррозий от 0,1 до 2 мм). Это часто происходит при наличии царапин на поверхности металла.

Дно царапины, как правило, является анодом; если оно забито грязью и продуктами коррозии, то затрудняется проход кислорода. Другие участки, более доступные для кислорода, выполняют роль катода. Пример: неоднородность в виде глубокой щели, образованная двумя листами, ведет к щелевой коррозии.

Заводские риски, появляющиеся при волочении труб, инициируют коррозию, которая, однажды начавшись, может долго продолжаться то затухая, то возобновляясь.

Под слоем окалины протекают анодные процессы, если рядом имеются чистые участки металлической поверхности, не испытывающие недостатка в кислороде. Аналогично влияние и других пористых слоев, окислов, солевых отложений разрушенного изоляционного покрытия. В любом случае затруднение в доставке кислорода инициирует анодный процесс, если рядом есть поверхность, где имеется избыток кислорода.

Деформированный участок поверхности металла – это уже другой металл со своими электрохимическими свойствами и электрохимическим потенциалом, например, отожженный и закаленный участки, грязные участки, участок с наклепом и тому подобное – это потенциально опасные участки коррозии.

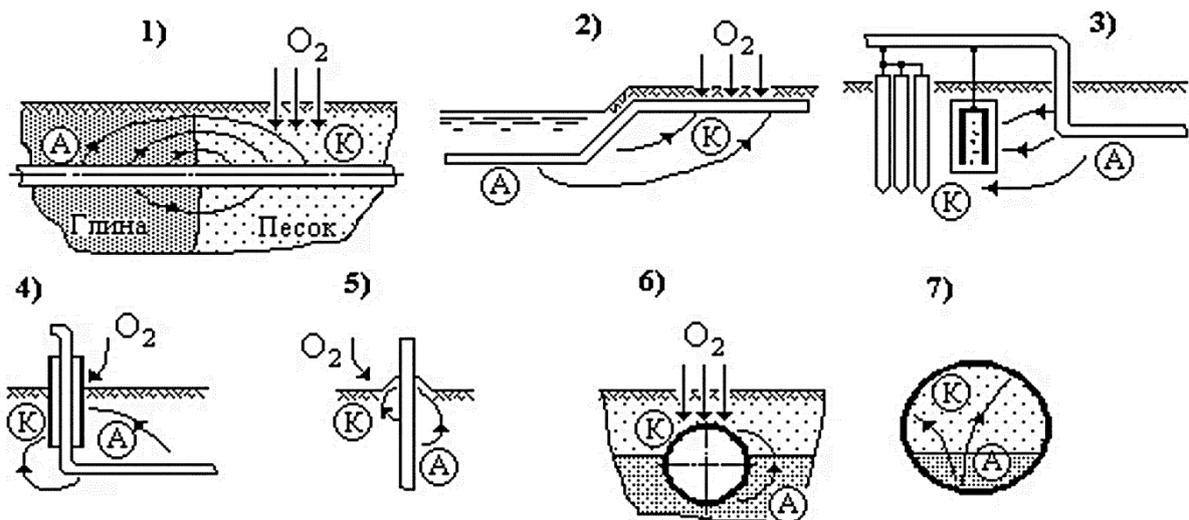
Сварной шов также может вызвать коррозию как непосредственно по шву, так и около него в зависимости от свойств сварного электрода. Коррозионное начало способствует дальнейшему разрушению трубы.

Необходимо отметить, что неоднородности окружающей среды также влияют на скорость развития коррозии. В случае присутствия комка глины в хорошо аэрированном песчаном грунте возникает дифференциальная пара с анодом под глинистой шапкой. Если среда в данной точке отличается по химическому составу, то потенциал металла будет иной.

Таким образом, можно подытожить, что исключение неоднородности – один из основных методов борьбы с коррозией.

## **2.2. Коррозионные макропары**

Возникновение коррозионных макропар обусловлено общим фактором – дифференциальной аэрацией (см. рисунок). Как было сказано ранее, в области повышенной концентрации металл принимает свойства катода, если рядом есть зона с пониженным содержанием кислорода.



Схемы коррозионных макропар

Если в приведенной на рисунке схеме 1 воздухосодержание песчаного грунта выше, чем глинистого, то на трубе, пересекающей границу песок – глина, возникает гальванопара. В песчаном грунте водопровод – катод, в глинистом – анод.

Так как воздухопроницаемость воды выше, чем почвы, то трубопровод, уложенный в воде, будет анодом, в то время, как береговой участок, – катодом (см. схему 2 на рисунке). Это характерно для болотистых трасс с островками плотной или насыпной земли и трасс с резкой переменной влажностью. На более влажных участках – анодная зона.

На предприятиях выполняют заземление корпусов электроустановок, чем связывают арматуру железобетонных опор и различное металлическое оборудование. При этом автоматически подключаются подземные трубопроводы, поскольку последние на вводе цеха крепятся к металлическим частям стен, возникает разветвленная *гальваническая система* – искусственное заземление трубопровода. При этом катодом служит заземлитель, так как облегчен доступ кислорода, а анодом – подземный трубопровод, уложенный во влажный грунт (см. схему 3). Арматура железобетонных конструкций всегда имеет более положительный потенциал, чем открытая сталь, что обусловлено высокой щелочностью бетона, при этом арматура в тонких трещинах бетона всегда выполняет функцию катода, а в местах полного разрушения – анода.

На схеме 4 изображена *макропара* труба изолированная – труба неизолированная. Неизолированной частью ГС является предохраняющий футляр на вводе в здание изолированного трубопровода. Неизолированная труба более доступна для контакта с кислородом, она выступает здесь катодом. Данную проблему удалось бы избежать путем хорошей изоляции трубопровода. Также следует поступать и в случае заземленного трубопровода, т. е. необходимо отсечь его от заземления на вводе в здание – для этого устанавливают изолирующие соединения.

Часто наблюдается коррозия в местах пересечения силового кабеля и неизолированного газопровода при вводе здания. Для того чтобы этого избежать, необходимо изолировать как сам трубопровод, так и соединения (фланцы, муфты, сифоны).

На схеме 5 показано появление макропары на вертикально расположенном металлическом сооружении, например, корпусе корабля, стальной опоре, скважине и т. д. Верхняя часть сооружения, куда поступает больше кислорода, выполняет функцию катода, а нижняя часть – анода. Так, например, разрушение ватерлинии – распространенный вид коррозии корпуса судна в речной и морской воде.

При высокостоящей грунтовой воде возникает макропара выше трубы, где нижняя часть ввиду низкой концентрации кислорода является анодом (см. схему 6).

Одна из причин внутренней коррозии трубопроводов или резервуаров связана с грязевыми отложениями. Если верхняя часть стенки трубы свободна и там присутствует много кислорода, то внизу под плотным слоем грязи может возникнуть мощный анод (см. схему 7).

Общие факторы, способствующие коррозии:

– *движение электролита* – коррозионный процесс активизируется в движущейся коррозионной среде. Если часть металлического сооружения находится в застойной зоне, в ней образуется мощный анод. Сказывается влияние кислорода, доставка кислорода облегчается – вероятность возникновения катодного процесса увеличивается;

– *солесодержание* – с увеличением общего солесодержания процессы коррозии должны возрастать, однако при определенных условиях этого не происходит;

– *температура* – с увеличением температуры скорость коррозионных процессов растет, однако до определенных температур, что связано с обескислороживанием среды при температуре 80 °С и выше;

– *микроорганизмы* – анодные и катодные процессы активизируются при наличии в коррозионной среде определенного типа бактерий, например сульфатвосстанавливающих бактерий, которые размножаются при отсутствии кислорода и образуют сероводород, являющийся сильным окислителем.

### Контрольные вопросы

1. Что понимается под термином «гальваническая микронеоднородность»?
2. Что такое коррозионные макропары?
3. Какие факторы способствуют коррозии?

## Тема 3. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ КОРРОЗИЯ

### 3.1. Потенциал и ток коррозии

Поток ионов железа (Fe) несет положительный заряд, образуя электрический ток  $I_a$ , направленный из анода в коррозионную среду. Такой же по величине ток  $I_k$  создает поток электронов от анода к катоду. Ток  $I$  равен току анода и току катода  $I = I_a = I_k$ , следовательно:

$$I = (\varphi_{ок} - \varphi_{оа})/R,$$

где  $I$  – ток гальванического элемента;

$\varphi_{ок}$ ,  $\varphi_{оа}$  – электрохимические потенциалы катода и анода, определенные при условии холостого хода гальванического элемента ( $J = 0$ );

$R$  – сопротивление цепи анод – среда – катод является нелинейной функцией электродного тока, который подчиняется закономерности

$$I = A e^{n/B},$$

где  $n$  – смещение потенциала относительно равновесного состояния (перенапряжение процесса);

$A$ ,  $B$  – некоторые константы, зависящие от параметров окружающей среды и свойств металла.

Сопротивление цепи между одним из электродов можно вычислить

$$R_{пол} = \frac{\eta}{I},$$

где  $R_{\text{пол}}$  – сопротивление двойного электрического слоя (металл – электролит);

$\eta$  – падение напряжения в этом слое (поляризационное, так как его величина зависит от величины и направления тока поляризации).

Для гальванического элемента, где ЭДС элемента тратится на преодоление коррозионной среды (омического сопротивления между анодом, катодом и двумя поляризационными сопротивлениями), возможно

$$\varphi_{\text{ок}} - \varphi_{\text{оа}} = \eta_{\text{к}} + \eta_{\text{а}} + \Delta U_{\text{с}},$$

тогда

$$I = (\eta_{\text{к}} + \eta_{\text{а}} + \Delta U_{\text{с}}) / (P_{\text{к}}/S_{\text{к}} + P_{\text{а}}/S_{\text{а}} + R_{\text{с}}),$$

где  $\eta_{\text{к}}, \eta_{\text{а}}$  – величина напряжения на поляризационном сопротивлении катода и анода соответственно;

$\Delta U_{\text{с}}$  – падение напряжения в коррозионной среде;

$P_{\text{к}}, P_{\text{а}}$  – удельные поляризационные сопротивления катода и анода, Ом  $\cdot$  м<sup>2</sup>;

$S_{\text{к}}, S_{\text{а}}$  – площадь катода и анода, м<sup>2</sup>;

$R_{\text{с}}$  – сопротивление среды между электродами, Ом.

На рис. 3.1 представлена поляризационная диаграмма Эванса. На оси абсцисс откладываются абсолютные значения тока данного электрода, на оси ординат – смещение потенциала с учетом их знаков ( $\eta_{\text{к}} < 0, \eta_{\text{а}} > 0$ ).

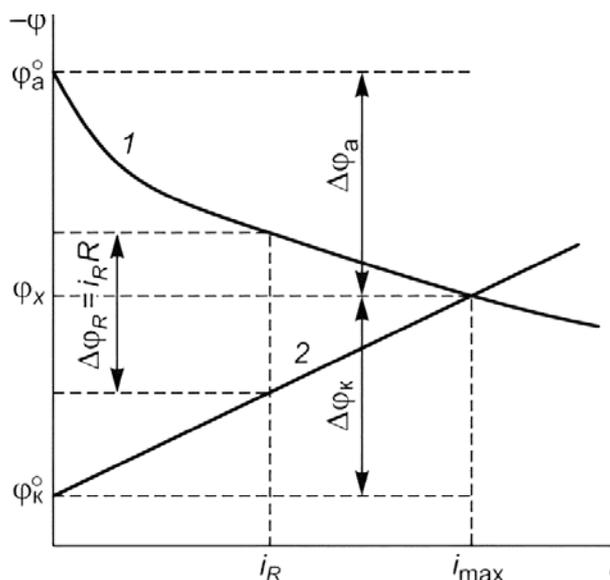


Рис. 3.1. Диаграмма Эванса

С помощью этой диаграммы можно сделать ряд выводов:

– чем больше ток поляризации, тем сильнее поляризуются (изменяют свои потенциалы) электроды, при этом анод поляризуется положительно, а катод – отрицательно;

– в конечном счете электроды приобретают некоторый средний потенциал  $\varphi_{\text{кор}}$  (потенциал коррозии); в идеале это должно бы быть пересечение характеристик катода и анода, если можно было бы пренебречь падением напряжения в среде  $\Delta U_c$ ;

– ток коррозии  $I_{\text{кор}}$  зависит от разности электродных потенциалов, которые не всегда известны;

– ток коррозии тем выше, чем меньше поляризационное сопротивление (чем меньше сопротивление среды).

#### *Показатели коррозионного разрушения*

1. Согласно закону Фарадея количество электричества, стекающего с электрода, пропорционально потере массы этого электрода. Плотность тока с потерей массы выражается следующим образом:

$$i = I / S = G / (S g T) \text{ и } i' = \{0,95v_1, 0,85v_2\},$$

где  $G$  – масса растворенного металла, г;

$S$  – поверхность растворяющегося электрода, м<sup>2</sup>;

$g$  – электрохимический эквивалент металла, г/А;

$T$  – время, ч;

$i$  – величина электродного тока, А;

$i'$  – плотность анодного тока, А/м<sup>2</sup>;

$v_1$  – скорость весовой коррозии, г/м<sup>2</sup>·ч;

$v_2$  – скорость проникающей коррозии, мм/г.

2. Скорость коррозии может быть определена различными методами:

– величиной поляризационного сопротивления;

– методом гравиметрии;

– контролем электросопротивления;

– ультразвуковым контролем;

– радиографическим контролем.

Так как реально оценить скорость коррозии у металла сооружения – сложная задача, то на практике для достоверности применяют одновременно несколько способов.

### 3.2. Ряд напряжений

Если один из электродов принять за стандартный и сравнивать с ним все остальные, то металлы могут быть расположены в порядке возрастания электродных потенциалов, т. е. образуют ряд напряжений (потенциалов).

На схеме представлены некоторые распространенные металлы, расположенные в порядке уменьшения их электродных потенциалов:

Na – Al – Mn – Zn – Cr – Fe (сталь) – Ni – Pb – Cu – Ag.

В данной связи необходимо отметить следующее:

- коррозия металла обычно возникает в присутствии кислорода и воды (электролит), хотя есть исключения;

- коррозия сопровождается движением электронов, т. е. в металле протекает электрический ток;

- коррозия металла не происходит на поверхности равномерно, так как имеются неоднородности и локальные участки, где возникает точечная коррозия;

- продукт коррозии – ржавчина – может образовываться на некотором расстоянии от места зарождения коррозии (например, в точках, где соединяются анодные и катодные продукты);

- высокая концентрация кислорода способствует образованию катода, и непосредственно примыкающий участок становится анодом и корродирует. Коррозия ускоряется с увеличением концентрации кислорода на катоде и ее уменьшением на аноде;

- интенсивность коррозионного взаимодействия между металлами зависит от ЭДС, определяемой разностью потенциалов между металлами, природой электролита, соотношением площади поверхности двух металлов и расстояния между ними;

- пленки, образующиеся на поверхности металла, придают ему определенную стойкость, которая зависит от природы пленки. Металл с плотно прилегающими нерастворенными пленками обладает более высокой коррозионной стойкостью по сравнению с металлом с растворенными пленками. Разрушение пленок вызывает дальнейшую коррозию, обнажая металл;

- на коррозию металла влияет окружающая среда. Степень этого влияния определяется физической характеристикой окружающей

среды (температурой, концентрацией кислорода, рабочими условиями);

– на коррозию металла оказывают влияние его химический состав и микроструктура;

– в материаловедении фазовая составляющая, находящаяся в равновесии при конкретных температурах, давлении и составе сплавов, может быть определена экспериментально и представлена в виде коррозионной диаграммы (рис. 3.2).

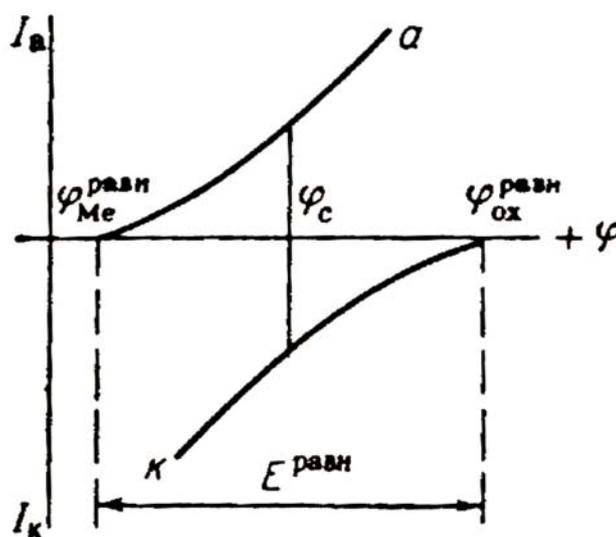


Рис. 3.2. Простейшая коррозионная диаграмма:  
*a* – анодная кривая; *к* – катодная кривая;  $\varphi_{\text{Ме}^{\text{равн}}}$ ,  $\varphi_{\text{Ох}^{\text{равн}}}$  –  
равновесные потенциалы металла и окислителя;  
 $\varphi_{\text{с}}$  – стационарный потенциал корродирующего металла

### 3.3. Основные способы защиты от электрохимической коррозии

На основе законов электрохимии вытекают принципы защиты от электрохимической коррозии (ЭХК):

1. Создание на поверхности металла химически инертного слоя, по возможности непроницаемого для компонентов среды, участвующих в сопряженных реакциях электрохимической коррозии. Эти слои называются *изоляционными*, или *барьерными*, покрытиями. На практике к ним относятся битумные, эпоксидные, полиэтиленовые, каменноугольные и другие покрытия.

2. Уменьшение в среде концентрации агрессивного реагента, участвующего в одной из сопряженных реакций (например, деаэрация воды в системах горячего водоснабжения, т. е. снижение концентрации растворенного кислорода и воздуха).

3. Снижение скорости анодного и катодного процессов путем введения в среду ингибиторов, тормозящих процесс коррозии (например, ингибиторы вводят в защитные органические покрытия, особенно в первый слой, наносимый непосредственно на металл, – *грунтовка*, или *праймер* – раствор битума марки 4 в изоляционном бензине б70 в соотношении 1 к 3).

4. ЭХЗ, при которой скорость анодного процесса за счет изменения потенциала снижается до значений, не превышающих технически допустимую величину, что осуществляется путем снижения потенциала в пределах активной области с помощью катодной поляризации или переводом потенциала из активной области в пассивную за счет анодной поляризации – так называемая катодная защита. Если для этого используются специальные источники постоянного тока, то ЭХЗ называют *катодной* (станция катодной защиты). Если потенциал понижается при соединении защитного объекта к протектору, т. е. к металлу со значительно более отрицательным потенциалом коррозии (Mg, Al, Zn), то защита называется *протекторной*, или *гальванической*.

5. Нанесение на поверхность стали анодных металлических покрытий (Al, Zn, Cr).

6. Рациональное проектирование и эксплуатирование металлоконструкций включает:

- выбор трассы;
- выбор защитных покрытий с учетом агрессивности почвы, в особенности для сильноагрессивных;
- обеспечение требований качества изоляционных покрытий, их сохранность при хранении, перевозке, укладке;
- систематический контроль за качеством покрытий в процессе эксплуатации;
- исключение контактов труб с арматурой железобетона;
- максимальное уменьшение возможности образования электрических контактов (однородная подсыпка, секционирование с трубопроводом и т. д.).

## Контрольные вопросы

1. Что означают понятия «потенциал» и «ток коррозии»?
2. Что относится к показателям коррозионного разрушения?
3. В чем смысл понятия «ряд напряжений»?
4. Приведите пример расстановки элементов в ряде напряжений.
5. Перечислите основные способы защиты от ЭХК.

## Тема 4. КОРРОЗИЯ В ГРУНТЕ

### 4.1. Коррозионная активность грунтов и методы ее определения

Коррозионная активность зависит от многих факторов: температуры, влажности, солевого состава, щелочности и т. д. Для определения активности грунтов применяют понятие электропроводности почв, которая играет существенную роль в коррозионном процессе. У большинства почв коррозионная активность возрастает с увеличением их проводимости, которая характеризует удельное электросопротивление  $\rho$  (Ом/м). Чем ниже  $\rho$ , тем выше коррозионная активность.

Наибольшую опасность с позиции силы коррозии представляют протяженные трубопроводы. Для них имеет место нестабильное значение проводимости почв, а также их чередование вдоль трассы. Коррозионная активность с увеличением влажности повышается, затем, достигнув максимума, снижается вследствие ограниченного доступа кислорода. Коррозионная активность влажных почв с увеличением воздухопроницаемости также увеличивается, достигнув максимума, и уменьшается из-за снижения влажности.

Влажность и воздухопроницаемость характеризуют водовоздушный режим почв, который меняется в зависимости от глубины заложения трубопровода и времени года. Повышение общей кислотности почв способствует коррозии, как и повышение температуры, поэтому наряду с коррозионной активностью грунтов по удельному электросопротивлению должны быть измерены и другие параметры.

### ***Методы определения коррозионной активности грунтов***

Наиболее точным методом можно назвать анализ и обследование характерных разрушений на трассе, однако условия для этого на практике неприменимы, и он используется редко. Широкое распространение нашли методы, основанные на наиболее важных факторах коррозии. Их можно разделить на следующие виды:

- лабораторные – требуют отбора почв на трассе в выбранных точках с последующим лабораторным испытанием образцов;
- полевые – позволяют определить коррозионную активность грунта непосредственно на трассе без отбора проб путем выполнения на месте необходимых измерений. Они не требуют больших затрат и времени и получили наибольшее распространение;
- лабораторно-полевые – требуют отбора образцов, но необходимые работы настолько просты, что они могут быть выполнены в передвижной лабораторной установке.

Коррозионную активность грунта по отношению к углеродистой стали подземных металлических сооружений определяют:

- по удельному электросопротивлению (по специально разработанной схеме);
- потере массы образца (используется прибор, состоящий из банки, трубки, источника постоянного тока и регулятора сопротивления);
- плотности поляризационного тока (МС08, ЭП1М, М231, Ш-39 и др.).

### **4.2. Критерии опасности коррозии подземных стальных трубопроводов**

Коррозионная агрессивность грунтов по отношению к подземным стальным трубопроводам характеризуется:

- удельным электрическим сопротивлением грунта, определенного в полевых условиях;
- удельным электрическим сопротивлением грунта, определенного в лабораторных условиях;

– средней плотностью катодного тока, необходимого для смещения потенциалов стали в грунте на 100 мВт отрицательного стационарного потенциала (потенциала коррозии). Если один из показателей свидетельствует о высокой коррозионности грунтов, то грунт считается агрессивным и определение других показателей необязательно.

Коррозионная характеристика грунтов представлена в таблице.

Характеристика коррозионности грунтов

Коррозионная агрессивность грунта	Удельное электрическое сопротивление грунта, Ом/м	Средняя плотность катодного тока, А/м <sup>2</sup>
Низкая	> 50	Менее 0,05
Средняя	20 – 50	0,05 – 0,2
Высокая	< 20	Более 0,2

Опасным влиянием блуждающего тока на ПСТ является наличие изменения по знаку и величине смещения потенциала трубопровода по отношению к его стационарному потенциалу (закономерная мера) или наличие только положительного смещения потенциала, как правило, изменяется по величине (анодная зона). Для проектных трубопроводов опасным считается наличие блуждающих токов в земле.

Опасное воздействие переменного тока на стальные трубопроводы характеризуется смещением среднего потенциала трубопровода в отрицательную сторону не менее чем на 10 мВт по отношению к стационарному потенциалу либо наличием применения тока плотностью более 1 мА/см<sup>2</sup> (10 А/м<sup>2</sup>) на вспомогательном электроде.

Применение электрохимической защиты обязательно:

– при прокладке трубопроводов в грунтах с высокой коррозионной агрессивностью;

– при наличии опасного влияния постоянного блуждающего и переменного токов.

При защите от почвенной коррозии катодная поляризация (кроме трубопроводов, транспортирующих нагретые выше 20 °С жидкие газообразные среды) должна осуществляться таким образом, чтобы средние значения поляризующих потенциалов металлов находились в пределах 0,85 – 1,15 В по насыщенному медно-сульфатному электроду сравнения.

Катодная поляризация ПСТ, по которому транспортируются нагретые выше 20 °С среды, должна осуществляться таким образом, чтобы средние значения поляризационных потенциалов стали находиться в пределах 0,95 – 1,15 В.

ЭХЗ от коррозии, вызываемой блуждающими постоянными токами, должна выполняться таким образом, чтобы обеспечивалось отсутствие на сооружении анодных и знакопеременных зон. При защите ПСТ в грунтах с высокой коррозионной агрессивностью при опасном одновременном влиянии блуждающих токов среднее значение поляризационных потенциалов должно быть не меньше значения стационарного потенциала.

Защита от коррозии, вызываемой блуждающими токами от электрифицированного на переменном токе транспорта, а также переменными токами, индуцированными от высоковольтных линий передач, выполняется в опасных зонах независимо от коррозионной агрессивности грунтов путем катодной поляризации. Она осуществляется таким образом, чтобы среднее значение поляризационных потенциалов находилось в пределах от 0,9 до 1,15 В или суммарных потенциалов от 0,95 до 2,5 В для трубопроводов с мастичными и ленточными покрытиями и от 0,95 до 3,5 В – для трубопроводов с покрытием экструдированным полиэтиленом.

В тех случаях, когда обеспечение защитных потенциалов на действующих трубопроводах, длительное время находящихся в эксплуатации в коррозионно-опасных условиях, экономически нецелесообразно, допускается по согласованию с проектной и эксплуатационной организациями, а при необходимости с органами технического надзора применение смягчающего критерия защищенности – минимального поляризационного защитного слоя.

### **4.3. Жесткость воды**

Жесткость воды – мера содержания в воде растворенных в ней солей Са и Mg. Различают некарбонатную, карбонатную и общую жесткость.

Некарбонатная жесткость  $J_{нк}$  обуславливается содержанием сульфатов, хлоридов и других солей (кроме бикарбонатов). При кипячении воды они остаются в растворе.

Карбонатная жесткость  $J_k$  характеризуется содержанием бикарбонатов. При кипячении воды бикарбонаты переходят в нерастворимые в воде карбонаты.

Общая жесткость  $J_0$  обуславливается общим содержанием солей Ca и Mg, ее можно выразить следующим образом:

$$J_0 = \frac{|Ca^{2+}|}{20,04} + \frac{|Mg^{2+}|}{12,16},$$

где 20,04 и 12,6 – эквивалентная масса соответственно Ca и Mg.

Если количество гидрокарбонатов в воде превышает содержание Ca и Mg ( $[HCO_3^-] > [Ca^{2+}] + [Mg^{2+}]$ ), то карбонатная жесткость эквивалентна суммарному содержанию кальция и магния при

$$\frac{|Ca^{2+}|}{20,04} + \frac{|Mg^{2+}|}{12,16} < \frac{|HCO_3|}{61,02},$$

$$J_k = J_0.$$

Если количество ионов кальция и магния больше, чем количество гидрокарбонатов, то карбонатная жесткость равна концентрации  $[HCO_3^-]$  при

$$\frac{|Ca^{2+}|}{20,04} + \frac{|Mg^{2+}|}{12,16} > \frac{|HCO_3|}{61,02},$$

$$J_k = \frac{|HCO_3|}{61,02}.$$

Приведем классификацию природных вод по жесткости (мг · экв/л):

- мягкая:  $< 4$ ;
- средней жесткости:  $4 - 8$ ;
- жесткая:  $8 - 12$ ;
- очень жесткая:  $> 12$ .

Жесткость речных вод обычно невысокая –  $1 - 6$  мг · экв/л. Жесткость питьевой воды по ГОСТу должна быть не выше  $7$  мг · экв/л и лишь в особых случаях допускается до  $14$  мг · экв/л.

### Контрольные вопросы

1. В чем заключается химический смысл почвенной коррозии?
2. Каковы методы определения коррозионной активности грунтов?

3. Как описывается (критерии) коррозионная агрессивность грунтов?

4. В каких случаях применение ЭХЗ для трубопроводов обязательно?

## **Тема 5. РАСПРОСТРАНЕННЫЕ ВИДЫ КОРРОЗИИ И МЕРЫ ПО ИХ ПРЕДОТВРАЩЕНИЮ**

### **Общие сведения**

Нерациональная деятельность человека привела к усилению коррозионной активности атмосферы, почвы и природных вод. Возрастает сложность коррозионных проблем.

Еще десять лет тому назад основным содержанием дискуссий по поводу коррозии были общие концепции. Так, один из вариантов сводился к предложению избегать применения конкретного металла или обеспечивать тщательную подготовку его поверхности. Составлялись специальные таблицы, которые содержали данные, характеризующие совместимость различных металлов с точки зрения недопустимости их сопряжения в узлах или недопустимости контакта между их ионами в электролитическом растворе. Эти общие положения до сего времени имеют известную ценность, однако их следует рассматривать как предварительные.

Любой коррозионный процесс является химически сложным. Он не соответствует тому простому случаю, при котором один материал окисляется до ионного состояния, а другой восстанавливается путем приобретения электронов. Полезной может оказаться такая модель, согласно которой в первую очередь следует считаться с поверхностными явлениями, которые вызывают коррозионный процесс, а затем – с совокупным влиянием индивидуальных коррозионных поражений.

В качестве примера можно привести информацию фирмы «Дюпон» о причинах разрушений металлического оборудования за период 2018 – 2020 гг.: 56,9 % разрушений – от коррозии, 43,1 % – от механических повреждений. При этом более детально коррозионные процессы представлены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

## Распределение по видам коррозии

Коррозионные разрушения	Процент
Общая коррозия	28,2
Коррозионное растрескивание	20,9
Коррозионная усталость	14,0
Питтинг (точечная коррозия)	9,1
Межкристаллитная коррозия	8,5
Эрозионная коррозия	8,0
Кавитационное разрушение	2,0
Фреттинг-коррозия	2,1
Высокотемпературная коррозия	2,1
Коррозия сварных швов	1,6
Термоконтактная коррозия	1,1
Щелевая коррозия	1,0
Избирательная коррозия	0,8
Водородное поражение	0,4
Контактная коррозия	0,2
Всего	100

### 5.1. Кавитационные повреждения

Повреждение материала, связанное со схлопыванием пустот в жидкости на поверхности ее раздела с твердым телом, называется *кавитационным разрушением* (рис. 5.1).

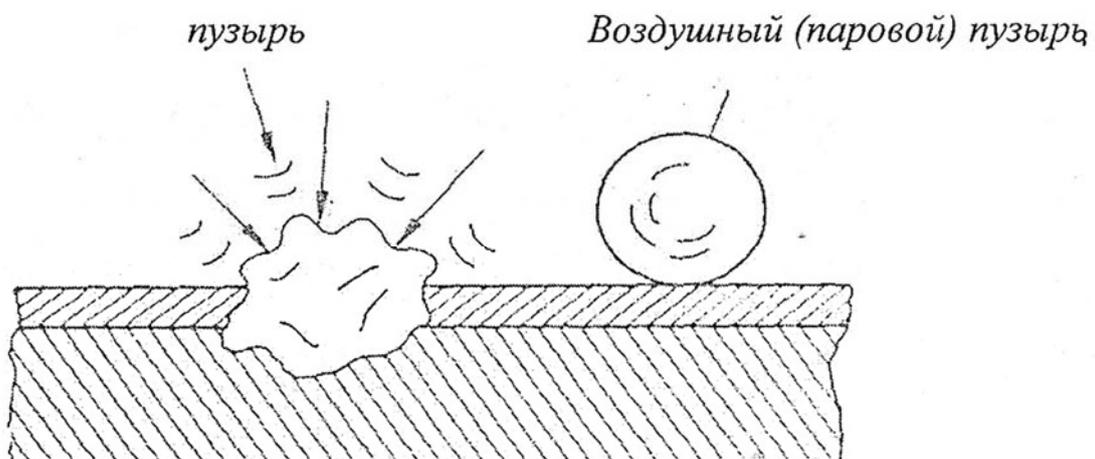


Рис. 5.1. Кавитационное разрушение

Поверхность защитных пленок на металле может подвергаться как слабому физическому повреждению (кавитационная коррозия), так и сильной деформации и разрушению поверхности (кавитационная деформация). При этом происходит повторяющийся процесс схлопывания паровых пузырей на поверхности металла (кавитационная усталость).

***Мероприятия по защите:***

- избегать условий, при которых абсолютное давление падает ниже давления паров жидкости;
- сводить к минимуму разности гидродинамических давлений;
- понижать перенос вибрации;
- выбирать соответствующие геометрические формы или углы поверхности, на которой происходит формирование, накопление и нежелательное движение газовых пузырей в жидкости;
- препятствовать доступу диспергированного воздуха (если он не нужен для формирования защитного слоя окислов);
- выбирать стойкие материалы, упрочняющиеся в результате наклепа, производимого разрушающимися пузырями;
- обеспечивать качественную обработку поверхности металла;
- наносить на поверхность эластичные покрытия или облицовки;
- использовать катодную защиту;
- вводить или генерировать в жидкости более крупные воздушные или газовые пузыри, амортизирующие процесс кавитации.

## **5.2. Щелевая коррозия**

*Щелевая коррозия* – локализованная коррозия, возникшая в результате образования щели (зазора) между двумя поверхностями, по крайней мере одна из которых металлическая.

*Концентрационный элемент* – это гальваническая ячейка, ЭДС которой обусловлена разностью концентраций одной или более реакционноспособных составляющих электролитического раствора (рис. 5.2).

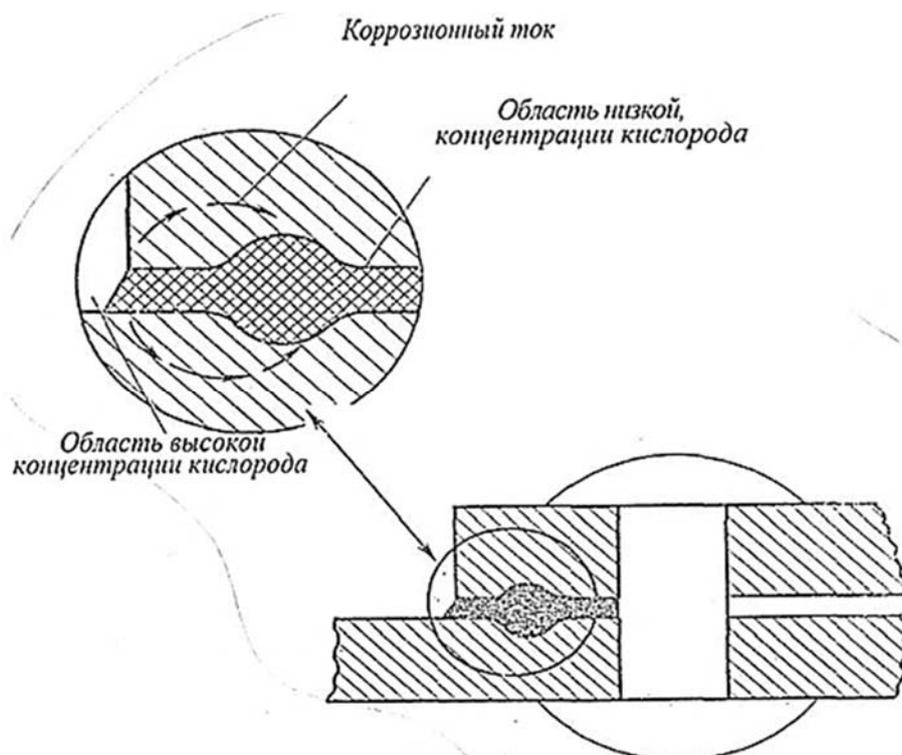


Рис. 5.2. Концентрационный элемент

Кислородные концентрационные элементы существуют в щелях (зазорах), а также в зонах ватерлинии на участках со сцепленными осадками (отложениями) и значительными углублениями, которые препятствуют диффузии кислорода и создают разности концентраций раствора. Зоны с пониженным содержанием кислорода анодны и поэтому склонны к коррозии.

Концентрационные элементы, возникающие из-за различной концентрации ионов металла, подобно кислородным концентрационным элементам стремятся сократить различие концентраций. Так, когда раствор над одним участком металла содержит больше ионов металла, чем над другим, металл переходит в раствор там, где концентрация ионов ниже.

***Мероприятия по защите:***

- уменьшать до необходимого минимума зазоры, в особенности в зонах теплообмена или там, где водные среды содержат неорганические соединения (в растворенном виде) или растворенный кислород;
- при конструировании избегать острых углов, а также образования застойных зон;

- при конструировании стремиться к полному дренажу и обеспечивать однородность среды;
- предотвращать доступ коррозионных агентов в зазоры путем улучшения подгонки при сборке, употребления непроницаемых уплотнительных материалов, капсулирования, обертывания и уплотнения;
- избегать щелевого эффекта между изоляцией и подложкой;
- использовать такие конструктивные формы, которые облегчают очистку поверхности и нанесение защитных покрытий;
- предусматривать удаление окислы и посторонних веществ с поверхностей металла, выбирая при проектировании соответствующие конструктивные формы;
- избегать попадания посторонних веществ в среду и образования осадков;
- устранять взвешенные твердые вещества путем фильтрации;
- вместо болтовых и заклепочных соединений применять стыковые сварные швы;
- применять непрерывную сварку; при соединении внахлестку зазоры закрывать непрерывной сваркой, запаиванием, зачеканиванием;
- предусматривать качественную сварку, при которой обеспечивается полный провар и исключаются пористость и зазоры;
- индивидуально оценивать возможность возникновения и развития щелевого эффекта применительно к каждому из отбираемых материалов;
- избегать упаковок из волокнистых или гигроскопических материалов; применять ингибирование среды в зазорах и застойных зонах.

### **5.3. Эрозионная коррозия**

*Эрозионная коррозия* – это коррозионная реакция, ускоренная истирающим действием при быстром относительном перемещении среды; истирающее действие обычно достигается присутствующими в среде твердыми частицами (рис. 5.3).

*Ударная коррозия* – локализованная коррозия, возникающая вследствие непосредственного воздействия и эрозии (совместно и по отдельности) при столкновении жидкости с поверхностью.

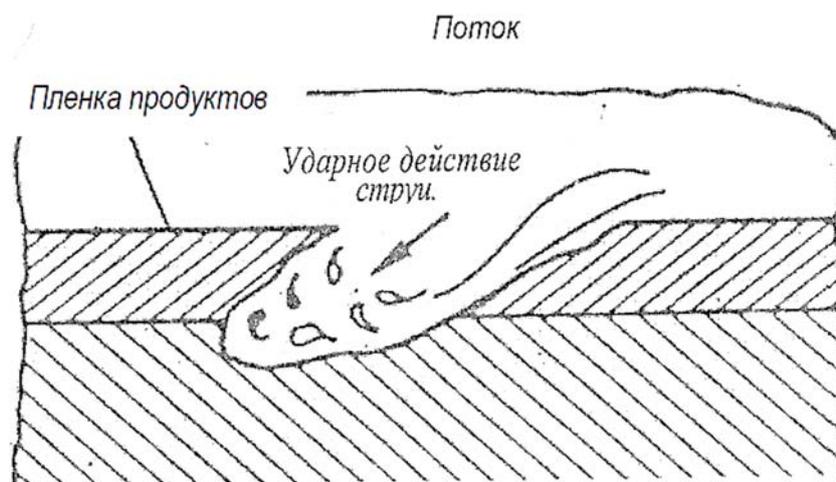


Рис. 5.3. Эрозионная коррозия

*Разъедание под действием струи пара* – коррозионное разъедание, ускоряемое потоком влажного пара, имеющего скорость более 60 м/с.

Ударная коррозия возникает под действием водяного потока, разрушающего коррозионные окисные пленки и растворяющего металл. Причиной разрушения под действием струи пара является скорость влажного пара. Действие ударной коррозии зависит главным образом от скорости жидкости, количества содержащегося в ней воздуха или числа твердых частиц, а также всех других факторов, влияющих на скорость образования защитных пленок.

***Мероприятия по защите:***

- снижать скорость потока жидкости и обеспечивать условия ламинарного течения;
- регулировать содержание воздуха в жидкой среде в соответствии со стойкостью металла;
- создавать условия безвихревого течения; избегать конструктивных форм, вызывающих турбулентность или сужение потока жидкости;
- сводить к минимуму резкие изменения в направлении потока;
- выравнивать трубные секции;
- скруглять входные и выходные кромки;
- устранять преграды для потока жидкости (как существующие, так и потенциально возможные);
- увеличивать толщину стенок материала в уязвимых местах;

- устанавливать заменяемые противоударные пластины и направляющие поток козырьки;
- предусматривать при конструировании легкую замену взаимозаменяемых деталей;
- предусматривать фильтры для улавливания абразивно действующих загрязнений в жидкостях или водяные ловушки в потоках водяного пара и сжатого воздуха;
- обеспечивать гладкие аэро- или гидродинамические поверхности;
- избегать грубой текстуры поверхности;
- подбирать соответствующие материалы;
- предусматривать необходимые покрытия или обкладки;
- применять катодную защиту.

#### 5.4. Коррозионная усталость

*Коррозионная усталость* – это разрушение, вызываемое применением переменных нагрузок в присутствии коррозионной среды и протекающее в форме растрескивания (рис. 5.4).

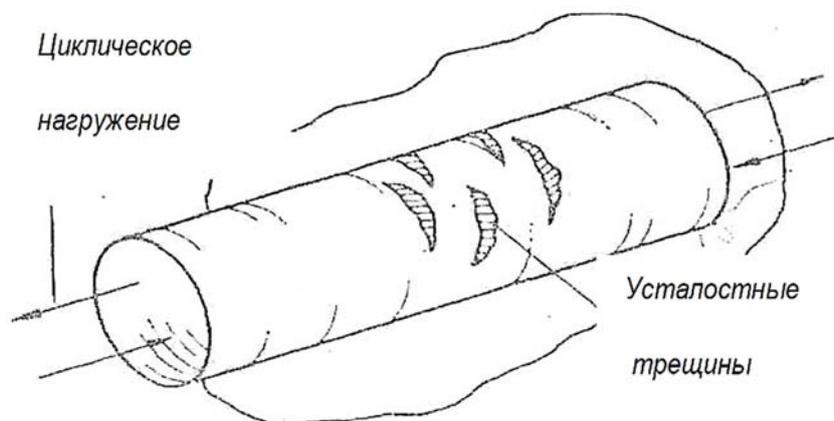


Рис. 5.4. Коррозионная усталость

В значительной степени подобно тому как при сочетании статических напряжений с коррозией возникает коррозионное растрескивание, при сочетании циклических нагрузок с коррозией возникает коррозионная усталость. Она выражается в разрушении металла, происходящем при существенно более низком пределе усталости, чем в некор-

розионных условиях. Эффект разрушения при комбинированном воздействии коррозии и циклической нагрузки больше, чем сумма соответствующих эффектов при отдельном воздействии коррозии и циклической нагрузки.

***Мероприятия по защите:***

- максимально уменьшать или устранять циклические нагрузки;
- увеличивать размеры, массу или локальную прочность в критических сечениях;
- уменьшать концентрацию напряжений или перераспределять их;
- придавать обтекаемую форму галтелям для уменьшения концентрации напряжений и рассредоточения последних;
- распределять напряжения и деформации по всему конструктивному элементу;
- выбирать правильную форму критических сечений;
- изменять форму и размеры деталей с целью перераспределения неиспользуемого материала в незагруженных элементах на находящиеся под критической нагрузкой сечения;
- обеспечивать достаточную пластичность, чтобы уменьшить повышение напряжений вследствие термического расширения, вибраций, ударов и эксплуатации сооружений и оборудования;
- учитывать возможность быстрых изменений нагрузки, температуры или давления;
- избегать внутренних напряжений, биений в конструкциях, возникновения или переноса вибрации;
- увеличивать частоту собственных колебаний проектируемого объекта с целью уменьшения резонансной коррозионной усталости;
- применять конструкционные материалы с повышенными пластичностью и ударной вязкостью;
- ослаблять напряжения путем термической обработки, дробеструйного наклепа, обкатки, обжата, жидкостного хонингования и др.;
- предусматривать соответствующую обработку поверхности, устранение при проектировании концентраторов напряжений, фреттинга, задира и коррозии;
- предусматривать электроосаждение цинковых, хромовых, никелевых, медных покрытий и азотирование с учетом технологии, исключающей возникновение растягивающих напряжений;

– изменять состав среды или ингибировать ее с целью понижения коррозионной активности.

### 5.5. Фреттинг-коррозия

*Фреттинг-коррозия* – локализованное разрушение на поверхности раздела между двумя контактирующими поверхностями, ускоренное относительным движением с амплитудой, достаточной для обеспечения скольжения одной поверхности относительно другой (рис. 5.5).

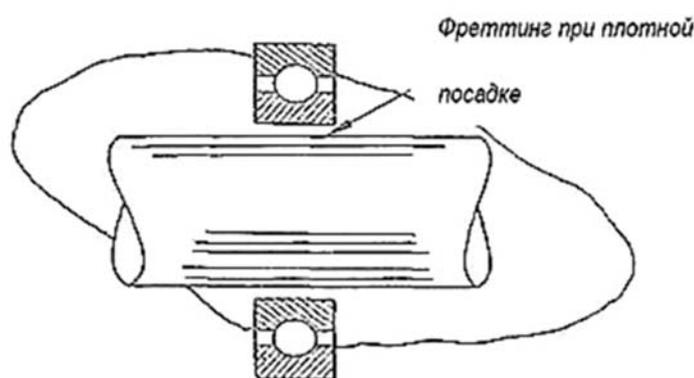


Рис. 5.5. Фреттинг-коррозия

Данный вид коррозии развивается при тесном контакте двух поверхностей, обычно находящихся под достаточно большой нагрузкой и подвергающихся очень слабому относительному движению (малейшие скольжения, вызываемые вибрациями высокой частоты). Различия в упругой деформации поверхностей могут быть причиной для возникновения в этих условиях фреттинг-коррозии, которая, по-видимому, вызывается сваркой контактирующих выступов с последующим их разрушением. Местное воздействие может вызывать образование усталостных трещин, особенно при концентрации напряжений или наличии питтинга на сопряженных поверхностях. Изнашивание поверхностных защитных пленок может вызывать контактную коррозию и коррозию, обусловленную работой концентрационного элемента.

#### ***Мероприятия по защите:***

- устранять конструктивные элементы, передающие вибрацию;
- вводить барьер между металлами, скользящими относительно друг друга;

- увеличивать сжимающую нагрузку (но не перегружать!) до прекращения взаимного скольжения;
- подбирать соответствующие материалы;
- предусматривать защитные покрытия из пористого (удерживающего смазку) материала;
- изолировать движущиеся детали от неподвижных;
- увеличивать абразивную устойчивость сопряженных поверхностей специальной обработкой одной из них или обеих;
- обеспечивать недоступность опорных поверхностей для кислорода;
- улучшать смазку путем обеспечения лучших условий поступления смазочных материалов;
- обеспечивать смывание мельчайших обломков (окисных пленок и металла), используя движение смазки;
- подбирать соответствующие смазки.

## 5.6. Контактная коррозия

*Контактная коррозия* – это коррозия, возникающая при сопряжении разнородных электродов, помещенных в электролитическую среду. Скорость этой коррозии соответствует величине генерируемого тока (рис. 5.6).

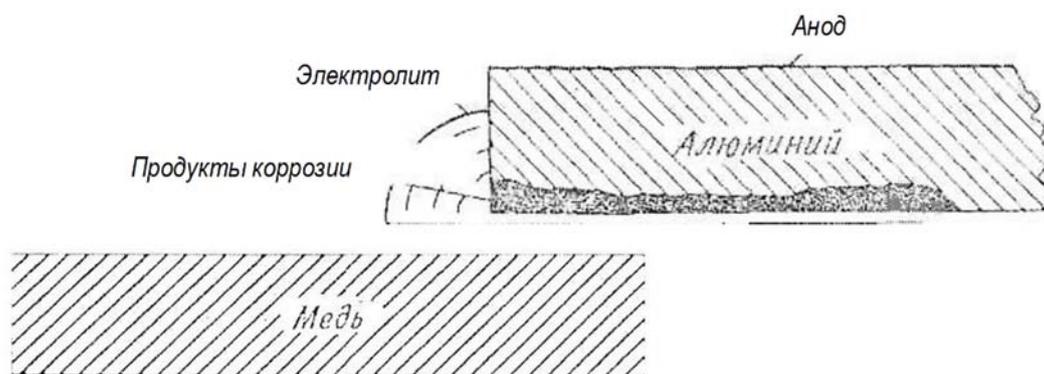


Рис. 5.6. Контактная коррозия

Когда два различных металла, помещенных в электропроводную среду, находятся в непосредственном контакте либо электрически со-

единены проводником или проводящей средой, происходит преимущественное разрушение одного из металлов, являющегося анодным, тогда как коррозия другого, называемого катодным, тормозится или прекращается совсем.

***Мероприятия по защите:***

– избегать гальванопар (если нет необходимости их использования по конструктивным соображениям). Если же такое сочетание разнородных металлов необходимо, то из таблицы «Ряд напряжений металлов» для конкретной среды следует подбирать совместимые металлы либо обеспечивать полную электрическую изоляцию одного металла от другого; для такой изоляции подбирать подходящие и эффективные материалы;

– избегать неблагоприятного эффекта, вызываемого сочетанием малого анода с большим катодом;

– увеличивать расстояние между неодинаковыми металлами в проводящей среде;

– предусматривать возможность замены анодных деталей или изготавливать их более толстыми;

– изменять относительное положение разнородных металлов для устранения загрязнения поверхности анодных деталей частицами катодного металла;

– избегать резьбовых соединений деталей из материалов, расположенных в ряду напряжений далеко один от другого;

– более предпочтительны соединения, паянные твердым припоем, сварные и полученные сплавлением;

– избегать размещения гальванопар из разнородных металлов в пористых, поглощающих влагу материалах;

– предусматривать применение совместимых металлов для сварки и пайки твердым припоем и нанесение эффективных непористых покрытий, в особенности на катодные поверхности контактных пар;

– не использовать электропроводные покрытия, если они несовместимы с сопряженными металлами;

– не полагаться полностью на окрашивание для достижения эффективного разделения сопряженных металлов;

– использовать катодную защиту;

– снижать агрессивность среды путем ингибирования;

- регулировать степень аэрации жидких сред в направлении уменьшения контактной коррозии сопряженных металлов или создавать соответствующие изменения температуры, характеристик движения или химического характера среды;
- обеспечивать эффективную вентиляцию сопряженных металлов;
- препятствовать доступу воздуха и (или) воды к биметаллическому соединению;
- избегать употребления несовместимых химических веществ для пропитывания материалов, содержащих сопряжения разнородных металлов;
- использовать контактную коррозию в ее полезной форме для катодной защиты материалов и деталей, которым угрожает коррозионное разрушение.

## 5.7. Высокотемпературная коррозия

*Высокотемпературная коррозия* – коррозия, связанная с влиянием атмосферных условий, различных газов, расплавленных металлов и солей при высоких температурах (рис. 5.7).

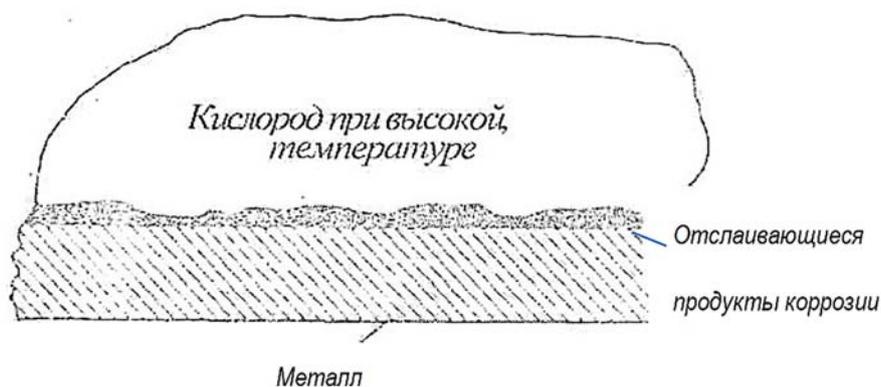


Рис. 5.7. Высокотемпературная коррозия

Эта коррозия вызывается воздействием высоких температур и определяется составами основного металла и окружающей среды (газы, соли, металлические расплавы), температурой и временем выдержки; сильно изменяет свою скорость и формы в зависимости от этих факторов. На металлах с малым удельным весом (меньше удельного веса их окислов) образуется слой, который не является защитным и утолщается с

течением времени, а затем отслаивается и образуется вновь. К другим формам высокотемпературной коррозии относятся сульфидная коррозия, науглероживание и обезуглероживание.

**Мероприятия по защите:**

- выбирать стойкие материалы;
- подбирать оптимальные температуры и составы сред;
- регулировать продолжительность нежелательного контакта изделия с агрессивной средой.

## 5.6. Водородное разрушение

*Водородное разрушение* – это уменьшение способности нести нагрузку вследствие внедрения водорода в металл (рис. 5.8).

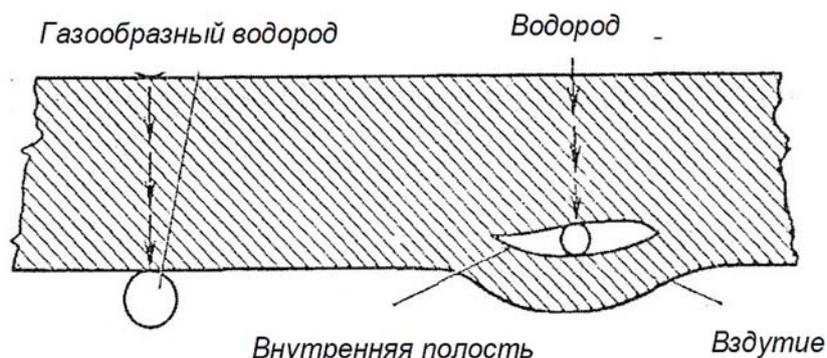


Рис. 5.8. Водородное разрушение

Причиной водородного разрушения следует назвать механическое повреждение металла, обусловленное присутствием водорода или взаимодействием с ним. Водородное вспучивание и водородное охрупчивание возникают в результате внедрения атомарного водорода в металл. Обезуглероживание вызывается водородом при высоких температурах. Дезинтеграция кислородсодержащего металла в присутствии водорода называется водородной болезнью. Появление водорода связано с технологическими операциями обезжиривания, травления, катодной защиты, сварки.

**Мероприятия по защите:**

- использовать металл с чистой поверхностью;
- применять устойчивый (монометаллический или плакированный) материал;

- использовать сварочные электроды с низким содержанием водорода в обмазке и обеспечивать проведение сварки в сухих условиях, а также правильную подготовку поверхности и ее обработку;
- исключать ошибки при выполнении операций травления и нанесения металлопокрытий;
- обеспечивать металлизацию водородостойким металлом или использовать биметалл с соответствующей водородостойкой плакировкой;
- создавать напряжения сжатия;
- удалять водород из металла горячей сушкой (93 – 149 °С);
- осуществлять контроль за химическим составом среды: применение ингибиторов, устранение сульфидов, соединений мышьяка, цианидов и фосфорсодержащих ионов;
- контролировать потенциал катодной защиты;
- предусматривать нанесение непористых защитных покрытий (резины, пластика);
- избегать анодных металлических покрытий.

## 5.9. Межкристаллитная коррозия

Коррозия, преимущественно протекающая по границам между зернами металла или сплава, называется *межкристаллитной* (рис. 5.9).

По ряду причин происходит избирательное разъедание и межкристаллитное растрескивание вдоль границ между зернами металла. В некоторых аустенитных нержавеющих сталях в процессе охлаждения после сварки происходит выпадение карбидов хрома на границах между зернами. Коррозия разрушает участки, обедненные хромом (разрушение швов, ножевая коррозия).

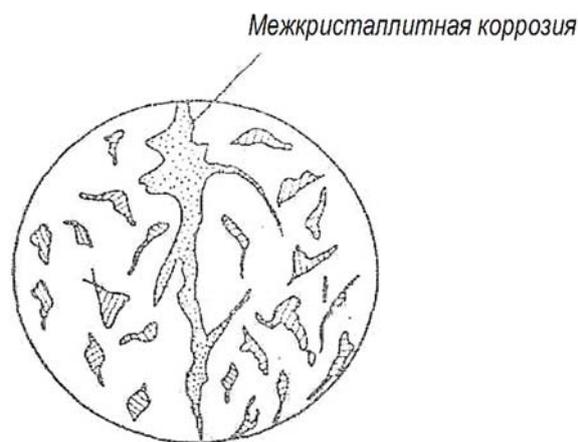


Рис. 5.9. Межкристаллитная коррозия

### ***Мероприятия по защите:***

- подбирать материалы, не склонные к обеднению границ между зернами (стабилизированные);
- применять соответствующий режим термообработки (высокотемпературный гомогенизирующий отжиг);
- избегать назначения технологических режимов термической обработки или сварки в опасном температурном интервале с точки зрения склонности к межкристаллитной коррозии.

## **5.10. Микробиологическая коррозия**

*Микробиологическая коррозия* – разрушение материалов, вызываемое как непосредственно, так и косвенно жизнедеятельностью бактерий, плесени или грибов.

Микробы (бактерии, грибки, плесень) вызывают коррозию в результате:

- а) химического воздействия на металлы, бетон и другие материалы побочными продуктами жизнедеятельности микробов, а именно: кислотами (например, серной, угольной и другими органическими кислотами), сероводородом или аммиаком;
- б) бактериального воздействия на органические материалы (например, органические лакокрасочные покрытия), некоторые природные неорганические вещества (например, серу) или ингибиторы;
- в) активации поверхности металла и образования коррозионных элементов;
- г) разрушения металла в результате процесса, при котором микробы и металл одновременно участвуют в коррозионной реакции;
- д) разъедания вследствие жизнедеятельности разных бактерий.

### ***Мероприятия по защите:***

- тщательно анализировать возможность заражения среды микроорганизмами, вызывающими коррозию;
- осуществлять химический контроль состава среды;
- производить ингибирование или добавлять гермициды;
- поддерживать среду неагрессивной или обеспечивать контролируемое удаление из нее питательных для микробов веществ;

- подбирать соответствующие стойкие материалы и подходящие защитные покрытия;
- применять катодную защиту;
- предусматривать возможность частых очисток.

### 5.11. Питтинг (точечная коррозия)

*Питтинг* (точечная коррозия) – это самокатализируемая локализованная коррозия, при которой происходит прогрессирующее проникновение вглубь металла с образованием язв (рис. 5.10).

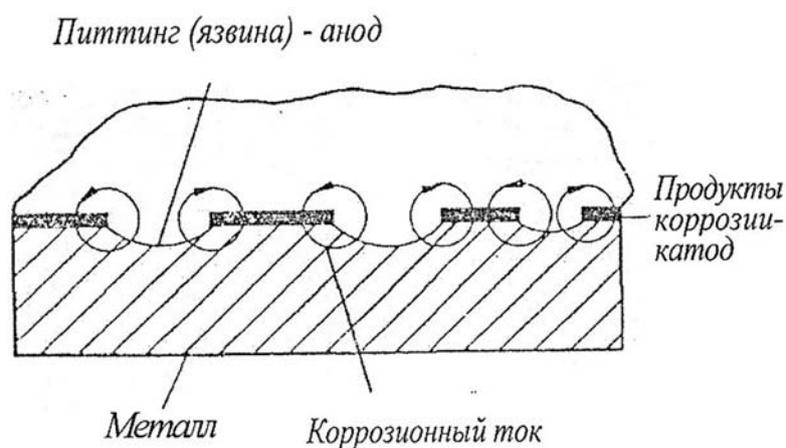


Рис. 5.10. Питтинг (точечная коррозия)

Локализованная коррозия в форме питтинга возникает при разрушении защитной пленки или слоев продуктов коррозии. По месту разрушения пленки образуется анод, а неразрушенная пленка (или продукты коррозии) становится катодом. Точечные разрушения образуют начальные точки концентрации напряжений, вследствие чего могут возникнуть или ускориться разрушения паза коррозионного растрескивания или коррозионная усталость.

#### **Мероприятия по защите:**

- подбирать соответствующие стойкие материалы;
- выбирать соответствующие геометрические формы для предотвращения условий, способствующих возникновению питтинга (увеличивать скорость потока);
- устанавливать толщину стенки изделия с учетом глубины язвы;

- обеспечивать контроль химического состава среды (не полагаться только на ингибиторы, если с их помощью разъедание не может быть полностью остановлено);
- предусматривать защитные покрытия (улучшать текстуру поверхности);
- обеспечивать образование непрерывной и прочной защитной пленки.

## 5.12. Селективная коррозия

Процесс удаления растворимого компонента из сплава с нерастворимым компонентом при воздействии на сплав растворителя (обычно водной среды) принято называть *селективной избирательной коррозией* (рис. 5.11).

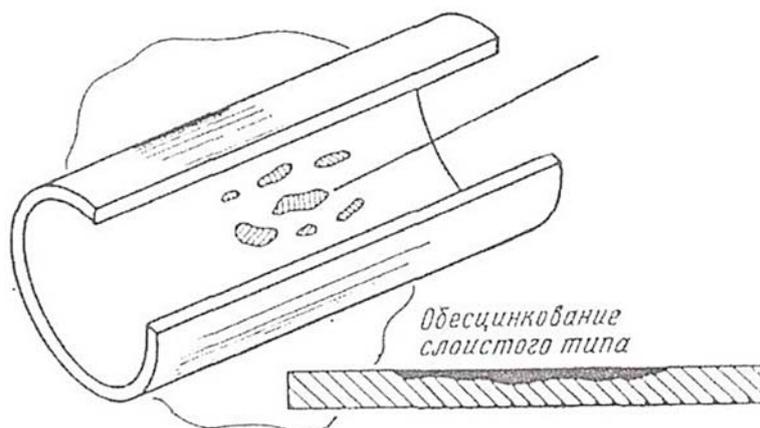


Рис. 5.11. Пример селективной коррозии

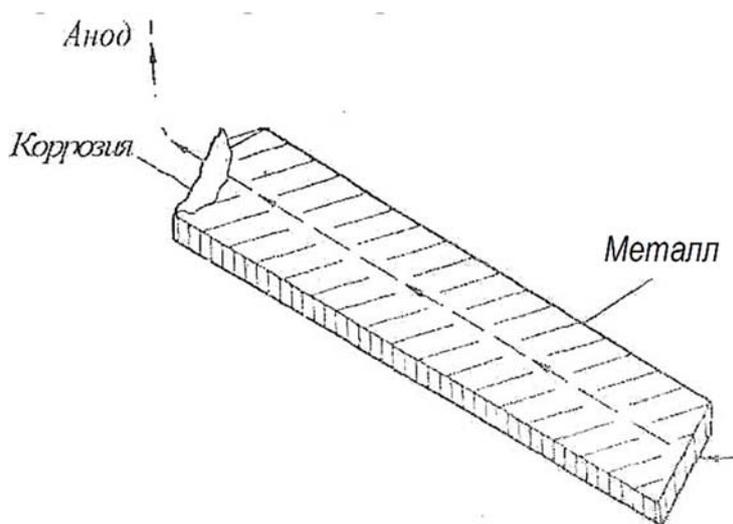
Один элемент из сплава выделяется в основном в результате коррозионного разъедания. Часто встречающимися видами селективной коррозии являются обесцинкование, обезалюминирование и графитизация. Например, когда медно-цинковые сплавы (латуни), содержащие менее 85 % меди, подвергаются воздействию влажной среды в течение продолжительного периода времени, цинк может перейти в раствор. Осаждающаяся на поверхность сплава медь имеет ничтожную механическую прочность. Обычный чугун также может реагировать подобным образом, поскольку в некоторых коррозионных средах железо разрушается с образованием пористого остатка графита, который самопроизвольно рассыпается.

**Мероприятия по защите:**

- выбирать стойкие материалы;
- снижать агрессивность среды;
- использовать катодную защиту.

**5.13. Коррозия блуждающими токами (электролиз)**

*Коррозия блуждающими токами* (электролиз) обычно возникает при прохождении постоянного тока по путям, не предусмотренным спроектированной цепью (рис. 5.12).



*Рис. 5.12. Коррозия блуждающими токами*

Электролитическая коррозия обусловлена протеканием неконтролируемых электрических токов (большой частью постоянного тока или постоянного тока высокого напряжения) от посторонних источников по непредусмотренным путям. Например, плохое заземление электрических машин и выпрямителей приводит к утечкам тока через металлические конструкции и другие токопроводящие пути и вызывает коррозию электрически соединенных конструкций и оборудования.

**Мероприятия по защите:**

- при конструировании электрических цепей и оборудования предусматривать, чтобы все детали и приборные доски из электропроводных материалов постоянно имели потенциал земли;

- изолировать электрические кабели и электрическое оборудование от элементов конструкций;
- обеспечивать контролируемое заземление электрического оборудования;
- применять неэлектропроводные среды;
- отводить блуждающие токи с помощью другого проводника;
- при необходимости применять катодную защиту;
- выбирать соответствующее расположение сооружений и деталей;
- устранять источники блуждающих токов;
- окружать сооружения или детали инертной неэлектропроводной средой, предотвращая тем самым доступ блуждающим токам;
- обеспечивать непрерывность электрических цепей, образуемых проводниками, которым угрожает разрушение (например, трубопроводами);
- электрически соединять металлические сооружения с точкой заземления;
- использовать протекторы, соединенные с анодной стороной изолированного соединения.

#### 5.14. Коррозионное растрескивание

Преждевременное разрушение металлов, происходящее при непрерывном воздействии коррозии и растягивающих остаточных или приложенных напряжений, называется *коррозионным растрескиванием* (рис. 5.13).

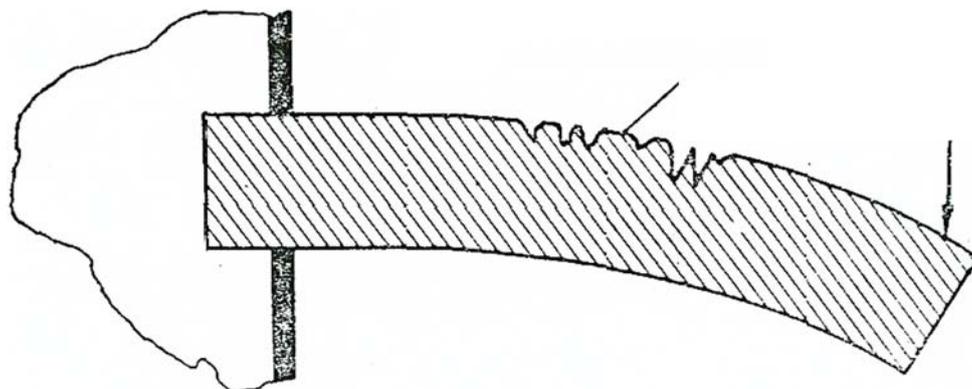


Рис. 5.13. Коррозионное растрескивание

Коррозионное растрескивание происходит при одновременном воздействии значительных растягивающих напряжений и коррозионной среды, например, морской воды, конденсата, сварочных флюсов, обезжиривающих смесей, смазок, органических растворителей и различных химических веществ (табл. 5.2). Растягивающие напряжения возникают на поверхности металла при статической нагрузке. Коррозионное воздействие приводит к концентрированию напряжений и превышению ими предела текучести металла. При достаточно длительной выдержке сочетание коррозии металла с высокими локальными концентрациями напряжений приводит в конечном счете к потере прочности. Неметаллы также проявляют сходные особенности поведения.

Таблица 5.2

Среды, вызывающие коррозионное растрескивание  
различных металлов и сплавов

Материал	Среда
Алюминиевые сплавы	Вода и пар; содержащие NaCl морская атмосфера и морская вода; воздух; водяной пар
Медные сплавы	Тропическая атмосфера; ртуть; HgNO <sub>3</sub> ; бромиды; аммиак; органические аминсоединения
Алюминиевая бронза	Вода и пар; H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ; щелочи
Аустенитные нержавеющие стали	Хлориды, включая FeCl <sub>2</sub> , FeCl <sub>3</sub> , NaCl; морская вода и атмосфера; H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ; фториды; конденсат пара, полученного испарением хлоридсодержащей воды; H <sub>2</sub> S
Ферритные нержавеющие стали	Хлориды, включая NaCl; фториды; бромиды; йодиды; щелочи; нитраты; вода; пар
Углеродистые и низколегированные стали	HCl; щелочи; нитраты; HN0 <sub>3</sub> ; KCN; расплавленный цинк и сплавы Na – Pb; H <sub>2</sub> S; H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> – HN0 <sub>3</sub> ; H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ; морская вода
Высокопрочные легированные стали (при напряжениях выше предела текучести)	Морская вода и атмосфера, загрязненная отходами промышленности
Магний	Содержащие NaCl морская вода и морская атмосфера; вода и пар; щелочи; N <sub>2</sub> O <sub>4</sub> ; атмосфера сельской местности и морского побережья; дистиллированная вода

Материал	Среда
Свинец	Растворы уксусно-кислого свинца
Никель	Бромиды; щелочи; $H_2SO_4$
Монель	Расплавленный едкий натрий; соляная и плавиковая кислоты
Инконель	Растворы едкого натра; вода высокой чистоты с несколькими миллиграммами на литр кислорода
Титан	Морская вода и морская атмосфера; среды, содержащие NaCl при высоких температурах; ртуть; расплавленный кадмий; AgCl и серебро, растворы галогенидов в метиловом спирте; красная дымящаяся азотная кислота; $N_2O_4$ ; хлор и фторпроизводные углеводородов

***Мероприятия по защите:***

- сводить к минимуму приложенные или остаточные растягивающие напряжения;
- обеспечивать достаточную эластичность покрывного материала;
- увеличивать размеры опасного сечения;
- снижать концентрацию напряжений или перераспределять их;
- компенсировать потерю жесткости, вызываемую проникновением трещин в металл;
- избегать перекоса конструктивных элементов, соединенных заклепками, болтами или сваркой;
- создавать простые соединения, работающие в условиях нагружения; избегать сварных, заклепочных, болтовых соединений внахлестку; предпочтительна сварка встык или угловым швом;
- предусматривать для нагруженных конструкций технологию изготовления, обеспечивающую получение прочных сварных соединений, тщательную подготовку к сварке и отделку швов;
- предусматривать устранение концентраторов напряжений при конструировании;
- подбирать соответствующие материалы (легирование);
- избегать операций механической обработки, сборки и сварки, которые создают остаточные растягивающие напряжения;
- при конструировании узлов использовать материалы с близкими коэффициентами термического расширения;

- обеспечивать контроль за режимами механической обработки и термообработки металла с целью получения стойкой к коррозионному растрескиванию микроструктуры;
- предусматривать создание поверхностных напряжений сжатия путем специальной обработки, нанесение гальванических покрытий или металлизацию напряженных участков;
- выбирать подходящие покрытия для участков поверхности, которым угрожает разрушение; предусматривать пассивирование, нанесение лакокрасочных пленок, покрытий на основе синтетических смол горячей сушки;
- использовать катодную защиту с контролем режимов поляризации;
- анализировать и регулировать состав окружающей среды;
- исключать возможность возникновения коррозионной среды;
- поддерживать низкие рабочие температуры;
- устранять возможные коррозионные агенты из сред, в которых производится эксплуатация, или вводить соответствующие ингибиторы;
- при проектировании предусматривать недопустимость периодического смачивания и осушения поверхностей, которым угрожает разрушение;
- предотвращать все виды коррозии участков, которым угрожает разрушение.

### 5.15. Термоконтактная коррозия

*Термоконтактная коррозия* – это коррозия, возникающая вследствие работы гальванического элемента, созданного градиентом температур (рис. 5.14).

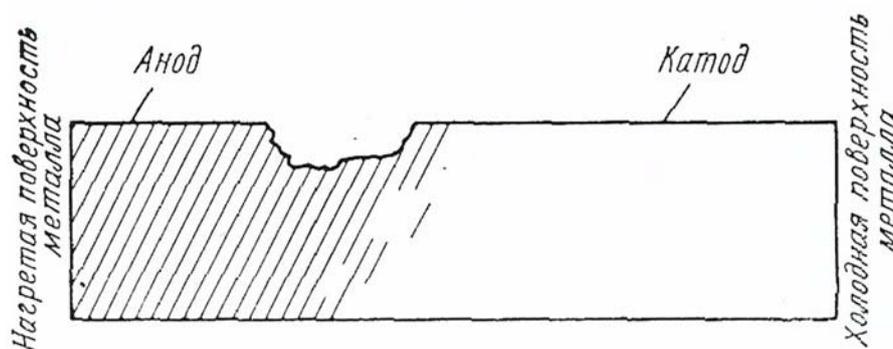


Рис. 5.14. Термоконтактная коррозия

Термический градиент, обусловленный неодинаковым нагреванием или рассеиванием тепла с поверхности металла, вызывает эффект, подобный контактной коррозии. Металл неодинаково поляризуется, и образуются анодные и катодные участки, вызывающие локальное разрушение.

**Мероприятия по защите:**

- избегать неодинакового нагревания, охлаждения и образования горячих участков;
- при проектировании предусматривать невозможность нежелательного влияния одного узла детали на другой;
- обеспечивать сплошность изоляции или обкладки;
- выбором соответствующей конструкции предотвращать поступление неодинаково нагретых или охлажденных жидкостей из внешних источников.

### 5.16. Равномерная коррозия

Коррозия, протекание которой не сопровождается формированием различных на глаз анодных и катодных участков (те и другие практически неразделимы), называют *равномерной* (рис. 5.15).

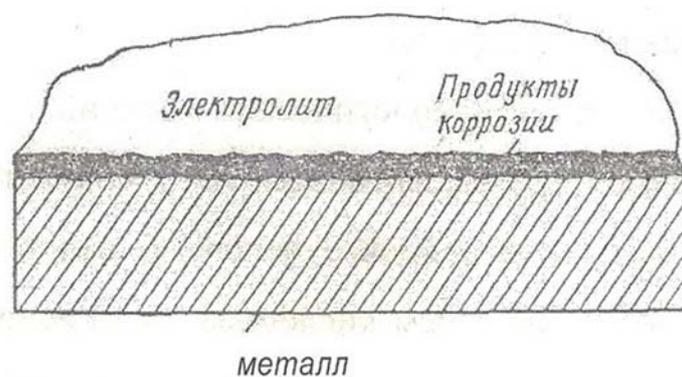


Рис. 5.15. Равномерная (общая) коррозия

На коррозию этого типа указывает общее разъедание поверхности; она обычно встречается при контакте металла с кислотой или ее раствором. Однако присутствие кислоты не обязательно, например, высокотемпературное окисление является видом равномерного разъедания, которое развивается в относительно сухой атмосфере. Продукты коррозии могут либо образовывать защитный слой на металле и

тормозить дальнейшее развитие коррозии, либо, как это имеет место в процессе непосредственного химического разъедания, растворяться в коррозионной среде.

***Мероприятия по защите:***

- выбирать подходящие стойкие материалы;
- изменять среду или обеспечивать ее ингибирование;
- предусматривать нанесение стойких защитных покрытий;
- применять анодную защиту.

**Контрольные вопросы**

1. Что такое кавитационное повреждение? Назовите методы борьбы с ним.
2. Охарактеризуйте и назовите методы борьбы с щелевой коррозией.
3. Каковы причины эрозионной коррозии и как ей противодействовать?
4. Что такое кавитационная коррозионная усталость? Назовите методы борьбы с ней.
5. Охарактеризуйте и назовите методы борьбы с фреттинг-коррозией.
6. Каковы причины контактной коррозии и как ей противодействовать?
7. Что такое высокотемпературная коррозия? Назовите методы борьбы с ней.
8. Охарактеризуйте и назовите методы борьбы с водородным разрушением.
9. Каковы причины микробиологической коррозии и как ей противодействовать?
10. Что такое питтинг (точечная коррозия)? Назовите методы борьбы с ним (ней).
11. Охарактеризуйте и назовите методы борьбы с селективной (избирательной) коррозией.
12. Каковы причины коррозии блуждающими токами и как ей противодействовать?
13. Что такое коррозионное растрескивание? Назовите методы борьбы с ним.

14. Охарактеризуйте термоконтактную коррозию и назовите методы борьбы с ней.

15. Каковы причины равномерной (общей) коррозии и как ей противодействовать?

## Тема 6. ПАССИВНАЯ ЗАЩИТА

При защите от коррозии металлических подземных трубопроводов применяются *пассивные* и *активные* методы.

*Пассивный метод защиты* заключается в создании непроницаемого барьера между металлическим трубопроводом и окружающим грунтом. При этом на трубу наносятся специальные защитные покрытия, например, полимерные ленты, битум, каменноугольный пек, эпоксидную смолу и др.

Основное назначение любого вида покрытия – *уменьшить доступ* агрессивной среды к поверхности металла. Применяют следующие виды покрытия: металлические, неорганические, лакокрасочные и полимерные.

### ***Требования к изоляционным покрытиям:***

- сплошность – обеспечивает надежность покрытия;
- водонепроницаемость – обеспечивает невозможность насыщения пор почвенной влагой, что устраняет контакт электролита с металлом;
- прилипаемость (адгезия) – основной показатель качества; при нарушении данного требования снижаются сопротивляемость механического воздействия, а также возможность проникновения электролита;
- химическая стойкость – длительная работа изоляции в условиях агрессивных грунтов;
- электрохимическая нейтральность – отдельные составляющие покрытия не должны учитываться в катодном процессе, в противном случае это может привести к разрушению изоляции при коррозии;
- механическая прочность – достаточна при проведении строительного-монтажных работ;
- термостойкость – обусловлена необходимостью сохранения пластических свойств в результате воздействия теплоносителя;

- учет температуры – наступление хрупкости при работе в зимний период;
- возможность механизированного нанесения изоляции;
- экономичность.

Материалы, входящие в состав покрытия, должны быть недефицитными, а само покрытие – недорогим, долговечным.

Противокоррозионную защиту подземных трубопроводов осуществляют:

- покрытиями на основе полимерных материалов (полиэтилена, термоусаживающихся и терморезистивных полимеров, эпоксидных красок и др.), наносимыми в заводских или базовых условиях;
- покрытиями на основе термоусаживающихся материалов, полимерных липких лент, битумных и асфальтосмолистых мастик, наносимыми в базовых и трассовых условиях.

Усиленный тип защитных покрытий применяется на трубопроводах диаметром 820 мм и более независимо от условий прокладки и диаметра трубопроводов при прокладке их в зонах *повышенной* коррозионной опасности:

- в засоленных почвах любого района страны;
- в болотистых, заболоченных, черноземных и поливных почвах, а также на участках перспективного обводнения или орошения; на подводных переходах и в поймах рек, а также на переходах через железные и автомобильные дороги;
- на участках промышленных и бытовых стоков, свалок мусора и шлака;
- на участках блуждающих токов источников постоянного тока;
- на участках трубопроводов с температурой транспортируемого продукта выше 30 °С;
- на территориях насосных станций;
- на пересечениях с различными трубопроводами;
- на участках трубопроводов, прокладываемых вблизи рек, каналов, озер, водохранилищ, а также населенных пунктов и предприятий.

Во всех остальных случаях применяются защитные покрытия *нормального* типа.

Материал труб и изделий для систем (теплогазоснабжения):

- дерево, чугун (в прошлом);

- медь, нержавеющая сталь, эмалированные стальные трубы;
- сталь малоуглеродистая, хорошо свариваемая;
- пластмассы: полиэтилен;
- асбестоцемент;
- композиты (в будущем).

Для систем водоснабжения и водоотведения:

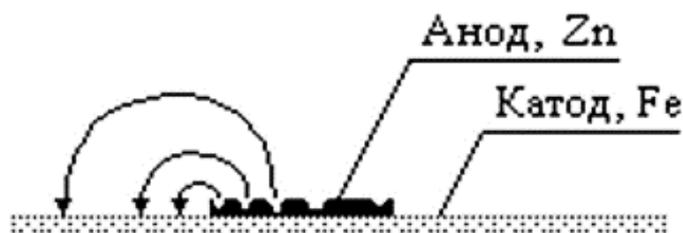
- чугун;
- железобетон, асбестоцемент;
- сталь малоуглеродистая, хорошо свариваемая;
- пластмассы: полиэтилен.

К сожалению, *все виды покрытия – пористые*. Не исключены, конечно, и механические повреждения. Поэтому надеяться на эффективную защиту от коррозии только с помощью покрытий нельзя. Однако и без покрытия как важнейшего звена *комплексной защиты* обойтись нельзя. Поэтому коротко познакомимся с особенностями наиболее распространенных видов покрытия.

## 6.1. Металлические покрытия

**Цинк** на стали – «жертва» в агрессивной среде. Действительно, цинк в паре с железом образуют гальванический элемент, в котором, как известно, одному из электродов – аноду – суждено растворяться, давая жизнь (энергию) другому электроду – катоду. В данном случае цинк – анод, сталь – катод. Пока на поверхности стали есть островки цинка, как показано на рис. 6.1, они создают ее защиту. В данной ситуации работает так называемая *протекторная защита* (см. подразд. 7.1).

Эффективность протекторной защиты распространяется на участки, недалеко отстоящие от края островка цинкового покрытия. Так, в морской воде эффективным катодом (там плотность тока достаточно велика) может служить поверхность, отстоящая от границы с цинком даже на десятки сантиметров, в то время как в низкоминерализованной (водопроводной) воде уже на расстоянии нескольких миллиметров от цинка плотность защитного тока незаметна и железо там начинает ржаветь.



*Рис. 6.1. Гальванический элемент и направление его тока в электролите*

В морской воде цинк расходуется со скоростью примерно 0,03 мм в год. Покрытие такой же толщины в атмосфере морских районов может прослужить 8 лет, в то время как в промышленных районах срок его службы может составить только 4 года.

В процессе работы гальванической пары цинк – железо образуются продукты коррозии, например  $ZnO$ , заполняющие трещины и поры. Поскольку  $ZnO$  – это проводник с электронной проводимостью со своим собственным электрохимическим потенциалом, то ЭДС гальванической системы будет меняться. Опыт показывает, что ток пары цинк – железо со временем может упасть до нуля. Но еще опаснее ситуация, когда благодаря осаждению  $ZnO$  может произойти изменение полярности гальванической системы, т. е. чистое железо станет анодом, а железо под слоем  $ZnO$  – катодом. Возникнет язвенная коррозия, что и наблюдалось не раз в аэрированной горячей воде.

Однако несмотря на это часто единственным способом борьбы с внутренней коррозией трубопровода горячей воды считается цинкование труб.

**Никелевое покрытие** служит катодом, стальная подоснова – анодом, т. е. с применением красивого никелевого покрытия мы сами инициируем коррозию, если к тому же иметь в виду, что электрохимически осажденный никель – пористый. Чтобы избежать коррозии в порах, покрытие должно быть достаточно толстым, а поры заполнены или лаком, или расплавом легкоплавкого металла, например олова. Часто сверху на слой никеля электроосаждением наносят слой хрома или еще один тонкий слой никеля, который благодаря легирующим добавкам специально делают пористым, к тому же он становится анодом относительно нижнего слоя.

Общая толщина слоя никелевого покрытия колеблется от 0,008 мм внутри жилого помещения до 0,2 мм на производствах в химической промышленности.

Для защиты металлических элементов, погруженных в воду, применяют *алюминиевое покрытие*, изготовленное методом напыления – металлизацией. Покрытие (обычно пористое толщиной 0,08 – 0,2 мм), пропитывают органическим лаком. В паре с железом алюминиевое покрытие может выступать как анодом, так и катодом в зависимости от химического состава коррозионной среды. При этом определяющее воздействие на потенциал алюминия и железа оказывают ионы  $\text{Cl}^-$  и  $\text{SO}_4^-$ .

## 6.2. Неорганические покрытия

*Силикатные эмали*, или стеклоэмали, изготавливают путем наплавления размолотого порошка силиката того или иного состава на защищаемую поверхность. Эмалированная посуда, емкости, детали трубопровода и даже целые трубопроводы – все это может быть изготовлено с эмалевыми покрытиями.

Покрытия практически непроницаемы для воды, но до тех пор, пока не появятся трещины, которых при хрупкости такого рода покрытий вряд ли можно избежать.

*Цементные покрытия* обладают ощутимым преимуществом – они имеют низкую стоимость и удобны при применении. Цемент обычно наносят на металлическую сетку слоем 5 – 25 мм.

Несмотря на то что обычное бетонное покрытие водопроницаемо, коррозионные процессы практически не идут из-за высокой щелочности бетона ( $\text{pH} > 11$ ). При большом числе трещин и выщелачивании бетона защитные свойства покрытия снижаются.

За счет высокой щелочности защищена арматура железобетонных сооружений, например мостов, но до тех пор, пока щелочность не уменьшится за счет проникновения солей и атмосферного воздуха, изменяющих химический состав бетона. Часто арматуру перед закладкой покрывают слоем изоляции, например эпоксидной смолой.

Сталь в бетоне имеет более положительный электрохимический потенциал, чем сталь в почве, поэтому при контакте с арматурой железобетонного сооружения подземный трубопровод работает анодом и может активно разрушаться.

**Оксидирование и анодирование** – процессы химической и электрохимической обработки защищаемой металлической поверхности с образованием нерастворяющейся пленки окислов. Покрытия хорошо стоят в атмосфере, но для трубопроводов непригодны.

### 6.3. Лакокрасочные и полимерные покрытия

В современном мире для защиты магистральных газопроводов чаще применяются следующие виды заводских защитных покрытий [1, 2]: эпоксидное, полиэтиленовое, полипропиленовое, комбинированное ленточно-полиэтиленовое.

Все виды перечисленных покрытий отвечают актуальным техническим требованиям и могут обеспечивать действенную и эффективную защиту газопроводов от различного вида коррозии в течение длительного времени.

Тенденция развития защитных изоляционных покрытий представлена на рис. 6.2.

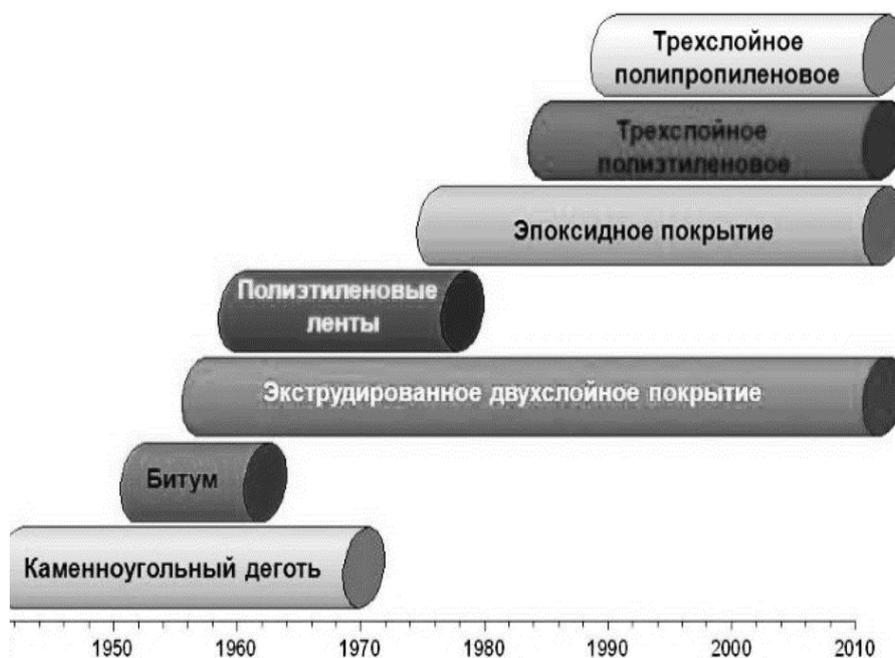


Рис. 6.2. Тенденция развития защитных покрытий труб

#### **Полиэтиленовое покрытие**

Конструкции заводских полиэтиленовых покрытий делятся на четыре вида:

- полиэтиленовое покрытие, наносимое по битумно-мастичному подслою (конструкция покрытия № 6 по ГОСТ Р 51164) [34];
- полиэтиленовое покрытие, наносимое по изоляционному подслою на базе липкой полимерной ленты (конструкция покрытия № 7 по [34]);
- полиэтиленовое двухслойное защитное покрытие, произведено из адгезионного подслоя на базе термоплавкой полимерной композиции и внешнего полиэтиленового слоя (система покрытия № 2 по [34], система покрытия № 4 по ГОСТ Р 52568) [36];
- полиэтиленовое трехслойное покрытие, состоящее из слоя эпоксидного праймера, адгезионного полимерного подслоя и внешнего полиэтиленового слоя (система покрытия № 1 по [34], система покрытия № 1 – 3 по [36]).

Защитное полиэтиленовое покрытие демонстрирует большой показатель адгезии к металлу (не менее 30 Н/см), неплохие диэлектрические свойства (более 6 кВ) и устойчивость к наружным механическим нарушениям.

Конструкция заводского двухслойного покрытия на основе полиэтилена представлена на рис. 6.3.



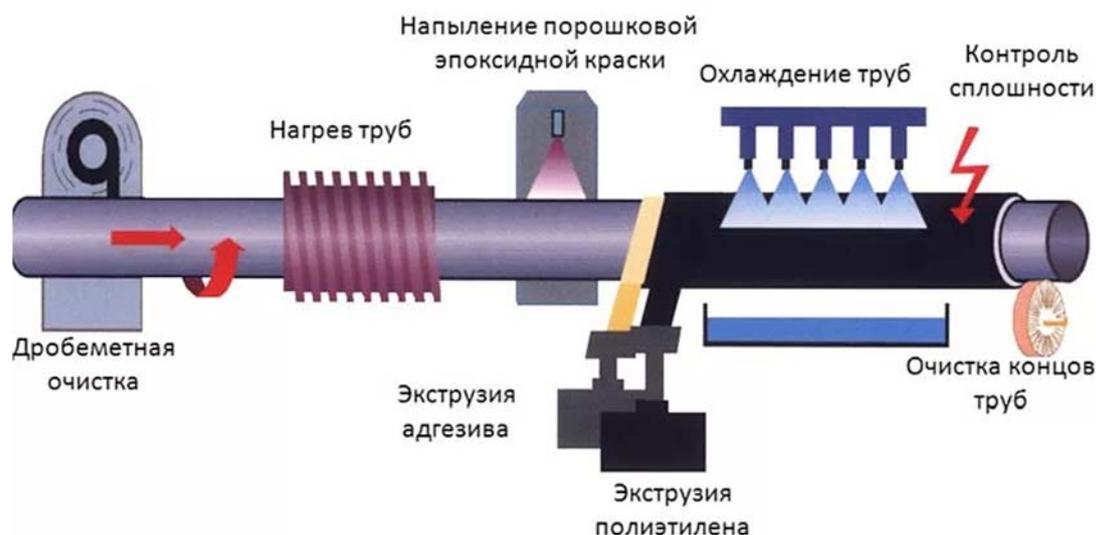
*Рис. 6.3. Заводское двухслойное исполнение изоляции на основе полиэтилена*

Данное защитное покрытие наносится способом боковой («плоскощелевой») экструзии.

Для обеспечения больших адгезионных свойств защитной изоляции используются только качественная дробеструйная чистка образующей труб, нанесение промежуточного клеящего слоя (адгезионно-активной композиции шириной от 350 до 400 мкм), нанесение впоследствии внешнего защитного слоя на базе термостостабилизированной композиции полиэтилена (рис. 6.4).

Газопроводы, обработанные экструдированным полиэтиленом, отличаются рядом значительных преимуществ [1]:

- безопасным экологически чистым покрытием;
- значительным увеличением периода работы трубопроводов, межремонтного интервала и культурой строительства;
- высокой механической прочностью;
- независимостью качественных характеристик покрытия от окружающей среды и т. д.



*Рис. 6.4. Схема нанесения трехслойного полиэтиленового покрытия*

На рынке российских производителей, предоставляющих материалы для заводской двухслойной изоляции, можно выделить следующие компании: ООО «Антикор Полимер» г. Котельники; ЗАО НПК «Полимер-Компаунд», г. Томск; ООО «Дита-Пласт», г. Селятино и др. Импортные поставщики: «Trisolen 190», поставки «Leuna Eurokommerz» (Германия).

### *Полипропиленовое покрытие*

Полипропиленовое покрытие характеризуется высочайшей теплостойкостью, высокой механической, ударной крепостью, стойкостью к продавливанию и абразивному износу.

Существенная доля использования полипропиленовых покрытий – антикоррозионная защита «горячих» (до 150 °С) участков газопроводов, «оборона» от коррозии морских, шельфовых газопроводов, подводных переходов, участков газопроводов, строящихся способами «замкнутой» прокладки («проколы» под дорогами, прокладка труб способом наклонно направленного бурения и т. д.).

Основными преимуществами заводского полипропиленового покрытия являются [16, 5]:

- высокая ударная стойкость, благодаря которой толщина полипропиленового покрытия может быть меньше на 25 % в сравнении с полиэтиленовыми покрытиями трубопроводов;
- стойкость к продавливанию;
- стойкость к срезу и механическому истиранию;
- повышенная теплостойкость, значения которой могут быть от 110 до 140 °С.

Технология нанесения полипропиленового покрытия представлена на рис. 6.5.

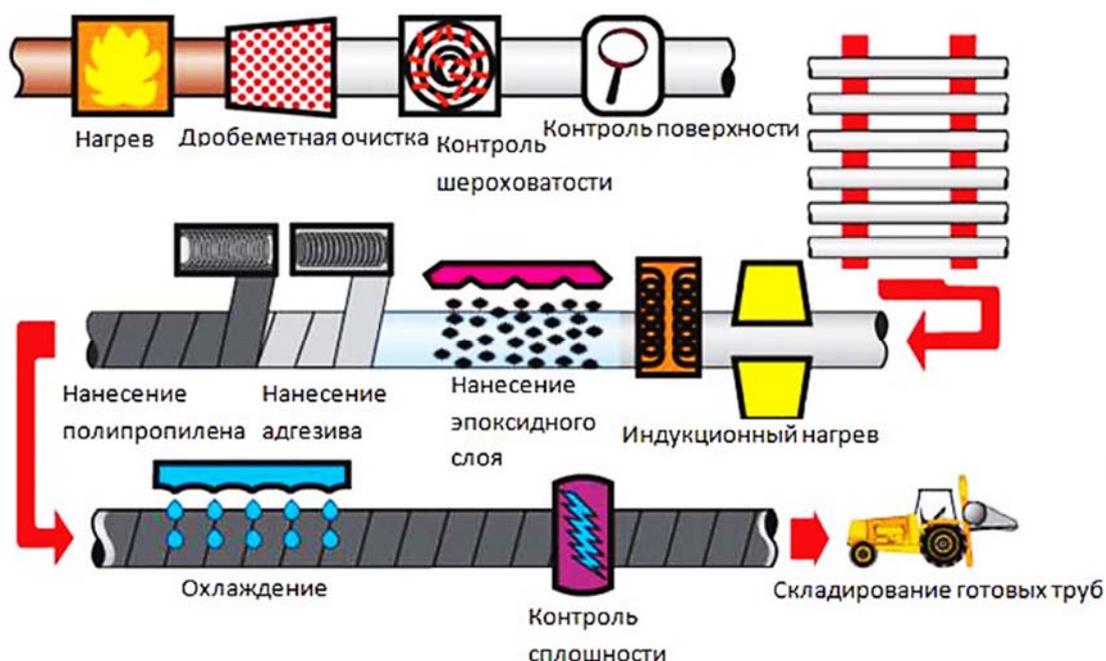


Рис. 6.5. Схема нанесения полипропиленового покрытия

Как правило, толщина полипропиленовых покрытий составляет не менее 1,8 и не более 2,5 мм.

Крупнейшими фирмами по производству и поставке материалов для заводского полипропиленового покрытия считаются «BASF Coatings», «Basell Poliolefins», «3M», «The Dow Chemical Company» и др.

### ***Комбинированное ленточно-полиэтиленовое покрытие [19]***

Для предотвращения развития коррозии газопроводов малых и средних диаметров (до 530 мм) в последние годы с успехом применяется комбинированное ленточно-полиэтиленовое покрытие, которое наносят на трубы промышленных или магистральных объектов. Конструктивно покрытие произведено из слоя адгезионной грунтовки (расход грунтовки – 115 г/м<sup>2</sup>), слоя дублированной полиэтиленовой ленты толщиной от 0,5 до 0,65 мм и наружного слоя на базе экструдированного полиэтилена толщиной от 1,7 мм до 2,7 мм. Суммарная толщина комбинированного ленточно-полиэтиленового покрытия составляет до 3,3 мм.

Нанесение комбинированного ленточно-полиэтиленового покрытия в стационарных (базовых, заводских) условиях осуществляют по следующим поочередно проводимым операциям [2, 19]:

- сушка и предварительный нагрев труб;
- очистка от ржавчины и окалины наружной поверхности труб;
- нанесение адгезионной грунтовки и дальнейшая ее просушка;
- нанесение дублирующей полиэтиленовой ленты;
- нанесение экструдированного полиэтиленового слоя;
- остывание изоляционного покрытия;
- контроль качества защитных труб.

### ***Эпоксидное покрытие труб***

По своему исполнению эпоксидное покрытие может быть однослойным и двухслойным. Однослойное эпоксидное покрытие применяется для трубопроводов малых и средних диаметров (до 530 мм включительно). Толщина однослойного эпоксидного покрытия составляет от 350 до 400 мкм.

К преимуществам однослойного эпоксидного покрытия относятся:

- повышенная теплостойкость, которая может достигать до температур от 100 до 110 °С;
- высокая адгезия покрытия к стали;
- стойкость к катодному отслаиванию и продолжительному воздействию воды;
- покрытие не экранирует токи катодной защиты.

К недостаткам заводского однослойного эпоксидного покрытия можно отнести низкую ударную прочность, которая составляет от 3 до 4 Дж при температурах от –20 до –25 °С. Конструкция заводского исполнения изоляции на основе однослойного эпоксидного покрытия представлена на рис. 6.6.

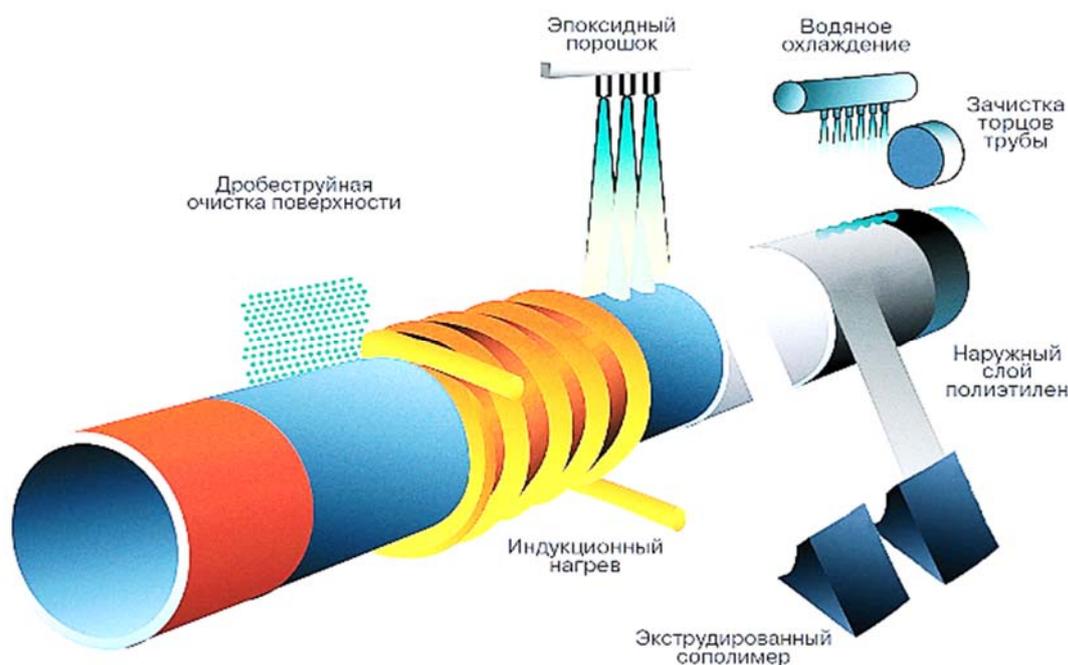


Рис. 6.6. Исполнение изоляции на основе однослойного эпоксидного покрытия

При эпоксидном покрытии используют порошковые краски, содержащие смолы, пигмент, отвердитель и активатор.

Конструкция заводского исполнения изоляции на основе двухслойного эпоксидного покрытия изображена на рис. 6.7.



Рис. 6.7. Исполнение изоляции на основе двухслойного эпоксидного покрытия

### ***Полиуретановое покрытие [9, 32]***

Покрытия на основе жидких безрастворимых полиуретановых композиций разрешены к применению в ОАО «Газпром» для защиты от коррозии объектов газопроводов подземной и надземной прокладки.

Полиуретановые материалы с успехом применяются на отечественных компрессорных станциях, а также при капитальном ремонте трубопроводов, в заводских (базовых) условиях для изоляции элементов трубопроводов, имеющих сложную конфигурацию (соединительные детали труб, отводы, запорная арматура). Имеется значительный зарубежный опыт нанесения таких покрытий на трубы в заводских (США) и трассовых условиях, где уже отремонтировано несколько тысяч километров трубопроводов.

В ОАО «Газпром» для данного вида покрытий были приняты «Технические требования к наружным покрытиям на основе терморезистивных материалов для антикоррозионной защиты труб, соединительных деталей, запорной арматуры и монтажных узлов трубопроводов с температурой эксплуатации от  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ».

В отечественной практике применяют как двухслойные полиуретановые покрытия типа FRUCS и «БИУРС», основной слой которых наносят по слою праймера, так и однослойные. Целесообразность применения однослойных покрытий типа Protegol UR-Coating 32-55R (RR), H; Scotchkote 352ht; Amercoat 210; РПУ-1001, имеющих технико-экономические преимущества перед двухслойными системами, обусловлена следующими факторами:

– не требуются длительные перерывы в процессе нанесения на промежуточную сушку слоя эпоксиуретанового праймера и использование дополнительного комплекта технологического оборудования для его нанесения;

– однослойные покрытия не содержат в своем составе каменноугольный пек;

– хорошо сопрягаются с другими типами покрытий, в том числе с полиэтиленовым;

– в состав поставки входят ремонтные материалы для устранения локальных дефектов в покрытии;

– имеют небольшой расход материалов ввиду меньшего количества компонентов;

– более низкая стоимость изоляции из-за меньшей толщины покрытия и отсутствия потерь материала, связанных с различным расходом компонентов праймера и основного слоя в двухслойных системах, что приводит к разукрупнению материалов.

Практика использования ручных установок горячего безвоздушного напыления фирмы Graco при нанесении полиуретановых покрытий марки Protegol 32-55 (R, H) показала, что для обеспечения требуемой ОАО «Газпром» толщины в 2 мм приходится наносить покрытие в два слоя с обязательной межслойной сушкой и толщинометрией нанесенного первого слоя. В результате окончательная толщина покрытия составляет 2,5 – 5 мм. При этом на изолированных участках с толщиной покрытия 1,0 – 1,5 мм диэлектрическая сплошность и адгезия соответствуют требованиям, предъявляемым к покрытиям толщиной 2 мм. Результаты адгезионных испытаний, проведенных на образцах-свидетелях, показали, что высокие значения толщины покрытия (до 4 мм) приводят к снижению адгезионной прочности.

Преимуществом механизированных комплексов по нанесению полиуретановых покрытий прежде всего следует назвать их высокую производительность. Как показал опыт использования комплекса ремонта трубопроводов (КРТ) в ООО «Газпром трансгаз Москва», производительность нанесения покрытия достигала 0,5 пог. м/ мин для трубы диаметром 1000 мм. При этом толщина покрытия составила в среднем 1,5 – 2 мм.

Обязательными требованиями технологии нанесения терморезистивных покрытий являются тщательная подготовка поверхности трубопровода или изолируемых изделий перед нанесением покрытия,

абразивоструйная очистка поверхности до степени Sa 2 по ISO 8501-1 [37], создание микрорельефа не менее  $Rz = 60$  мкм, обеспыливание.

В трассовых условиях полиуретановую изоляцию протяженных участков трубопроводов рекомендуется осуществлять механизированным способом с помощью КРТ и техники, обеспечивающих непрерывное движение колонны и непрерывную изоляцию с производительностью 0,5 пог. м/мин на трубопроводе диаметром 1420 мм при толщине покрытия 1,5 мм.

### ***Стеклоэмалевые покрытия***

Технология нанесения эмали на металлические трубы с применением индукционного подогрева предполагает подготовку плоскости стали для нанесения эмали, нанесение шликера с эмалью на охраняемую поверхность, просушку шликера с применением индукционной сушилки и оплавление эмалевого покрытия. Покрытия из стеклоэмали заводского нанесения используют для защиты газопроводов от атмосферной и подземной коррозии. Требования к качеству изоляционных покрытий представлены в [11] (см. таблицу).

Многообразный выбор различного рода красок не свидетельствует об окончательном решении всех проблем коррозионной защиты, так как с одной стороны, эти покрытия пористые, с другой – стоимость работ по их нанесению (с подготовкой окрашиваемой поверхности) в несколько раз превышает стоимость краски.

Однако без изолирующих покрытий в антикоррозионной борьбе обойтись нельзя. Подробное описание различных технологий нанесения защитных покрытий для подземных трубопроводов приведено в нормативном документе [39]. В подразд. 6.4 представлены варианты покрытий на основе битумных мастик.

*Покрытие из экструдированного полиэтилена* – наиболее прогрессивный сегодня вид покрытия – наносят на вращающуюся трубу, нагретую до температуры 170 – 200 °С, пока не сформируется нужный слой толщиной 1,8 – 3,5 мм в зависимости от диаметра трубы и заданного типа изоляции. Изоляцию наносят на предварительно подготовленную клеевую подоснову из полимерных композиций.

*Покрытие из экструдированного полипропилена* обладает повышенной механической прочностью и изготавливается по той же технологии, что и покрытие из полиэтилена.

## Требования к качеству изоляционных покрытий

Показатель	Норма покрытия				На основе битумных мастик
	Экструдированный полиэтилен	Комбинированный мастично-ленточный	Комбинированный ленточно-полиэтиленовый	Полиэтиленовые липкие ленты	
Толщина покрытия в зависимости от диаметра труб, не менее, м	Ø до 89 – 2,2	Ø от 57 до 820 – 4,0	Ø до 114 – 2,2	Ø от 57 до 426 мм – 1,8	Ø от 159 (вкл.), – 7,5; св. 159 – 9,0
	Ø до 259 – 2,5		Ø до 259 – 2,5		
	Ø до 426 – 3,0		Ø до 530 – 3,0		
	Ø до 530 – 3,5				
Адгезия к стальной поверхности трубы при 20 °С, не менее, кгс/см <sup>2</sup>	3,5	1,5	2,0	1,5	5,0
	Ø до 57 – 3,5	4,0 (на всю толщину покрытия)	Ø до 57 – 3,5	Ø до 273 – 4,0	Ø до 159 – 4,0
Ударная прочность на 1 мм толщины покрытия, Дж	Ø от 76 до 159 – 4,25	–	Ø от 76 до 159 – 4,25	Ø от 325 до 530 – 6,0 на всю ширину покрытия	Ø от 176 до 530 – 6,0 на всю толщину покрытия
	Ø от 219 до 530 – 5,0	–	Ø от 219 до 530 – 5,0	–	–
Величина напряжения при контроле сплошности на 1 мм покрытия, кВ	5,0	5,0	5,0	5,0	4,0
Переходное электросопротивление на законченном строительстве газопровода, не менее, Ом · м <sup>2</sup>	1 · 10 <sup>5</sup>	1 · 10 <sup>5</sup>	1 · 10 <sup>5</sup>	5 · 10 <sup>4</sup>	–

*Покрытие из полиэтиленовых липких лент* наносят на битумно-полимерную грунтовку обычно двумя слоями внахлест общей толщиной до 1,8 мм. Поскольку при нанесении покрытия в полевых условиях на поверхности возможно появление складок и гофр, сплошность покрытия не гарантируется.

*Комбинированные покрытия* различной конструкции. По битумно-полимерному грунтовочному слою наносят слой липкой полиэтиленовой ленты, а затем защитный слой из экструдированного полиэтилена. Применяют также покрытие на основе термоусаживающейся ленты в комбинации со слоем мастики толщиной не менее 4 мм, а также покрытия на основе различного типа полимерно-битумных лент.

Однако дешевизна и надежность битумных покрытий способствовали их преимущественному применению примерно с 30-х годов XX века. И сейчас этот замечательный изолирующий материал используется повсеместно. Можно вспомнить, что еще при строительстве дворца царя Соломона в 980 г. до н.э. битум использовали для защиты от коррозии.

*Битумные эмали*, или мастики, – широко распространенный вид покрытия подземных трубопроводов – изготавливают из смеси нефтяных битумов и различного рода наполнителей. Их наносят в расплавленном виде при температуре 160 – 170 °С на очищенную и грунтованную поверхность, при этом поверх мастики еще в горячем состоянии накладывают армирующий слой стеклохолста. Толщина усиленного покрытия составляет около 6 мм. Применяют и *весьма усиленное* покрытие толщиной 9 мм. Такое покрытие включает в себя дополнительно еще один слой мастики со стеклохолстом.

Битумное покрытие готовят в основном в заводских условиях, стыки труб вручную заделывают на трассе.

#### **6.4. Изоляция на основе битумных мастик**

Для изоляции подземных трубопроводов применяются в основном битумные мастики, которые в зависимости от вида наполнителей можно подразделить на битумно-полимерные и битумно-минеральные. Их рекомендуется наносить при температуре транспортируемого

продукта не выше 40 °С и диаметре трубы не более 800 мм. Для определения основных характеристик битумных мастик необходимо провести испытание, при котором определяются:

- глубина проникновения согласно ГОСТу (пенетрация);
- температурное расширение (кольцо – шар);
- растяжимость (дуктильность) при помощи специальных приборов – дуктилометров.

Нефтяные битумы подразделяются:

- на дорожные (БН0, БН1, БН2, БН3);
- строительные (БН-50-50, БН-70-30, БН-90-10);
- битумы нефтяные специальные (БВГ);
- битумы нефтяные изоляционные (БНИ4, БНИ5).

Все эти битумы отличаются по температуре размягчения, пентрации, дуктильности. Для изоляции инженерных систем, как правило, должны применяться изоляционные строительные битумы. Мастики на их основе, применяемые на трассе, должны иметь сертификаты соответствия ГОСТу.

### ***Наполнители***

Для повышения структурной прочности и вязкости в состав битумов добавляют специальные добавки – наполнители, частицы которых являются центрами структурных образований и придают материалам особые свойства. Различают следующие добавки:

- минеральные тонкомолотые горные породы: доломитизированный известняк, доломит, асбест;
- полимерные – полиэтилен порошкообразный нестабилизированный, атактический полипропилен;
- органические – резиновая крошка.

Введение этих добавок улучшает структуру изоляционных покрытий.

### ***Пластификаторы***

*Пластификаторы* – это вещества, вводимые в битум, химически не взаимодействующие с ним и образующие гомогенную структуру. Их основное назначение – повысить пластичность битума до 25 °С. Пластификатор эффективен, если при введении его в битум, наряду с

приданием мастике упругопластичных свойств, наблюдается наименьшее снижение вязкости и температуры размягчения. По сравнению с трансформаторным и трансмиссионным маслами лучшими пластификаторами следует назвать полиизобутилен и полидиен. Количество вводимого пластификатора зависит от температуры окружающего воздуха и состава мастики.

*Грунтовка* – первый слой, который наносят на чистую подготовленную поверхность; он обеспечивает необходимую адгезию между металлом и слоем битумного покрытия. Это объясняется тем, что грунтовка заполняет все неровности на металле, улучшая сцепление мастики с металлической трубой. На высохшую грунтовку наносят первый слой мастики, который расплавляется в слой грунтовки и плотно соединяется с ней и телом металла. Грунтовка изготавливается из битума, растворенного в бензине в объеме 1:3 или 1:2 по массе (БН4 + Б70). Грунтовка должна сохнуть на открытом воздухе и солнце не более 7 – 10 дней. Мастика может изготавливаться или в специальных мастерских, или в полевых условиях с соблюдением технологической инструкции.

Наряду с битумными покрытиями применяются и мягкие полимерные пленки, которые накладывают на тело трубы с грунтовкой или без нее при помощи специальных клеев и растворов. Для каждого вида полимерного покрытия должна разрабатываться технологическая инструкция.

### ***Мастичные покрытия***

К мастичным относятся покрытия на основе битумных и асфальтосмолистых мастик (рис. 6.8). Конструкция битумных покрытий сложилась в результате их длительного применения. Сначала идет слой грунтовки, получаемый при нанесении на трубу раствора битума в бензине или дизельном топливе. Он заполняет все микронеровности на поверхности металла. Грунтовка служит для обеспечения более полного контакта, а следовательно, лучшей адгезии между поверхностью металла и основным изоляционным слоем – битумной мастикой.



*Рис. 6.8. Нанесение липких полимерных лент*

### ***Полимерные покрытия***

Для защиты трубопроводов применяют полимерные покрытия из следующих материалов:

- экструдированного полиолефина;
- полиуретановых смол;
- термоусаживающихся материалов;
- эпоксидных красок;
- полимерных или битумно-полимерных лент.

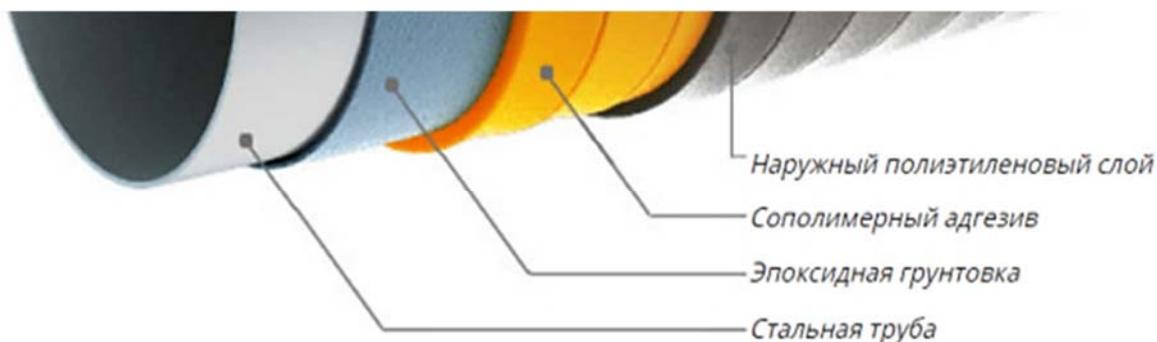
Полимерные ленты в сравнении с мастиками более технологичны при нанесении и позволяют в значительной степени механизировать этот процесс. Кроме того, они обладают высокими диэлектрическими свойствами.

### **6.5. Комбинированные покрытия**

На протяжении многих лет в нашей стране наряду с мастичными широко применялись покрытия на основе липких полимерных лент. Опыт их использования показал, что они очень технологичны (простота нанесения, удобство механизации работ), однако легко уязвимы: острые выступы на поверхности металла, острые камешки легко прокалывают такую изоляцию, нарушая ее сплошность. С этой точки зрения хороши покрытия на основе битумных мастик, проколоть которые достаточно сложно. Однако с течением времени битумные мастики

«стареют»: теряют эластичность, становятся хрупкими, отслаиваются от трубопроводов.

Полимерный слой в общей конструкции покрытия пластобит играет роль своеобразной «арматуры», которая обеспечивает независимо от срока службы целостность основного изоляционного слоя – битумного (рис. 6.9).



*Рис. 6.9. Последовательность нанесения комбинированного покрытия пластобит*

В свою очередь, прокол полимерной пленки не приводит к нарушению целостности покрытия, так как слой битумной мастики имеет достаточно большую толщину. Более того, опыт эксплуатации покрытия пластобит показывает, что в местах мелких сквозных повреждений полимерной части имеет место «самозалечивание», выражающееся в вытекании части мастики через это отверстие и застывание ее в виде грибка над местом повреждения.

Покрытие пластобит является технологичным с точки зрения нанесения, не требует значительной перестройки применяемой до настоящего времени технологии капитального ремонта, обладает высокими защитными качествами, которые, по утверждению разработчика, не ухудшаются со временем.

## **6.6. Контроль качества изоляционных покрытий**

Контроль качества осуществляется на всех этапах производства и эксплуатации трубопроводов и включает в себя следующие основные операции:

– проверять на температурное размягчение, пенитрацию и дуктильность не реже одного раза в сутки мастику, изготовленную на трассе;

- проводить постоянный визуальный контроль (трещины, пузыри и другие дефекты);
- проверять толщину покрытия через каждые 100 м в четырех точках специальными приборами – толщиномерами;
- определять дефектоскопом сплошность покрытия;
- контролировать адгезию изоляции специальным прибором – адгезиметром.

Конкретные типы приборов в каждом случае определяются технологической инструкцией данного предприятия. Для ответственных инженерных трубопроводов в городских условиях, как правило, используется усиленная изоляция.

### **6.7. Охрана труда и техника безопасности при изоляционных работах**

При выполнении работ по организации противокоррозионной защиты необходимо выполнение следующих мер:

- к производству работ допускаются работники, прошедшие медосмотр и техминимум;
- погрузку, транспортирование, разгрузку и подготовку изоляционных материалов проводят в строгом соответствии с технологической инструкцией;
- котлы для варки и разогрева мастик должны плотно закрываться крышкой и заполняться не более чем на 2/3 объема;
- загружать материал в котел следует сухим;
- места для варки и разогрева мастик должны располагаться на расстоянии не менее 50 м от строений и других объектов;
- около каждого котла должен быть предусмотрен противопожарный инвентарь;
- при смешивании разогретый битум вливают в бензин, при этом место, где готовится грунтовка, должно находиться не менее чем в 50 м от места варки битума;
- при приготовлении мастик и грунтовок пользуются деревянными мешалками;
- запрещается использовать этилированный бензин и бензол из-за их токсичности;

- баки для хранения грунтовок и мастик должны плотно закрываться при помощи специальных ключей;
- хранить грунтовку и мастики только в помещениях, где обеспечена пожарная безопасность;
- инженерно-технические рабочие (ИТР), занятые при производстве изоляционных работ, должны быть обеспечены спецодеждой и специнвентарем.

### **Контрольные вопросы**

1. Что такое пассивная защита от коррозии?
2. Какие существуют основные методы защиты металлических покрытий от коррозии?
3. Что понимается под защитой от коррозии неорганическими покрытиями?
4. Каковы преимущества при применении лакокрасочных и полимерных покрытий при защите металлов от коррозии?
5. В чем суть защиты от коррозии при использовании изоляции на основе битумных мастик?
6. Что такое комбинированные покрытия, каков порядок их нанесения, использования, обслуживания?
7. Что входит в контроль качества изоляционных покрытий?
8. Какие мероприятия входят в охрану труда и технику безопасности при проведении работ по коррозионной защите?

### **Тема 7. АКТИВНАЯ ЗАЩИТА**

На практике трудно добиться полностью герметичного изоляционного покрытия. Используя только пассивный метод, далеко не всегда достигается полная защита трубопровода от коррозии, поэтому одновременно с пассивной применяется и активная защита.

*Активный метод защиты* заключается в управлении электрохимическим процессом, протекающим на границе между металлом трубы и грунтовым электролитом. Такой тандем носит название *комплексной защиты*. Одним из видов активного метода защиты от коррозии является метод *катодной поляризации*. В его основе лежит эффект сниже-

ния скорости растворения металла при смещении его коррозионного потенциала в область отрицательных значений относительно естественного потенциала.

На практике катодную защиту трубопроводов осуществляют двумя основными методами: гальваническим и электрическим.

*Гальванический метод* (протекторная защита) основан на применении магниевых «жертвенных» анодов-протекторов. В основе *гальванического метода* лежит принцип: в электролите разные металлы имеют различные электродные потенциалы. Если при этом образовать гальваническую пару из двух металлических электродов и опустить их в электролит, то металл, имеющий более отрицательный потенциал, будет выполнять функцию анода и станет разрушаться, тем самым защищая металл (катод), имеющий менее отрицательный потенциал. В качестве «жертвенных» гальванических анодов на практике используют протекторы, изготавливаемые из магниевых, алюминиевых и цинковых сплавов.

Однако применение протекторов в качестве катодной защиты эффективно лишь в низкоомных грунтах (до 50 Ом·м); в высокоомных грунтах такой метод не обеспечивает необходимой защиты.

*Электрический метод* – это применение внешнего источника постоянного тока, отрицательный полюс которого соединяется с трубой, а положительный – с анодным заземлителем.

*Катодная защита* с помощью внешних источников тока – наиболее сложная и трудоемкая задача, но главным ее преимуществом считается малая зависимость от величины удельного сопротивления грунта и практически неограниченный функциональный ресурс.

Преобразователи постоянного тока, запитанные от сети переменного тока, позволяют регулировать уровень защитного тока в значительных пределах, что обеспечивает защиту трубопровода при любых условиях. Таким образом, эффективной защитой газопроводов от коррозии является целый комплекс мероприятий, приведенных выше.

Учитывая крайне разнообразные условия прокладки трубопроводов, сооружений с пассивной изоляцией не всегда бывает достаточно, поэтому используют активную изоляцию, к которой относят протекторную, катодную и электродренажную защиты.

## 7.1. Протекторная защита

*Протекторной (гальванической) защитой* называют ЭХЗ, при которой защитный ток вырабатывается коррозионным элементом, образованным с помощью вспомогательного электрода (протектора), подключенного к защищенному металлу (рис. 7.1).

### *Физическая сущность процесса*

При разрушении анода его ионы безвозвратно уходят в землю, а освободившиеся элементы перетекают как избыточные на катод трубопровод, заряжая его отрицательно, т. е. под действием ЭДС гальванопара труба – протектор – земля – трубопровод возникает защитный ток, натекающий, как и положено при ЭХЗ, из земли на трубопровод.

*Эффективность протекторной защиты* зависит от химико-физических свойств:

- состава металлического сплава, массы, формы, электрохимического эквивалента;
- состава активатора;
- коэффициента использования величины защитного потенциала.

*Внешними факторами, обуславливающими режим его использования, являются:*

- степень оголения металлических сооружений, подлежащих защите;
- параметры, определяющие грунтовые условия;
- расположение протектора относительно защищаемого сооружения;
- период времени, в течение которого должно быть обеспечено непрерывное действие защиты.

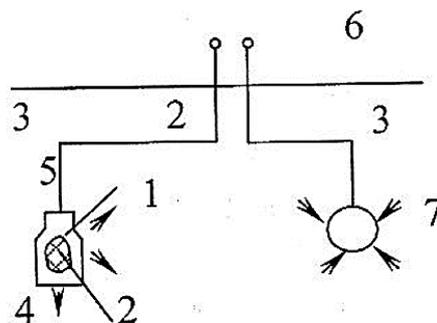


Рис. 7.1. Схема протекторной защиты: 1 – протектор; 2 – сердечник; 3 – активатор; 4 – хлопчатобумажный мешок; 5 – проводник; 6 – контрольно-измерительная колонка; 7 – трубопровод

К сплаву – материалу протектора – применяются следующие требования: электронный потенциал материала протектора должен быть более отрицательным, чем потенциал защищаемого сооружения, а количество электричества, получаемого при электрохимическом растворении единицы массы протектора, должно быть как можно больше, поэтому наиболее применимые материалы, из которых используют сплавы, Mg, Al, Zn. Их и применяют на практике для поверхностного нанесения в.

Поскольку ЭДС пары есть разность стационарных потенциалов катода и анода, ток в цепи протектор – земля – трубопровод в общем случае определяется законом Ома.

### *Алгоритм расчета*

В соответствии с законом Фарадея, который определяет количество растворившегося металла  $G$ , связанного с электрохимическим эквивалентом  $Q$ , вводится новый термин – *токоотдача* – это количество электричества на единицу массы  $Q_{\text{теор}} = \frac{8750}{q}$ , где  $Q_{\text{теор}}$  – теоретическая токоотдача, А · ч / кг.

Однако фактическая токоотдача меньше теоретической. Это связано с явлением саморастворения протектора, а также возможностью побочных реакций с выделением  $H \Rightarrow Q = Q_{\text{теор}} \cdot \eta$ ,

где  $Q$  – фактическая токоотдача;

$\eta$  – коэффициент полезного использования (коэффициент выхода по току).

Продолжительность растворения протектора в зависимости от массы и величины тока

$$T = \frac{G \eta}{q},$$

где  $T$  – ожидаемый срок службы протектора до полного износа, г.;

$q$  – электрохимический эквивалент, кг/А · г.

ЭДС действующей гальванопары равна

$$E = U_k - U_a, \quad U_{\text{защ}} = U_k - \Delta U_{\text{защ}}, \quad U_{\text{пр}} = U_a - \Delta U_{\text{пр}},$$

где  $\Delta U_{\text{защ}}$  – смещение потенциала на поляризационном сопротивлении трубопровода;

$\Delta U_{\text{пр}}$  – смещение потенциала на поляризационном сопротивлении протектора;

$U_{\text{защ}}$  – падение напряжения в земле, и так как поляризуется отрицательным током  $\Delta U_{\text{защ}} < 0$ , а анод – положительным, то  $\Delta U_{\text{пр}} > 0$ , тогда  $U_{\text{пр}} = U_{\text{а}} + \Delta U_{\text{пр}}$ ;

$\Delta U_{\text{а}}$  – смещение потенциала на поляризационном сопротивлении анода.

В результате поляризации на трубопроводе и протекторе устанавливается напряжение, где  $U_{\text{защ}}$  и  $U_{\text{пр}}$  – фактически разности потенциала труба – земля и протектор – земля.

Если  $U_{\text{защ}} < U_{\text{защ min}}$ , то протектор надежно выполняет свои функции. Таким образом, протекторная защита – это катодная защита, где источником тока служит гальваническая пара труба – протектор.

### ***Протекторные материалы***

Из практических соображений для защиты стальных сооружений используются три вида металлов: Mg, Al, Zn. Есть попытки применять для этих целей и другие материалы, например сплавы Mn и марганцовистые стали.

В России выпускаются магниевые протекторы типов ПМ (магниевые), ПМУ (магниевые усиленные) и прутковые для подземных условий.

Конструкция типа ПМ представляет собой контактный сердечник из стального прутка диаметром 4 – 5 мм. Контактный сердечник служит для подключения кабеля к протектору. По конструктивному использованию протекторы делятся:

- на стержневые;
- прутковые;
- плоские (могут быть произвольной формы).

Обозначение протекторов: ПМ-10 – М-магниевый, цифра означает массу (кг); ПА – алюминиевый; ПС – цинковый.

Протекторы при монтаже могут соединяться коротко или в регулированные потоки.

### ***Активированная засыпка***

Предназначена для обеспечения равномерности протектора и уменьшения сопротивления растеканию, чтобы протектор растекался равномерно и постепенно.

Наиболее целесообразно в качестве засыпки для ПМ использовать 75 % гипса, 20 % бетонита, 10 %  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

### **Размещение протектора**

Протекторная установка состоит из одного или нескольких протекторов, включенных группой (рис. 7.2).

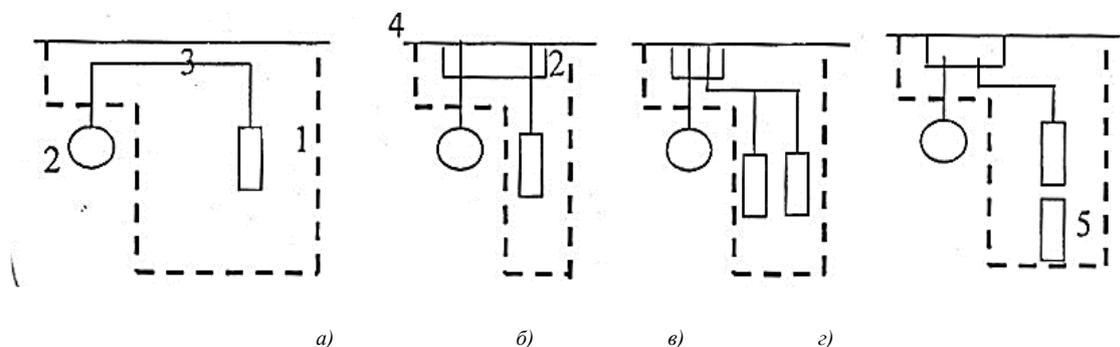


Рис. 7.2. Варианты протекторных установок:

- а – короткозамкнутая; б – контролируемая потоком (КИП) (используется чаще); в – грунтовая с п-протекторами вдоль трассы; г – грунтовая под трубопроводы в скважине; 1 – протектор; 2 – труба; 3 – изолированный соединенный провод; 4 – КИП; 5 – скважина

Расстояние протектора от трубы составляет 3 – 5 м, глубина на уровне трубопровода, шаг между протекторами определяется расчетом. В строительные работы входят бурение неглубокой скважины и рытье траншеи для соединений провода. Протектор, если он в коллекторе с активатором, опускают в скважину вместе с мешком и засыпают с трамбовкой и увлажнением. Установка при этом развивает свой максимальный ток через несколько дней. Величина тока протекторной установки и протектора зависит от сопротивления цепи протектор – труба. Для изолированного трубопровода и протектора величина тока составляет 20 – 200 мА.

### **Расчет протекторной защиты**

Протекторная защита рассчитывается как с использованием пакета специализированных программ, так и с применением формул.

Задачи расчета:

- определить количество протекторов, если ток протекторной установки задан;

– определить фактический ток, который будет генерировать протекторная установка.

### ***Оценочный расчет протекторной защиты***

Строится по формуле закона Ома, при этом вводится понятие «действующее напряжение»  $U_d$ , которое для магниевого протектора составляет  $U_d = 0,6$  В, для цинкового  $U_d = 0,2$  В.

$$I_{\text{пр}} = \frac{U_d}{R_{\text{пр}}} = \frac{0,6}{0,4\rho} = \frac{1,5}{\rho} \text{ А.}$$

Задаваясь средним значением плотности тока  $i_{\text{ср}}$  защиты трубопровода, определяем суммарный ток ПЗ для данного участка защищаемого трубопровода

$$I_{\Sigma} = i_{\text{ср}} \cdot S_{\Sigma},$$

где  $I_{\Sigma}$  – количество протекторов;

$S_{\Sigma}$  – площадь поверхности защищаемого трубопровода.

Далее вычисляем количество протекторов

$$n = \frac{I_{\Sigma}}{I_{\text{пр}}}.$$

При удачно выбранной величине  $i_{\text{ср}}$  получаем приемлемую точность расчета.

## **7.2. Катодная защита**

Обычно катодная защита используется совместно с изоляционным покрытием, которое значительно уменьшает необходимый ток для защиты. По мере разрушения покрытия и оголения металла катодный ток должен возрасти для обеспечения защиты трубопровода (величина тока зависит от качества изоляции).

*Основной принцип СКЗ* – наличие источника тока и анодного заземлителя. Электроэнергия, необходимая для СКЗ, поступает из сети переменного тока, далее через конвертер преобразуется в постоянное напряжение и используется для защиты (рис. 7.3).



Рис. 7.3. Схема станции катодной защиты

Выпрямительный ток от «плюса» выпрямителя поступает на анодный заземлитель, затем по земле натекает на трубопровод, тем самым выполняет свои функции и возвращается на выпрямитель.

В станцию катодной защиты могут входить:

- высоковольтный понижающий трансформатор для питания СКЗ от сети напряжением более 220 В;
- автоматически отключаемое устройство на питающей линии переменного тока;
- счетчик электроэнергии;
- защитный заземлитель корпуса-преобразователя;
- блоки совместной защиты.

Катодная защита возможна только там, где защищаемая конструкция и анодное заземление находятся в электродном и электролитическом контакте, который достигается с помощью металлических проводников и наличием электролитической среды грунта.

КЗ регулирует поддержание необходимого защитного потенциала, который измеряется между конструкцией и электродом сравнения; как правило, это электрод длительного действия МСП.

При расчете параметров катодной защиты:

- определяют смещение тока;
- рассчитывают систему анодного заземления;

- вычисляют систему дренажной цепи сооружения – КЗ анодное заземление;
- определяют направление и мощность тока катодной защиты;
- рассчитывают электрическую цепь фитингов и распределительных устройств в соответствии с нормативно-технической документацией;
- определяют место установки катодной защиты;
- подготавливают чертежи, спецификации, сметы.

Исходными данными для расчета СКЗ служат параметры проектирования сооружений и удельное сопротивление грунта на трассе трубопровода.

Конструкция анодного заземлителя для каждого случая определяется технико-экономическим результатом и может быть как горизонтальной, так и вертикальной. Основное требование к конструкции – малая скорость анодного растворения. В качестве анодного материала используют сталь, чугун, графит, ферросилит, свинец, серебро, магнетит, платину. Поиск материалов для анодного заземлителя продолжается: на сегодняшний день перспективными следует назвать вентильные металлы с разнообразными окисными покрытиями типа титана.

### **7.3. Электродренажная защита**

Значительную опасность для магистральных трубопроводов представляют блуждающие токи электрифицированных железных дорог, которые в случае отсутствия защиты трубопровода вызывают интенсивное коррозионное разрушение в анодных зонах.

*Дренажная защита (электродренажная защита)* – это электрическая защита металлических подземных сооружений на железных дорогах (кабельных линий, трубопроводов, фундаментов опор контактной сети и др.) от коррозии, вызываемой блуждающими токами.

Основной задачей ЭДЗ является отвод блуждающих токов для обеспечения катодной защиты на всем протяжении трубопровода, а не только на участке вблизи станции катодной защиты.



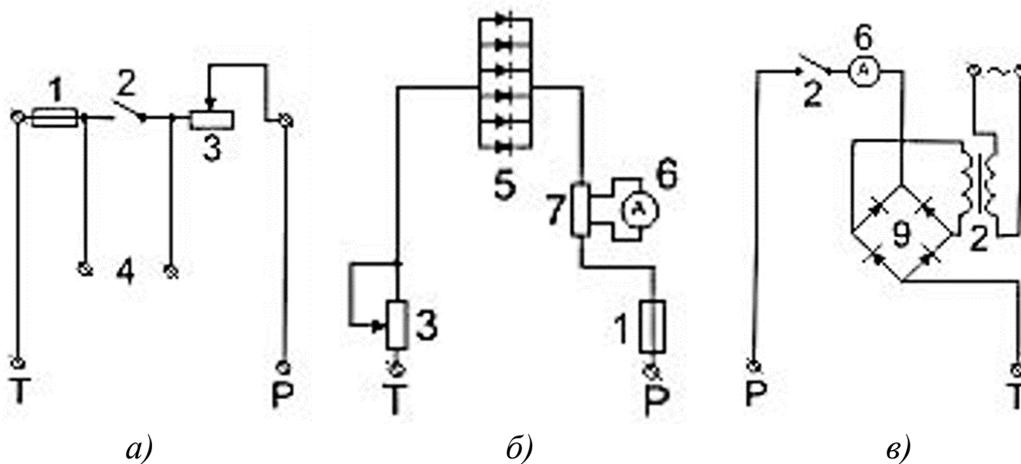


Рис. 7.5. Варианты электродренажной защиты:  
 а – прямая; б – поляризованная; в – усиленная

*Прямая ЭДЗ* имеет двустороннюю проводимость. Ее используют, когда потенциал трубопровода постоянно выше потенциала земли, куда отводятся блуждающие токи.

*Поляризованная ЭДЗ* имеет одностороннюю проводимость. Она исключает натекание блуждающих токов на трубопровод по дренажному проводу.

*Усиленную* используют, когда нужно не только отводить блуждающие токи от трубопровода, но и обеспечить на нем необходимую величину защитного потенциала.

Прямой электрический дренаж – это дренажное устройство двусторонней проводимости. Схема прямого электрического дренажа включает в себя реостат, рубильник, плавкий предохранитель и сигнальное реле. Сила тока в цепи трубопровод – земля регулируется реостатом. Если величина тока превысит допустимую величину, то плавкий предохранитель сгорит, ток потечет по обмотке реле, при включении которого срабатывает звуковой или световой сигнал.

Прямой электрический дренаж применяется в тех случаях, когда потенциал трубопровода постоянно выше потенциала земли, куда отводятся блуждающие токи. В противном случае дренаж превратится в канал для натекания блуждающих токов на трубопровод.

Усиленный дренаж применяется, когда нужно не только отводить блуждающие токи от трубопровода, но и обеспечить на нем необходимую величину защитного потенциала. Усиленный дренаж представ-

ляет собой обычную катодную станцию, подключенную отрицательным полюсом к защищаемому сооружению, а положительным – не к анодному заземлению, а к рельсу (земле) электрифицированного транспорта.

Эффективная работа электрохимической защиты возможна только при высоком качестве монтажа всех конструктивных элементов. Для этого требуются научно обоснованная организация работ, максимальная механизация и высокая квалификация строительно-монтажных рабочих. Так как для защиты трубопроводов применяется ограниченное число типов установок, а элементы электрохимической защиты в основном типовые, следует производить предварительную заготовку основных монтажных узлов и блоков в заводских условиях.

Для сооружения электрохимической защиты магистральных трубопроводов от коррозии применяются средства и установки катодной, электродренажной, протекторной защиты, электрические переключки, контрольно-измерительные пункты и конструктивные узлы типовых проектов.

Работы по сооружению электрохимической защиты проводят в две стадии. На первой стадии необходимо выполнять следующие работы:

- разметку трасс участка производства работ, ЛЭП и кабелей, подготовку строительной площадки;
- выбор и обустройство места для хранения оборудования, монтажных узлов, деталей, метизов, инструментов и материалов;
- доставку техники, машин и механизмов;
- подготовку участка для производства работ;
- доставку оборудования установки катодной защиты, монтажных узлов, деталей, метизов, инструмента, приспособлений и материалов;
- разработку грунта в траншеях и котлованах. Обратную засыпку с трамбовкой после установки оборудования и кабелей до уровня, указанного в рабочей документации;
- сооружение анодных и защитных заземлений, монтаж и укладку протекторов;
- прокладку подземных коммуникаций;
- монтаж катодных и контрольных электрических выводов от трубопроводов, а также контактных соединений анодных, защитных заземлений и протекторных выводов;

– установку и закладку в сооружаемые фундаменты несущих опорных конструкций для монтажа оборудования.

Работы первой стадии следует вести одновременно с основными строительными работами по технологической части трубопровода.

На второй стадии выполняют работы по установке оборудования, подключение к нему электрических кабелей, проводов и индивидуальное опробование электрических коммуникаций и установленного оборудования.

Работы второй стадии должны быть выполнены, как правило, после окончания основных видов строительных работ и одновременно с работами специализированных организаций, осуществляющих пуск, опробование и наладку средств и установок электрохимической защиты по совмещенному графику.

Пуск, опробование и наладку средств и установок электрохимической защиты проводят с целью проверки работоспособности как отдельных средств и установок ЭХЗ, так и всей системы электрохимической защиты, ввода ее в действие и установления режима, предусмотренного проектом для обеспечения электрохимической защиты участка подземного трубопровода от внешней коррозии в соответствии с действующей нормативно-технической документацией.

Установки электрохимической защиты в процессе эксплуатации должны обслуживаться в соответствии с графиком технических осмотров и планово-предупредительных ремонтов. График должен включать в себя определение видов и объемов технических осмотров и ремонтных работ, сроки их проведения, указания по организации учета и отчетности о выполненных работах.

Основное назначение работ по профилактическим осмотрам и планово-предупредительным ремонтам – содержание электрохимической защиты в состоянии полной работоспособности, предупреждение преждевременного износа и отказов в работе.

#### **7.4. Прочие виды защиты**

##### ***Ингибиторная защита***

*Ингибитор*, или замедлитель, – это химическое вещество, искусственная добавка которого в агрессивную среду, причем в очень малом количестве, уменьшает *скорость коррозии*.

Считают, что защитное действие ингибитора связано с экранирующим эффектом адсорбированной пленки ингибирующего вещества на корродирующей поверхности. Этот барьер затрудняет ионный обмен и, следовательно, коррозионный процесс.

Ингибиторы широко применяются для защиты *внутренних поверхностей* трубопроводов при транспортировке агрессивных жидкостей, а также в химических производствах. В мире запатентованы тысячи химических соединений, пригодных в качестве ингибиторов в той или иной коррозионной среде.

### ***Деаэрация воды***

Этот способ защиты основан на том факте, что при *уменьшении содержания кислорода* в воде ее *агрессивность падает*.

Кислород удаляется из воды либо химически, либо паровой или вакуумной деаэрацией. В *паровых* деаэраторах кислород выпаривают в тонких слоях воды или в брызгах на нагретых паром поверхностях. Полученная горячая вода далее используется в водяных котлах или системе горячего водоснабжения, благоприятно действуя на коррозию внутренних поверхностей трубопроводов.

В *вакуумных* деаэраторах обескислороживается холодная вода путем понижения давления с помощью пароструйных насосов. При этом удаляются и другие растворенные в воде газы.

Антикоррозионная защита стали в горячей воде имеет место при концентрации кислорода в ней не более 0,1 мг/л, что обеспечивается стандартным деаэратором. Кстати, концентрация кислорода в воде в нормальных условиях может достигать 20 мг/л.

### **Контрольные вопросы**

1. В чем суть активной защиты трубопроводов от коррозии?
2. Перечислите основные виды активной защиты.
3. Как работает протекторная защита?
4. В чем особенность работы катодной защиты?
5. Каков принцип работы электродренажной защиты?

## Тема 8. ЭКСПЛУАТАЦИЯ, КОНТРОЛЬ, ОБСЛУЖИВАНИЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ

### 8.1. Приборы контроля за состоянием системы электрохимической защиты

В соответствии с требованиями ГОСТ Р 51164-98 в состав УКЗ входит источник электроснабжения (ЛЭП – 10 кВ, ТП-10/0,23 кВ) с элементами и средствами коррозии. Для контроля эффективности ЭХЗ на подземных трубопроводах проектом предусматривается установка контрольно-измерительных пунктов (КИП), специальных КИП (СКИП) с датчиком электрохимического потенциала и контрольно-диагностических пунктов (КДП) с датчиками коррозии.

Значения контролируемых параметров ЭХЗ зависят от фактического состояния изоляционного покрытия трубопровода и окружающих условий (гидрогеологических, климатических и др.). Допустимые погрешности измерений контролируемых параметров ЭХЗ не должны превышать суммарных погрешностей измерений пассивной защиты.

Характеристика контролируемых параметров ЭХЗ магистральных трубопроводов приведена в таблице.

Контролируемые параметры ЭХЗ трубопроводов

Контролируемый параметр	Пределы измерения	
	минимальный	максимальный
Сила тока в цепи труба – земля для изолированного трубопровода, А	$0,5 \cdot 10^{-3}$	20
Разность потенциалов труба – земля, В	0,5	10
Удельное электросопротивление грунта, Ом·мм <sup>2</sup> /м	0,1	$100 \cdot 10^3$

#### *Техническая оснащенность контроля параметров и средств измерений*

Рассмотрим технические характеристики основных средств измерений и контроля параметров, используемых для контроля качества электрохимической защиты.

Прибор КАГ-2 предназначен для определения коррозионной активности грунтов по отношению к углеродистой стали в зависимости от плотности поляризующего тока. Все операции (определение времени пропускания поляризующего тока через образец, извещение оператора звуковой и световой сигнализацией о насыщении грунта током, фиксация результатов разности потенциалов в момент разрыва поляризующей цепи «электронной памятью») осуществляются автоматически.

Комплекс «Луч-1» предназначен для бесконтактного измерения и регистрации относительных изменений удельного сопротивления грунтов. Этот прибор применяют при комплексном обследовании подземных магистральных газопроводов для обнаружения участков грунтов с резким изменением удельного сопротивления, что весьма важно при оценке вероятности возникновения коррозионных макропар на подземных участках газопровода.

Прибор ИПВК-1 – высокоомный измеритель защитных потенциалов осуществляет измерение разности потенциалов труба – земля на подземных магистральных трубопроводах. Прибор позволяет проводить и другие электрометрические работы на магистральных трубопроводах, расположенных в различных климатических и почвенных условиях, включая грунты с высоким удельным электрическим сопротивлением. Рассчитан на работу в лабораторных и полевых условиях.

Интегратор блуждающих токов ИТБ-1 – разработан на основе последних достижений молекулярной электроники, предназначен для определения средних значений потенциалов при электрохимических коррозионных измерениях, позволяющих прогнозировать и оценивать состояние магистральных трубопроводов в зависимости от коррозионных повреждений, а также для контроля работы средств ЭХЗ. Принцип действия интеграторов блуждающих токов основан на раздельном интегрировании положительных и отрицательных составляющих тока. Интегратор состоит из корпуса, на котором смонтирована электрическая схема, и двух ртутно-капиллярных кулон-метров. Интегратор блуждающих токов отличается от приборов электромеханического

типа многофункциональностью, малыми габаритами и массой, долговременной памятью, надежностью, простотой конструкции и малой стоимостью.

### ***Мероприятия по охране окружающей среды***

Установки протекторной защиты трубопроводов от коррозии сооружают в соответствии с ВСН 015-88 «Строительство магистральных и промышленных трубопроводов. Охрана окружающей среды».

Под окружающей средой понимается вся совокупность природных элементов в полосе строительства и прилегающих к ней территорий.

Природоохранные мероприятия должны проводиться в соответствии со специфическими особенностями окружающей среды, характерными для природоохранительной зоны, в пределах которой сооружаются объекты протекторной защиты.

Природоохранные мероприятия и рекультивация земель после завершения сооружения протекторной защиты должны носить комплексный характер или должно обеспечиваться не только сохранение отдельных природных элементов (рельефа, почв, воды, воздуха, растительного и животного мира), но и ландшафтов в целом.

Объем необходимых природоохранных мероприятий снижается путем сооружения протекторной защиты как единого целостного процесса со строительством трубопровода. Поточность работ позволяет избежать проведения консервационных природоохранных мероприятий во время перерывов между различными видами работ и в значительной мере ограничить их рекультивационными мероприятиями.

Для уменьшения неблагоприятных воздействий на окружающую среду при сооружении протекторной защиты во всех природоохранных зонах необходимо сокращать площади участков строительства, ограничивая их минимальными технологически необходимыми размерами.

При проведении работ по сооружению протекторной защиты следует избегать загрязнений окружающей среды горюче-смазочными, изоляционными материалами, строительными отходами, для чего

необходимо на стадии проектирования протекторной защиты предусмотреть способы переработки или захоронения отходов.

На всех этапах сооружения протекторной защиты необходимо проводить мероприятия, нейтрализующие или предотвращающие неблагоприятные рельефообразующие процессы, возникающие или активизирующиеся вследствие строительства объектов протекторной защиты.

На всех этапах строительства протекторной защиты следует избегать нарушения естественной дренажной сети, восстанавливать ее в близком к существовавшему до начала строительства виде в ходе рекультивационных работ.

При сооружении объектов протекторной защиты важно обеспечить соблюдение правил противопожарной безопасности, особенно при работах в пределах лесной зоны и зоны многолетнемерзлых пород в месяцы с положительными среднесуточными температурами воздуха.

### ***Измерения на протекторных установках***

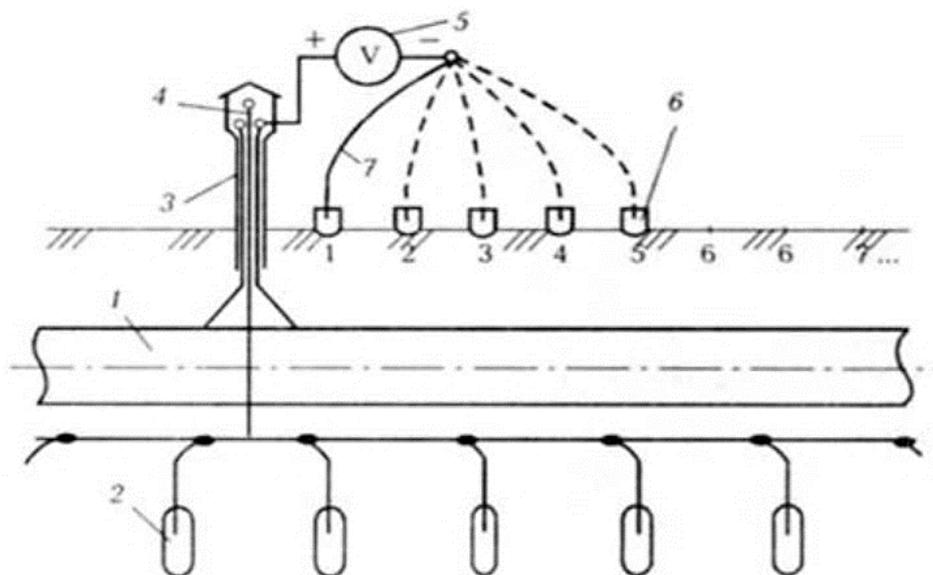
Измерения на протекторных установках проводят для оценки эффективности их работы. Работа протекторной установки считается удовлетворительной, если при ее подключении обеспечивается требуемая защитная зона сооружения.

При наладке и приемке в эксплуатацию протекторных установок измерению подлежат следующие параметры:

- потенциал защищаемого сооружения до подключения протекторов;
- потенциал протекторов относительно грунта до подключения сооружения;
- разность потенциалов между сооружениями и протекторами (ЭДС протекторной установки);
- потенциал сооружения после подключения протекторов.

Контролируют работы протекторных установок во время эксплуатации путем измерения разности потенциалов труба – грунт выносным электродом. Шаг измерения должен быть таким, чтобы можно

было зафиксировать значение потенциала трубопровода против протектора и в середине участка между протекторами (рис. 8.1).



*Рис. 8.1. Проверка эффективности работы протекторной установки путем измерения разности потенциалов труба – грунт выносным электродом: 1 – труба; 2 – протекторы; 3 – КИП; 4 – переключатель; 5 – высокоомный вольтметр; 6 – медно-сульфатный электрод сравнения; 7 – измерительный провод*

В случае обнаружения участка трубопровода с потенциалом менее минимально допустимого выясняют причину недозащиты и принимают меры по восстановлению нормальной работы протекторов.

При техническом осмотре протекторной установки проводят измерения:

- силы тока в цепи протектор – труба;
- потенциала сооружения в месте подключения протекторной установки.

При обнаружении уменьшения силы тока протекторной установки по сравнению с результатами предыдущих измерений измеряют сопротивление цепи протектор – труба и, если обнаружено увеличение этого сопротивления, измеряют удельное сопротивление грунта или сопротивление растеканию тока протектора. Измерение сопротивлений выполняют измерителем сопротивлений.

Если увеличение сопротивления цепи вызвано увеличением удельного сопротивления грунта и сопротивлением растеканию тока, то это увеличение может быть объяснено сезонным изменением. В противном случае увеличение сопротивления цепи свидетельствует о неисправности протекторной установки.

При измерении силы тока в цепи протекторной установки используют приборы с низким внутренним сопротивлением на пределе 10 А или с наружным шунтом. Соединительные провода должны иметь сечение не менее 4 мм<sup>2</sup> и общую длину 0,5 м.

### **Измерение поляризационного потенциала при контроле электрохимической защиты**

Поляризационный потенциал (электрохимический потенциал) определяет кинетику электродных реакций и характеризует защищенность сооружения от коррозии. Пространственно он расположен в области двойного электрического слоя на границе металл – электролит.

Если электрод сравнения расположен на поверхности земли, то измеряемая вольтметром разность потенциалов труба – грунт содержит кроме величины поляризационного потенциала еще и величину падения напряжения между электродом сравнения и металлом трубы – омическую составляющую  $u_{ом}$

$$u_{изм} = u_{пол} + u_{ом} = u_{пол} + IR,$$

где  $u_{пол}$  – поляризационный потенциал, В;

$u_{ом} = IR$  – омическая составляющая потенциала (омический потенциал, В).

Омический потенциал по знаку совпадает с поляризационным, поэтому измеренная прибором величина потенциала всегда больше поляризационного. Это может привести к ложным выводам о защищенности контролируемого сооружения. В определенных условиях (например, при высоком удельном сопротивлении грунта и в точках дренажа УКЗ) омическая составляющая может быть значительной и в несколько раз превышать величину поляризационного потенциала.

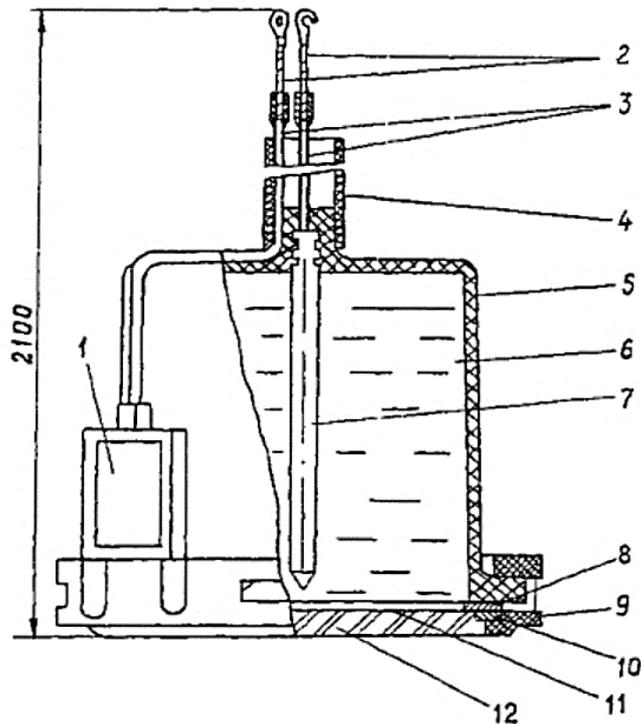
В практике катодной защиты поляризационный потенциал называют также потенциалом без омической составляющей («бос-потенциал», или  $u_{IRfree}$  в зарубежной литературе). Потенциал, измеренный прибором при включенных средствах защиты, называют потенциалом с омической составляющей; для обозначения потенциала с омической составляющей приняты также термины: «общий потенциал», «суммарный потенциал» и «потенциал включения»  $u_{вкл}$  ( $u_{on}$  в зарубежной литературе).

Измерить поляризационный потенциал непосредственно при помощи вольтметра в трассовых условиях не представляется возможным. Существует ряд методов косвенного измерения поляризационного потенциала, или исключения омической составляющей, однако далеко не все они могут быть использованы в полевых условиях либо из-за сложности схем и расчетов, либо из-за больших затрат труда и времени.

Перечислим методы измерения поляризационного потенциала трубопровода, которые могут быть рекомендованы для применения в полевых условиях:

- метод отключения тока защиты сооружения и измерения потенциала после отключения тока;
- метод измерений с использованием капилляра Габера – Лугина;
- метод отключения тока поляризации вспомогательного электрода, имитирующего дефект в изоляционном покрытии, и измерения его потенциала;
- метод непосредственного измерения потенциала вспомогательного электрода через электролитический ключ, подведенный к границе двойного электрического слоя вспомогательного электрода;
- метод экстраполяции.

Метод отключения тока поляризации вспомогательного электрода заключается в измерении потенциала отключения вспомогательного образца – датчика (имитирующего дефект изоляции трубы) в момент его отключения от трубы. Схема устройства представлена на рис. 8.2.



*Рис. 8.2. Долгодействующий неполяризующийся электрод сравнения с датчиком потенциала: 1 – датчик потенциала; 2 – наконечники жил проводов; 3 – провода; 4 – штуцер; 5 – пластмассовый корпус; 6 – электролит; 7 – медный стержень (электрод); 8 – уплотнительная прокладка; 9 – гайка; 10 – уплотнительная прокладка; 11 – ионообменная мембрана; 12 – основание*

Датчик потенциала 1 выполнен из стальной пластины размерами  $25 \times 25$  мм. Корпус электрода 5 заполняется электролитом 6, состоящим из насыщенного раствора сульфата меди в дистиллированной воде и этиленгликоля. Ионообменная мембрана 11 прижата к корпусу 5 гайкой 9 через уплотнительную прокладку 8. К наконечнику присоединена экранированная оплетка кабеля. Электрод 7 вставлен в верхнюю часть корпуса 5.

Коммутирующее устройство состоит из накопительного конденсатора емкостью  $4,7$  мкФ и тумблера «реле», обеспечивающего попеременную коммуникацию цепей датчик – трубопровод и датчик – электрод сравнения. Измерения выполняют высокоомным вольтметром через наконечники жил проводов 2.

Продолжительность коммутации цепи датчик – электрод сравнения должна быть не менее 5 мс, продолжительность коммутации цепи датчик – трубопровод – не менее 50 мс.

Вспомогательный электрод представляет собой пластину определенного размера, выполненную из стали, близкой по составу к трубной стали. Одну из сторон пластины изолируют. Плоскость датчика при установке должна быть ориентирована перпендикулярно оси трубы. Важно, чтобы датчик был максимально приближен к трубе.

При проведении измерений по этому методу в измеряемую величину всегда входит и падение напряжения (градиент поля токов катодной защиты) между электродом сравнения и датчиком. Поэтому необходимо, чтобы электрод сравнения был максимально приближен к датчику, но при этом не экранировал его.

Применение метода отключения вспомогательного образца ограничивается удельным сопротивлением грунта в месте измерения. В высокоомных грунтах из-за малой силы тока, протекающего через датчик, поляризация его проходит очень медленно и получить достоверные данные практически невозможно.

Еще одним ограничением в применении этого метода является уровень переменной составляющей разности потенциалов труба – грунт, который особенно велик у точек дренажа установки катодной защиты. Величину переменной составляющей можно оценить тем же мультиметром. Если переменное составляющее превышает 8 В, то измерения этим методом проводить нельзя, так как возможны значительные погрешности в результатах измерений.

Для измерения поляризационного потенциала должны быть сооружены специальные контрольно-измерительные пункты. Их оснащают стационарным электродом сравнения и вспомогательным электродом. На электромонтажном щитке колонки должны быть устройства для замыкания проводов от вспомогательного электрода и контрольного вывода. Вспомогательный электрод должен быть постоянно соединен с защищаемым сооружением; его отключают от сооружения только на время измерений.

Допускается оснащать КИПы только вспомогательными электродами. В этих случаях измерения проводят относительно переносного электрода сравнения. Место, где расположен вспомогательный электрод, должно быть обозначено. Для уменьшения расстояния между

электродами можно соорудить колодец из асбоцементной трубы. Измерительный электрод опускают в колодец на удлинительной штанге. Если градиент потенциала в грунте превышает 50 мВ/м, то сооружение колодца для измерительного электрода является обязательным.

## **8.2. Эксплуатация средств защиты трубопроводов от электрохимических загрязнений**

Последовательность выполнения работ при обеспечении технологии создания систем электрохимической защиты:

- получение технического задания заказчика на объект ЭХЗ, подготовка технических условий;
- проектирование специализированными организациями;
- согласование проекта с ответственными;
- оформление проекта, составление отчета и передача заказчику;
- передача проекта заказчиком монтажной организации, возведение объекта, пусконаладочные работы, сдача – приемка;
- эксплуатационная организация ведет эксплуатационные работы и техническую документацию.

### ***Состав проекта при выполнении строительно-монтажных работ***

Перед началом СМР проект должен быть зарегистрирован в специальной организации, которая проверяет его на соответствие НТД (НТЛ); изменения должны быть согласованы с заинтересованной организацией и основным заказчиком. При этом СМР должны вестись с учетом передовых технологий, материалов, типовых чертежей под авторским и техническим надзором.

При приемке после завершения СМР должны быть представлены:

- согласованный проект;
- исполнительные чертежи в масштабе 1:500;
- журнал авторского и технического надзора;
- справки от смежных организаций;
- технический паспорт;
- акт приемки электромонтажных работ;

- акт приемки контактных устройств;
- акт приемки скрытых работ;
- акт проверки удельного сопротивления изоляции и заземления;
- протоколы измерительных сопротивлений изоляционного кабеля;
- протоколы измерения сопротивления заземлителя;
- акт контроля преобразователей;
- акт пневматических или электрических испытаний изолированных фланцев;
- справка о применении установочных электроизоляционных соединений;
- справка о выполнении благоустройства территории.

### ***Пусконаладочные работы***

После завершения СМР заказчик передает исполнительно-техническую документацию специализированной пусконаладочной организации:

- проект с согласованными изменениями;
- копии исполнительных чертежей;
- акты приема строительно-монтажных работ;
- акты допуска энергонадзора электроустановок.

При ПНР выполняется осмотр и проверка всех элементов ЭХЗ и контроль потенциала трубопровода на контрольно-измерительном пункте.

Все элементы электрохимической защиты проверяются и выводятся на проектный уровень. Система электрохимической защиты объекта должна проработать не менее 72 ч.

### ***Эксплуатация установок электрохимической защиты***

При эксплуатации установок ЭХЗ проводят:

- периодические технические осмотры;
- проверку эффективности работ;
- присвоение каждой защитной установке порядкового номера, заводят журнал контроля для результатов осмотра и измерения.

Установки ЭХЗ в процессе эксплуатации обслуживают согласно графикам техосмотра и планово-предупредительных ремонтов. Основное назначение работ – содержание установок ЭХЗ в работоспособном состоянии, предупреждение предварительного износа и отказов в работе.

### ***Состав работ и рекомендуемые сроки***

Технический осмотр:

- два раза в месяц для изолирующего соединения;
- четыре раза в месяц для электродренажной установки;
- один раз в полгода для установки протекторной защиты.
- один раз в год – текущий ремонт;
- один раз в пять лет – капитальный ремонт.

Эффективность ЭХЗ проверяют не реже чем два раза в год (с интервалом не менее четырех месяцев), а также при изменении параметров работы и коррозионных условий:

- при прокладке новых сооружений;
- изменении конфигурации сети;
- установке ЭХЗ и смежных коммуникаций.

При всех вскрытиях – при ремонте, реконструкции, ликвидации дефектов изоляции при коррозионных повреждениях следует определять коррозионное состояние металла и состояние изолирующего покрытия с составлением актов.

При коррозионных повреждениях проводятся обследования для выявления причин коррозии и разработки противокоррозионных мероприятий. Составляется акт определенной формы:

- определение вредного влияния блуждающих токов – один раз в два года;
- оценка коррозионной агрессивности грунтов – один раз в пять лет.

### **Контрольные вопросы**

1. Какими приборами можно проверить состояние системы электрохимической защиты?
2. Какие мероприятия по охране окружающей среды проводят при коррозионной защите?

3. Как осуществляются измерения на протекторных установках?
4. Что такое поляризационный потенциал у электрохимической защиты?
5. Что входит в последовательность работ при создании системы электрохимической защиты?
6. Какие существуют основные документы по приемке строительно-монтажных работ при создании системы электрохимической защиты?
7. Какие элементы входят в пусконаладочные работы?
8. Что входит в работы по эксплуатации системы электрохимической защиты?

## **ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ**

*Адгезия* – сцепление покрытия с металлической основой поверхности трубы или полимерной основой.

*Анодное заземление* – устройство, обеспечивающее стекание защитного тока на землю.

*Анодный заземлитель* – проводник, погруженный в электрическую среду и подключенный к сети постоянного тока.

*Блуждающий ток* – постоянный ток, протекающий вне предназначенной для него цепи.

*Вдольтрассовая ВЛ* – воздушная (воздушная с кабельными вставками) линия электропередачи, используемая для обеспечения электрической энергией средств ЭХЗ и электрооборудования линейной части магистральных нефтепроводов.

*Гальваническая (протекторная) защита* – электрохимическая защита металлического сооружения путем подключения к нему гальванического анода.

*Гальванический анод* – электрод из металла с более отрицательным потенциалом, чем защищаемое металлическое сооружение, подключающийся к сооружению при его гальванической защите.

*Диагностирование* – процесс определения технического состояния с помощью технических средств, поиска дефекта для оценки работоспособности и прогнозирования изменения технического состояния оборудования.

*Диэлектрическая сплошность изоляционного покрытия* – отсутствие сплошных повреждений и утоньшение покрытий определяемого при взаимодействии высоковольтного источника постоянного тока.

*Дренажная линия* – кабели, соединяющие минусовую клемму источника постоянного тока с трубопроводом (катодная дренажная линия) и плюсовую клемму – с анодным заземлением (анодная линия).

*Защитный потенциал* – катодный потенциал, предотвращающий коррозионный процесс.

*Изоляционное покрытие* – слой или система слоев вещества, наносимых на покрытие для защиты металла от коррозии и обладающих электроизоляционными свойствами.

*Катодная защита* – электрохимическая защита металлических сооружений путем подключения к отрицательному полюсу источника тока (постоянного) и к положительному полюсу, к которому подключен анод.

*Контрольно-измерительный пункт* – устройство, предназначенное для измерения разности потенциалов труба – земля электродом сравнения, состоящее из колонки с клеммной панелью, узла подключения кабеля к МН, соединительных и измерительных проводов.

*Коррозионная агрессивность грунта* – совокупность свойств, характеристик грунта, которые влияют на коррозию металла.

*Минимальный защитный потенциал* – минимальный (по абсолютному значению) катодный потенциал, обеспечивающий защиту от коррозии.

*Поляризационный потенциал* – потенциал без омической составляющей.

*Пункт контроля и управления* – оборудование телемеханики, предназначенное для дистанционного контроля положения задвижек и других составляющих линейной части нефтепроводов и управления ими. Блок-боксы ПКУ размещены на трассе нефтепроводов у узлов задвижек.

*Работоспособное состояние* (работоспособность) – состояние оборудования, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической (эксплуатационной) и (или) конструкторской (проектной) документации и других нормативных актов.

*Ремонт* – комплекс мероприятий по устранению неисправностей вдоль трассовых ВЛ и средств ЭХЗ или их составных частей, обеспечивающий эксплуатацию ВЛ с заданной работоспособностью в периоды между ремонтами.

*Средства ЭХЗ* – средства, используемые для защиты от подземной коррозии наружной поверхности трубопроводов, кабельных линий связи и их элементов методом катодной поляризации постоянным током.

*Текущий ремонт* – ремонт, выполняемый в процессе эксплуатации для обеспечения работоспособности вдольтрассовых ВЛ и средств ЭХЗ и состоящий в замене и (или) восстановлении отдельных частей и их регулировке.

*Техническое обслуживание* – комплекс мероприятий, направленный на предотвращение преждевременного износа элементов оборудования или их разрушения, обеспечение надежной работы оборудования в межремонтный период.

*Установка дренажной защиты* – электроустановка, состоящая из поляризованного дренажа (СДЗ) и соединительных кабелей, предназначенных для отвода (дренажа) блуждающих токов из трубопровода к источнику этих токов (электрифицированный железнодорожный транспорт).

*Установка катодной защиты* – электроустановка, предназначенная для защиты подземных сооружений от почвенной коррозии и коррозии, вызываемой блуждающими токами, состоящая из катодной станции, анодного заземления, заземляющего устройства и соединительных кабелей.

*Установка протекторной защиты* – установка для катодной поляризации нефтепровода путем создания гальванической пары металл нефтепровода – протектор, состоящая из протектора или группы протекторов, активатора, регулирующих резисторов, шунтов, поляризованных элементов, контрольно-измерительной колонки и соединительных проводов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование процессов коррозии позволяет более полно и глубоко рассматривать прикладные вопросы теории теплоснабжения и, в частности, долговечности и ресурса систем трубопроводного транспорта, перехода с эксплуатации систем «по фактическому состоянию» на планово-предупредительный.

Материал учебного пособия дает законченное представление о выбранной теме и позволяет студентам получить необходимые знания для использования их в дальнейшем обучении.

Вместе с тем следует отметить, что существуют и более глубокие элементы изучения процесса коррозии, такие как структура коррозионных фракталов, особенности гомогенного и гетерогенного воздействия на металл, диагностика трубопроводов, особенности химического взаимодействия металлов, использование нетрадиционных способов защиты, перспективы развития методов и средств защиты и др. Данные вопросы можно изучать в качестве дополнительного материала по источникам, приведенным в библиографическом списке.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Александров, Ю. В. Актуальные вопросы защиты от коррозии длительно эксплуатируемых магистральных газопроводов / Ю. В. Александров, Р. В. Агинец. – СПб. : Недра, 2012. – 394 с. – ISBN 978-5-905153-28-0.
2. Бэкман, В. Катодная защита от коррозии : справочник / В. Бэкман, В. Швенк. – М. : Металлургия, 1984. – 496 с. – ISBN 5-1153117.
3. Замалетдинов, И. И. Электрохимическая коррозия и защита металлов : учеб. пособие / И. И. Замалетдинов. – Пермь : Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2010. – 152 с. – ISBN 978-5-88151-833-2.
4. Зарубина, Л. П. Защита зданий, сооружений, конструкций и оборудования от коррозии. Биологическая защита. Материалы, технологии, инструменты и оборудование / Л. П. Зарубина. – Вологда : Инфра-Инженерия, 2015. – 224 с. – ISBN 978-5-9729-0087-9.
5. Защита от коррозии протяженных металлических сооружений : справочник / В. И. Глазков [и др.]. – М. : Недра, 1969. – 311 с.
6. Защита подземных металлических сооружений от коррозии : справочник / И. В. Стрижевский [и др.]. – М. : Стройиздат, 1991. – 303 с. – ISBN 5-274-01161-6.
7. Волков, Б. Г. Справочник по защите подземных металлических сооружений от коррозии / Б. Г. Волков, Н. И. Тесов, В. В. Шувалов. – Л. : Недра, 1975. – 224 с.
8. Защита трубопроводов от коррозии : учеб. пособие В 2 т. Т. 2 / Ф. М. Мустафин [и др.]. – СПб. : Недра, 2007. – 708 с. – ISBN 5-94089-048-2.
9. Зиневич, А. М. Защита трубопроводов и резервуаров от коррозии / А. М. Зиневич, В. М. Глазков, В. Г. Котик. – М. : Недра, 1975. – 288 с.
10. Иваненков, В. В. Моделирование работы ЭХЗ методом конечных элементов [Электронный ресурс] / В. В. Иваненков, Р. Р. Гиззатуллин, К. М. Гумеров // Нефтегазовое дело. – 2008. – № 2. – Режим доступа : [http://ogbus.ni/authors/Ivanenkov/Ivanenkov\\_1.pdf](http://ogbus.ni/authors/Ivanenkov/Ivanenkov_1.pdf). (дата обращения: 20.09.22).
11. Семенова, И. В. Коррозия и защита от коррозии : учеб. пособие / И. В. Семенова, Г. М. Флорианович, А. В. Хорошилов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Физматлит, 2010. – 416 с. – ISBN 978-5-9221-1234-5.

12. Коршак, А. А. Проектирование и эксплуатация газонефтепроводов / А. А. Коршак, А. М. Нечваль. – СПб. : Недра, 2008. – 488 с. ISBN 978-5-940089-112-3.

13. Методические указания по проведению сертификационных испытаний (обследований) противокоррозионной защиты подземных трубопроводов. – М. : НефтегазТехЭкспертиза, 2012. – 57 с.

14. Никитенко, Е. А. Монтер по защите подземных трубопроводов от коррозии : учебник / Е. А. Никитенко, Я. М. Эдельман. – М. : Недра, 1981. – 256 с.

15. Мустафин, Ф. М. Защита от коррозии. В 2 т. Т. 1 / Ф. М. Мустафин, М. В. Кузнецов, Л. И. Быков. – Уфа : ДизайнПолиграфСервис, 2004. – 806 с. – ISBN 5-94089-048-2.

16. Защита трубопроводов от коррозии. В 2 т. Т. 1 / Ф. М. Мустафин [и др.]. – М. : Недра, 2005. – 620 с. – ISBN 5-94089-048-2.

17. Нефтегазовое строительство / под ред. И. И. Мазура, В. Д. Шапиро. – М. : Недра, 2005. – 790 с. – ISBN 5981197439.

18. Новицкий, П. В. Оценка погрешностей результатов измерений / П. В. Новицкий, И. А. Зограф. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л. : Энергоатомиздат, 1991. – 304 с. – ISBN 5-283-04513-7.

19. Основы метрологии и электрические измерения : учеб. для вузов / Б. Я. Авдеев [и др.] ; под ред. Е. М. Душина. – 6-е изд., перераб. и доп. – Л. : Энергоатомиздат, 1987. – 480 с.

20. Основы проектирования электрохимической защиты от коррозии подземных и подводных объектов транспорта нефти и газа : учеб. пособие / под ред. проф. Р. В. Агиней. – СПб. : Недра, 2016. – 198 с. – ISBN 978-5-502-00771-9.

21. Притула, В. А. Электрическая защита от коррозии подземных металлических сооружений / В. А. Притула. – М. : Госэнергоиздат, 1958. – 239 с.

22. Противокоррозионная защита трубопроводов и резервуаров : учеб. для вузов / М. В. Кузнецов [и др.]. – М. : Недра, 1992. – 238 с. – ISBN 5-247-02196-7.

23. Семенова, И. В. Коррозия и защита от коррозии / И. В. Семенова, Г. М. Флорианович, А. В. Хорошилов. – М. : Физматлит, 2006. – 306 с. – ISBN 5-9221-0246-X.

24. Скороходов, В. Д. Защита неметаллических строительных материалов от биокоррозии / В. Д. Скороходов. – М. : Высш. шк., 2004. – 204 с. – ISBN 5-060-04612-5.

25. Земенков, Ю. Д. Справочник инженера по эксплуатации нефтегазопроводов и продуктопроводов / Ю. Д. Земенков, Г. Г. Васильев, С. М. Дудин. – М. : Инфра-Инженерия, 2006. – 928 с. – ISBN 5-9729-0001-7.

26. Тихомиров, Е. Н. Монтаж, наладка и эксплуатация устройств электрохимической защиты / Е. Н. Тихомиров. – Л. : Недра, 1976. – 130 с.

27. Ткаченко, В. Н. Электрохимическая защита трубопроводных сетей / В. Н. Ткаченко. – М. : Стройиздат, 2004. – 320 с. – ISBN 5-98207-011-4.

28. Хайдерсбах, Р. Защита от коррозии и металловедение оборудования для добычи нефти и газа / Р. Хайдерсбах. – Вологда : Инфра-Инженерия, 2014. – 416 с. – ISBN 978-5-91884-066-6.

29. Шевченко, А. А. Химическое сопротивление неметаллических материалов и защита от коррозии / А. А. Шевченко. – М. : КолосС, 2006. – 248 с. – ISBN 5-9532-0222-9.

### **СП, ГОСТы, ТУ, РД, правила, инструкции**

30. СП 28.13330.2012. Защита строительных конструкций от коррозии. Актуализированная редакция СНиП 2.03.11-85. – М. : Стандартинформ, 2013. – 85 с.

31. ГОСТ 9.602-205. Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. – М. : Стандартинформ, 2007. – 59 с.

32. РД 03-357-00. Методические рекомендации по составлению декларации промышленной безопасности опасного производственного объекта. – М. : Стандартинформ, 2017. – 62 с.

33. ГОСТ 9.101-78. Единая система защиты от коррозии и старения (ЕСЗКС). – М. : Стандартинформ, 2017. – 136 с.

34. ГОСТ Р 51164-98. Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии. – М. : Стандартинформ, 1998. – 46 с.

35. ГОСТ 9.602-2005. Единая система защиты от коррозии и старения. – М. : Стандартинформ, 2007. – 48 с.

36. ГОСТ Р 52568. Трубы стальные с защитными наружными покрытиями для магистральных газонефтепроводов. – М. : Стандартинформ, 2007. – 20 с.

37. ГОСТ Р ИСО 8501-1-2014. Подготовка стальной поверхности перед нанесением лакокрасочных материалов и относящихся к ним продуктов. Визуальная оценка чистоты поверхности. – М. : Стандартинформ, 2014. – 12 с.

38. СНиП 11-01-95. Инструкция о порядке разработки, согласования, утверждения и составе проектной документации на строительство предприятий, зданий и сооружений. – М. : Стандартинформ, 1995. – 12 с.

39. ВРД КТК 73-02-2013. Регламент по организации работ по контролю, техническому обслуживанию и ремонту средств электрохимической защиты нефтепровода КТК. – М. : КТК, 2013. – 46 с.

40. ГОСТ 17516.1-90. Изделия электротехнические. Общие требования в части стойкости к механическим внешним воздействующим факторам. – М. : Стандартинформ, 2007. – 45 с.

41. ГОСТ 9.602-2016. Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии. – М. : Стандартинформ, 2016. – 93 с.

42. ГОСТ Р 50571.5.54-2013. Электроустановки низковольтные. Ч. 5 – 54. Выбор и монтаж электрооборудования. Заземляющие устройства, защитные проводники и защитные проводники уравнивания потенциалов. – М. : Стандартинформ, 2014. – 30 с.

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

44. РД 29.200.00-КТН-048-14. Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Обследование коррозионного состояния технологических трубопроводов и резервуаров. Порядок выполнения и требования к отчетной документации. – М. : Транснефть, 2014. – 139 с.

45. РД 91.020.00-КТН-259-10. Нормы и правила проектирования заземляющих устройств объектов магистральных нефтепроводов и нефтепродуктопроводов организаций системы ОАО ««АК“Транснефть”». – М. : Транснефть, 2010. – 165 с.

46. РД-91.020.00-КТН-234-10. Нормы проектирования электрохимической защиты магистральных трубопроводов и сооружений НПС. – М. : Транснефть, 2010. – 71 с.

47. Руководство по эксплуатации систем противокоррозионной защиты трубопроводов. – М. : ВНИИГАЗ, 2004. – 300 с.

48. СП 245.1325800.2015. Защита от коррозии линейных объектов и сооружений в нефтегазовом комплексе. Правила производства и приемки работ. – М. : Минстрой России, 2015. – 41 с.

49. РД 153-39.4-091-01. Инструкция по защите городских подземных трубопроводов от коррозии. – СПб. : ДЕАН, 2002. – 240 с.

50. СанПин 2,1,4,1074-01. Питьевая вода и водоснабжение населенных мест. – М. : Минздрав РФ, 2001. – 62 с.

51. НДК 3-02-2001. Правила технической эксплуатации систем и сооружений коммуникаций ВВ. – М. : Союзводоканалпроект, 2000. – 124 с.

52. Правила безопасности систем газораспределения и газопотребления ПБ-12-529-03. – М. : Ростехнадзор, 2003. – 80 с.

53. Правила устройства электроустановок. – 7-е изд. стер., – М. : НЦ ЭНАС, 2003. – 115 с.

## СПИСОК ТЕРМИНОЛОГИЧЕСКИХ СОКРАЩЕНИЙ

а/д – автомобильная дорога  
АЗ – анодный заземлитель  
ВВ – водоснабжение, водоотведение  
ВЛ – высоковольтные линии  
ГС – гальваническая система  
ИзП – изолирующее покрытие  
ИС – изолирующее соединение  
КЗ – катодная защита  
КПД – контрольно-диагностический пункт  
КИП – контрольно-измерительный пункт  
КПП – камера приема, пуска  
КРТ – комплекс ремонта трубопроводов  
МН – магистральный нефтепровод и/или нефтепродуктопровод  
НД – нормативный документ  
НПС – нефтеперекачивающая станция  
НТД (НТЛ) – научно-техническая документация (литература)  
ОСТ – организация системы «Транснефть»  
ПЗ – протекторная защита  
ПКО – повышенная коррозионная опасность  
ПКУ – пункт контроля и управления  
ПНО – пусконаладочная организация  
ПНР – пусконаладочные работы  
ПО – программное обеспечение  
ПСТ – подземный стальной трубопровод  
ПЭ – полиэтилен  
СГРГП – система газораспределения и газопотребления  
СКЗ – станция катодной защиты  
СМР – строительно-монтажные работы  
СОД – средства очистки и диагностики  
СЭХЗ – система электрохимической защиты  
ТГВ – теплогазоснабжение  
ТД – точка дренажа  
ТО – техническое обслуживание  
УКЗ – установка катодной защиты  
ЭДЗ – электродренажная защита  
ЭДУ – электродренажная установка  
ЭХК – электрохимическая коррозия  
ЭХЗ – электрохимическая защита

*Учебное издание*

РОМАНОВА Любовь Валентиновна  
СТАРИКОВ Альберт Николаевич

**ЗАЩИТА ТРУБОПРОВОДОВ ОТ КОРРОЗИИ**

*Учебное пособие*

Редактор А. П. Володина  
Технические редакторы Ш. Ш. Амирсейидов, Н. В. Пустовойтова  
Компьютерная верстка Е. А. Кузьминой  
Выпускающий редактор А. А. Амирсейидова

Подписано в печать 16.05.23.  
Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 6,51. Тираж 30 экз.

Заказ

Издательство

Владимирского государственного университета  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.  
600000, Владимир, ул. Горького, 87.