

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ  
РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ (РОСТЕХРЕГУЛИРОВАНИЕ)  
ФГУП «РОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЦЕНТР  
ИНФОРМАЦИИ ПО СТАНДАРТИЗАЦИИ, МЕТРОЛОГИИ И ОЦЕНКЕ  
СООТВЕТСТВИЯ» (ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ»)

Рег. № 3848

Группа МКС 75.200

**Промышленность нефтяная и газовая. Катодная защита  
систем транспортирования по трубопроводам.**

**Часть 2:**

**Морские трубопроводы**

*Petroleum and natural gas industries -- Cathodic protection of pipeline transportation systems –*

*Part 2: Offshore pipelines*

11 февраля 2005 г. создан ФГУП «Российский научно-технический центр информации по стандартизации, метрологии и оценке соответствия» (ФГУП «Стандартинформ»).

ФГУП «Стандартинформ» является правопреемником ФГУП «ВНИИКИ» по информации в области технического регулирования, метрологии и оценки соответствия и выполняет все его уставные функции.

Страна, № стандарта

**ISO 15589-2:2004**

Переводчик: Макаров Н.К.

Редактор: Лебедева Е.В.

Кол-во стр.: 73

**Перевод аутентичен оригиналу**

Кол-во рис.: 5

Кол-во табл.: 7

Перевод выполнен: 29.01.2009

Редактирование выполнено: 30.01.2009

**Москва  
2009 г.**

---

---

**Промышленность нефтяная и газовая.  
Катодная защита систем  
транспортирования по трубопроводам.**

**Часть 2:  
Морские трубопроводы**

*Petroleum and natural gas industries -- Cathodic protection of pipeline  
transportation systems –*

*Part 2: Offshore pipelines*

**ЗАРЕГИСТРИРОВАНО**

**Федеральное агентство**

**по техническому  
регулированию и метрологии  
ФГУП “СТАНДАРТИНФОРМ”**

Номер регистрации: **3848/ISO**

Дата регистрации: 30.01.2009

Ответственность за подготовку русской версии несёт GOST R  
(Российская Федерация) в соответствии со статьёй 18.1 Устава ISO



Ссылочный номер  
ISO 15589-2:2004

**Отказ от ответственности при работе в PDF**

Настоящий файл PDF может содержать интегрированные шрифты. В соответствии с условиями лицензирования, принятыми фирмой Adobe, этот файл можно распечатать или смотреть на экране, но его нельзя изменить, пока не будет получена лицензия на интегрированные шрифты и они не будут установлены на компьютере, на котором ведется редактирование. В случае загрузки настоящего файла заинтересованные стороны принимают на себя ответственность за соблюдение лицензионных условий фирмы Adobe. Центральный секретариат ISO не несет никакой ответственности в этом отношении.

Adobe - торговый знак фирмы Adobe Systems Incorporated.

Подробности, относящиеся к программным продуктам, использованные для создания настоящего файла PDF, можно найти в рубрике General Info файла; параметры создания PDF были оптимизированы для печати. Были приняты во внимание все меры предосторожности с тем, чтобы обеспечить пригодность настоящего файла для использования комитетами-членами ISO. В редких случаях возникновения проблемы, связанной со сказанным выше, просьба проинформировать Центральный секретариат по адресу, приведенному ниже..



**ДОКУМЕНТ ОХРАНЯЕТСЯ АВТОРСКИМ ПРАВОМ**

© ISO 2004

Если не указано иное, никакую часть настоящей публикации нельзя копировать или использовать в какой-либо форме или каким-либо электронным или механическим способом, включая фотокопии и микрофильмы, без предварительного письменного согласия ISO, которое должно быть получено после запроса о разрешении, направленного по адресу, приведенному ниже, или в комитет-член ISO в стране запрашивающей стороны.

ISO copyright office  
Case postale 56 • CH-1211 Geneva 20  
Tel. + 41 22 749 01 11  
Fax + 41 22 734 09 47  
E-mail copyright @ iso.org

Web [www.iso.org](http://www.iso.org)

Опубликовано в Швейцарии

## Содержание

Страница

Предисловие .....	v
1 Область применения .....	1
2 Нормативные ссылки .....	1
3 Термины и определения .....	2
4 Обозначения и сокращенные термины.....	3
5 Требования к системе СР.....	4
5.1 Общие положения .....	4
5.2 Выбор систем СР.....	5
6 Расчетные параметры .....	6
6.1 Общие положения .....	6
6.2 Защитные потенциалы.....	8
6.3 Расчетный ресурс .....	10
6.4 Расчетные плотности тока .....	10
6.5 Коэффициенты разрушения покрытия.....	13
7 Гальванические аноды (протекторы).....	14
7.1 Проектирование системы .....	14
7.2 Выбор материала анода .....	15
7.3 Электрохимические свойства.....	16
7.4 Форма анода и коэффициент использования.....	16
7.5 Конкретные механические и электрические свойства .....	16
8 Производство анодов.....	18
8.1 Испытание опытного образца.....	18
8.2 Покрытие .....	18
8.3 Материалы центральной части анода.....	18
8.4 Материалы алюминиевых анодов.....	19
8.5 Материалы цинковых анодов.....	19
9 Контроль качества гальванических анодов (протекторов) .....	20
9.1 Общие положения .....	20
9.2 Центральные элементы стальных анодов .....	20
9.3 Химический анализ сплава анода.....	20
9.4 Масса анода .....	20
9.5 Размеры и прямолинейность анода.....	20
9.6 Размеры и расположение центрального элемента анода .....	21
9.7 Дефекты поверхности анода .....	21
9.8 Трещины.....	22
9.9 Внутренние дефекты, разрушающие испытания.....	23
9.10 Испытания в рамках электрохимического контроля качества .....	24
10 Установка гальванических анодов (протекторов).....	25
11 Системы электрохимической защиты с наложенным током .....	26
11.1 Источник тока и контроль .....	26
11.2 Материалы анодов, подающих ток .....	26
11.3 Конструкция системы.....	26
11.4 Вопросы производства - установки .....	28
11.5 Механические и электрические проблемы .....	28
12 Документация.....	29

12.1	Проектная, производственная и рабочая документация на производство монтажных работ.....	29
12.2	Пусковые процедуры.....	30
12.3	Инструкции по эксплуатации и техническому обслуживанию .....	30
13	Эксплуатация, мониторинг и техническое обслуживание систем катодной защиты .....	30
13.1	Общие положения.....	30
13.2	Планы мониторинга .....	30
13.3	Ремонт.....	31
	Приложение А (нормативное) Методы проектирования гальванических протекторных анодов катодной защиты .....	32
	Приложение В (нормативное) Определение рабочих характеристик материалов для производства гальванических анодов.....	41
	Приложение С (нормативное) Мониторинг систем катодной защиты для морских трубопроводов.....	43
	Приложение D (информативное) Лабораторные испытания гальванических анодов в рамках контроля качества.....	50
	Приложение E (информативное) Помехи.....	53
	Приложение F (информативное) Проектирование трубопровода с учетом катодной защиты ....	57

## Предисловие

ISO (Международная организация по стандартизации) представляет собой всемирную федерацию, состоящую из национальных органов по стандартизации (комитеты-члены ISO). Работа по разработке международных стандартов обычно ведется Техническими комитетами ISO. Каждый комитет-член, заинтересованный в теме, для решения которой образован данный технический комитет, имеет право быть представленным в этом комитете. Международные организации, правительственные и неправительственные, поддерживающие связь с ISO, также принимают участие в работе. ISO тесно сотрудничает с Международной электротехнической комиссией (IEC) по всем вопросам стандартизации в области электротехники.

Международные стандарты разрабатываются в соответствии с правилами, установленными в Части 2 Директив ISO/IEC.

Основное назначение технических комитетов заключается в разработке международных стандартов. Проекты международных стандартов, принятые Техническими комитетами, направляются комитетам-членам на голосование. Для их опубликования в качестве международных стандартов требуется одобрение не менее 75 % комитетов-членов, участвовавших в голосовании.

Внимание обращается на тот факт, что отдельные элементы данного документа могут составлять предмет патентных прав. ISO не несет ответственность за идентификацию каких-либо или всех подобных патентных прав.

ISO 15589-2 был разработан Техническим комитетом ISO/TC 67, *Материалы, оборудование и морские сооружения для нефтяной, нефтехимической и газовой промышленности*, Подкомитетом SC 2, *Системы перекачки по трубопроводам*.

ISO 15589 включает следующие части под общим названием *Промышленность нефтяная и газовая. Катодная защита систем транспортирования по трубопроводам*:

— *Часть 1: Наземные трубопроводы*

— *Часть 2: Морские трубопроводы*

## Введение

Катодная (электрохимическая) защита трубопровода достигается путем подачи постоянного тока на наружную поверхность трубы, так чтобы разность потенциалов сталь-электролит понижался до значений, при которых внешняя коррозия снижается до незначительной величины.

Катодная защита обычно используется в сочетании с подходящей системой защитного покрытия для защиты наружных поверхностей стальных трубопроводов от коррозии.

Контроль внешней коррозии в общем подпадает под требования международного стандарта ISO 13623.

Пользователи данной части ISO 15589 должны знать, что для отдельных задач могут потребоваться дополнительные или отличающиеся от приведенных в данном документе требования. Настоящая часть ISO 15589 не ставит целью запретить применение альтернативного оборудования или инженерных решений в каждом отдельном случае. Это может, в частности, быть оправдано там, где используются передовые или развивающиеся технологии. Там где предлагается альтернативное решение, следует определить все отличия от положений данной части ISO 15589.

Отклонения от данной части ISO 15589 могут быть оправданы в конкретных обстоятельствах, при условии, что задачи, поставленные в данной части ISO 15589, выполнены.

# Промышленность нефтяная и газовая. Катодная защита систем транспортирования по трубопроводам.

## Часть 2: Морские трубопроводы

### 1 Область применения

Данная часть ISO 15589 устанавливает требования и дает рекомендации по предварительным обследованиям до установки, проектированию, материалам, оборудованию, изготовлению, монтажу, пуску, эксплуатации, контролю и техническому обслуживанию систем катодной защиты для морских трубопроводов нефтяной и газовой промышленности в соответствии с ISO 13623.

Данная часть ISO 15589 применима к морским трубопроводам из углеродистой и нержавеющей стали.

Данная часть ISO 15589 применима при модернизации, модификации и ремонта, выполняемых на существующих трубопроводных системах.

Данная часть ISO 15589 применима ко всем типам морской воды и морского дна относительно проходящих горизонтально под водой труб и стояков до среднего уровня воды.

**ПРИМЕЧАНИЕ** Иногда возникают определенные условия, при которых катодная защита неэффективна или эффективна только отчасти. Такие условия могут включать повышенные температуры, отсоединившиеся покрытия, теплоизоляционные покрытия, экранирование, возможную микробиологическую коррозию и необычные примеси в электролите.

### 2 Нормативные ссылки

Нижеследующие документы являются обязательными для применения данного документа. Для датированных ссылок действительно только указанное издание. В случае недатированных ссылок используется последняя редакция документа, на который дается ссылка (включая все изменения)..

ISO 1461, *Покрyтия, нанесенные методом горячего цинкования на изделия из чугуна и стали. Технические условия и методы испытания*

ISO 8044, *Коррозия металлов и сплавов. Основные термины и определения*

ISO 8501-1, *Подготовка стальной поверхности перед нанесением красок и относящихся к ним продуктов. Визуальная оценка чистоты поверхности. Часть 1. Степень ржавления и степени подготовки непокрытой стальной поверхности и стальной поверхности после полного удаления прежних покрытий*

ISO 10474:1991, *Сталь и изделия из стали. Акты приемочного контроля*

ISO 13623, *Промышленность нефтяная и газовая. Системы транспортирования по трубопроводам*

ISO 15589-1, *Промышленность нефтяная и газовая. Катодная защита систем транспортирования по трубопроводам. Часть 1: Наземные трубопроводы*



ASTM D 1141<sup>1)</sup>, *Стандартные методы приготовления заменителя морской воды*

AWS D1.1/D1.1M<sup>2)</sup>, *Сварка конструкций. Код установившейся практики. Сталь*

EN 287-1<sup>3)</sup>, *Аттестация сварщиков. Сварка плавлением. Часть 1: Сталь*

EN 288-1, *Спецификация и квалификация технологии сварки металлических материалов. Часть 1: Общие правила*

### 3 Термины и определения

Применительно к данному документу используются термины и определения, приведенные в ISO 8044, а также следующие.

#### 3.1

##### **анодный потенциал**

anode potential

потенциал анод-электролит

#### 3.2

##### **анодный потенциал замкнутой цепи**

closed-circuit anode potential

анодный потенциал при электрическом контакте с защищаемым трубопроводом

#### 3.3

##### **коэффициент разрушения покрытия**

coating breakdown factor

$f_c$

отношение плотности тока, требуемого для поляризации поверхности стали с покрытием, по отношению к плотности тока, требуемого для поляризации поверхности стали без покрытия

#### 3.4

##### **холодный спай (неслитина)**

cold shut

несплошность горизонтальной поверхности, получившаяся в результате затвердевания мениска частично отлитых анодов в результате прерывания потока литья

#### 3.5

##### **градиент электрического поля**

electric field gradient

изменение электрического потенциала на единицу расстояния проводящей среды, возникающее за счет прохождения электрического тока

#### 3.6

##### **электрохимическая емкость**

electrochemical capacity

$\varepsilon$

общее количество электричества, получаемое, когда электрохимически потребляется фиксированная масса (обычно 1 кг) материала анода

ПРИМЕЧАНИЕ Выражается в ампер-часах.

1) Американское общество по материалам и их испытаниям, ASTM International? 100 Barr Harbour Drive, West Conshohocken, PA 19428-2959, USA.

2) Американское общество сварщиков, AWS, 550 NW Le Jeune Road, Miami, FL 33126, USA.

3) Европейский комитет по стандартизации, CEN, Management Centre, Rue de Stassart, B-1050, Brussels, Belgium.

**3.7****конечная плотность тока**

final current density

расчетная плотность тока в конце срока службы трубопровода

**3.8****активное (омическое) падение напряжения**

IR drop

напряжение, от любого тока, возникающее между двумя точками металла или в поперечном градиенте в электролите, таком как морская вода или морское дно, и измеряемое между электродом сравнения и металлом трубы по закону Ома

ср. **градиент электрического поля** (3.5)**3.9****средняя плотность тока**

mean current density

расчетная средняя плотность катодного тока в течение всего срока службы трубопровода

ПРИМЕЧАНИЕ Выражается в амперах на квадратный метр.

**3.10****защитный потенциал**

protection potential

потенциал конструкция-электролит, для которого скорость коррозии металла несущественна

**3.11****дистанционно управляемое средство передвижения**

remotely operated vehicle

**ROV**

подводное устройство, дистанционно управляемое с надводного судна или установки

[ISO 14723]

**3.12****трубопровод, связывающий морскую платформу с подводным месторождением (водоотделяющая колонна, трубопроводный стояк)**

riser

та часть морского трубопровода, включая все подводные части пьедестала, которая выступает из морского дна до точки выхода трубопровода на надводную установку (платформу)

[ISO 13623]

**3.13****коэффициент использования**

utilization factor

*u*

та часть материала анода, которую можно использовать в процессе катодной защиты

**4 Обозначения и сокращенные термины**

CE углеродный эквивалент

CP катодная защита

 $N_{PRE}$  эквивалент сопротивления точечной коррозии

ROV дистанционно управляемое передвижное устройство

SCE каломельный электрод сравнения

$\sigma_{SMY}$  установленный минимальный предел текучести

## 5 Требования к системе СР

### 5.1 Общие положения

Основными задачами и требованиями к системе СР являются следующие:

- предотвращать внешнюю коррозию в течение всего срока службы трубопровода,
- обеспечить подачу достаточного количества тока к защищаемому трубопроводу и распределить этот ток таким образом, чтобы выбранные для катодной защиты критерии эффективно выполнялись,
- обеспечить расчетный ресурс анодной системы, соразмерный требуемому ресурсу защищаемого трубопровода, или обеспечить возможность периодической реабилитации анодной системы,
- обеспечить адекватный допуск на предполагаемые изменения в потребности электрического тока со временем,
- установить аноды там, где возможность их повреждения или разрушения минимальна,
- обеспечить адекватные средства мониторинга для испытания и оценки рабочих показателей системы.

Проектирование, изготовление, установка, эксплуатация и техническое обслуживание систем СР для морских трубопроводов должны осуществляться квалифицированным и опытным персоналом.

Система СР должна быть спроектирована в соответствии с окружающими условиями, близлежащими сооружениями и другой деятельностью в данной местности.

Морские трубопроводы, защита которых осуществляется с помощью систем гальванических анодов (протекторов), рекомендуется электрически изолировать от других трубопроводов и сооружений, защищаемых системами с наложенным током. Морские трубопроводы должны быть изолированы от других незащищенных или в меньшей степени защищаемых сооружений, которые могут дренировать электрический ток с системы СР рассматриваемого трубопровода. Если изоляция непрактична или имеются проблемы с блуждающим током, рекомендуется обеспечить неразрывность электрической цепи (непрерывный электрический контакт).

Необходимо следить за тем, чтобы различные системы СР соседних трубопроводов или сооружений были совместимы, и чтобы не происходило избыточной утечки тока из одной системы в другую, соседнюю систему.

При проектировании системы СР необходимо учитывать метод укладки трубопровода, типы трубопровода и трубопроводного стояка, также как предлагаемые методы заглубления и крепления на опорах (см. Приложение F).

Система СР должна быть рассчитана на определенный срок службы с помощью расчетов, приведенных в Приложении А. При расчетах необходимо использовать данные, приведенные в разделе 6 данной части ISO 15589.

Для участков с высокой скоростью течения и участков с вызывающими эрозию факторами: захваченный песок, ил, частицы льда и т.д., расчет системы СР необходимо осуществлять с особым вниманием и учетом дополнительных критериев.

Рекомендуется рассмотреть установку постоянных контрольно-измерительных мощностей с учетом конкретных параметров, таких как длина трубопровода, глубина воды и доступ под водой, связанный с заглубленными участками трубопровода.

Для катодной защиты коротких отрезков подводных трубопроводов и их веток, напрямую связанных с наземными трубопроводами с катодной защитой, необходимо пользоваться международным стандартом ISO 15589-1.

## 5.2 Выбор систем СР

### 5.2.1 Общие положения

СР можно осуществлять с помощью гальванических анодов (протекторов) или системы с наложенным током. В разделе 6 представлены расчетные параметры, которые используются для обеих этих систем. Обзор этих систем и позиции, которые необходимо рассмотреть при выборе системы для использования, представлены в 5.2.2 - 5.2.5.

### 5.2.2 Системы с распределенными гальваническими анодами

Гальванические аноды (протекторы) подсоединяют к трубе по отдельности или группами (пакетами). Они ограничены с точки зрения подачи тока управляющим напряжением анод-труба и удельным электрическим сопротивлением электролита. Обычно аноды подсоединяют непосредственно к трубе как браслеты. Салазки с анодами также можно разместить через определенные интервалы вдоль трубопровода.

### 5.2.3 Системы гальванических анодов, установленные на концах трубопровода

Более короткие трубопроводы можно защитить с помощью анодов, расположенных на каждом конце трубопровода. Обычно такой тип установки используют для трубопроводов, расположенных в пределах платформы. Аноды для таких трубопроводов можно подсоединить к платформе, если трубопровод имеет с ней электрический контакт.

### 5.2.4 Анодные системы с наложенным током

Аноды системы с наложенным током могут быть изготовлены из такого материала, как графит, литейный чугун с высоким содержанием кремния, свинцово-серебряный сплав, благородные металлы или сталь. Они присоединяются посредством изолированного кабеля, по отдельности или группами, к положительному полюсу источника постоянного тока, такого как выпрямитель или генератор. Трубопровод соединяют с отрицательным полюсом источника постоянного тока.

### 5.2.5 Выбор системы защиты

Выбор системы СР должен основываться на следующем:

- система с наложенным током может защитить трубопровод определенной длины, в зависимости от
  - практических ограничений на расположение анодных установок наложенного тока и выпрямителей, например, на одном или на обоих концах трубопровода, таких как подходы к берегу и платформы,
  - сопротивления изоляции трубопровода с покрытием относительно окружающего электролита под конец расчетного ресурса,
  - продольного сопротивления трубопровода;
- системы с наложенным током могут оказаться более практичными для применения в водах с высоким удельным сопротивлением (например, дельты крупных рек и соленые воды заливов);
- отсутствие внешнего источника питания может помешать применению систем с наложенным током;

- гальванические анодные системы требуют минимального контроля и технического обслуживания в течение срока службы трубопровода, в то время как системы с наложенным током требуют регулярного контроля и технического обслуживания;
- гальванические анодные системы редко создают серьезные проблемы помех в отношении близлежащих не связанных с трубопроводом сооружений, в то время как системы с наложенным током могут оказывать значительное влияние;
- величины требуемого защитного тока;
- наличия блуждающих токов, вызывающих значительные колебания потенциала между трубой и землей, что может помешать применению гальванических анодов-протекторов;
- воздействия мешающих катодной защите токов на соседние конструкции, что может ограничить применение систем катодной защиты с наложенным током;
- ограничений в имеющемся пространстве ввиду близкой расположенности не связанных с трубопроводом сооружений, что соответственно сказывается на строительстве и техническом обслуживании;
- будущего развития района и предполагаемого в будущем расширения трубопроводной системы;
- стоимости установки, эксплуатации и технического обслуживания;
- надежности системы в целом;
- гальванические анодные системы продемонстрировали надежные рабочие характеристики для защиты в течение продолжительного срока;
- системы с наложенным током, расположенные в море, способны обеспечить долгосрочную защиту, но менее толерантны к недостаткам расчетов, монтажа и технического обслуживания, чем гальванические анодные системы. Надежность в эксплуатации можно ожидать, если уделить должное внимание механической прочности, соединениям, защите кабелей (особенно в зоне заплеска волн и периодического смачивания), выбору типа анода и сохранности источника питания. Необходимо обеспечить надежную систему мониторинга;
- системы с наложенным током могут оказаться более предпочтительными на коротких трубопроводах, которые заканчиваются на платформах с установленными системами защиты с наложенным током;
- системы с наложенным током могут оказаться более предпочтительными в качестве модифицированной системы на трубопроводах при отказе гальванических анодов, избыточном расходе анодов, эксплуатации в условиях превышения первоначального расчетного ресурса или избыточного повреждения покрытия;
- системы с наложенным током могут оказаться более предпочтительными на коротких трубопроводах, где система с наложенным током управляется с берега;
  - системы с наложенным током могут привести к нарушению целостности других трубопроводов и/или сооружений, расположенных в той же зоне, если не принять соответствующих мер для защиты.

## 6 Расчетные параметры

### 6.1 Общие положения

Проектирование системы катодной защиты трубопровода должно основываться на следующем:

- подробной информации о защищаемом трубопроводе, включая материал, длину, толщину стенок, наружный диаметр, способы укладки труб, маршрут, условия прокладки трубопровода по морскому дну, температурный профиль (в рабочем режиме и при остановке) на всей протяженности, тип и толщина защищающего(их) от коррозии покрытия(ий) для труб и фитингов, наличие, тип и толщина теплоизоляции, механическая защита и/или утяжеляющее покрытие,
- условий окружающей среды, а именно: состава морской воды, температуры и удельного электрического сопротивления у морского дна по всей длине трубопровода,
- состояния заглубления (степени засыпки после укладки в траншею или естественного заглубления) и удельного электрического сопротивления грунта,
- расчетного ресурса системы,
- информации об уже существующих трубопроводах, расположенных в непосредственной близости или пересекающих новый трубопровод, включая местоположение, владельца и методы коррозионного контроля,
- информации о существующих системах СР (платформы, подходы к берегу, и т.д.) и электрической изоляции трубопровода,
- доступности источника питания, электрических разъединительных устройств, электрических соединений,
- применяемого местного законодательства,
- сроков строительства, даты пуска (требуемая для «горячих» линий),
- труб, фитингов, J-образных труб, стояков, зажимов, хомутов и других приспособлений, и
- данных по рабочим показателям систем СР, работающих в аналогичных условиях.

На глубине свыше 500 м под водой и иногда на меньших глубинах, характеристики морской воды (растворенный кислород, соленость воды, рН, морские течения и обрастание ракушками и водорослями) может значительно отличаться от характеристик воды на небольшой глубине и неблагоприятно влиять на катодную поляризацию и образование солевых катодных отложений. Для таких ситуаций необходимо получить информацию полевых съемок, данные по определению коррозии или данные по опыту эксплуатации, включая следующее:

- a) требования к удовлетворению применяемых критериев защитным током;
- b) электрическое удельное сопротивление электролита, включая сезонные изменения, если применимо;
- c) глубина заглубления трубы (если труба заглублена) и идентификация открытых пролетов и мест;
- d) температура воды у морского дна;
- e) концентрация кислорода у морского дна;
- f) скорость течения у морского дна, включая сезонные изменения, если применимо;
- g) топография (рельеф) морского дна.

При рассмотрении опыта эксплуатации трубопроводов, необходимо учесть следующие дополнительные данные:

1. неразрывность электрической цепи;
2. электрическую изоляцию;
3. целостность наружного покрытия;

4. отклонение от спецификаций;
5. данные по эксплуатации и техническому обслуживанию.

Методы проектирования систем СР должны соответствовать Приложению А.

## **6.2 Защитные потенциалы**

### **6.2.1 Введение**

Критерии для потенциала и другие измерения и наблюдения, которые указывают, получена ли адекватная степень катодной защиты трубопровода, приведены в 6.2.2. Эффективность катодной защиты или других мер внешнего контроля коррозии можно подтвердить путем непосредственного измерения потенциала трубопровода. Однако, визуальное наблюдение развивающегося разрушения покрытия и/или коррозии, например, указывает на возможную неадекватность защиты. Физические измерения уменьшения толщины стенки трубы с помощью водолазов или внутренних устройств контроля, таких как интеллектуальные скребки для чистки труб, могут также указывать на недостаточность уровня антикоррозионной защиты.

### **6.2.2 Критерии для потенциала**

Чтобы обеспечить адекватную катодную защиту трубопровода, измеренный потенциал должен соответствовать Таблице 1.

Таблица 1 — Рекомендуемые критерии для потенциала

Материал	Минимальный отрицательный потенциал (минимальный критерий защиты) V	Максимальный отрицательный потенциал (максимальный критерий защиты) <sup>a</sup> V
<b>Углеродистая сталь</b>		
Аэробное окружение	– 0,80	– 1,10 <sup>b</sup>
Анаэробное окружение	– 0,90	– 1,10 <sup>b</sup>
<b>Аустенитная нержавеющая сталь</b>		
$N_{PRE} \geq 40$ <sup>c</sup>	– 0,30 <sup>d</sup>	– 1,10
$N_{PRE} < 40$ <sup>c</sup>	– 0,50 <sup>d</sup>	– 1,10
<b>Дуплексная нержавеющая сталь</b>	– 0,50 <sup>d</sup>	e
<b>Мартенситная нержавеющая (13 % Cr) сталь</b>	– 0,50 <sup>d</sup>	e
Потенциалы, приведенные в Таблице 1, применяются к соленому илу и соленой воде обычного состава (соленость от 3,2 % до 3,8 %).		
Потенциалы соотносятся с электродом сравнения SCE, который эквивалентен хлор-серебряному электроду сравнения (Ag/AgCl/морская вода) в морской воде сопротивлением 30 Ом·см.		
<p><sup>a</sup> Эти отрицательные пределы также обеспечивают пренебрежимо малое влияние катодной защиты на покрытие трубопровода.</p> <p><sup>b</sup> Там где трубопроводные системы изготовлены из высокопрочной стали (<math>\sigma_{SMY} &gt; 550</math> МПа), необходимо определить наиболее отрицательный потенциал, который металл может выдержать без водородного охрупчивания.</p> <p><sup>c</sup> <math>N_{PRE} = \%Cr + 3,3 \% (Mo + 0,5W) + 16 \%N</math>.</p> <p><sup>d</sup> Для коррозионно-стойких сталей минимальные отрицательные потенциалы применяются как в аэробных, так и в анаэробных условиях.</p> <p><sup>e</sup> В зависимости от прочности, конкретного металлургического состояния и уровня напряжения, с которыми сталкиваются в ходе эксплуатации, такие сплавы могут подвергаться водородному охрупчиванию и растрескиванию. Если существует риск водородного охрупчивания, то следует избегать потенциалов более отрицательных чем –0,8 В.</p>		

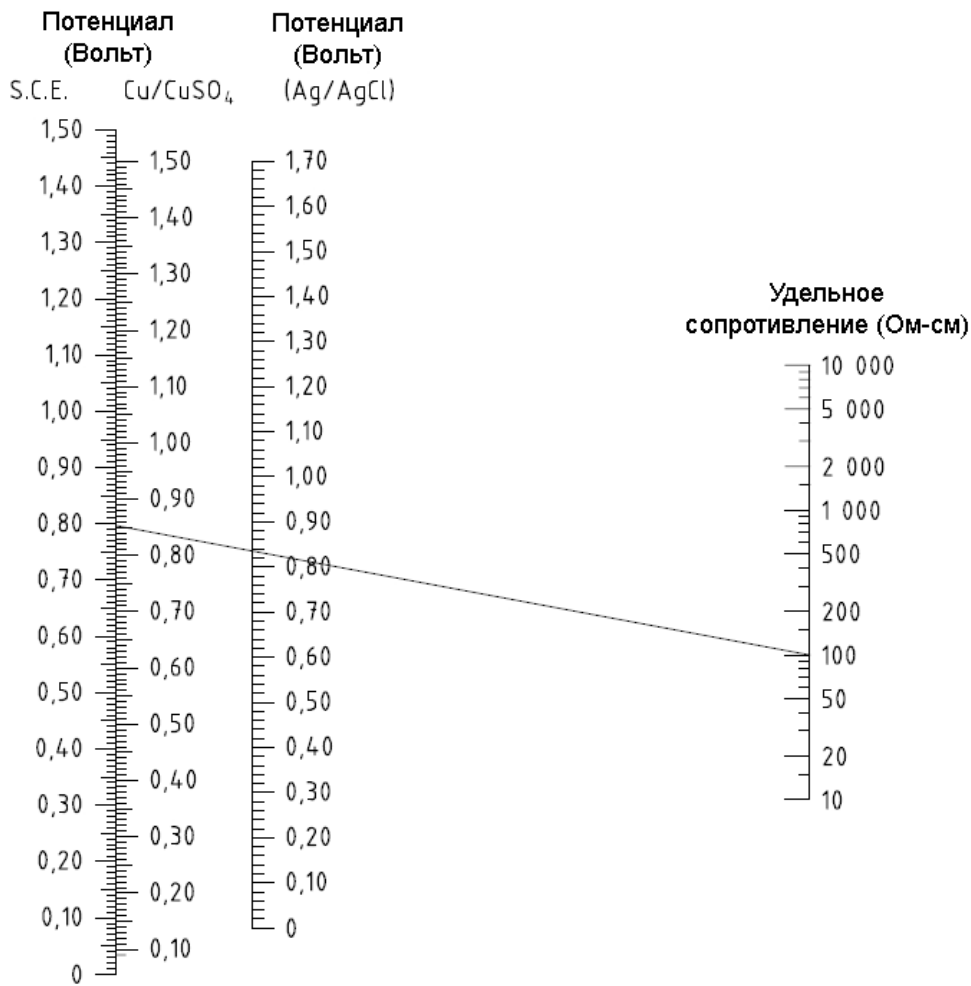
### 6.2.3 Нанесенный распылением алюминий

Для конструкции с покрытием из нанесенного термонапылением алюминия, которая оснащена катодной защитой при потенциалах, более отрицательных чем – 1,15 В, термонапыление алюминия может подвергаться коррозии вследствие образования щелочи на границе раздела металл/электролит. Потенциал поляризации более отрицательный чем – 1,15 В использовать не рекомендуется, если по результатам предыдущих исследований или из опыта эксплуатации не очевидно, что значительной коррозии происходить не будет.

### 6.2.4 Другие факторы

Потенциал хлорсеребряного электрода сравнения (Ag/AgCl/морская вода) зависит от концентрации ионов хлорида в электролите, и, следовательно, от удельного электрического сопротивления морской воды. Если концентрация хлорида, а следовательно, удельное сопротивление, значительно отличается от концентрации хлорида и удельного электрического сопротивления обычной морской воды (обычно 3,5 % и 30 Ом·см, соответственно), критерии для защитного потенциала должны регулироваться в соответствии с рисунком 1.





**Рисунок 1 — Номограмма для корректировки показаний потенциала, полученных на хлорсеребряном электроде (Ag/AgCl/морская вода) в воде различной солёности и удельного сопротивления относительно электродов сравнения SCE и Cu/CuSO<sub>4</sub> [5]**

**ПРИМЕР** Если в месте измерения потенциала трубопровода имеется солёная вода с удельным сопротивлением 100 Ом-см, то наименьший отрицательный потенциал электрода для эффективной защиты от коррозии составит – 0,84 В, а не – 0,80 В как дано в Таблице 1, в пересчёте на хлорсеребряный электрод сравнения (Ag/AgCl/морская вода).

Альтернативные электроды сравнения для конкретных условий приведены в С.4.2.

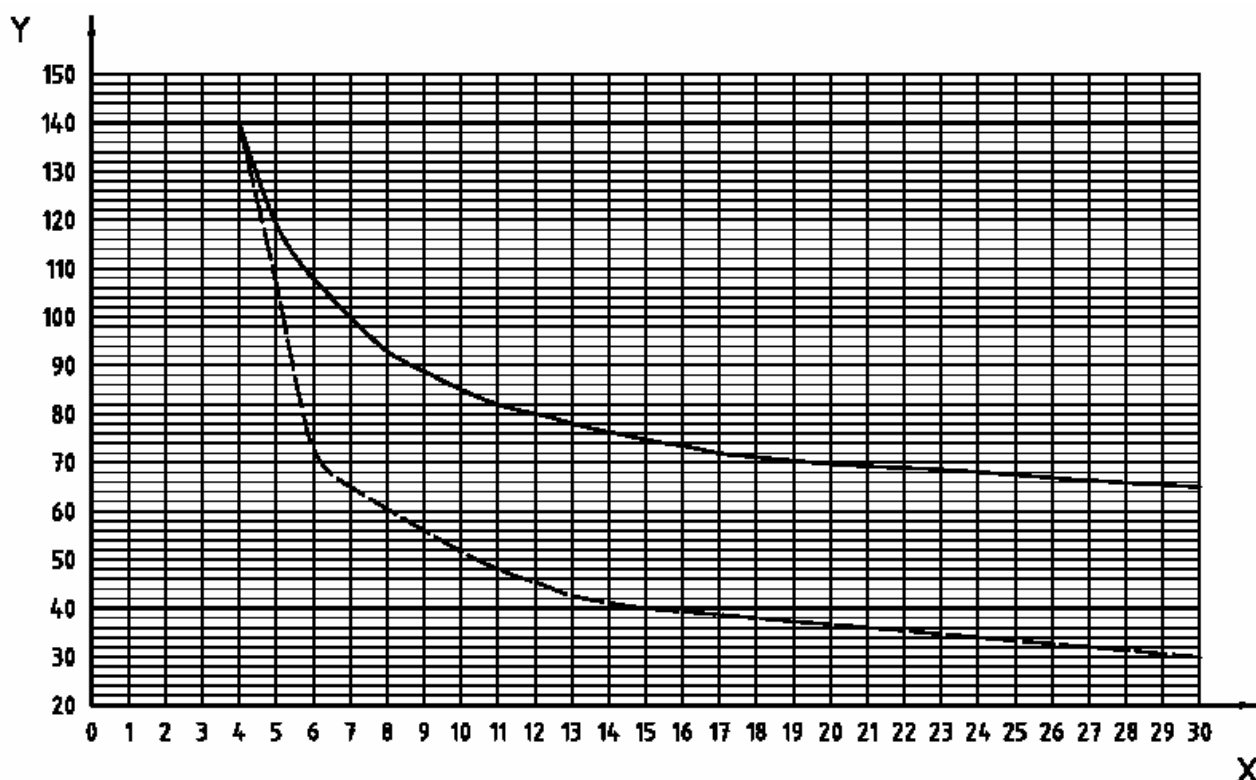
### 6.3 Расчетный ресурс

Расчетный срок службы системы СР трубопровода должен охватывать период с момента установки до окончания эксплуатации трубопровода.

### 6.4 Расчетные плотности тока

Расчетные плотности тока зависят от температуры морской воды, содержания кислорода, скорости течения морской воды и способности к образованию защитных известковых пленок на металлических поверхностях без покрытия. Для большинства применений на глубине менее 500 м, расчетные

плотности тока зависят только от температуры морской воды, а плотности тока для незаглубленного трубопровода можно взять из Рисунка 2.



#### Обозначение

X температура морской воды, °C

Y плотность тока, мА/м<sup>2</sup>

**ПРИМЕЧАНИЕ** Нижняя кривая была опубликована в [2]. Эта кривая основана на результатах испытаний и полевых данных от множества платформ и мест прокладки трубопроводов со всего мира, собранных за несколько последних лет. Верхняя кривая является консервативной кривой, построенной по данным, опубликованным в [3] и [4].

**Рисунок 2 — Средняя плотность тока для незаглубленного трубопровода**

На Рисунке 2, нижнюю кривую плотности тока можно использовать там, где не имеется значительных изменений в содержании кислорода при продвижении от поверхности к дну моря, нет проблем образования защитных известковых пленок и течение у дна небольшое или умеренное (до 2 узлов). Верхняя кривая представляет самые высокие полученные значения плотности тока, которые требуются там, где необходимо учитывать содержание кислорода, известковые пленки и донные течения.

Если данных не имеется, рекомендуется использовать верхнюю кривую на Рисунке 2.

**ПРИМЕЧАНИЕ 1** Требуемые значения плотности тока для данного месторождения лежит между двумя экстремумами.

**ПРИМЕЧАНИЕ 2** Теоретически, существенны три значения плотности тока: начальная, средняя и конечная плотность, которые представляют собой: плотность тока, требуемая для поляризации трубопровода в течение определенного промежутка времени (т.е. 1 – 2 месяца, начальная), плотность тока, необходимая для поддержания поляризации (средняя), и плотность тока, необходимая для возможной повторной поляризации, что может произойти к концу срока службы трубопровода (конечная), например, после сильного шторма. Для трубопровода с покрытием, начальная плотность тока не является критическим ограничением в проекте, поэтому

далее, в Приложении А, она не рассматривается. Трубопроводы располагаются на морском дне, и деполяризация в результате штормов считается незначительной, так что одно и то же значение плотности тока можно использовать для средней и конечной плотности тока. Если принимается решение в отношении конкретного расположения трубопровода, так что требуется рассмотреть более высокую плотность тока в расчете на штормы при проектировании, то можно использовать значение, которое на 60 мА/м<sup>2</sup> выше среднего значения для данной температуры.

Если температурный профиль морской воды вдоль маршрута трубопровода неизвестен, требуемая плотность тока должна основываться на минимальной измеренной температуре морского дна, которая обычно будет представлять собой температуру самого глубокого места на маршруте трубопровода.

Если температурный профиль морской воды вдоль маршрута трубопровода известен, то кривые на Рисунке 2 рекомендуется использовать с усредненными температурами участков трубопровода, чтобы получить плотности тока для каждого участка трубопровода. Может потребоваться подразделить трубопровод на участки на основе локальных ежегодных средних состояний морской воды. Если среднегодовая температура морской воды изменяется более чем на 5 °С по длине трубопровода, длину трубопровода следует разделить на отдельные отрезки, каждый из которых находится при температуре в интервале 5 °С. Для каждого такого отрезка следует использовать среднюю температуру.

Плотность тока можно альтернативно рассчитывать на основе полевых измерений или данных, полученных с измерительных станций, установленных в такой же географической зоне.

Хотя кривые на Рисунке 2 охватывают большинство географических точек в мире, существуют конкретные местоположения, для которых сообщаются более высокие или более низкие плотности тока, там где имеются более значительные изменения содержания кислорода в зависимости от глубины, и/или значительные донные течения, и/или глубина укладки трубопровода превышает 500 м (см. Таблицу 2).

**Таблица 2 — Расчетные плотности тока для экстремальных условий**

Место	Глубина моря м	Температура морской воды °С	Поддержание плотности тока мА/м <sup>2</sup>	Комментарии
Западный берег США	до 500	от 10 до 12	90	умеренное течение
Залив Кука	все глубины	2	380	сильные донные течения
Австралия	до 500	от 12 до 18	90	значительные сезонные колебания температуры
Норвежское море	до 1 500	от -1 до 4	300	холодная вода на глубине, вероятно совпадающая с экстраполяцией кривых на Рисунке 2.

**ПРИМЕЧАНИЕ 4** За счет известковых отложений, образующихся на открытых поверхностях трубопровода при наложении тока катодной защиты, плотность тока, требуемая для поддержания защитных потенциалов, будет меньше, а также улучшается распределение тока. Для покрытия трубопровода образование плотного известкового отложения также благоприятно, поскольку начальная плотность тока будет достаточно высока, когда в покрытии образуются дефекты. Поскольку растворимость пленкообразующих известковых отложений зависит от температуры, то в более холодной воде образование защитных известковых отложений будет происходить труднее, или потребуются более высокая начальная плотность тока, чтобы получить требуемую поляризацию.

Для трубопроводных стояков в зоне заплеска волны требуется выбрать плотность тока на 10 мА/м<sup>2</sup> выше, чем плотность тока для такого же стояка или трубопровода, расположенных ниже зоны периодического смачивания (при одной и той же температуре).

ПРИМЕЧАНИЕ 5 Глубина зоны периодического смачивания меняется в зависимости от места, например, в зонах заплеска волны в Северном море глубина обычно составляет до 10 м, тогда как в Южно-Китайском море эта глубина обычно равна 1 м.

Для трубопроводов полностью заглубленных в осадочные породы или искусственно засыпанных (например, сбросом породы), необходимо использовать расчетную плотность тока (среднюю и конечную) равную 20 мА/м<sup>2</sup>, независимо от температуры морской воды или глубины.

Трубопроводы, работающие при повышенных температурах (выше 50 °С) на наружной поверхности трубы, требуют регулировки расчетной плотности тока. Возрастающая температура воды уменьшает растворимость кислорода. Увеличение температуры также ускоряет скорость коррозии. При увеличении температуры металла/окружающей среды на каждый градус Цельсия выше 50 °С расчетные плотности тока должны быть увеличены на 1 мА/м<sup>2</sup>. Повышенные температуры могут также ухудшить рабочие характеристики анода и покрытия трубопровода. Для температуры наружной поверхности трубы выше 80 °С рекомендуется осуществить специальную оценку плотности тока.

Расчетные плотности тока, обсуждаемые выше, также применимы для катодной защиты всех типов нержавеющей стали без покрытия (аустенитной, мартенситной и дуплексной).

Если в проект системы катодной защиты трубопровода включены подводные установки, то необходимо включить и дренаж тока на подводные сооружения, устье скважины, коллекторы и обсадные трубы. Следует в общие требования к расчетной плотности тока включить припуск для компенсации токовой нагрузки, накладываемой обсадными трубами ниже уровня ила. Значения обычно находятся в диапазоне от 1,5 А до 5 А на скважину.

## 6.5 Коэффициенты разрушения покрытия

Потребность тока у трубопровода с покрытием возрастает со временем по мере разрушения покрытия. Следует обеспечить достаточную мощность катодной защиты, чтобы обеспечивать адекватную защиту по мере разрушения покрытия. Это приводит к концепции коэффициентов разрушения покрытия в соответствии с определением, приведенным в 3.3 и используемым в Приложении А.

Средний коэффициент разрушения покрытия  $\bar{f}_c$  задается формулой (1):

$$\bar{f}_c = f_i + (0,5\Delta f \times t_{dl}) \quad (1)$$

Конечный коэффициент разрушения покрытия  $f_f$  задается формулой (2):

$$f_f = f_i + (\Delta f \times t_{dl}) \quad (2)$$

где

$f_i$  начальный коэффициент разрушения покрытия при пуске трубопровода в эксплуатацию;

$\Delta f$  среднее ежегодное увеличение коэффициента разрушения покрытия;

$t_{dl}$  расчетный срок, выраженный в годах.

Типичные параметры в расчете коэффициентов разрушения покрытия ( $f_i$  и  $\Delta f$ ) приведены в Таблице 3. Эти значения должны применяться при расчете участков непокрытой металлической поверхности трубы с покрытием в течение и в конце расчетного срока службы, соответственно (см. Приложение А).

ПРИМЕЧАНИЕ В Таблице 3, “Теплоизоляционные системы” определены как системы покрытия, которые включают, в дополнение к покрытию, защищающему от коррозии, слой, конкретная задача которого заключается в обеспечении теплоизоляции, в отличие от защищающего от коррозии покрытия, причем общая толщина системы превышает 3 мм и предназначена для образования теплоизоляционного барьера.

Коэффициенты разрушения покрытия основаны на соответствии качества покрытия обычно применяемым промышленным стандартам. Коэффициенты разрушения покрытия не включают допусков на значительное повреждение покрытия трубопровода в процессе производства или установки трубопровода или на монтажные стыки трубопровода, намеренно оставленные без покрытия, или на повреждение третьей стороной при эксплуатации (например, якорями, траловой оснасткой). Если предполагаются такие ситуации, любой подверженный воздействию участок необходимо оценить и включить в расчет как открытую металлическую поверхность ( $f_i = 1$ ) или увеличить коэффициенты разрушения покрытия, приведенные в Таблице 3.

Расчетные коэффициенты разрушения покрытия, приведенные в Таблице 3, взяты на основе монтажных соединений трубопровода, имеющих качество эквивалентное качеству заводских покрытий.

**Таблица 3 — Коэффициенты разрушения покрытия для антикоррозионных и теплоизоляционных покрытий**

Тип покрытия	Коэффициент $f_i$	$\Delta f$
Асфальтовый/битумный лак + бетон	0,010	0,000 5
Расплавленная эпоксидная смола (FBE) + бетон	0,010	0,000 5
Расплавленная эпоксидная смола	0,020	0,001 0
Эластомерные материалы (полихлоропрен или аналогичный материал)	0,005	0,000 2
Многослойное (вкл. грунтовку FBE) полиэтиленовое (PE) и полипропиленовое (PP) антикоррозийное	0,005	0,000 2
Многослойное (вкл. грунтовку FBE) PE/PP антикоррозийное покрытие + бетон	0,002	0,000 1
Теплоизоляционные системы (полностью наплавленные)	0,002	0,000 1
Указанные коэффициенты разрушения покрытия относятся как к заглубленным в дно трубопроводам, так и находящимся в воде.		

## 7 Гальванические аноды (протекторы)

### 7.1 Проектирование системы

Система гальванических анодов должна быть спроектирована путем размещения анодов правильного размера и надлежащей формы вдоль трубопровода, так чтобы на трубопровод подавался ток, достаточный для поддержания требуемых потенциалов в течение расчетного срока службы.

ПРИМЕЧАНИЕ 1 Обычно система CP состоит из браслетных анодов, расположенных через равные промежутки вдоль трубопровода.

Проектный расчет систем CP должен продемонстрировать, что аноды подают на трубопровод ток, необходимый для удовлетворения требований к плотности тока. Аноды должны подавать ток, достаточный для удовлетворения требований к средней и конечной расчетной плотности тока.

Если используются аноды на салазках, рекомендуется рассмотреть альтернативные методы распределения и присоединения к трубопроводу.

Расстояние между анодами должно определяться после того, как будет рассчитано количество анодов. Аноды должны располагаться достаточно близко, чтобы поддерживать надлежащую защиту в случае механического или электрического отказа отдельного анода. Расстояние между анодами, превышающее 300 м, должно быть обосновано расчетами ослабления или другими методами математического моделирования.

Для коротких трубопроводов аноды можно установить на каждом конце трубопровода, если можно продемонстрировать с помощью математических расчетов и моделирования, что катодная защита в этом случае может быть обеспечена должным образом. Расчеты ослабления (см. Приложение А) должны осуществляться для таких установок, чтобы определить, возможно ли осуществить защиту середины трубопровода, если аноды расположить на концах.

Иногда желательно разместить дополнительные аноды на части трубопровода, которая расположена наиболее близко к платформе. Причины для подсоединения дополнительных анодов включают

**Annex NA**повышенный риск повреждения покрытия трубопровода за счет падающих объектов и судовых якорей,

**Annex NB**возможность избыточной утечки тока,

**Annex NC**вероятность, что потенциал трубопровода будет более отрицательным, чем потенциал платформы, так что аноды трубопровода, расположенные вблизи конструкции будут также подавать ток на платформу.

ПРИМЕЧАНИЕ 2 Все эти факторы увеличивают выход тока от анодов и уменьшают срок службы анодов.

Эффективность распределения тока можно повысить за счет применения большего числа анодов с более низким индивидуальным выходом, распределенных равномерно вдоль трубопровода. Распределение тока можно также улучшить путем использования покрытия на трубопроводе. Системы гальванических анодов, составленные из ряда распределенных небольших источников тока (обычно от 0,5 А до 3 А каждый), достигают максимальной эффективности распределения тока.

Аноды и анодные опоры должны быть рассчитаны таким образом, чтобы избегать острых кромок, углов или выступающих узлов, которые могут оказаться опасными для персонала (см. также Приложение F). Это последнее требование особенно касается водолазных работ, производимых вблизи анодных установок.

## 7.2 Выбор материала анода

Сплавы на основе цинка и алюминия являются материалом, наиболее часто используемым для гальванических анодов на трубопроводах. Типичный состав сплавов приведен в 8.4 и 8.5.

Выбранный сплав должен обладать рабочими характеристиками, удовлетворяющими необходимым требованиям в аналогичных полевых условиях или в лабораторных и полевых испытаниях в смоделированных окружающих условиях.

Аноды из алюминиевых сплавов уменьшают электрохимическую эффективность при повышенных температурах. Алюминиевые сплавы определенного состава могут оказаться непригодными при повышенной температуре.

На поведение определенных алюминиевых сплавов может неблагоприятно повлиять заглупление в ил морского дна, особенно, если выход тока остается низким.

Некоторые алюминиевые сплавы, содержащие магний, могут подвергаться старению с потерей механических свойств.

При температурах, превышающих 50 °С, цинковые аноды могут подвергаться снижению раскачивающего потенциала и ухудшению рабочих характеристик и, если данные соответствующих испытаний в отношении этих рабочих характеристик не свидетельствуют об обратном, не рекомендуются к использованию при таких температурах. Межкристаллическая коррозия и/или снижение допустимой нагрузки по току остаются основными проблемами при повышенных температурах.

### 7.3 Электрохимические свойства

Для проектных задач можно использовать значения из таблицы 4. Эти значения должны быть подтверждены в соответствии с Приложением В. Можно использовать альтернативные значения для электрохимической эффективности гальванических анодов, если они надежны и соответствующим образом подтверждены документально. Электрохимические характеристики должны быть задокументированы для соответствующих рабочих температур анодов.

**ПРИМЕЧАНИЕ** Состав материала анода, который определен для одного набора рабочих условий, например, при низкой температуре, без заглупления, может не подойти для использования в других условиях, например, при высокой температуре с заглуплением.

### 7.4 Форма анода и коэффициент использования

Браслетные аноды должны быть сконструированы таким образом (см. 7.5), чтобы получить коэффициент использования ( $u$ ) не менее 0,80. Аноды на салазках должны быть сконструированы (см. 7.5) таким образом, чтобы получить коэффициент использования ( $u$ ) не менее 0,90. Детальный проект анодов должен включать чертежи с размерами и допусками. Расположение стержня анода внутри корпуса требует внимательного рассмотрения, если необходимо достичь указанных выше коэффициентов использования.

### 7.5 Конкретные механические и электрические свойства

Для присоединения к трубопроводу имеются аноды разнообразной конструкции. Размеры анода определяются применяемым диаметром трубы и толщиной покрытий. Полуцилиндрические браслеты с сужающимися или прямоугольными заплечиками имеются для применения на трубопроводах с небольшим или средним диаметром трубы. Для труб большего диаметра, где полуцилиндрические аноды не практичны, имеются сегментные конструкции. Для конкретных обстоятельств иногда можно использовать аноды, отлитые непосредственно на трубу.

Таблица 4 — Расчетные значения для гальванических анодов

Тип анода	Температура поверхности анода <sup>a</sup>  °C	Погруженный в морскую воду		Заглубленный в донные осадочные породы	
		Потенциал  Ag/AgCl/ морская вода  mV	Электрохимическая емкость  $\epsilon$  А·ч/кг	Потенциал  Ag/AgCl/ морская вода  mV	Электрохимическая емкость  $\epsilon$  А·ч/кг
Алюминий	≤ 30	– 1 050	2 500	– 1 000	2 000
	60	– 1 050	2 000	– 1 000	850
	80 <sup>b</sup>	– 1 000	900	– 1 000	400
Цинк	≤ 30	– 1 030	780	– 980	750
	≤ 30 – 50 <sup>c</sup>			– 980	580

Электрохимическая емкость для данного сплава является функцией температуры и плотности анодного тока. См. Приложение А для руководства в отношении проекта катодной защиты по изменениям плотности анодного тока.

Для незаглубленных трубопроводов, температура поверхности анода должна браться как наружная температура трубопровода, а не внутренняя температура транспортируемой среды.

<sup>a</sup> Для температур поверхности анода между установленными пределами допустимая нагрузка по току должна интерполироваться.

<sup>b</sup> Для алюминиевых анодов температура поверхности анода не должна превышать 80 °C, если рабочие характеристики не испытаны и не подтверждены документально.

<sup>c</sup> Для цинковых анодов температура поверхности анода не должна превышать 50 °C, если удовлетворительные характеристики не продемонстрированы в испытаниях и не подтверждены документально.

В зависимости от метода укладки трубопровода аноды могут подвергнуться повреждению. Момент, когда аноды проходят по стингеру при спуске трубопровода с баржи-трубоукладчика, является критическим.

Для трубопроводов без утяжеляющего покрытия рекомендуется использовать аноды с сужающимися заплечиками или конической формы, чтобы уменьшить риск задержки (застревания) анодов на роликовых опорах стингера.

Для трубопроводов с утяжеляющим покрытием толщина анодов должна соответствовать толщине утяжеляющего покрытия, так чтобы аноды не застревали на роликовых опорах стингера.

Центральная часть анода должна быть спроектирована таким образом, чтобы обеспечить поддержание электрической целостности с телом анода в течение всего срока службы анода.

Электрический контакт между трубопроводом и анодом обычно осуществляется с помощью соединительного провода. Соединительный провод можно подсоединять множеством способов, включая термитную сварку и точечную пайку. Способ присоединения должен быть совместим с требованиями метода укладки труб и металлургическими характеристиками стали, из которой эти трубы изготовлены.



## 8 Производство анодов

### 8.1 Испытание опытного образца

Перед изготовлением анодов необходимо выполнить испытание опытного образца в литейном цеху, чтобы убедиться, что все формы, литейные стержни, литейное оборудование и другие компоненты соответствуют применяемым стандартам, основным чертежам, размерам, допускам, процедурам контроля и спецификациям.

Не менее одной заготовки анодного узла необходимо подвергнуть разрушающему контролю в соответствии с 9.9.

Можно рассмотреть другие типы проверки.

### 8.2 Покрытие

Браслетные аноды должны иметь покрытие с тех сторон, которые обращены к трубопроводу и к бетонному утяжеляющему покрытию. Покрытие, нанесенное на поверхности анода, должно осуществляться двухкомпонентной эпоксидной смолой методом окунания и иметь минимальную толщину 100 мкм.

Открытая (наружная) поверхность анода должна оставаться без покрытия.

### 8.3 Материалы центральной части анода

Центральная часть анода должна изготавливаться из листов/заготовок свариваемой конструкционной стали в соответствии с общепризнанным стандартом, таким как EN 10025 или аналогичным. Материалы центральной части анодов, подлежащие сварке с трубой, должны быть совместимы с материалом трубопровода или конструкционных элементов, к которым они привариваются, а углеродный эквивалент (CE) не должен превышать значение CE материала трубопровода. Значение CE должно рассчитываться по формуле (3).

$$CE = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Ni + \%Cu}{15} \quad (3)$$

если химический состав полностью не сообщается, можно использовать альтернативную формулу (4) для расчета CE.

$$CE = \%C + \frac{\%Mn}{6} + 0,04 \quad (4)$$

Сертификат на материал для центральной части анодов должен выполнять, как минимум, требования ISO 10474:1991, 2.1 b).

Вся технология заводской сварки стальных центральных элементов анодов должна соответствовать требованиям AWS D1.1/D1.1M или равноценного стандарта, и выполняться сварщиками, аттестованными по EN 287-1 или AWS D1.1/D1.1M. Сертификация технологии сварки должна соответствовать требованиям EN 288-1, AWS D1.1/D1.1M, или аналогичных стандартов.

Сталь центральных элементов для алюминиевых анодов должна очищаться посредством пескоструйной очистки до уровня Sa 2½ (ISO 8501-1) перед литьем и поддерживаться на этом уровне, пока не приступят к литью.

Сталь центральных элементов для цинковых анодов должна очищаться посредством пескоструйной очистки до минимального уровня Sa 2½ (ISO 8501-1), а оцинковка проводится в соответствии с ISO 1461 или равноценными требованиями. Изменение цвета за счет ржавчины и/или визуальное

загрязнение оцинкованной поверхности не допускается. Такая степень очистки должна поддерживаться до начала литья.

#### 8.4 Материалы алюминиевых анодов

Материал алюминиевых анодов рекомендуется брать по типу Al-Zn-In. Химический состав анодов должен избираться таким образом, чтобы поддерживать расчетный потенциал и предельно допустимый ток в соответствии с проектом. Обычные химические составы, хорошо работающие в различных условиях, приведены в таблице 5. Можно использовать другие составы, если испытания показали, что они удовлетворяют требованиям к электрохимическим характеристикам анодов. Необходимо соблюдать осторожность, если содержание какого-либо из элементов выходит за установленные допустимые пределы, поскольку в этом случае электрохимические характеристики анода могут отличаться от расчетных значений.

Таблица 5 — Типичный химический состав (массовая доля) материалов алюминиевых анодов

Элемент <sup>a</sup>	Массовая доля	
	w	
	мин. %	макс. %
Zn	2,5	5,75
In	0,016	0,040
Fe	—	0,09
Si	—	0,12
Cu	—	0,003
Cd	—	0,002
Другие		0,02 (каждый)
Al	остаток	

<sup>a</sup> В определенных рабочих условиях, таких как большая глубина (> 500 м) или холодная вода, может потребоваться выбирать диапазон для состава материала анода более узкий, чем приведенный в данной таблице, чтобы получить требуемые электрохимические свойства анода.

#### 8.5 Материалы цинковых анодов

Типичный химический состав, хорошо работающий в разных условиях, приведен в Таблице 6.

Таблица 6 — Типичный химический состав (массовая доля) материалов цинковых анодов

Элемент	Массовая доля	
	w	
	мин. %	макс. %
Cu	—	0,005
Al	0,10	0,50
Fe	—	0,005
Cd	0,025	0,07
Pb		0,006
Zn	Остаток	

Можно использовать другие составы, если испытания показали, что они удовлетворяют требованиям к электрохимическим характеристикам анодов. Необходимо соблюдать осторожность, если содержание

какого-либо из элементов выходит за установленные допустимые пределы, поскольку в этом случае электрохимические характеристики анода могут отличаться от расчетных значений.

## 9 Контроль качества гальванических анодов (протекторов)

### 9.1 Общие положения

Необходимо осуществить контроль качества, чтобы обеспечить выполнение требований данного раздела.

### 9.2 Центральные элементы стальных анодов

Все сварные швы необходимо проверить визуально.

Необходимо проверить требуемую шероховатость поверхности визуально непосредственно перед литьем.

### 9.3 Химический анализ сплава анода

Для химического анализа от каждой плавки необходимо взять по два образца. Образцы необходимо отбирать в начале и в конце литья из потока. Для плавильных печей небольшого размера (500 кг макс.), допускается отбирать по одному образцу на плавку. Образец необходимо отбирать в начале первой плавки и в конце второй плавки, затем в начале третьей плавки и т.д. Образцы необходимо анализировать для проверки требуемого химического состава.

Аноды от плавков, химический состав которых не соответствует требованиям, бракуют.

### 9.4 Масса анода

Отдельные аноды каждого типа должны иметь массу в пределах  $\pm 3\%$  от номинальной массы, рассчитанной для анодов с общей массой выше 50 кг. Не менее 10 % от общего количества анодов необходимо взвесить по отдельности или в партии, чтобы подтвердить соответствие указанному требованию. Для анодов массой ниже 50 кг допуски на массу следует согласовывать между продавцом и заказчиком.

Общая масса анодов не должна превышать  $^{+2}_0\%$  от номинального значения.

### 9.5 Размеры и прямолинейность анода

#### 9.5.1 Аноды, устанавливаемые на салазки

Размеры и прямолинейность таких анодов должна соответствовать следующим требованиям:

**Аппех ND** длина анода должна соответствовать  $\pm 3\%$  от номинальной длины или  $\pm 25$  мм, в зависимости от того, какая величина меньше;

**Аппех NE** средняя ширина анода должна составлять  $\pm 5\%$  от номинальной средней ширины;

**Аппех NF** средняя высота (толщина) анода должна быть в пределах  $\pm 10\%$  от номинальной средней высоты;

**Аппех NG** диаметр цилиндрических анодов должна быть в пределах  $\pm 7,5\%$  от номинального диаметра;

**Annex NH** прямолинейность анода не должна отклоняться более чем на 2 % номинальной длины анода от продольной оси анода.

Не менее 10 % от общего количества анодов необходимо проверить для подтверждения соответствия этим требованиям.

### 9.5.2 Браслетные аноды

Длина каждого браслетного анода должна быть в пределах  $\pm 3$  % от номинальной длины или  $\pm 25$  мм, в зависимости от того, какая величина меньше.

Внутренний диаметр анода должен соответствовать следующим допускам на размер:

**Annex NI**  $^{+4}_0$  мм для анодов внутренним диаметром  $< 300$  мм;

**Annex NJ**  $^{+6}_0$  мм для анодов внутренним диаметром  $> 300$  мм до 610 мм;

**Annex NK**  $^{+1}_0$  % для анодов внутренним диаметром  $> 610$  мм.

Допуск на размер для толщины анода должен браться  $\pm 3$  мм.

Не менее 10 % от общего количества анодов необходимо проверить на соответствие данным требованиям.

Аноды не должны изгибаться и скручиваться. Это должно проверяться путем подбора согласованного количества браслетных узлов по шаблону по полной длине или эквивалентным методом. Наружный диаметр не должен превышать совокупности допусков, приведенных выше.

## 9.6 Размеры и расположение центрального элемента анода

Допуски на расположение центрального элемента анода в его пределах подлежат согласованию перед производством в отношении соответствия с требованиями коэффициента использования, что рекомендуется включить в план обеспечения качества изготовления. Выступающую часть центрального элемента анода и другие критические размеры необходимо проверять измерением на соответствие установленным требованиям.

## 9.7 Дефекты поверхности анода

### 9.7.1 Аноды, устанавливаемые на салазки

К таким анодам применимы следующие требования:

**Annex NL** выемки, вызванные усадкой, не должны превышать 10 % номинальной толщины анода, при измерении от самого верхнего угла до нижней части выемки;

**Annex NM** поверхностные дефекты литья должны быть полностью связаны с анодным материалом в массе;

**Annex NN** неметаллические включения допускаются на  $\leq 1$  % общей поверхности заготовки анода;

**Annex NO** неслитины не должны превышать глубину 10 мм или простираются на длину, более чем втрое превышающую ширину анода;

**Annex NP** все выступающие части, которые представляют опасность для персонала при обращении с изделием, необходимо устранить;

**Annex NQ** уменьшение поперечного сечения материала анода, прилегающего к выступающим частям центрального элемента анода, должно составлять  $\leq 10\%$  от номинальной площади поперечного сечения анода.

Все аноды подлежат визуальному контролю для подтверждения соответствия вышеуказанным требованиям.

### 9.7.2 Браслетные аноды

К браслетным анодам применяются следующие требования:

**Annex NR** выемки, вызванные усадкой, не должны превышать  $10\%$  номинальной толщины анода, при измерении от самого верхнего угла до нижней части выемки. Выемки, вызванные усадкой, открывающие центральную часть анода, не допускаются;

**Annex NS** поверхностные дефекты литья должны быть полностью связаны с анодным материалом;

**Annex NT** неслитины должны иметь глубину не более 10 мм и простираться на длину  $< 150$  мм;

**Annex NU** все выступающие части, которые представляют опасность для персонала при обращении с изделием, необходимо устранить. Шлифование или механическая обработка эффективной поверхности анода не допускается. Не допускается обработка заточкой, проковкой или другим способом заделки трещин до контроля и проверок.

Все аноды подлежат контролю для подтверждения соответствия вышеуказанным требованиям.

## 9.8 Трещины

### 9.8.1 Общие положения

Трещины могут возникать при охлаждении в процессе литья гальванических браслетных анодов в результате разных коэффициентов расширения анода и его центрального элемента. Эти трещины не опасны, при условии, что они не сходятся таким образом, чтобы привести к убыли материала анода. Коробление в небольшой степени допускается, если не оказывает неблагоприятного воздействия и не мешает при установке анода.

Цинковые аноды не должны иметь трещин.

Трещины допускаются на алюминиевых анодах, при условии, что такие трещины не приведут к механическому отказу в процессе установки, транспортирования или эксплуатации анода. Сочетание трещин и отсутствия соединения трещин с центральным элементом анода и трещинами в области, где аноды не полностью поддерживаются центральными элементами, не допускается. Для алюминия должны применяться критерии растрескивания, приведенные в 9.8.2 и 9.8.3.

Все аноды должны проходить контроль на растрескивание.

### 9.8.2 Алюминиевые аноды, устанавливаемые на салазки

Применяются следующие критерии растрескивания:

- на участках материала анода, не полностью поддерживаемых центральным элементом, видимых трещин не допускается;
- трещины на участке материала анода, поддерживаемого центральным элементом, не допускаются, если их длина  $> 100$  мм и/или ширина  $> 2$  мм;
- сквозные трещины анода или его центрального элемента не допускаются;

- допускается максимум 10 трещин на анод, причем мелкие частые трещины считаются за одну, а трещины шириной  $< 0,5$  мм не считаются.

### 9.8.3 Алюминиевые браслетные аноды

Применяются следующие критерии растрескивания:

- для участков анодного материала, не полностью поддерживаемых центральным элементом анода, видимые трещины не допускаются;
- сквозные трещины на теле анода и центральном стальном элементе анода не допускаются;
- трещины длиной  $> 200$  мм или  $> 50$  % диаметра анода, в зависимости от того, какая величина меньше, и/или шириной  $> 5$  мм не допускаются.

При условии выполнения указанных выше требований, следующие трещины допускаются в поперечном направлении:

- трещины длиной  $\leq 50$  мм или  $\leq 20$  % от диаметра анода, в зависимости от того, какая величина меньше, и шириной  $< 5$  мм;
- трещины длиной от 50 мм до 200 мм или от 20 % до 50 % диаметра анода, в зависимости от того, какая величина меньше, и шириной  $< 1$  мм;
- трещины длиной от 50 мм до 200 мм ограничиваются до двух на половину браслета или четырех на анод.

Трещины в продольном направлении должны быть  $\leq 100$  мм длиной или  $\leq 20$  % от длины анода, в зависимости от того, какая величина меньше, и/или  $\leq 1$  мм шириной.

## 9.9 Внутренние дефекты, разрушающие испытания

Количество и метод выбора анодов для разрушающих испытаний (деление на части) для каждого типа/размера анода должны учитывать конструкцию анода, общее количество анодов и требования к испытанию опытного образца (8.1).

Если анод не проходит испытание, разрушающему контролю необходимо подвергнуть еще один анод. Если и этот анод не удовлетворяет установленным требованиям, вся партия анодов подлежит браковке, или необходимо предпринять иные действия, согласованные перед изготовлением.

Аноды, устанавливаемые на салазках, рекомендуется разрезать на 25 %, 33 % и 50 % номинальной длины, или в других согласованных местах для конкретных конструкций анодов. Поверхности разреза, при визуальном обследовании без увеличения должны соответствовать следующим критериям:

- газовые пузыри и пористость должны ограничиваться до максимум 2 % от общей площади поверхности разреза и максимум 5 % любой отдельной площади поверхности разреза;
- неметаллические включения должны ограничиваться до максимум 1 % от общей площади поверхности разреза и максимум 2 % любой отдельной площади поверхности разреза;
- отсутствие соединения (пустоты) должны ограничиваться до максимум 10 % от общей окружности стержня трубчатого анода и максимум 20 окружности любого отдельного разреза.

Браслетные аноды рекомендуется разрезать в поперечном направлении и/или в продольном направлении отдельными разрезами на 25 % и 50 % от номинальной длины, или в других согласованных местах для конкретной конструкции анода. Поверхности разреза при визуальном обследовании без увеличения должны соответствовать следующим критериям:

- газové пузыри и пористость должны ограничиваться до максимум 2 % от общей площади поверхности разреза и максимум 5 % любой отдельной площади поверхности разреза;
- неметаллические включения должны ограничиваться до максимум 1 % от общей площади поверхности разреза и максимум 2 % любой отдельной площади поверхности разреза;
- отсутствие соединения (пустоты) должны ограничиваться до максимум 10 % от общей окружности стержня трубчатого анода и максимум 20 окружности любого отдельного разреза.

Соответствие положения центрального элемента анода в пределах тела анода в соответствии с проектными чертежами должно подтверждаться физическим измерением на поверхностях разреза.

Можно рассмотреть другие методы типовых испытаний на основе соглашения между продавцом и заказчиком.

### 9.10 Испытания в рамках электрохимического контроля качества

Необходимо оценить следующее:

- потенциал замкнутой цепи;
- электрохимическую емкость;
- характер коррозии (неравномерное потребление, межкристаллитная коррозия, и т.д.).

Необходимо выполнить одну серию испытаний на каждые 15 тонн произведенных анодов. Данные электрохимических испытаний необходимо внести в протокол.

Потенциал замкнутой цепи и электрохимическая емкость должны соответствовать согласованным критериям приемки. Рекомендованные значения приведены в Таблице 7.

Испытание рекомендуется проводить, используя методику, описанную либо в Приложении D, либо в документе NACE TM0190.

Критерии приемки должны соответствовать конкретной применяемой методике, поскольку результаты испытания зависят от условий испытания.

Испытания рекомендуется выполнять в натуральной морской воде или в искусственной морской воде в соответствии с ASTM D 1141.

Если установленные требования не выполняются, рекомендуется осуществить повторные испытания на трех образцах от каждой плавки, которая не прошла испытания. Несоответствие требованиям хотя бы одного из этих трех образцов должно привести к браковке или другим действиям, предпринятым по согласованию перед изготовлением всех анодов из металла рассматриваемой плавки.

**Таблица 7 — Рекомендованные значения для электрохимических параметров (контроль качества продукции) по Приложению D**

Тип анода	Средняя допустимая нагрузка по току А·ч/кг	Потенциал замкнутой цепи мВ (Ag/AgCl морская вода)
Алюминиевый	2600 <sup>a</sup>	– 1 050
Цинковый	780	– 1 030
<sup>a</sup> Любые значения меньше чем 2500 А·ч/кг неприемлемы.		

## 10 Установка гальванических анодов (протекторов)

Сварщики и технология сварки должны быть аттестованы в отношении применяемого процесса по признанному стандарту.

Браслетные аноды должны прикрепляться или привариваться к трубопроводу.

Для браслетных анодов, установленных на трубных стыках с бетонным утяжеляющим покрытием, электрического контакта между бетонным утяжелением и анодами рекомендуется избегать путем выполнения зазора, обычно шириной 25 мм с каждого конца анода. Зазоры между половинками браслетных анодов и между этими половинками и бетоном должны быть заполнены не проводящей электрический ток мастикой или аналогичным веществом.

Установка анодов должна производиться таким образом, чтобы свести к минимуму повреждение покрытия.

Присоединение кабелей к трубопроводу должны проектироваться таким образом, чтобы обеспечить адекватную механическую прочность и неразрывность электрической цепи и предотвратить повреждение трубы в точке соединения. Удаление защитного покрытия с трубы следует свести к минимуму. После установки соединения кабель-труба покрытие необходимо восстановить с помощью подходящего материала.

В проект СР необходимо включить подробное описание процедуры соединения кабеля с трубопроводом. Сварка кабельных соединений не допускается на колене трубопровода или в пределах 200 мм от сварных швов на трубе.

Для термитной сварки кабелей технология сварки должна быть такой, чтобы пенетрация меди в материал трубопровода не превышала 1 мм и местная твердость трубопровода оставалась в рамках требований, приведенных в технических условиях на трубопровод.

Загрузка термитной смеси при сварке не должна превышать 15 г. Если необходимо присоединить кабель сечением больше 16 мм<sup>2</sup>, то необходимо разделить жилу кабеля на несколько прядей, чтобы каждая прядь была меньше 16 мм<sup>2</sup> и приваривать по отдельности.

Термитную сварку не допускается осуществлять на трубопроводах из коррозионно-стойких сплавов. Можно применять альтернативные методы, такие как точечная пайка, пайка мягким припоем, соединение склеиванием, при условии, что данный метод и исполнение надежны и подтверждены документально.

Все защищаемые компоненты должны находиться в электрическом контакте и иметь сварное или паяное (твердым припоем) соединение с анодом. Все компоненты с болтовым или хомутным соединением, площадь поверхности которых превышает 1 м<sup>2</sup>, должны иметь цельносварное или паяное соединение с анодом. Для всех болтовых или хомутных узлов, не имеющих цельносварного или паяного (твердым припоем) соединения необходимо проверить, что удельное электрическое сопротивление не превышает 0,10 Ом. Покрытие на контактирующих поверхностях необходимо удалить до сборки.

Кабели должны иметь медное покрытие, изоляцию и оплетку, чтобы выдержать преобладающие химические и механические условия. Минимальные размер жилы для контрольного кабеля должен составлять 4 мм<sup>2</sup>. Кабели должны иметь такие размеры, чтобы не возникало избыточного падения напряжения, снижающего мощность системы.

Если контакт выполнен с использованием медных носителей тока, сваренных или спаянных на каждом конце, то такие жилы необходимо разделить на пряди с минимальным поперечным сечением 16 мм<sup>2</sup> и припаять к концевой кабельной муфте. Необходимо установить не менее двух кабелей на анод. Для разъемных анодов обе половинки анода должны рассматриваться как отдельный анод.



Только в исключительных случаях (например, модификация системы СР или использование удаленных анодов в сборе) при установке анодов под водой рекомендуется использовать сварные или зажимные приспособления и выполнять сварные работы.

Болтовые соединения стопорными винтами или сварку трением можно рассмотреть для электрического соединения в модифицированных системах анодов.

Для высокопрочных материалов ( $\sigma_{SMY} > 550$  МПа) следует избегать сваривания накладных листов для соединений анода, поскольку это может привести к увеличению местного напряжения, что, в свою очередь, приводит к водородному охрупчиванию.

## 11 Системы электрохимической защиты с наложенным током

### 11.1 Источник тока и контроль

В системах электрохимической защиты с наложенным током в качестве источника тока применяется трансформатор-преобразователь. Нормативные требования можно применить к его проектированию, установке и эксплуатации.

Отдельные соединения с отрицательным выводом необходимо установить на каждый защищаемый трубопровод, независимо от любого соединения с отрицательным выводом на платформе или береговой установке. Эти соединения должны заделываться в блоке управления. Необходимо средство для регулировки и измерения защитного тока для каждого трубопровода.

Управление выходом тока с трансформатора-преобразователя может осуществляться вручную или автоматически. В первом случае можно использовать либо регулировку тока, либо регулировку напряжения, тогда как автоматический контроль должен быть основан на показаниях потенциала от стационарных электродов сравнения. Необходимо предусмотреть функции сигнализации, предупреждающей об избыточном напряжении/токовой нагрузке на аноды и/или слишком положительных защитных потенциалах.

Выход тока от отдельных анодов должен регулироваться независимо.

### 11.2 Материалы анодов, подающих ток

В качестве материала для анодов рекомендуется применять смешанные оксиды металлов или платины на подложке из титана, ниобия или тантала. В конкретных задачах можно использовать другие материалы, если они надежны и этому имеется документальное подтверждение. Для наземных систем электрохимической защиты, сконструированных для защиты морских трубопроводов, можно использовать для анодов другие материалы, если они надежны и этому имеется документальное подтверждение (см. ISO 15589-1).

**ПРИМЕЧАНИЕ** Материал анода и подложки определяет максимальное рабочее напряжение и плотность анодного тока, которые можно применять. Материалы подающих ток анодов портятся, причем степень порчи зависит от плотности анодного тока и приложенного напряжения.

### 11.3 Конструкция системы

**ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ** — В процессе эксплуатации систем СР может выделяться газообразный хлор на поверхностях анодов и газообразный водород на поверхностях катодов. Чтобы избежать угрозы здоровью и безопасности, при проектировании и эксплуатации необходимо предусмотреть устранение опасного скопления газов.

Подающие ток аноды располагают на концах заглубленных трубопроводов. Выход тока должен быть достаточным, чтобы защитить середину трубопровода. Системы с наложенным током проектируются для большего выхода тока, чем системы гальванических протекторных анодов, и достигают меньшей эффективности распределения тока.

ПРИМЕЧАНИЕ 1 Это последнее требование, в частности, применимо для водолазных работ, выполняемых вблизи анодных установок.

Высокий выход тока может привести к избыточной защите того конца, который расположен ближе к подающим ток анодам. Поэтому рекомендуется выполнить расчеты ослабления тока, чтобы подтвердить, что защита середины трубопровода может достигаться без избыточной защиты его концов (см. Приложение А).

Общая допустимая нагрузка по току систем с наложенным током должна составлять не менее 1,25 от общей потребности трубопровода, рассчитанной в соответствии с Приложением А.

Чтобы учесть неравномерное распределение тока и повышенный риск нарушения нормальной работы анода по сравнению с системами гальванических анодов-протекторов, расчет системы электрохимической защиты с наложенным током должен включать резервирование в отношении количества анодов.

Подающие ток аноды и кабели должны быть спроектированы таким образом, чтобы выдерживать все ожидаемые нагрузки во время монтажа и эксплуатации. Аноды должны быть спроектированы так, чтобы их можно было заменять либо с поверхности, либо водолазом или ROV под водой.

Там где аноды устанавливаются в пределах 1,5 м от опорной конструкции, необходимо применить непроводящее электрический ток покрытие или лист (толщиной не менее 1 мм), т.е. диэлектрический экран к расположенной рядом поверхности опоры.

ПРИМЕЧАНИЕ 2 Такая предосторожность нужна для предотвращения возникновения излишне отрицательных потенциалов. Обычно используются экраны из изготовленных заводским способом листов эпоксидной смолы, армированной стекловолокном, они могут быть частью анодного узла или прикрепляться к объекту эпоксидной смолой. Альтернативно можно применять наносимые в жидком виде покрытия, такие как эпоксидная смола или полиэфир, армированные стеклянными чешуйками.

Анодные кабели должны иметь стальную оплетку или защищаться адекватным образом путем прокладки в подходящем кабельном трубопроводе. Положение о ремонте и замене кабелей также необходимо включить в проект.

ПРИМЕЧАНИЕ 3 Можно установить дополнительно ограничения на прокладку кабелей в опасных зонах.

Титан, ниобий и тантал, покрытые платиной или золотом рекомендуется использовать для электрических контактов, подверженных воздействию морской воды.

Трубопроводы, защищаемые внешним током, должны быть электрически изолированы на обоих концах от близлежащих сооружений/трубопроводов. Изоляционные соединения следует располагать над водой в месте, удобном для контроля и технического обслуживания. Если необходимо рассмотреть помехи от расположенных рядом сооружений или трубопроводов, следует смонтировать соединения для установки резистивных проводов.

Если используются системы с наложенным током, необходимо установить стационарные электроды сравнения, чтобы подтвердить адекватность электрохимической защиты трубопровода, которые должны включать мониторинг потенциала в зоне, ближайшей к аноду; т.е. чтобы избежать избыточной защиты. Критические участки, на которых невозможно осуществлять контроль с помощью водолазов или ROV, должны оснащаться стационарными электродами сравнения.

Поскольку стационарные электроды сравнения имеют ограниченный срок службы, рекомендуется разработать процедуры технического обслуживания и калибровки в оперативном режиме.

Кабели присоединения к положительному и отрицательному полюсу не допускается прокладывать в одном кабельном трубопроводе.

Чтобы оценить рабочие характеристики CP на подводных трубопроводах, защищаемых системой с наложенным током, на каждом конце трубопровода должны устанавливаться измерительные кабели и измерительные наконечники, если прямой контакт невозможен.

В изоляционных соединениях два кабеля должны подсоединяться к каждой из сторон соединения или фланца. Кабели должны заделываться по отдельности в одной контрольно-измерительной колонке или распределительной коробке с подходящими средствами, чтобы установить прямые или резистивные связи. Чтобы облегчить воспроизводимый мониторинг, распределительную коробку рекомендуется установить в удобном, безопасном месте вблизи трубопроводного стояка, там где имеется вертикальный доступ к морской воде для обследования с помощью спускаемого датчика .

#### 11.4 Вопросы производства - установки

Производство подающих ток анодов, подводных электрических соединителей и диэлектрических экранов должно осуществляться согласно утвержденной системе контроля качества. Приварка и припайка кабелей, и т.д. к трубопроводу должна выполняться в соответствии с общепризнанным методом.

#### 11.5 Механические и электрические проблемы

Системы с наложенным током являются более критическими в отношении механического повреждения, чем системы гальванических протекторных анодов, поскольку используют относительно мало анодов, каждый из которых подает достаточное количество защитного тока. Любой ущерб аноду или отрицательному обратному кабелю может серьезно ухудшить рабочие показатели системы.

Электрическое соединение между освинцованным кабелем анода и телом анода должно быть в водонепроницаемом и механически прочном исполнении.

Изоляционные материалы кабелей и соединений должны быть стойкими к воздействию хлора, углеводородов и других вредных химических веществ.

Необходимо следить за обеспечением соответствующей механической защиты для анода и соединительного кабеля. На подвесных системах отдельные аноды или анодные цепи рекомендуется оснастить лебедками или другими средствами возврата в качестве меры предотвращения повреждения во время сильных штормов или для планового контроля и технического обслуживания, поэтому рекомендуется оценить результирующую потерю защиты на эти периоды.

Можно применять следующие методы установки подающих ток анодов стационарного типа.

- Аноды можно устанавливать на дне океана на специально спроектированных бетонных салазках для устойчивости. Таким образом, сводится к минимуму возможность покрытия анодов илом или осадком.
- Аноды можно устанавливать на нижних концах защитных вертикальных стальных колонн или трубопроводов, соединенных с платформой. Колонны должны соединяться с надводными элементами платформы и поддерживаться дублирующими элементами ниже уровня воды. Аноды рекомендуется опускать по трубам (которые защищают освинцованные провода анода) и дать им опуститься ниже окончного фитинга в нижней части каждой колонны. Такой метод обеспечивает средства возврата анода или его замены с помощью анодного кабеля без участия водолазов. Обрастание морскими организмами или ржавчина могут затруднить или сделать невозможным возврат анода. Верхняя часть защитной колонны должна закрываться съёмным колпаком, чтобы предотвратить попадание мусора в колонну.
- Аноды плоской конфигурации, держатели изоляционного типа можно присоединить непосредственно к подводным элементам платформы или к вспомогательным элементам конструкции, таким как вертикальные трубы, которые можно извлечь для возврата анода без помощи водолазов.
- Аноды можно устанавливать на подводных элементах платформы, используя вынесенную стальную опору конструкции, присоединенную к элементам платформы. В этом случае для установки анодов требуется помощь водолазов.

Необходимо использовать простое прочное легко обслуживаемое оборудование внешнего тока. Система может быть основана на выпрямителях с ручным управлением постоянного тока или автоматическим контролем потенциала. Поскольку условия под водой редко изменяются, за исключением факторов, зависящих от погоды, обычно используют выпрямители с ручной регулировкой и масляным охлаждением и защитой от перегрузки постоянного или переменного тока.

Может пройти от нескольких месяцев до одного года или более между моментом укладки трубопровода и установлением постоянного уровня электрической энергии на платформе. Необходимо обеспечить адекватную защиту СР трубопровода на этот промежуточный период.

Необходимо оценить коррозию в результате мешающих токов от других трубопроводов, стальных конструкций и утяжеляющих бетонных конструкций (см., например, Приложение E).

## 12 Документация

### 12.1 Проектная, производственная и рабочая документация на производство монтажных работ

Документация на системы в заводском исполнении должна охватывать следующее:

- описание основы проекта катодной защиты со ссылкой на технические требования к проекту, коды и стандарты;
- расчеты площадей защищаемой поверхности и требуемого тока;
- итоговые расчеты проектируемого анода, включая массу анода, его размеры, сопротивление, количество анодов и рабочие показатели;
- чертежи, включая распределение анодов, детальную конструкцию анода, изготовление и монтаж.

Окончательная документация должна включать технические чертежи и перечень оборудования, актуализированный в соответствии со статусом исполнения, и сертификаты на изготовление и испытания анодов.

Для систем электрохимической защиты с наложенным током необходимо включить следующую дополнительную документацию:

- документацию на трансформаторы-преобразователи, включая мощность, управляющие и сигнализационные средства и чертежи электрических цепей;
- детальные чертежи анодов, электродов сравнения, подводных соединителей, заделки кабелей и диэлектрических экранов;
- методы крепления анодов, электродов сравнения и диэлектрических экранов, если применяются;
- документацию на рабочие показатели подающих ток анодов;
- чертежи, показывающие схему расположения анодов и электродов сравнения;
- детальные чертежи кабелей и электроизоляционных соединений, если применяются;
- чертежи защитных кабельных трубопроводов;
- документацию на систему мониторинга потенциалов.

Необходимо выпустить перечень материалов, используемых для установки системы СР, в котором перечислить установленные материалы в количествах, требуемых для сооружения системы катодной защиты.

Необходимо обеспечить описание строительных работ и способов монтажа системы СР.

## **12.2 Пусковые процедуры**

Для систем гальванических протекторных анодов пусковые процедуры обычно не применяются. Для систем электрохимической защиты с наложенным током пусковые процедуры должны включать:

- испытания изоляции трубопровода, там где имеется;
- активацию аппаратуры СР, если необходимо;
- измерение адекватной степени защиты (см. Приложение С);
- определение помех, если необходимо.

## **12.3 Инструкции по эксплуатации и техническому обслуживанию**

Для систем электрохимической защиты с наложенным током инструкции по эксплуатации и техническому обслуживанию должны включать следующее:

- описание системы и компонентов системы;
- отчет по пуско-наладочным работам;
- чертежи компонентов/систем заводского исполнения;
- документацию изготовителя/поставщика;
- критерии потенциалов для системы;
- план мониторинга, включающий процедуры, графики и оборудование для каждого типа средства мониторинга, установленного на трубопроводе;
- руководство по безопасности эксплуатации системы катодной защиты;
- процедуры технического обслуживания.

## **13 Эксплуатация, мониторинг и техническое обслуживание систем катодной защиты**

### **13.1 Общие положения**

Мониторинг и контроль должен осуществляться в соответствии с Приложением С. Подробное описание помех приведено в Приложении Е.

### **13.2 Планы мониторинга**

План мониторинга должен разрабатываться как часть проекта.

План мониторинга должен учитывать следующее:

- требуемые типы измерения, такие как измерение потенциалов морская вода - труба, потенциалов анодов, выхода тока с анода, визуальный контроль размеров анодов, испытание изоляции трубопровода, и т.д.;
- места, в которых производятся измерения;
- постоянные средства мониторинга;
- требуемые установки для мониторинга и оборудование для осуществления таких обследований;
- описание используемой техники мониторинга, например, мониторинг с помощью водолазов, ROV, буксируемых тросов, буксируемой рыбообразной капсулы, и т.д. Такое описание должно также включать методы точного определения местонахождения трубопровода и требования на этапе строительства, касающиеся сбора информации о навигации, для этой цели;
- периодичность выполнения измерений каждого типа.

Такой план должен быть частью инструкций по эксплуатации и техническому обслуживанию.

### 13.3 Ремонт

Если периодические обследования и проверки показали, что защита больше не удовлетворяет расчетным критериям, необходимо выполнить восстановительные работы. В таких случаях может потребоваться установка дополнительных анодов.

Анодные кабели можно присоединять к трубопроводу с помощью механических крепежных устройств или сваркой в соответствии с утвержденной технологией (например, сварка трением). Электрическое сопротивление таких соединений должно быть меньше 0,1 Ом.

**ПРИМЕЧАНИЕ** Механические крепежные устройства могут не обеспечить надежного электрического соединения для долгосрочного применения.

Последующий контроль должен включать проверки на всех модифицированных гальванических анодах, которые используют механический контакт с трубопроводом для неразрывности электрической цепи (например, измерение потенциала на аноде и на трубопроводе непосредственно вблизи точки присоединения).

## Приложение А (нормативное)

### Методы проектирования гальванических протекторных анодов катодной защиты

#### А.1 Введение

Приложение А охватывает методы детального проектирования систем СР на основе гальванических протекторных анодов.

#### А.2 Подразделение трубопровода

Трубопровод можно поделить на участки, например, места, где изменение глубины, рабочей температуры или условий заглубления может вызвать изменение расчетной плотности тока.

#### А.3 Расчет площади защищаемой поверхности

Для каждого участка трубопровода необходимо рассчитать площадь поверхности, которую необходимо обеспечить катодной защитой, по отдельности, там где окружающие условия приводят к различной потребности в защитном токе.

Компоненты, подлежащие электрическому соединению с трубопроводом, такие как морские стояки, уравнивательные петли, соединительные катушки, трубопроводная арматура, тройники, и т.д. должны быть включены в расчеты площади поверхности.

#### А.4 Расчет потребности в защитном токе

По размерам трубопровода и выбранного покрытия рассчитывают среднюю потребность в токе ( $I_{cm}$ ) и конечную потребность ( $I_{cf}$ ) по отдельности по формуле (А.1).

$$I_c = A_c \times f_c \times i_c \quad (\text{А.1})$$

где

- $I_c$  потребность в защитном токе для конкретного участка трубопровода, в амперах;
- $i_c$  плотность тока, в амперах на квадратный метр, выбранная для средних и конечных условий (см. 6.4);
- $f_c$  коэффициент разрушения покрытия, рассчитанный для средних и конечных условий (см. 6.5);
- $A_c$  общая площадь поверхности для конкретного участка трубопровода, в метрах квадратных.

## A.5 Выбор типа и размеров анода

Тип анода должен определяться возможностями изготовления, установки и эксплуатации. Форма анода определяет формулу сопротивления анода, которая будет использована, а центральный элемент анода определяет коэффициенты использования, которые должны быть приняты в дальнейших расчетах.

Для браслетных анодов трубопровода, которые устанавливаются на одном уровне с бетонным покрытием, толщина слоя бетонного покрытия должна быть принята во внимание при определении габаритных размеров анода.

Размеры анода должны быть достаточными, чтобы анод мог обеспечивать требуемый защитный ток до конца расчетного срока службы.

## A.6 Расчет массы анода

Общая масса нетто анода, требуемая для поддержания катодной защиты в течение расчетного срока службы, должна быть рассчитана для каждого участка трубопровода в соответствии с формулой (A.2).

$$m = I_{cm} \times t_{dl} \times \frac{8760}{u \times \varepsilon} \quad (\text{A.2})$$

где

$m$  — общая масса нетто анода, в килограммах, для конкретного участка трубопровода;

$I_{cm}$  — средняя потребность в токе, в амперах, для конкретного участка трубопровода;

$t_{dl}$  — расчетный срок службы, в годах (6.3);

$\varepsilon$  — электрохимическая емкость материала анода, в ампер-часах на килограмм (7.3);

$u$  — коэффициент использования (7.4).

## A.7 Расчет количества анодов

Для выбранного типа анодов необходимо определить количество анодов, их размеры и массу нетто, чтобы удовлетворить рассчитанную среднюю и конечную потребность в токе для защиты трубопровода. Конечные размеры и масса нетто отдельных анодов должны быть оптимизированы путем осуществления ряда повторяющихся расчетов, используя приведенные ниже формулы. Общая масса анодов задается формулой (A.3).

$$m = n \times m_a \quad (\text{A.3})$$

где

$n$  — количество анодов, которые надо установить на конкретном участке трубопровода;

$m$  — общая масса нетто анодов, в килограммах, для конкретного участка трубопровода [по формуле (A.2)];

$m_a$  — масса нетто отдельного анода, в килограммах.

Ограничение на количество анодов задается максимально допустимым пространством между анодами (7.1). Для браслетных анодов пространство между анодами устанавливается по фиксированному



числу монтажных стыков. Для анодов на салазках расстояние между анодами обычно устанавливается как расстояние, наиболее просто определяемое (например, рассчитанное расстояние может составлять 1187 м, а выбранное расстояние 1000 м).

Изготовители анодов обычно имеют формы стандартных размеров для трубопроводов конкретного размера. Хотя формула (A.3) верна, на практике  $n$  и  $m_a$  выбирают по формуле (A.4).

$$m \geq n \times m_a \tag{A.4}$$

Требуемый выход тока в конце срока службы отдельного анода,  $I_f$ , должен рассчитываться по формуле (A.5).

$$I_f = \frac{I_{cf}}{n} \tag{A.5}$$

где

$I_f$  требуемый выход тока в конце срока службы отдельного анода, в амперах;

$I_{cf}$  общая потребность в токе для защиты конкретного участка трубопровода в конце срока службы, в амперах;

$n$  количество анодов, которые необходимо установить на конкретном участке трубопровода.

Для данной массы и размера анода фактический выход тока отдельного анода в конце срока службы,  $I_{af}$ , рассчитывают по формуле (A.6).

$$I_{af} = \frac{E_c - E_a}{R_a} \tag{A.6}$$

где

$I_{af}$  фактический выход тока отдельного анода в конце срока службы, в амперах;

$E_a$  расчетный потенциал замкнутой цепи анода, в вольтах (см. Таблицу 4, 7.3);

$E_c$  расчетный защитный потенциал, в вольтах, минимальный отрицательный потенциал (см. таблицу 1, 6.2.2);

$R_a$  общее сопротивление цепи, в омах, которое считается эквивалентным сопротивлению анода, в омах (см. A.8).

Для сопротивления анода относительно морской воды в конце расчетного срока службы аноды должны расходоваться в такой степени, которая задается коэффициентом их использования. Приблизительные размеры анода, соответствующие такой степени расходования, должны использоваться в формулах сопротивления анода для  $R_a$  в (A.8) ниже по тексту.

Для анодов, разнесенных на очень значительные расстояния, рекомендуется учитывать сопротивление металла (см. A.10).

ПРИМЕЧАНИЕ  $E_c - E_a$  обычно рассматривается как расчетное напряжение возбуждения (в вольтах).

Чтобы обеспечить требуемый ток, фактический выход тока анода должен быть больше и равным требуемому выходу тока:

$$I_{af} \geq W I_f \tag{A.7}$$

Формулы (А.4) - (А.7) рекомендуется использовать для оптимизации количества, размеров, и массы отдельных анодов, которые будут применяться. Для анодов, выполняющих условия формул (А.4) и (А.7), можно выполнить экономическую оптимизацию с учетом общей массы анодов, стоимости изготовления анодов, и стоимости установки анодов.

## А.8 Формулы расчета сопротивления анода

Сопротивление анода, которое будет применяться для браслетных или установленных на салазках небольшой ширины анодов, рассчитывают по формулам (А.8) и (А.9) соответственно.

$$R_a = 0,315 \times \frac{\rho}{\sqrt{A}} \quad (\text{А.8})$$

$$R_a = \frac{\rho}{2 \times \pi \times L} \times \left( \ln \frac{4L}{r} - 1 \right) \quad (\text{А.9})$$

где

$R_a$  сопротивление анода, в омах, которое принимается эквивалентным общему сопротивлению цепи;

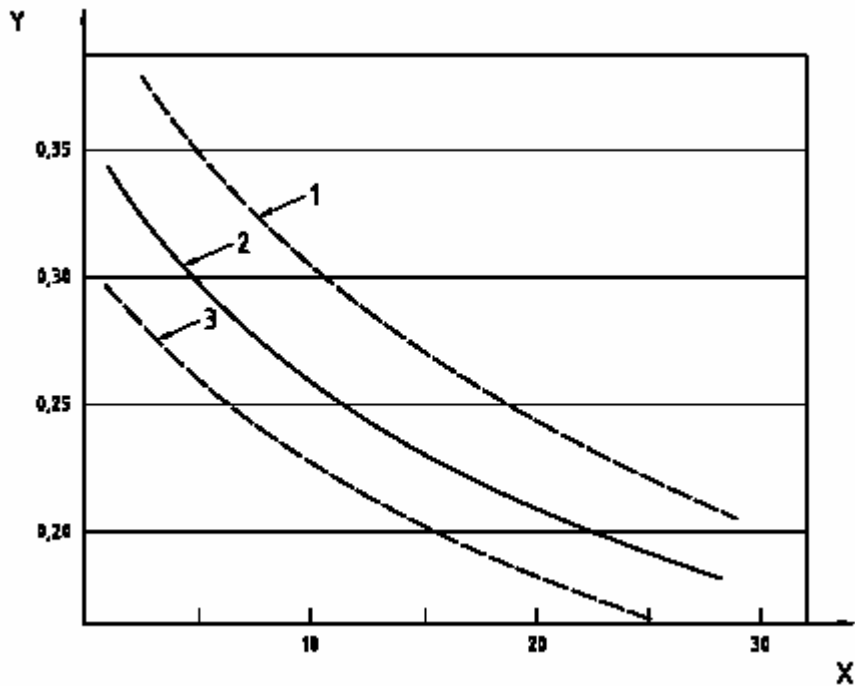
$\rho$  удельное электрическое сопротивление окружающей среды, в ом-метрах;

$L$  длина анода, в метрах;

$r$  радиус анода, в метрах;

$A$  площадь открытой поверхности анода, в метрах квадратных.

Типичные значения удельного электрического сопротивления морской воды показаны на Рисунке А.1.



**Обозначение**

- 1 соленость 3,0 %
- 2 соленость 3,5 %
- 3 соленость 4,0 %
- X температура, °C
- Y удельное электрическое сопротивление  $\rho$ , Ом·м

**Рисунок А.1 — Удельное электрическое сопротивление морской воды как функция температуры для солености от 3,0 % до 4,0 %**

Для анодов, открытых окружающей среде морского дна, удельное электрическое сопротивление рекомендуется оценить по измерениям или из имеющегося опыта. Если данные отсутствуют, рекомендуется использовать значение 1,5 Ом·м.

Для анодов нецилиндрической формы, радиус,  $r$  в формуле (А.9) необходимо рассчитать по формуле (А.10).

$$r = \frac{C}{2\pi} \tag{A.10}$$

где

- $r$  радиус анода, в метрах;
- $C$  периметр поперечного сечения, в метрах.

Другие формулы расчета сопротивления анода могут быть подтверждены теорией и/или испытаниями.

## А.9 Варианты проектирования для изменяющихся условий

Коэффициент разрушения покрытия,  $f_c$ , и электрохимическая емкость,  $\varepsilon$ , используются в типичных проектах катодной защиты, при допущении, что рабочие условия для трубопровода не будут изменяться в течение всего срока службы трубопровода. Если такое допущение неверно, то значения, используемые в формулах (А.1), (А.2) и (А.6) не будут константами, а будут меняться по мере изменения условий эксплуатации. Влияние меняющихся условий эксплуатации на проектирование катодной защиты можно оценить повторяющимися проектными расчетами в экстремальных точках ожидаемых условий. Если разность между двумя расчетами анода незначительна, рекомендуется использовать наиболее консервативный проект. Однако, если количество анодов, требуемых обоими проектами заметно различается, можно разработать проект, учитывающий все изменения рабочих условий.

**ПРИМЕР 1** Для трубопроводов, работающих в режиме высоких температур, проложенных за несколько лет до начала производства, потребность в катодном токе в течение предпускового периода будет меньше за счет меньшей температуры.

**ПРИМЕР 2** Для заглубленного напорного трубопровода, который может работать при повышенных рабочих температурах, по мере возрастания водопритока в процессе эксплуатационной наработки, потребность в катодном токе будет гораздо меньше в начальный период, чем впоследствии, в течение высокотемпературного периода. Поскольку рабочая температура анода может изменяться со временем, электрохимическая емкость может изменяться по мере возрастания температуры.

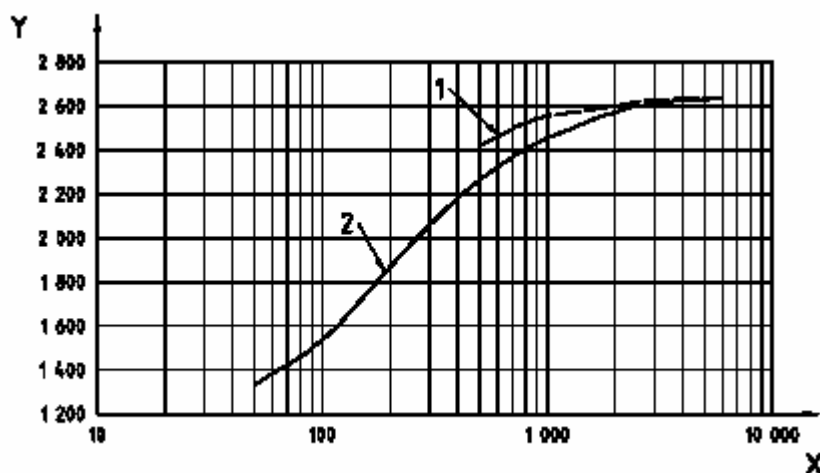
**ПРИМЕР 3** Для трубопровода с покрытием исключительного качества и потребностью в значительной плотности катодного тока, такого как глубоководный изолированный трубопровод, эта ситуация может потребовать такие небольшие количества тока, что плотность тока условного анодного браслета в проекте будет ниже 1000 мА/м<sup>2</sup>. Электрохимическая емкость алюминиевых сплавов не является постоянной величиной при плотностях анодного тока ниже 1000 мА/м<sup>2</sup>.

Электрохимическая емкость анода обычно сводится в таблицу при высоких и низких значениях температуры, если плотность анодного тока превышает 1000 мА/м<sup>2</sup>. Для обычных рабочих температур меньше 50 °С и плотностях анодного тока выше 1000 мА/м<sup>2</sup>, этим изменением можно пренебречь. Примеры 2 и 3, приведенные выше по тексту, описывают ситуации, которые выходят либо за рамки обычного рабочего диапазона анода, либо в которых рабочие условия будут изменяться в течение срока службы анода (в качестве примера см. Рисунок А.2, на котором приведены кривые предельной нагрузки по анодному току в зависимости от плотности анодного тока для двух конкретных температурных диапазонов). В этих ситуациях электрохимическая емкость анода,  $\varepsilon$ , будет изменяться в течение срока службы трубопровода.

Для того, чтобы учесть такие изменяющиеся рабочие условия, отдельное значение электрохимической емкости анода может не подойти в формулу (А.2). Если рассматривать изменяющуюся электрохимическую емкость, то это означает, что в таких ситуациях формулу (А.2) следует пересмотреть в соответствии с (А.11).

$$m = \frac{A_c \times 8760}{u} \int_t i_c \times f_c \times \frac{1}{\varepsilon} dt \quad (\text{А.11})$$

где  $i_c$ ,  $f_c$  и  $\varepsilon$  не являются постоянными значениями, а изменяются в течение расчетного срока службы трубопровода. Необходимо получить информацию о  $\varepsilon$  как функции температуры и/или плотности тока в соответствии с Приложением В. Обычно такие расчеты выполняют как численное интегрирование, используя сводную электронную таблицу, которая позволяет рассчитать ежегодное значение для  $m$  и затем суммировать его на срок службы трубопровода.



#### Обозначение

- 1  $T = 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$   
 2  $T = \text{от } 25 \text{ }^{\circ}\text{C до } 28 \text{ }^{\circ}\text{C}$

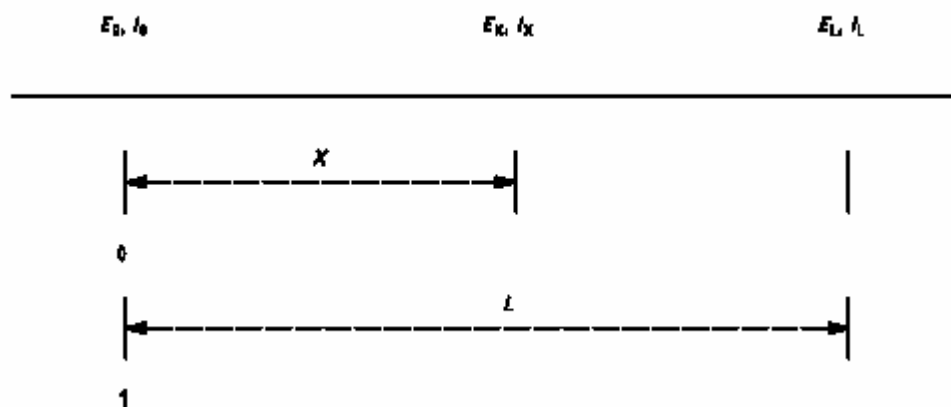
X плотность анодного тока,  $\text{mA}/\text{m}^2$

Y допустимая нагрузка по анодному току,  $\text{A}\cdot\text{ч}/\text{кг}$

**Рисунок А.2 — Рабочие показатели алюминиевого анода в морской воде при низких плотностях тока**

### А.10 Ослабление защиты

После определения количества, размера анодов и расстояний между ними по формулам, приведенным выше, можно выполнить приблизительную проверку пригодности распределения анодов, используя формулы ослабления. По этим формулам можно получить индикацию распределения потенциала труба-электролит и тока, текущего на трубопровод, в зависимости от расстояния между точками дренажа (анодами), используя схему, показанную на Рисунке А.3.

**Обозначение**

1 точка дренажа

**Рисунок А.3 — Определение точек дренажа**

Уравнения ослабления:

$$E_x = E_0 \times \cosh \alpha x - R_K \times I_0 \times \sinh \alpha x \quad (\text{A.12})$$

$$E_0 = E_x \times \cosh \alpha x - R_K \times I_x \times \sinh \alpha x \quad (\text{A.13})$$

$$I_x = I_0 \times \cosh \alpha x - \frac{E_0}{R_K} \times \sinh \alpha x \quad (\text{A.14})$$

$$I_0 = I_x \times \cosh \alpha x - \frac{E_x}{R_K} \times \sinh \alpha x \quad (\text{A.15})$$

Для типичного трубопровода с многочисленными точками дренажа (анодами) с одинаковым расстоянием между ними равным  $2L$ , потенциал,  $E_x$ , и ток,  $I_x$ , на любом расстоянии  $x$  также задается формулами:

$$E_x = E_0 \times \frac{\cosh \alpha (L - x)}{\cosh \alpha L} \quad (\text{A.16})$$

$$I_x = I_0 \times \frac{\sinh \alpha (L - x)}{\sinh \alpha L} \quad (\text{A.17})$$

где

 $E_0$  потенциал труба-электролит в точке дренажа (анод), в вольтах; $E_x$  потенциал труба-электролит на расстоянии  $x$  от точки дренажа, в вольтах; $E_L$  потенциал труба-электролит в средней точке  $L$  между соседними анодами, в вольтах; $I_0$  ток, истекающий на трубу в точке дренажа (анод), в амперах; $I_x$  ток, истекающий на трубу на расстоянии  $x$  от точки дренажа, в амперах;

$I_L$  ток, истекающий на трубу в средней точке L между соседними анодами, в амперах;

$L$  половина расстояния между точками дренажа, в метрах;

$R_K$  характеристическое сопротивление участка трубопровода, в омах, равное  $\sqrt{R_L \cdot R_t}$ ;

$R_L$  линейное электрическое сопротивление участка трубопровода, в омах на метр, которое задается формулой:  $R_L = \frac{\rho}{A_w}$ ;

$R_t$  утечка или поперечное сопротивление, в ом-метрах, равная  $\frac{R_0}{\pi D_o}$ ;

$R_0$  сопротивление изоляции труба-электролит, в ом-метрах квадратных;

$\rho$  удельное электрическое сопротивление материала трубопровода, в ом-метрах;

$D_o$  наружный диаметр трубопровода, в метрах;

$A_w$  площадь поперечного сечения стенки трубы, в квадратных метрах;

$\alpha$  коэффициент ослабления для участка трубопровода, в обратных методах, равный  $\sqrt{\frac{R_L}{R_t}}$ .

Значение для сопротивления изоляции,  $R_0$ , рекомендуется выбирать на основе практического опыта с учетом следующих факторов:

- тип покрытия;
- условия воздействия, такие как со стороны морской воды или донных осадков;
- расчетный ресурс трубопровода, и ожидаемое постепенное уменьшение сопротивления покрытия в течение расчетного срока службы;
- метод укладки трубопровода и ожидаемая степень повреждения покрытия.

$R_L$ , линейное электрическое сопротивление участка трубопровода, можно рассчитать по уравнению (A.18):

$$R_L = 4L \times \frac{\rho}{\pi(D_o - D_i)} \quad (A.18)$$

где

$D_o$  наружный диаметр трубопровода;

$D_i$  внутренний диаметр трубопровода;

$L$  половина расстояния между точками дренажа, в метрах.

Альтернативно, значения электрического сопротивления для труб стандартных размеров можно получить из таблиц в литературе [3].

## Приложение В (нормативное)

### Определение рабочих характеристик материалов для производства гальванических анодов

#### В.1 Общие положения

Данное приложение обеспечивает методику определения рабочих характеристик гальванических анодов в лабораторном окружении.

Рабочие характеристики материалов, используемых для гальванических анодов, можно также подтвердить полевыми испытаниями, либо используя данные мониторинга анодов или специальных полевых испытаний полноразмерных анодов.

Такая методика также применяется в специальных условиях окружающей среды, например, горячей морской воде или осадочных отложениях.

Определение рабочих характеристик должно осуществляться для каждого нового номинального состава материала анода и/или отливки, или в случае возникновения потребности в подтверждении рабочих характеристик.

#### В.2 Отбор проб и подготовка образцов для испытания

От подлежащего испытаниям материала необходимо отобрать образцы, либо непосредственно от изготовленных анодов, либо от специальных отливок-заготовок, для которых используется то же самое сырье и те же самые методы плавки, как в обычном производстве.

Необходимо подготовить по два образца для испытания от материалов, представляющих не менее пяти плавов. Химический состав образцов материала для испытания должен быть представительным для обычного производства, т.е. содержание легирующих и примесных элементов должно отражать пределы, установленные изготовителем для состава данной продукции.

Из подлежащего испытаниям материала необходимо выточить образцы цилиндрической формы минимальным диаметром 20 мм и минимальной длиной 80 мм.

В образце необходимо просверлить сквозное отверстие диаметром приблизительно 2 мм, с резьбой на одном конце и присоединить к титановому опорному стержню. Опорный стержень должен иметь электроизоляционное покрытие на всех поверхностях, подвергающихся воздействию испытательного раствора.

Перед экспонированием испытуемые образцы необходимо сполоснуть водопроводной водой и высушить с применением этанола или аналогичного растворителя. После просушивания образцы необходимо взвесить с точностью до 0,1 мг.

После установки опорного стержня концы образца необходимо покрыть герметизирующим компаундом, таким как полихлоропропеновым клеем или кремнийорганический (силиконовый) каучук.

#### В.3 Испытательное оборудование и метод испытания

Испытательной средой должна быть чистая морская вода (или осадочные отложения) соленостью  $\geq 3,0$  % (по массе). Температура подлежит контролю в пределах  $\pm 3$  °C от средней ожидаемой рабочей



температуры анода. Температуру и соленость необходимо измерять и регистрировать не реже одного раза в неделю.

Испытательные камеры необходимо конструировать в соответствии с описанием Приложения D, причем необходимо обеспечить постоянную смену морской воды в камере со скоростью не менее 1 л/мин. Морская вода должна постоянно продуваться воздухом.

Испытание необходимо сопровождать либо гальваностатическим контролем, либо проводить его в автономном режиме.

Продолжительность испытания должна составлять не менее 12 месяцев.

При гальваностатическом контроле плотность тока анода должна составлять 1 мА/см<sup>2</sup>, исходя из начальной площади подвергаемой воздействию поверхности образца. Более полные данные можно получить при расширенном испытании в диапазоне от 0,4 мА/см<sup>2</sup> до 4 мА/см<sup>2</sup>.

Суммарный ток можно определить в соответствии с Приложением D, но также требуется вручную снимать показания не реже одного раза в неделю.

Регистрация потенциалов анода (см. Приложение D) должна выполняться раз в день, 5 дней в неделю в течение первых 2 недель испытания, и не реже одного раза в неделю в последующем.

При испытании в автономном режиме участки анода и катода необходимо соединить через прецизионное сопротивление 10 Ом, чтобы ограничить плотность тока анода. Можно использовать более высокие или более низкие значения сопротивления цепи (например, от 2 Ом до 20 Ом), если требуется более широкий диапазон данных. Участок поверхности катода должен не менее чем в 20 раз превышать по площади открытую поверхность анода.

Плотность анодного тока должна рассчитываться по падению напряжения в цепи с сопротивлением равным 10 Ом, используя вольтметр с высоким импедансом ( $\geq 10^7$  Ом).

Измерение тока и потенциала анода должно производиться через регулярные интервалы. Для испытаний в автономном режиме потенциалы стального катода также необходимо регистрировать одновременно с потенциалом и током анода.

Как для гальваностатических, так и для автономных методов испытаний электрохимическая емкость должна рассчитываться в соответствии с Приложением D.

## В.4 Документация

Необходимо составить протокол испытания, включающий следующую информацию:

- h) данные плавки и литья испытуемого материала, включая содержание легирующих и примесных элементов, влияющих на рабочие характеристики анода;
- i) номинальный состав и гарантированные пределы по составу;
- j) подготовку образца для испытания, испытательного оборудования и процедуры;
- k) данные по испытательной среде, включая температуру и соленость морской воды;
- l) потенциалы анода, представленные графически как функция времени;
- m) для испытаний в автономном режиме, рассчитанную плотность анодного тока и потенциал анода в графической форме;
- n) фотографии образцов анода до и после очистки;
- o) электрохимическую емкость, в ампер-часах на килограмм.

## Приложение С (нормативное)

### Мониторинг систем катодной защиты для морских трубопроводов

#### С.1 Введение

Для мониторинга эффективности катодной защиты морского трубопровода можно применить ряд методов, но в местных регламентах обычно устанавливаются минимальные требования, которые необходимо выполнять. Уровень мониторинга должен быть соизмерим с критичностью и состоянием трубопровода.

Системы гальванических протекторных анодов на ранних этапах эксплуатации не нуждаются в обследовании, если

- проект катодной защиты и характеристики анодов соответствуют требованиям данной части ISO 15589,
- обследование после установки системы выполнено и не обнаружено заметных недостатков (см. С.6.1),
- повреждение покрытия трубопровода составляет меньше приведенных в Таблице 3 значений,
- отсутствует влияние других трубопроводов и сооружений, и
- оценка риска системы катодной защиты выполнена с удовлетворительными результатами.

Если предполагается оставить трубопровод в эксплуатации по истечении исходного расчетного срока службы, необходимо исследовать потенциалы за последние пять лет расчетного срока службы системы катодной защиты, см. С.6.2.

#### С.2 Мониторинг потенциалов верхней части

Измерение потенциалов, приложенных к трубопроводным стоякам можно осуществить с помощью простого портативного электрода сравнения и стандартного вольтметра. Отрицательный полюс вольтметра должен соединяться со стояком выше уровня воды, а положительный полюс с электродом сравнения. Электрод сравнения необходимо опускать в воду вдоль стояка и, чтобы обеспечить точность измерения, как можно ближе к нему, и регистрировать потенциалы на различной глубине, определенной маркерами, привязанными к кабелю электрода сравнения. Движение воды и потеря визуального контакта с электродом сравнения уменьшает точность измерения. Однако точность можно восстановить, если воспользоваться помощью водолаза для обеспечения надлежащего позиционирования электрода сравнения. Если используются водолазы или ROV для снятия измерений потенциалов, то применяют специально сконструированные контактные датчики (см. С.4.3).

На потенциал может повлиять главная конструкция, если трубопровод находится с ней в электрическом контакте, в случае чего необходимо выполнить проверку, находится ли трубопроводный стояк в контакте с главной конструкцией, прежде чем предпринимать какое-либо обследование катодной защиты. Однако, потенциал стояка не обязательно является хорошим показателем профиля потенциалов вдоль всего трубопровода в целом.

Потенциал на коротких трубопроводах, проходящих между двумя платформами, можно смоделировать с помощью уравнений затухания и значений потенциалов в самом неблагоприятном случае, предсказанных по потенциалам, измеренным в крайних точках. Длина таких трубопроводов зависит от

толщины стенки и диаметра трубы, состояния наружного покрытия, рабочей температуры, степени заглубления, потенциалов конечных точек, расположения анода, подающего ток, состояния гальванических анодов и расстояния между ними, и эффективно ли изолирован трубопровод от главной конструкции(й). Измерения потенциалов должно осуществляться через определенные интервалы вдоль трубопровода для подтверждения надежности модели.

### С.3 Визуальный контроль

Визуальный контроль незаглубленных участков трубопровода следует осуществлять по мере необходимости, чтобы проверить состояние трубопровода, покрытия и системы катодной защиты. Тип подлежащих сбору данных в процессе контроля должен устанавливаться до начала контроля в соответствии с нуждами трубопровода.

**ПРИМЕЧАНИЕ** Прямое визуальное обследование водолазами или камерами ROV может обнаружить недостатки системы катодной защиты, такие как повреждение или потерю анодов, повреждение кабелей, избыточное расходование анода. Видимое коррозионное повреждение или ржавчина может быть другим признаком недостатка защиты. Низкое потребление анода может указывать на пассивацию, а значительные известковые отложения вблизи анодов могут указывать на избыточную защиту.

Поверхности гальванических анодов рекомендуется очищать перед физическими измерениями размеров анодов.

### С.4 Измерения потенциалов

#### С.4.1 Общие положения

Измерения потенциалов можно выполнить для оценки рабочих показателей системы катодной защиты.

Цель измерения потенциалов заключается в определении фактического потенциала на границе раздела труба-морская вода по отношению к электроду сравнения, так чтобы можно было оценить степень защиты. Критерии приемки для различных электродов сравнения представлены в С.4.2.

Обычно затруднительно измерить потенциалы труба-морская вода напрямую, ввиду отсутствия участков непокрытой стали. В таких случаях следует предусмотреть опосредованные измерения потенциалов.

Измерения потенциалов рекомендуется осуществлять у гальванических анодов, чтобы получить информацию об их рабочих характеристиках.

Если катодная защита осуществляется с использованием систем электрохимической защиты с наложенным током, потенциал измеряется с примененным защитным током. Полученное значение включает падение напряжения через границу раздела сталь/вода, а также падение напряжения в морской воде между электродом сравнения и трубой.

В большинстве случаев, за исключением мест вблизи подающих ток анодов, падение напряжения в морской воде можно принять равным нулю.

Испытательное оборудование требует постоянного ухода и периодической поверки. Электроды сравнения должны проходить проверку на загрязнение и плановую поверку по стандартному лабораторному электроду сравнения.

Электроды сравнения должны позиционироваться как можно ближе к трубопроводу. Это наиболее важно для измерений потенциалов анодов, имеющих значительное падение напряжения в морской воде вблизи анода. В таких случаях активное (омическое) падение напряжения должно компенсироваться при интерпретации измеренного потенциала анода в пересчете на истинный потенциал анода.

Потенциалы анодов должны быть более отрицательными, чем расчетный потенциал анода в замкнутой цепи. Более положительные показания указывают на избыточную нагрузку по току или пассивацию.

Необходимо соблюдать правила безопасности работы с электричеством при работе водолазов на трубе, защищаемой системой электрохимической защиты с наложенным током.

### С.4.2 Электроды сравнения

Хлорсеребряный (Ag/AgCl/морская вода) электрод является наиболее часто используемым электродом в морских условиях, особенно совместно с портативным оборудованием мониторинга. Для устройств мониторинга потенциалов, чтобы получить взаимную калибровку в оперативном режиме, рекомендуется рассмотреть использование двух электродов в сборе.

Другие электроды сравнения, которые можно использовать вместо хлорсеребряных (Ag/AgCl/морская вода) электродов сравнения, описаны ниже, с соответствующими защитными потенциалами для углеродистой стали составляет  $-0,80$  В против критерия Ag/AgCl/морская вода.

- Насыщенный медно-сульфатный электрод сравнения (CSE): Минимальный отрицательный потенциал, измеренный по этому электроду, должен быть  $-0,85$  В. Этот электрод чаще всего используется для определения степени защиты на наземных трубопроводах и является недостаточно устойчивым в морской воде в течение длительного срока погружения в эту среду. Не рекомендуется использовать этот электрод в морской воде.
- Цинковый электрод высокой чистоты: Марка “High Purity” (ASTM B 418 Тип II) или “US Mil Spec” (Mil—A-18001K) имеет умеренно устойчивый потенциал в морской воде и иногда используется в качестве электрода сравнения. Однако цинковые электроды менее точны, чем хлорсеребряные электроды сравнения, и чаще используются для задач постоянного мониторинга. Для постоянных установок небольшой анодный ток следует пропускать через поверхность, чтобы сохранить его чистым и активным. Минимальный отрицательный потенциал для эффективной катодной защиты углеродистой стали по отношению к электроду сравнения цинк/морская вода составляет  $+0,25$  В.
- Насыщенный каломельный электрод сравнения (SCE): Сюда входит ртуть, хлорид ртути в насыщенном растворе хлорида калия. Наименьший отрицательный потенциал для эффективной катодной защиты низколегированной стали составляет  $-0,78$  В. Такой электрод обычно не используют для обследований на месте, он больше пригоден для лабораторных исследований.
- Насыщенный хлорсеребряный (Ag/AgCl/насыщенный KCl) электрод: Этот электрод аналогичен хлорсеребряному (серебро/хлорид серебра/морская вода) электроду, за исключением того, что данный хлорсеребряный электрод погружен в насыщенный раствор хлорида калия, и на потенциал его не влияет соленость (или удельное электрическое сопротивление) морской воды. Наименьший отрицательный потенциал для эффективной катодной защиты низколегированной стали с помощью этого электрода составляет  $-0,76$  В. Как и в случае электрода SCE, насыщенный хлорсеребряный электрод больше пригоден для лабораторных исследований.

### С.4.3 Приборы прямого контакта

#### С.4.3.1 Контактные датчики

Такие датчики включают электрод сравнения в прочном корпусе с металлическим наконечником для осуществления непосредственного контакта с трубопроводом. Они предназначены для исследований потенциалов, проводимых с участием водолазов или ROV. Их можно использовать в режиме близости, аналогично мониторингу верхней части трубопровода (см. С.2), но они имеют дополнительную способность контактировать с конструкцией локально посредством металлического наконечника. Это важно, если трубопровод изолирован и невозможно заземление верхней его части через вольтметр.

Измерение потенциалов можно осуществить над водой с помощью стандартного вольтметра, соединенного с электродом сравнения проводом, и используя второй провод для соединения

металлического наконечника, а не надводного участка вертикального трубопровода, с отрицательным полюсом вольтметра.

Измерение потенциалов можно также выполнить с помощью автономных датчиков, которые аналогичны датчикам с контактным наконечником, но в дополнение к электроду сравнения имеют интегральный вольтметр и не требуют проводов для соединения с поверхностью. Такой датчик может держать водолаз, или его можно закрепить на ROV, и работать только в режиме заземления с контактным наконечником. Показания выводятся на дисплей под водой и регистрируются либо визуально, на видеопленке, либо водолаз сообщает эти данные по голосовой связи на расположенный на поверхности регистратор данных.

#### **C.4.3.2 Закрепленные/стационарные системы**

Критические трубопроводы, такие как работающие при высоких температурах, недоступные трубопроводные стояки или участки трубопроводов, расположенные в чувствительных средах, можно оснастить стационарными средствами мониторинга катодной защиты. Для таких трубопроводов можно использовать ряд приборов, таких как стационарные электроды сравнения, контрольные пластинки для определения плотности тока (из стали без покрытия или с покрытием), и шунты мониторинга анодного тока.

Средства мониторинга рекомендуется соединить с устройством, расположенным в верхней части трубопровода, таким как регистратор данных с помощью кабеля, а некоторые версии приборов можно запрашивать по акустической связи. Приборы с акустической связью требуют портативных батарейных источников питания, и диалог с ними является трудоемким процессом. Срок службы батареи, стоимость и практичность следует рассмотреть в отношении приборов с акустической связью.

Распределение таких приборов мониторинга по всей длине трубопровода непрактично, поэтому стационарные средства мониторинга более удобны для вертикальных трубопроводов или на участках трубопровода в пределах коротких расстояний от платформы или береговой линии.

### **C.5 Измерения анодного тока**

Измерение плотности тока и градиента электрического поля можно использовать для подтверждения того, что гальванические аноды на незаглубленных трубопроводах остаются активными. Для заглубленных трубопроводов, размещение анодов может быть более ограниченным, и следует рассмотреть возможность слежения, глубину укладки трубопровода и выход анодного тока. Расчет выхода анодного тока можно произвести, если возможны высокоточные измерения величины и направления электрического поля или тока.

**ПРИМЕЧАНИЕ** Существует несколько способов для оперативного измерения выхода тока гальванического анода. Такие данные применяются в расчетах оставшегося срока службы анода и могут быть использованы для оптимизации проектирования в будущем.

### **C.6 Обследования**

#### **C.6.1 Общие положения**

Визуальное подводное обследование для магистральных линий и других критических трубопроводов необходимо выполнять в процессе или после установки, чтобы определить возможные повреждения системы катодной защиты. Такое обследование может включать определение потенциала трубопровода по его длине, выход тока гальванических анодов по измерениям градиента электрического поля, и оценку состояния покрытия. Если изучение окружающих условий системы гальванических анодов показывает, что система контроля коррозии работает в соответствии с расчетами, может не потребоваться выполнять следующее обследование катодной защиты на трубопроводе в течение целого ряда лет.

Результаты предшествующих проверок следует использовать для планирования будущих программ контроля. Необходимо сконцентрировать внимание на участках, где во время предыдущих обследований обнаружена недостаточная степень защиты, и на участках, где выявлено повреждение анодов и/или покрытия.

Локальные обследования или обследования на всей протяженности трубопровода должны выполняться более часто, там где известно или подозревается недостаточная степень катодной защиты в результате следующего

- известных недостатков в исходном проекте катодной защиты,
- повреждения трубопровода или системы катодной защиты,
- повреждения, нанесенного в результате деятельности третьей стороны,
- трубопровод, срок службы катодной защиты которого подходит к концу, если эксплуатация трубопровода будет продолжена после исходного расчетного срока службы.

Там где полные регулярные обследования невозможны ввиду недоступности, обследования можно альтернативно осуществлять на основе взятия замеров на выборочной основе.

Заглубленные трубопроводы, в общем, сложно обследовать, поскольку визуальный контроль состояния покрытия и повреждения средств катодной защиты, в частности анодов, невозможен. Рекомендуется учесть этот факт при оценке рисков.

## C.6.2 Методы

Можно использовать различные методы обследования, включая измерение потенциалов при непосредственном контакте с трубопроводом или измерения градиента электрического поля с помощью двух или нескольких электродов сравнения, расположенных на фиксированном расстоянии друг от друга и от трубопровода.

Для наиболее полных и точных измерений потенциалов привлекают водолазов или ROV, которые плывут вдоль трубопровода и снимают точечные показания через определенные интервалы с помощью датчика катодной защиты с контактным наконечником и встроенным электродом сравнения. Их часто называют показаниями-«уколы». Можно использовать модели ослабления для прогнозирования распределения потенциалов между последовательными точками измерения.

**ПРИМЕЧАНИЕ** Для трубопроводов с утяжеляющим бетонным покрытием, там где покрытие находится в хорошем состоянии, этот способ может быть очень ограниченным. Показания-«уколы», снятые на гальванических анодах, предоставляют только очень ограниченную информацию об эффективности системы катодной защиты.

Один из методов обследования, который преодолевает проблему невозможности прямого контакта с трубой, использует группы фиксированных электродов сравнения, расположенных на известном расстоянии от трубопровода. Эти группы должны устанавливаться на ROV плюс два или несколько дополнительных электродов сравнения располагают на измеряемом расстоянии друг от друга. ROV должен перемещаться вдоль трубопровода на фиксированном расстоянии от него и измерять градиенты электрического поля вокруг трубы, возникающие за счет тока катодной защиты в морской воде. С помощью компьютерной программы эти измерения можно преобразовывать с потенциалы труба-морская вода и определить профиль потенциалов на протяжении трубопровода. Измерение градиента электрического поля можно использовать для оценки уровней плотности тока на анодах и трубопроводе, и для выявления дефектов покрытия.

Менее точный метод обследования использует погруженный под воду датчик или «рыбу» (рыбообразную капсулу), которую тянет вдоль трубопровода судно. По этому методу электрический контакт с трубопроводом создается посредством гибкого троса, соединенного с трубопроводом при выходе на берег или с вертикальным трубопроводом. Судно на поверхности должно следовать вдоль маршрута трубопровода и тянуть «рыбу» за собой. Потенциал трубопровода должен измеряться непрерывно по отношению к электроду сравнения, установленному на «рыбе». Точность измерения

потенциала определяется положением «рыбы» по отношению к трубопроводу, поэтому преимущества здесь ограничены.

Если водолазы или ROV выполняют другие работы на трубопроводе, такие как выполнение соединения двух линий трубопровода, проверка пролетов, выполнение ремонтных работ или повторная засыпка, следует использовать эту возможность для сбора данных о катодной защите.

Если изолированная система трубопроводов заводняется, катодная защита не может быть очень эффективной. Рекомендуется рассмотреть дополнительные средства оценки возможной коррозии трубопровода (например, интеллектуальные скребки) и соответственно разработать план обследования.

### **С.7 Контроль компонентов систем электрохимической защиты с наложенным током**

Источники внешнего тока подлежат проверке 6 раз в течение календарного года через интервалы, не превышающие 2,5 месяца. Напряжение и выход тока должны быть измерены и показания близки к значениям, полученным по завершении пусконаладочных работ.

Переключатели обратного тока, диоды и интерференционные связи, отказ которых подвергают риску катодную защиту, подлежат проверке на надлежащее функционирование 6 раз в течение календарного года через интервалы, не превышающие 2,5 месяца.

Мощности системы электрохимической защиты с наложенным током должны проверяться один раз за календарный год через интервалы, не превышающие 15 месяцев, чтобы свести к минимуму отказы в процессе эксплуатации. Такие проверки могут включать проверку на электрический пробой, заземляющих соединений, точность измерительных приборов, проверку эффективности и сопротивления цепи.

Эффективность электроизоляционных приспособлений и соединений, обеспечивающих неразрывность цепи, должна оцениваться в течение таких регулярных проверок.

### **С.8 Безопасность**

Необходимо выполнять соответствующие предписанные регламенты по безопасности при работе водолазов на трубопроводах, защищаемых системами электрохимической защиты с наложенным током. Любая система катодной защиты представляет собой опасность, но конкретные опасности, связанные с системами электрохимической защиты с наложенным током, представляют собой физический ущерб, удар электрическим током, опасность возгорания, токсичность и опасности, связанные с давлением-энергетикой.

В процессе водолазных работ, непосредственно не связанных с системами катодной защиты, и водолазных проверок, выполняемых вблизи подающих ток анодов, подача постоянного тока анодами должна быть отключена. Однако проверку катодной защиты водолазами можно выполнять без отключения системы с наложенным током, при условии соблюдения всех соответствующих правил и мер предосторожности.

### **С.9 Документация**

Отчеты о проверке должны включать методы измерения, места выполнения измерения, результаты и данные от установленных систем мониторинга в оперативном режиме.

Исторические данные и данные оперативного мониторинга должны храниться таким образом, чтобы стали понятны долгосрочные тенденции и их можно было анализировать. Этого можно достичь с помощью специальных компьютерных программ.

Отчет об обследовании должен быть представлен после обработки и расшифровки данных, и может включать следующее:

- описание выполненных операций;
- технические характеристики и рабочие параметры используемого для мониторинга оборудования;
- все коррективы, внесенные в записи;
- построенные графики потенциала трубы вдоль трубопровода;
- измеренные градиенты электрического поля (если требуется);
- измеренные значения удельного электрического сопротивления (если требуется);
- оригинальные записи на бумаге и на магнитном носителе или на оптической среде;
- Сопоставление зарегистрированных данных с данными, зарегистрированными в предыдущих обследованиях.



## Приложение D (информативное)

### Лабораторные испытания гальванических анодов в рамках контроля качества

#### D.1 Общие положения

Данную лабораторную методику рекомендуется использовать для контроля качества алюминиевых и цинковых материалов в процессе производства гальванических анодов. Результаты не следует использовать при проектировании катодной защиты, поскольку электрохимические данные, полученные в краткосрочных испытаниях, могут оказаться нерепрезентативными для долгосрочных рабочих характеристик.

Альтернативную методику испытания можно найти в документе NACE TM0190 [8].

#### D.2 Отбор образцов и подготовка образцов для испытания

Если нет иных указаний, контроль электрохимических параметров (анодный потенциал и электрохимическая емкость) должен осуществляться для каждых 15 тонн произведенных анодов.

Образцы для испытания можно отрезать от готового анода от каждой плавки или отливки отдельно.

**ПРИМЕЧАНИЕ** Считается, что литые образцы дают более репрезентативные результаты.

Образцы для испытания должны иметь цилиндрическую форму диаметром  $10 \text{ мм} \pm 1 \text{ мм}$  и длину  $50 \text{ мм} \pm 5 \text{ мм}$ . В процессе подготовки и испытания на образце должна сохраняться идентификационная маркировка.

Необходимо просверлить в образце сквозное отверстие диаметром приблизительно 2 мм с резьбой на одном конце и соединить с титановым поддерживающим стержнем, который должен иметь электроизоляционное покрытие на всех поверхностях, соприкасающихся с испытательным раствором.

Перед экспонированием испытуемые образцы необходимо сполоснуть водопроводной водой, высушить с помощью этанола или аналогичного растворителя и взвесить с точностью до 0,1 мг.

После установки опорного стержня концы образца необходимо покрыть подходящим герметизирующим компаундом, таким как полихлоропропеновый клей или силиконовый каучук.

#### D.3 Оборудование и метод испытания

В качестве испытательного раствора должна использоваться натуральная или искусственная морская вода в соответствии с требованиями ASTM D 1141.

Необходимо использовать не менее 10 литров испытательного раствора на образец. Испытательный раствор необходимо постоянно продувать воздухом, поддерживаемым при температуре  $20 \text{ °C} \pm 3 \text{ °C}$ , и не менять на протяжении всего испытания.

Каждый образец должен быть подвешен по центру цилиндрического стального без покрытия контейнера или сегмента трубы, смачиваемая поверхность которого по площади должна составлять не менее 20-кратной площади образца анода, т.е. минимум  $400 \text{ см}^2$ .

Гальваностатический контроль должен осуществляться с помощью источника постоянного тока. Образец и стальной катод должны соединяться с положительным и отрицательным полюсами соответственно. Несколько испытательных камер можно подсоединить последовательно к одному источнику постоянного тока.

Интегратор тока медного кулометра или электронный прибор, обеспечивающий определение общего вытекающего тока с точностью  $\pm 2\%$ , необходимо включить в цепь, содержащую одну или несколько испытательных камер, соединенных последовательно.

Ток через испытательные камеры должен быть отрегулирован таким образом, чтобы обеспечить плотность анодного тока в соответствии с начальной экспонируемой площадью поверхности образца по следующей схеме:

- День 1:  $1,5 \text{ mA/cm}^2$
- День 2:  $0,4 \text{ mA/cm}^2$
- День 3:  $4,0 \text{ mA/cm}^2$
- День 4:  $1,5 \text{ mA/cm}^2$

Плотность тока подлежит контролю с точностью  $\pm 0,1 \text{ mA/cm}^2$  и должна поддерживаться в течение периода  $24 \text{ ч} \pm 1 \text{ ч}$  при общей продолжительности испытания  $96 \text{ ч} \pm 4 \text{ ч}$ .

В конце каждого этапа испытания необходимо замерить потенциал анода в трех позициях на каждый образец. Должен применяться стандартный электрод сравнения с электролитическим мостиком (например, капилляр Лугина (Luggin)). Кончик мостика должен располагаться в пределах 1 мм от поверхности образца, который не допускается очищать от продуктов коррозии до начала измерений.

По завершении всего испытательного периода образцы необходимо очистить от продуктов коррозии. Алюминиевые образцы должны очищаться в течение 10 мин при температуре  $80^\circ\text{C}$  в растворе, содержащем 20 г триоксида хрома и 30 мл концентрированной фосфорной кислоты на литр воды. Цинковые образцы необходимо погрузить на 2 ч в насыщенный раствор хлорида аммония при окружающей температуре. Затем испытуемые образцы споласкивают водопроводной водой, сушат с этанолом или эквивалентным растворителем и взвешивают с точностью до 0,1 мг. Электрохимическая емкость анода должна быть рассчитана с помощью формулы (D.1):

$$\varepsilon = Q/\Delta m \quad (\text{D.1})$$

где

$\varepsilon$  электрохимическая емкость, в ампер-часах на килограмм;

$Q$  полный электрический заряд, в ампер-часах;

$\Delta m$  убыль массы испытуемого образца, в килограммах.

#### D.4 Критерии приемки и повторные испытания

В случае невыполнения предъявляемых требований можно выполнить повторные испытания на трех образцах от каждой плавки, которая не соответствует требованиям. Несоответствие требованиям хотя бы одного из этих трех образцов приводит к браковке или иным действиям, предусмотренным соглашением, достигнутым перед изготовлением всех анодов рассматриваемой плавки(ок).

#### D.5 Документация

Необходимо подготовить протокол испытания, включающий следующую информацию:

- данные по испытываемому материалу, включая номер плавки, химический состав и дату разливки;
- подготовку образца для испытания, испытательное оборудование и процедуры;
- зарегистрированные потенциалы, представленные в форме таблицы;
- убыль массы анода и общий расход тока;
- рассчитанная допустимая электрохимическая емкость анода.

## Приложение Е (информативное)

### Помехи

#### Е.1 Общие положения

Данное приложение охватывает выявление и контроль мешающих постоянных и переменных токов для трубопроводов.

Коррозия, вызванная мешающим током, на подводных трубопроводах отличается от других случаев коррозионного повреждения тем, что ток, вызывающий коррозию, имеет источник, посторонний по отношению к рассматриваемому трубопроводу. Типичными источниками мешающих токов могут оказаться силовые кабели электрического постоянного тока, сварка, электрические системы прямого нагрева и посторонние системы электрохимической защиты с наложенным током.

Системы гальванических протекторных анодов не вызывают проблем мешающих токов для сторонних близлежащих сооружений.

Вредные воздействия мешающих токов возникают в местах, где токи передаются между защищаемыми трубопроводами электролитом (морская вода или морское дно).

#### Е.2 Управление мешающими токами

Рекомендуется проводить испытания на участках, где подозревается наличие мешающих токов. Тип испытания зависит от глубины воды и доступности трубопровода. Можно использовать любой из следующих предлагаемых методов или их комбинацию:

- измерение потенциалов труба-электролит с помощью индикаторных и регистрирующих приборов, используя технику непрерывного измерения градиента электрического поля и аналогичное непрерывное измерение потенциала;
- измерение колебаний выхода тока подозреваемого источника мешающего тока и сопоставление с измерениями, полученными методом, описанным выше.

**ПРИМЕЧАНИЕ** Коррозия под действием мешающего тока на подводном трубопроводе может быть вызвана близлежащим посторонним сооружением, электрически не связанным с рассматриваемым трубопроводом, через который течет ток от источников постоянного тока. Ток от этого постороннего сооружения находит путь на рассматриваемый трубопровод через пути с низким сопротивлением в морской воде. Ускоренная коррозия трубопровода может возникнуть в местах, где происходит истечение мешающего тока в электролит с трубопровода и возвращение его к сторонней конструкции.

#### Е.3 Помехи от постоянного тока

##### Е.3.1 Измерения

На участках, где подозревается наличие мешающих постоянных токов, необходимо выполнить соответствующие испытания. Можно использовать любой из следующих предлагаемых методов или их комбинацию:

- измерение потенциалов с помощью индикаторных и регистрирующих приборов;
- измерение плотности тока на контрольных пластинках;

- измерение тока, стекающего на трубопровод, с помощью индикаторных и регистрирующих приборов;
- измерение колебаний выхода тока из подозреваемого источника мешающего тока и сопоставление с измерениями, полученными методом, описанным выше.

Эти измерения рекомендуется осуществлять в течение периода, типичного для исследуемого подозреваемого мешающего явления, чтобы оценить временную зависимость уровня помех.

Помехи от других морских трубопроводов или установок следует измерять после активизации системы катодной защиты. Такие испытания помех рекомендуется выполнять следующим образом:

- измерить потенциал труба-морская вода на постороннем и рассматриваемом трубопроводах, в то время как соответствующие источники тока катодной защиты, которые могут вызвать помехи одновременно отключить;
- измерить потенциал труба-морская вода у постороннего трубопровода или установки при включенных станциях катодной защиты.

Среднее изменение потенциала в любой части постороннего трубопровода или установки в результате помех не должно вызывать возникновение потенциала на стороннем трубопроводе, который находится вне пределов защиты, установленных в Разделе 6. Если в результате помех требования критериев катодной защиты не выполняются, необходимо предпринять восстанавливающие меры, чтобы снизить помехи до приемлемого уровня.

### **Е.3.2 Общие методы решения проблем, связанных с коррозией, вызываемой мешающим постоянным током**

Следующие общие методы рекомендуются к рассмотрению для решения проблем помех в отношении защищаемых трубопроводов или других подводных конструкций:

- предотвращение приема или ограничение течения мешающего тока через трубопровод;
- устранение вредных эффектов мешающего тока на трубопровод с помощью металлического проводника, установленного между трубопроводом и возвратной стороной (отрицательным полюсом) источника мешающего тока;
- противодействие эффекту мешающего тока посредством вспомогательной катодной защиты на защищаемый трубопровод;
- устранение, перемещение и переналадка источника мешающего тока.

## **Е.4 Помехи от переменного тока**

### **Е.4.1 Общие положения**

Высоковольтные источники переменного тока, такие как силовые кабели и трубопроводные омические нагревательные системы, могут вызвать помехи от переменного тока в отношении рассматриваемого трубопровода. Величина таких помех зависит от следующего:

- близость источника переменного тока,
- уровень переменного напряжения,
- уровень переменного тока,
- количество и местоположение гальванических анодов,

- качество покрытия трубопровода,
- электропроводимость стали и морской воды.

Помехи от переменного тока для трубопровода, хотя и редко встречаются в отношении наземных трубопроводов, могут вызвать ряд проблем безопасности и коррозии, если значительно не ослабить их. В случае возникновения помех рекомендуется применять следующие процедуры.

#### **E.4.2 Индукция переменного тока**

Рекомендуется смоделировать сценарий помех, вызываемых переменным током, принимая во внимание каждый пункт характеризующих данных, полученных от рассматриваемого трубопровода, таких как характеристики покрытия, диаметр трубы, маршрут трубопровода и расположение изоляционных соединений. Если изоляционное соединение расположено поперек, так что трубопровод остается электрически неразрывным с платформой или береговой установкой, необходимо оценить сопротивление относительно земли со стороны платформы или береговой установки или исследовать саму платформу или отдельно береговую установку.

#### **E.4.3 Мешающие переменные токи**

Чтобы определить риск возникновения коррозии от переменного тока, можно установить контрольные пластинки в местах, где плотность переменного тока достигает максимального значения. Эти пластинки должны быть установлены на той же глубине, что и трубопровод, и иметь адекватное оборудование для измерения тока. Дополнительные пластинки можно установить с целью их последующего извлечения и визуального осмотра. Контрольные пластинки должны быть соединены с трубопроводом через измеряющую ток цепь. Сигнал от измерительного контура следует направлять по фиксированной разводке на платформу/береговую установку или на подводный преобразователь данных.

Плотность переменного тока в пределах дефекта покрытия является вопросом первостепенной озабоченности в отношении целостности трубопровода. Другим вопросом является плотность переменного тока на поверхности гальванических анодов, которая может привести к избыточному изнашиванию анода.

**ПРИМЕЧАНИЕ** На берегу, где удельное электрическое сопротивление трубопровода выше, существует высокий риск коррозии, вызываемой переменным током, если плотность переменного тока на 100 мм<sup>2</sup> открытой поверхности (например, наружной измерительной приставки) превышает 30 А/м<sup>2</sup>. Для морских трубопроводов, там где удельное электрическое сопротивление электролита ниже, коррозия за счет переменного тока может развиваться при плотности переменного тока ниже 30 А/м<sup>2</sup> на 100 мм<sup>2</sup> открытой поверхности. Риск коррозии, главным образом, связан с уровнем плотности переменного тока по сравнению с уровнем плотности тока катодной защиты. Если плотность переменного тока слишком высока, коррозию под действием переменного тока нельзя предотвратить с помощью катодной защиты. На участках, где напряжение переменного тока выше 10 В или где напряжения вдоль трубопровода демонстрируют изменение до более низких значений, указывая на возможную утечку переменного тока, следует произвести конкретные измерения на месте.

Не существует универсальной общепринятой техники измерения или критерия оценки риска от коррозии переменным током, чтобы определить коррозию переменным током. Некоторые конкретные методы измерения включают измерение

- a) потенциала труба-электролит,
- b) плотности переменного тока,
- c) плотности тока катодной защиты,
- d) отношение плотностей тока (плотность переменного тока/плотность тока катодной защиты).

#### Е.4.4 Меры по ограничению помех от переменного тока

Защитные меры от коррозии переменным током трубопровода и избыточного изнашивания анодов включают следующее:

- увеличение уровня катодной защиты, так чтобы положительной составляющей переменного тока можно было пренебречь;
- увеличение количества или размера гальванических анодов;
- установка оборудования для заземления трубопровода. Может потребоваться имитация для оптимизации числа, местоположения и сопротивления земле таких заземляющих систем.

**ПРИМЕЧАНИЕ** Могут потребоваться более длинные анодные соединительные кабели, чтобы обеспечить прохождение потенциально более высокого переменного тока.

## Приложение F (информативное)

### Проектирование трубопровода с учетом катодной защиты

#### F.1 Общие положения

Данное приложение охватывает проектирование и прокладку трубопровода с точки зрения разработки требований и расчета систем контроля внешней коррозии для морских трубопроводов и вертикальных трубопроводов, связывающих морскую платформу с подводным месторождением. В приложение включены специальные рекомендации для трубопроводов и трубопроводных стояков различного типа, установленных различными методами. Трубопроводы и трубопроводные стояки можно рассматривать по отдельности, благодаря различиям воздействия на них окружающей среды. Трубопровод обычно полностью погружен в воду и/или заглублен в морское дно, тогда как трубопровод, связывающий морскую платформу с подводным месторождением, имеет участки заглубленные, участки подводные и участки, подверженные действиям приливов, заплеска волны и атмосферным явлениям.

#### F.2 Способы прокладки трубопроводов

##### F.2.1 Общие положения

Глубина воды, протяженность и диаметр трубопровода, географическое местоположение и экономика являются главными факторами, которые определяют выбор способа прокладки трубопровода. Выбранный способ должен включать метод катодной защиты. Способ укладки должен предусматривать сохранность наружных защитных покрытий или аппаратуры катодной защиты. Монтаж системы контроля коррозии, выполняемый на барже-трубоукладчике, не должен отрицательно сказываться на скорости прокладки трубопровода.

##### F.2.2 Укладка труб по S-образной кривой (S-укладка труб)

Гальванические аноды можно предварительно устанавливать на отдельные отрезки труб на берегу или в море, если это не влияет на скорость укладки труб. Не допускается повреждения анодов и соединительных проводов анодов при движении труб по стингеру. Покрытия монтажных стыков, установленных в море после сварки последовательных отрезков труб вместе, и коэффициент разрушения покрытия (см. 6.5) должны учитывать достижимое качество покрытия монтажных стыков.

Самый обычный метод укладки труб заключается в соединении отрезков труб, обычно сваркой, на судне-трубоукладчике непосредственно перед укладкой. В этом случае труба подается горизонтально с кормы судна-трубоукладчика по стингеру по мере продвижения судна вперед, трубопровод принимает S-образную форму между морским дном и судном по мере постепенной его укладки на морское дно. Качество покрытия монтажного стыка может оказаться важным фактором в общем начальном повреждении покрытия трубопровода.

##### F.2.3 Укладка труб по J-образной кривой (J-укладка труб)

J-метод укладки трубопровода обычно используется для укладки труб на больших глубинах.

Этот способ включает развертывание трубы по вертикали с рамы J-укладки, обычно расположенной на корме судна-трубоукладчика. В этом методе труба подвергается напряжениям высокой степени. Перед укладкой отрезки трубопровода (обычно в соединении по четыре) формируют на палубе трубоукладчика и затем поднимают вертикально на раме J-укладчика. Приваривают к трубе специально применяемые при J-укладке муфты через определенные интервалы и используют их в



помощь трубоукладчику для поддержки веса трубы по мере ее опускания в вертикальном положении с трубоукладчика.

Такие муфты, которые часто служат в качестве предохранителей от смятия труб, можно использовать в качестве мест для установки гальванических анодов. Браслетные аноды можно предварительно устанавливать на берегу или на четвертичных соединениях в море. Покрытие монтажных стыков можно наносить на четвертичные соединения на палубе судна, а на конечные соединения двух отрезков трубопровода следует наносить, пока труба находится в вертикальном положении на раме J-укладчика в море.

#### **F.2.4 Укладка с катушки**

С помощью способа укладки труб с катушки отдельные отрезки труб предварительно сваривают на берегу в более длинные отрезки. На монтажные стыки покрытие наносят на берегу, а затем трубу наматывают на большую катушку на судне-трубоукладчике.

Между витками трубы на катушке рекомендуется проложить разделительные прокладки, чтобы свести к минимуму повреждение покрытия от контакта труба-труба. Браслетные аноды не рекомендуется устанавливать на берегу, ввиду высокого уровня напряжений, действующих на трубу в процессе намотки.

При укладке трубу разматывают, удерживая в натяжении, и укладывают, обычно по стингеру в конфигурации S-образной кривой. Труба проходит через набор роликов на судне-трубоукладчике, которые служат для выпрямления трубы, сходящей с катушки. Главным преимуществом такого способа укладки труб является скорость, с которой можно проложить трубопровод.

Установка анодов, которая выполняется на судне-трубоукладчике по мере разматывания трубы, не должна негативно сказываться на процессе прокладки трубопровода, и браслетные аноды и/или детали соединения анодов должны быть достаточно прочными, чтобы выдержать нагрузки, прикладываемые к трубе по мере ее схода со стингера.

#### **F.2.5 Укладка буксировкой по дну**

Данный метод укладки трубопровода подходит только для коротких трубопроводов длиной порядка нескольких километров. Трубопровод полностью собирают на берегу, на береговой монтажно-сборочной площадке (включая нанесение покрытий на монтажные стыки и установку гальванических анодов). Затем трубопровод стягивают с береговой площадки и тянут по морскому дну к месту установки.

Рекомендуется использовать износостойкие покрытия для труб и монтажных стыков, и принимать специальные меры предосторожности при проектировании анодов. Детали присоединения анодов должны обеспечить механическую устойчивость, снизить сопротивление спусковых драг и свести к минимуму риск застревания.

#### **F.2.6 Буксировка на определенной глубине**

Данный метод устраняет большинство проблем, связанных с укладкой путем буксировки по дну, однако необходимо принять во внимание массу анодов и их распределение при расчетах плавучести.

Этот способ аналогичен буксировке по дну, за исключением того, что трубопровод укладывается на плаву, обычно путем обезвоживания и герметизации трубы и применения дополнительных временных модулей плавучести, располагая их через определенные интервалы. Гибкие грузы (обычно цепи) свешивают с трубопровода через определенные интервалы со смещением от плавучих модулей и дают трубопроводу плыть на определенной глубине над морским дном, подвесив трубопровод между двумя судами. Трубопровод буксируют до требуемого места и погружают на место.

## **F.3 Типы морских трубопроводов и трубопроводных стояков**

### **F.3.1 Трубопроводы**

#### **F.3.1.1 Трубопроводы общего назначения**

Трубопроводы общего назначения представляют собой трубопроводы, которые используются для транспортирования сред при окружающей температуре, и могут быть проложены с утяжеляющим бетонным покрытием или без него. Эти трубопроводы либо заглубляют и засыпают, либо прокладывают в открытой траншее, либо непосредственно по морскому дну. Их обычно защищают гальваническими браслетными анодами, гальваническими анодами, расположенными на расстоянии от трубопровода, или системами электрохимической защиты с наложенным током, расположив эти системы на одном или обоих концах трубопровода.

#### **F.3.1.2 Теплоизолированные трубопроводы**

Теплоизоляция может потребоваться, чтобы предотвратить падение температуры содержимого трубопровода ниже значения, при котором могут образоваться гидраты или парафины и воспрепятствовать течению среды. Существует два основных типа теплоизоляционных систем трубопроводов: это либо прочное толщину несколько миллиметров теплоизоляционное покрытие, нанесенное непосредственно на наружную сторону трубопровода, либо система труба в трубе, в которой кольцевой зазор между внутренней и наружной трубой заполняется изоляционным материалом. В системе труба в трубе наружная труба полностью герметизирована, чтобы обеспечить полную сухость изоляции. Теплоизоляционные покрытия, наносимые снаружи, обычно изготавливаются на основе полипропилена или полиуретана. Приемлемо низкие характеристики теплопроводности могут достигаться при использовании синтетических или вспененных составов, или тем и другим слоями.

Различные схемы катодной защиты могут включать

- браслетные аноды, непосредственно соединенные с трубопроводом,
- браслетные аноды, прижимаемые вокруг трубы снаружи покрытия, с кабельными соединениями, проходящими через изоляцию к стали,
- гальванические аноды, установленные на расстоянии от трубопровода,
- системы с наложенным током,
- термически напыленный под слой изоляции алюминий.

Браслетные аноды, присоединенные непосредственно к трубе, могут обеспечить теплоотвод и снизить общую эффективность изоляционной системы. При проектировании катодной защиты необходимо рассмотреть влияние повышенной рабочей температуры.

Для браслетных анодов, прижатых вокруг наружного покрытия, с кабельным соединением, проходящим через изоляцию к стали, существует риск смещения анодов в процессе укладки трубопровода. В таких случаях следует рассмотреть использование переходных конусов анод – изоляция и непропорционально длинного соединительного кабеля. Для таких электрических соединений следует использовать четыре кабеля, по два для каждого полубраслета, с выводами, присоединенными продольно в противоположных направлениях. Необходимо учесть возрастающий риск целостности изоляции в местах прохождения кабеля.

#### **F.3.1.3 Системы труба в трубе**

Для систем труба в трубе используются теплоизоляционные материалы с пониженной теплопроводностью и меньшей устойчивостью к попаданию воды по сравнению с системами наружной

изоляции. Защитное покрытие следует наносить на внутреннюю трубу перед сборкой, чтобы защитить трубу от воды, попавшей в наружную трубу в какой-либо момент эксплуатации трубопровода.

Наружная поверхность внешней трубы должна быть обработана с целью защиты от коррозии аналогично морским трубопроводам общего назначения.

#### **F.3.1.4 Пучки трубопроводов**

Такие системы включают несколько трубопроводов небольшого диаметра, связанных вместе, часто вместе с электрическими кабелями, и прокладываются методом буксировки. Между нитками в пучке необходимо проложить диэлектрические разделители. Такие разделители не должны неблагоприятно влиять на распространение защиты или причинять повреждения системам покрытия трубопровода во время сооружения или прокладки пучка.

Можно рассмотреть расположение анодов-протекторов на одном из трубопроводов для защиты всех трубопроводов в пучке. В этом случае необходимо предусмотреть адекватное размещение электрических контактов между трубопроводами, чтобы обеспечить электрическую неразрывность цепи на каждом трубопроводе.

#### **F.3.1.5 Гибкие трубопроводы**

Гибкие трубопроводы часто разворачивают как короткие соединительные трубопроводы между подводными сооружениями и трубопроводами общего назначения. Если они представляют собой цельнометаллическую конструкцию, то необходимо обеспечить электрическую неразрывность между гибким трубопроводом, трубопроводными системами общего назначения и подводными сооружениями.

Для гибких трубопроводных систем, включающих концентрические неметаллические и металлические оболочки с толстым наружным неметаллическим слоем, который проходит между металлическими соединениями или стыками, аноды следует располагать вблизи металлических соединений или стыков.

### **F.3.2 Трубопроводные стояки**

#### **F.3.2.1 Стандартные стационарные (статичные) трубопроводные стояки**

Такой тип стояка можно соединить с концом трубопровода отрезком трубы с фланцевыми соединениями на каждом конце. Стояк обычно прикрепляют к основной конструкции (морскому основанию) на различных высотах. Гальванические аноды можно установить на стояк или обеспечить катодную защиту, за счет защиты морского основания или катодной защиты трубопровода.

Если требуется электрическая изоляция стояка и трубопровода от конструкции, то все зажимы стояка должны быть оснащены диэлектрической прокладкой из неопренового каучука или аналогичного материала. Эта прокладка может быть установлена либо на границе труба-зажим, либо на границе зажим-конструкция. Если зажим электрически изолирован от стояка и от конструкции, на зажимы необходимо установить специальные аноды.

Если изоляционный фланец или соединение устанавливают на стояк, необходимо обеспечить наличие диагностических выводов с каждой стороны этого соединения, заделанных в водонепроницаемой коробке, расположенной в доступном месте.

#### **F.3.2.2 Поднятые трубы (J-образные трубы)**

На стационарных и плавучих морских платформах в глубокой воде могут потребоваться заранее установленные J-образные трубы, которые можно использовать для установки вертикального трубопровода (трубопроводного стояка). J-образные трубы используются для протягивания стояка на платформу и для механической защиты трубопроводных стояков во время эксплуатации платформы. После протяжки и при последующих операциях трудно подтвердить эффективность защиты от коррозии участка трубопроводного стояка в пределах J-трубы.

Стояки, установленные таким способом, рекомендуется защищать с помощью высококачественной износостойкой системы покрытия, чтобы свести к минимуму повреждение покрытия в процессе протяжки. Однако, рекомендуется сделать определенный допуск на вероятность повреждения покрытия при определении требований к катодной защите для участка стояка в пределах J-образной трубы. Можно применить другие меры контроля коррозии, такие как ингибирование, для кольцевого пространства между J-образной трубой и стояком.

Если используются гальванические аноды для защиты нижних участков J-образной трубы, эти аноды рекомендуется устанавливать в позиции «6 часов», чтобы не препятствовать протяжке стояка во время его установки.

### **F.3.2.3 Стальные подвесные стояки**

Стальные подвесные стояки можно использовать для соединения глубоководных трубопроводов с плавучими производственными установками. Стояк подвешивают от промысловой платформы вблизи поверхности воды, свешивают с платформы с помощью предварительно определенной цепной подвески в точку на морском дне, в которой он касается дна. Такие системы стояков можно подвергать очень большим напряжениям в процессе эксплуатации. Определенные компоненты деталей опоры могут быть изготовлены из высокопрочных материалов, которые чувствительны к катодной защите в таких условиях высокого напряжения. Степень этой чувствительности следует рассмотреть специально (см. Таблицу 1). Перед установкой анодов непосредственно к подвесному участку стояка можно провести идентификацию рисков. Аноды можно разместить на неподвижном участке стояка или на основной конструкции (морском основании) выше и/или на трубопроводе ниже, чтобы защитить подвесной участок. Можно использовать моделирование ослабления, чтобы определить распространение защиты вниз по стояку от различных конфигураций анодов и/или их различного местоположения.

Стальные цепные стояки часто оснащают поясом обшивки, чтобы снизить влияние вибрации за счет водоворотов. Катодная защита может оказаться недостаточно эффективной ниже поясов обшивки, что следует признать при выборе подходящего защитного покрытия для этих участков.

### **F.3.2.4 Гибкие стояки**

Такие стояки обычно имеют конструкцию, аналогичную конструкции гибких трубопроводов, обсужденных выше (см. F.3.1.5), и сталкиваются с такими же проблемами.

## **F.4 Засыпка и стабилизация**

### **F.4.1 Общие положения**

Решение о засыпке и/или стабилизации морского трубопровода принимается на основе транспортируемой среды, рабочей температуры и местного законодательства. Степень засыпки и меры по стабилизации трубопровода следует рассматривать при проектировании с учетом эффективности системы катодной защиты.

### **F.4.2 Условия заглубления**

#### **F.4.2.1 Открытый тип**

В этом случае трубопровод сначала прокладывают по морскому дну, где он подвергается воздействию, в основном, морской воды, и покрытие трубопровода и аноды могут подвергаться повреждению в процессе эксплуатации. Это следует учесть при проектировании катодной защиты, особенно на мелководье на участках интенсивного судоходства.

Если, для задач проектирования принимается, что на данном участке движение у морского дна отсутствует, трубопровод и аноды можно рассматривать как полностью открытые (на 100 %). Если в течение эксплуатации трубопровода возникает подтверждение наличия движения у морского дна, так

что аноды могут быть покрыты осадочными отложениями (а трубопровод остается открытым или тоже постепенно засыпается), это необходимо учесть при проектировании системы катодной защиты.

**ПРИМЕЧАНИЕ** Наиболее неблагоприятным случаем для проектирования катодной защиты является полностью открытый трубопровод с полностью засыпанными анодами; наиболее благоприятным случаем проектирования является полностью засыпанный трубопровод с полностью открытыми анодами. В ситуациях частичной засыпки фактический случай располагается где-то посередине между первым и вторым крайними случаями.

#### **F.4.2.2 В открытой траншее**

В такой ситуации трубу прокладывают в предварительно вырытой траншее, но траншею после укладки трубопровода не засыпают. Допускают, что таким образом обеспечивается защита трубопровода от механического повреждения, поскольку траншея со временем самостоятельно засыпается. Такие трубопроводы обычно рассматривают как полностью засыпанные при проектировании систем катодной защиты, однако необходимо оценить ситуацию с учетом местного опыта в отношении самозасыпки.

#### **F.4.2.3 В засыпанной траншее**

В такой ситуации трубопровод намеренно засыпают в траншее обычно с помощью специальных буксировочных салазок, которые копают траншею и засыпают трубопровод за один проход. Если используется такой метод, необходимо обеспечить, чтобы аноды не создавали препятствия для буксируемой салазками аппаратуры, которую обычно охватывают с двух сторон и перемещают вдоль трубопровода. В этом случае, чтобы сгладить переход в поперечном сечении, можно рассмотреть использование полностью литых конических анодов или анодов, оснащенных армированными, отлитыми заодно с анодом полиуретановыми конусами.

Если существует возможность оголения засыпанного трубопровода, то может потребоваться больше анодов. Это необходимо учесть при проектировании, и если риск будет признан, то рекомендуется проектировать трубопровод как открытый.

### **F.4.3 Методы придания устойчивости, метод стабилизации**

#### **F.4.3.1 Нестабилизированный трубопровод**

Для трубопроводов с бетонным покрытием аноды рекомендуется устанавливать в верхней части антикоррозионного покрытия. Метод присоединения анодов должен быть достаточно надежным, чтобы аноды выдержали процесс укладки труб. Способы избежания соскальзывания анодов могут включать использование анодов конической формы или с коническими торцевыми фитингами на одной из сторон анода в соответствии с требованиями процесса трубоукладки.

#### **F.4.3.2 Трубопровод с утяжеляющим покрытием**

Применение армированного бетонного покрытия поверх антикоррозионного покрытия является стандартной процедурой для некоторых морских трубопроводов большого диаметра. Бетон снижает плавучесть и обеспечивает механическую защиту трубопроводу дополнительно к защите, которую может обеспечить частичное или полное заглобление.

Во время установки гальванических анодов рекомендуется обеспечить, чтобы стальная арматура бетона не входила в электрический контакт ни с самим трубопроводом, ни с браслетными анодами, чтобы избежать экранирования защитного тока к трубопроводу. Электрическая неразрывность цепи между упрочнением и трубой и/или анодами может также привести к увеличению потребности в токе на анодах трубопровода, чем это допускается по проекту катодной защиты. Если трубопровод с утяжеляющим покрытием предполагается прокладывать методом S-укладки или J-укладки, аноды рекомендуется вставлять или устанавливать на одном уровне с бетонным утяжеляющим покрытием. Альтернативно можно рассмотреть применение конических анодов или армированных отлитых заодно с анодами полиуретановых конусов, чтобы сгладить переход поперечного сечения и, таким образом, свести к минимуму повреждение анодов в процессе укладки трубопровода.

### **F.4.3.3 Сброс породы**

Сброс породы включает укрытие незасыпанного трубопровода. Если это является предлагаемым методом придания устойчивости, то можно ожидать дополнительного повреждения покрытия и потери анодов, что необходимо отразить при проектировании катодной защиты. Иногда вместо сброса породы для стабилизации трубопровода применяют заранее изготовленные гибкие бетонные подстилки. В некоторых новых проектах используют неметаллические мягкие покрытия поверх бетона, чтобы еще больше снизить риск повреждения покрытия в процессе укладки. Подстилки можно осторожно опустить на трубопровод под контролем.

### **F.4.3.4 Якоря (анкерные опоры) трубопровода**

Различные типы трубопроводных якорей можно использовать на участках с сильным течением, таких как участки вблизи дельт крупных рек и в определенных арктических районах. Влияние этих якорей на проектирование катодной защиты необходимо внимательно оценить, особенно, если они включают использование стальных свай. Если прогнозируется избыточный дренаж тока к анкерным опорам, опоры необходимо обеспечить собственной системой катодной защиты, независимой от системы катодной защиты трубопровода.

## **F.5 Пересечения трубопроводов и подводные соединения**

### **F.5.1 Пересечения**

Помехи могут возникнуть между системами катодной защиты на подводных перекрестках трубопроводов. Если оба пересекающихся трубопровода защищены гальваническими протекторными анодами, то обычно достаточно обеспечить разделение двух трубопроводов в точке их пересечения.

Разнесения на 0,3 м обычно достаточно, однако могут удовлетворить требованиям меньшие расстояния, если можно продемонстрировать, что взаимные помехи катодной защите между трубопроводами незначительны.

Риск смещения трубы или морского дна со временем следует компенсировать путем введения физического разделительного барьера в точке пересечения ниток трубопроводов. Барьером может служить бетонная подстилка, каучуковая подстилка или мешки с песком.

### **F.5.2 Подводные соединения**

У соединений двух трубопроводных систем под водой необходимо обеспечить отсутствие значительного взаимного влияния систем катодной защиты того и другого трубопровода.

Если обе системы соединяются напрямую, рекомендуется учесть все соответствующие детали систем катодной защиты, так чтобы ни одна из систем катодной защиты не приводила к нежелательному дренажу тока на другую систему.

Если обе системы электрически изолированы друг от друга, необходимо периодически проверять состояние изоляционных соединений и анодов вблизи изоляционного соединения. Возможность возникновения помех между двумя трубопроводными системами следует учитывать, например, в случае, когда один из трубопроводов имеет систему электрохимической защиты с наложенным током, а другой систему гальванических протекторных анодов.

## Библиография

- [1] ISO 14723, *Промышленность нефтяная и газовая. Трубопроводные системы транспортирования. Арматура морских трубопроводов*
- [2] RIPPON, I.J. *Platform CP design in the South China Sea*, NACE 1997, paper 475
- [3] DnV RP B401, *Cathodic protection design*
- [4] NACE *Corrosion Engineer's Reference Book*
- [5] PETERSON, M.H. and GROOVER, R.E. Tests indicate the Ag/AgCl electrode is the ideal reference cell in sea water, *Materials Protection and Performance*, **11** (5), 1972, pp. 19-22
- [6] ASTM B 418, *Стандартные технические условия на литые и кованные гальванические цинковые аноды*
- [7] EN 10025, *Продукты горячекатаные из нелегированной конструкционной стали. Технические условия поставки*
- [8] NACE TM0190<sup>4)</sup>, *Лабораторное испытание наложенного тока в отношении алюминиевых сплавов*
- [9] US Mil Spec Mil-A-18001K

---

4) NACE International, 1440 South Creek, Houston, TX 77084, USA.





