

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
"ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ"  
(ДГТУ)

Кафедра "Химические технологии нефтегазового комплекса"

**КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ**  
**по дисциплине**  
**"Защита оборудования нефтегазового комплекса от коррозии"**  
  
**для магистрантов заочной формы обучения**  
**по направлению 18.04.01 Химическая технология**

Ростов-на-Дону  
2018

## ВВЕДЕНИЕ

Среди различных способов защиты металлов от коррозии особое место занимают электрохимические способы. Это обстоятельство связано с тем, что чаще всего металлы в эксплуатационных условиях подвергаются электрохимической коррозии, против которой наиболее эффективны электрохимические методы защиты.

Сущность всех электрохимических методов защиты заключается в смещении потенциала защищаемого металла в область значений, при которых его ионизация затруднена или вообще невозможна.

### 1. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ЗАЩИТЫ ОТ КОРРОЗИИ.

Защита от коррозии вообще необходима в том случае, когда процесс коррозии протекает при таком потенциале, которому соответствует скорость ионизации металла, превышающая технически допустимую, обеспечивающую необходимую долговечность конструкции.

Как правило, в этом случае потенциал коррозии  $E_{ст}$  находится в области активного растворения металла  $E_{ст}^1$  или в области нарушения пассивного состояния  $E_{ст}^{11}$  (рис.1).

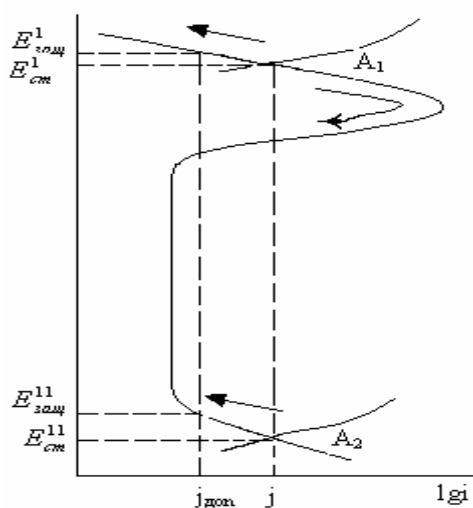


Рисунок 1.

Полная анодная  
поляризационная кривая

Уменьшить скорость растворения до приемлемой, величины  $j_{дон}$  можно, сместив потенциал к достаточно низкому значению в активной области, например к  $E_{защ}$  или сместив его в пассивную область, например, до  $E_{защ}^{11}$ . Добиться требуемого смещения потенциала можно при помощи электрохимической защиты.

Для смещения потенциала от  $E_{ст}^1$  к  $E_{защ}^1$  или от  $E_{ст}^{11}$  к  $E_{защ}^{11}$  металл необходимо поляризовать катодно.

Добиться смещения потенциала в этом направлении можно, пользуясь внешним источником тока. Этот метод принято называть катодной защитой от внешнего источника.

Катодную поляризацию можно осуществить, соединив защищаемый металл с другим металлом, имеющим более отрицательный потенциал. Этот метод получил название катодной защиты с помощью анодных протекторов. Протектор в данном случае работает как анод. Для смещения потенциала от  $E_{\text{ст}}^1$  до  $E_{\text{защ}}^{11}$  металл необходимо поляризовать анодно. При поляризации от внешнего источника тока метод называют анодной защитой. Возможно также осуществление анодной поляризации за счет соединения защищаемого металла с протектором, имеющим более положительный потенциал. Этот метод называется анодной защитой с помощью катодного протектора. Протектор в этом случае работает как катод.

Таким образом, электрохимическая защита металлов от коррозии в растворах электролитов основана на зависимости скоростей растворения от потенциала. При катодной защите используют снижение скорости растворения металла в активной области при смещении потенциала в отрицательную сторону, т.е. положительный протект-эффект. Анодная защита использует принцип перевода металла в пассивное состояние.

## 2. КАТОДНАЯ ЗАЩИТА.

### 2.1. Катодная защита с помощью протекторов.

При изучении этого материала особое внимание следует обратить на характер процессов, протекающих на электродах. Литература: [1, 2, 3].

Наиболее простым случаем катодной защиты является защита с помощью протекторов. В данном случае процесс электрохимической защиты обусловлен действием коррозионного элемента, образованного двумя разнородными металлами, помещенными в проводящую среду. В этом случае более благородный электрод коррозионного элемента – катод, менее благородным – анод. Возникающий гальванический ток является током короткого замыкания.

Ток этого коротко замкнутого гальванического элемента катодно защищает теплопровод точно так же, как если бы поляризующий ток подавался от внешнего источника тока.

Схематически катодная защита с помощью протектора может быть представлена следующим образом (рис. 2).

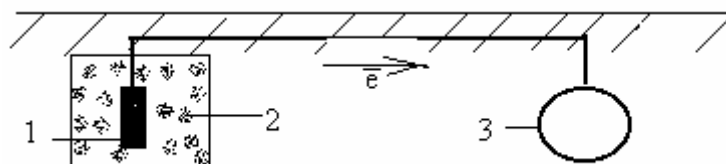


Рисунок 2.

1. протектор
2. активатор протектора
3. защищаемое сооружение (трубопровод).

При замыкании защищаемой конструкции с протектором с помощью соединительного кабеля происходит растворение материала протектора, а на поверхности защищаемого сооружения идут восстановительные процессы, не приводящие к разрушению сооружения. В процессе эксплуатации протектор растворяется и требует периодической замены.

Протекторы широко используются для защиты подземных трубопроводов и кабелей. Катодная защита с помощью протекторов не требует специальных источников энергии, поэтому может быть использована в труднодоступных районах, где отсутствуют постоянные источники энергии.

Ее используют преимущественно в тех случаях, когда необходим защитный ток малой величины. Это бывает, если конструкция имеет хорошее изоляционное покрытие и необходима защита только тех участков, где изоляция нарушена.

Область применения протекторной защиты ограничивается величиной удельного сопротивления грунта. В токопроводящих грунтах протекторная защита становится малоэффективной.

К протекторным материалам предъявляются определенные требования:

- потенциал материала протектора должен быть достаточно отрицательным, чтобы пара "протектор – сталь" имела максимальную ЭДС;
- протекторы не должны пассивироваться, т.е. поляризация протектора при пассивации может значительно снизить защитный ток.

Для уменьшения возможности пассивации протектора его помещают в мешки, заполненные специальным активатором.

- протекторный материал должен иметь высокую эффективность или высокую токоотдачу. Практической токоотдачей протектора  $q_{np}$  называют среднее количество электричества, получаемое с единицы массы протектора.

$$q_{np} = \frac{J_n \cdot \tau}{\Delta m_n} \quad (A \text{ час} / \text{кг}) \quad (1)$$

$J_n$  - средняя сила тока протектора, А;

$\tau$  - время работы протектора, час;

$\Delta m_n$  - убыль массы протектора, кг.

Вследствие коррозии протектора, из-за неравномерного его растворения и выкрашивания, от наличия примесей и т.д. практическая токоотдача не совпадает с теоретической  $q_T$ , которую можно рассчитать по закону Фарадея  $q_T = I/k$ , где  $k$  – электрохимический эквивалент металла.

Отношение практической токоотдачи к теоретической, выраженное в процентах, называют коэффициентом полезного действия протектора  $\eta$ .

$$\eta = \frac{q_{np}}{q_T} \cdot 100\% \quad (2)$$

#### 2.1.1. М а т е р и а л ы а н о д н ы х п р о т е к т о р о в.

В качестве протекторных материалов могут быть использованы магний, алюминий, цинк или сплавы на основе этих металлов. Однако следует отметить, что чистые металлы, несмотря на достаточно высокий отрицательный потенциал, не получили широкое применение. Это объясняется тем, что Mg имеет сравнительно низкую токоотдачу, а алюминий и цинк склонны к пассивации. Например, КПД магния на 10-20% ниже, чем КПД специальных протекторов, изготовленных из сплавов на основе магния.

Поэтому наибольшее применение находят различные протекторные сплавы. Введение добавок в основной металл позволяет получать более отрицательный потенциал, более, активный, равномерно растворяющийся и не склонный к пассивации материал.

#### 2.1.2. Р а с п р е д е л е н и е з а щ и т н о г о п о т е н ц и а л а н а п о в е р х н о с т и з а щ и щ а е м о й к о н с т р у к ц и и.

Протекторную защиту следует проектировать так, чтобы обеспечить равномерное распределение тока по всей поверхности конструкции. Практически, однако, достичь этого весьма трудно. Наибольшие плотности поляризующего тока наблюдаются в местах, ближе всего расположенных к протектору, т.е. в тех местах, где наибольшая разность потенциалов. Схематически распределение потенциала вдоль оси трубопровода при наличии одиночного протектора можно представить следующим образом (рис. 3)

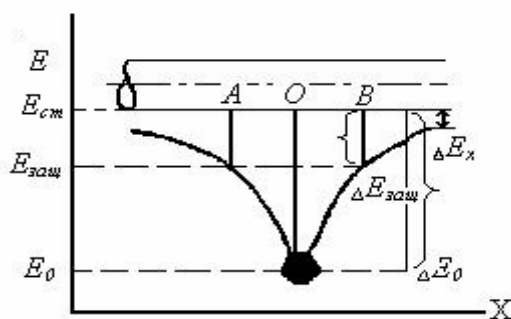


Рисунок 3

$\Delta E_0$  - разность потенциалов между протектором и защищаемой конструкцией.

$\Delta E_{защ}$  - защитная разность потенциалов.

Точка подключения кабеля протектора к защищаемой конструкции (точка 0) называется точкой дренажа. В точке 0 устанавливается наибольшая разность потенциалов ( $\Delta E_0$ ).

Изменение потенциала вдоль трубопровода имеет вид экспоненциальной зависимости. При большем удалении от точки дренажа ( $X \rightarrow \infty$ ) величина разности потенциалов асимптотически приближается к нулю.

$$\Delta E_x = \Delta E_0 \cdot l^{-\alpha} \quad (3)$$

$l$  - есть удвоенный радиус действия защиты (AB). Из рисунка видно, что чем больше отрицательное значение потенциала в точке дренажа, тем радиус действия защиты больше ( $l' > l$ ).

$\alpha$  - коэффициент неравномерности распределения ( $\alpha = 1, 2, 3$ ). При использовании нескольких протекторов равномерность распределения потенциала улучшается (рис. 4). Иногда используют даже ленточные протекторы, имеющие точки дренажа через, равные промежутки (рис. 5).

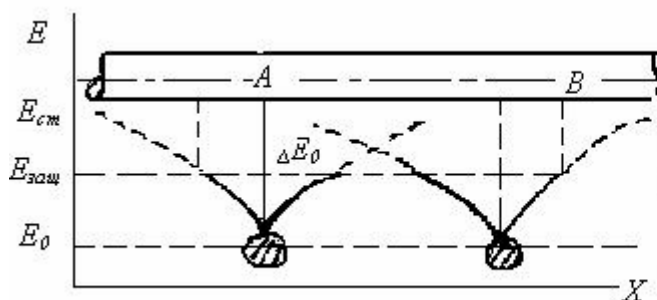


Рисунок 4.

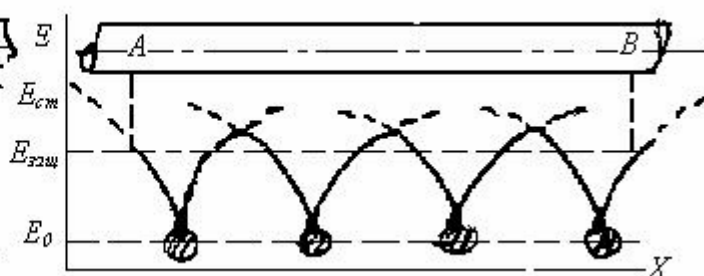


Рисунок 5.

Эффективность протекторной защиты  $\mathcal{E}_{пр}$  определяется из формулы (4):

$$\mathcal{E}_{пр} = \frac{j_0 - j}{j_0} (\%) \quad (4)$$

$j_0, j$  - соответственно скорость коррозии материала защищаемой конструкции без защиты и при ее наличии.

### 2.1.3. Расчет параметров катодной защиты с помощью протекторов.

Практическим критерием протекторной защиты является защитный потенциал  $E_{защ}$ . Стационарный потенциал стали в большинстве грунтов примерно равен - 0,55В по медносульфатному электроду. Поляризация подземных конструкций до защитного потенциала -0,85В по этому же электроду сравнения и поддержание его в этих пределах практически всегда обеспечивает надежную защиту сооружений. Этот параметр был экспериментально установлен еще в 1923 г Шепардом и подтвержден долголетними наблюдениями. В настоящее время он является, повсеместно принятым критерием катодной защиты стали. Только в присутствии серобактерий, восстанавливающих сульфаты в анаэробных средах до сероводорода, защитный потенциал стали, снижают до - 0,75В.

Расчет параметров протекторной защиты сводится к определению необходимого числа протекторов и срока их службы. Для этого последовательно определяются следующие параметры:

#### 2.1.3.1. Переходное сопротивление протектора $R_{п}^{np}$ .

Величина  $R_{п}^{np}$  равна сумме поляризационного сопротивления протектора  $R_{пол}^{np}$  и сопротивления растеканию тока протектора  $R_{р}^{np}$ .

$$R_{п}^{np} = R_{пол}^{np} + R_{р}^{np}, (Ом) \quad (5)$$

Поляризационное сопротивление есть сопротивление протеканию электрохимической реакции. Оно зависит от природы материала протектора, от природы и концентрации электролита, т.е. среды, куда погружен протектор. Эта величина определена для основных протекторных материалов и основных типов грунтов и сред и сведена в справочные таблицы.

Сопротивление растеканию тока зависит от формы и расположения протекторов, от удельного сопротивления грунта, от природы и параметров используемого активатора. Величину сопротивления растеканию тока определяют расчетом соответствующей электрической цепи. Например, при вертикальном расположении протекторов величина  $R_{р}^{np}$  рассчитывается по формуле:

$$R_{р}^{np} = \frac{\rho_2}{2\pi l_a} \left( \ln \frac{2l_a}{d_a} + \frac{1}{2} \ln \frac{4h + l_a}{4h - l_a} + \frac{\rho_a}{\rho_2} \ln \frac{d_a}{d_n} \right) \quad (6)$$

где  $\rho_2$  – удельное сопротивление грунта (Ом·м)

$h$  – средняя глубина залегания протектора (м)

$d_a$  – диаметр активаторной засыпки (м)

$\rho_a$  – удельное сопротивление активатора (Ом·м)

$l_a$  – длина участка протектора, погруженного в активатор (м)

$d_n$  – диаметр протектора (м)

При горизонтальном расположении протекторов расчетная формула изменяется, т.к. изменяется вид электрохимической цепи.

$$R_p^z = \frac{\rho_z}{2\pi l_a} \left( \ln \frac{2l_a}{d_a} + \ln \frac{l_a + \sqrt{l_a^2 + 16h^2}}{4h} + \frac{\rho_a}{\rho_z} \ln \frac{d_a}{d_n} \right) \quad (7)$$

Однако при достаточно большой глубине укладки протекторов ( $h > 1,5$  м) разница между величинами  $R_p$  при горизонтальном и вертикальном расположении уменьшается и не превышает 1-2%.

В этом случае величины  $R_p^e$  и  $R_p^z$  примерно равны.

Для наиболее часто используемых практикой магниевых протекторов марки ППА-5, что означает протектор порошковый упакованный, величины  $R_p$  определены и равны  $0,47 - 0,56 \rho_z$  и величина переходного сопротивления протектора  $R_n$  в этом случае может быть рассчитана по формуле  $R_n^{np} = 0,56 \rho_z + 0,24$ , где 0,24 – это поляризационное сопротивление электродной реакции.

#### 2.1.3.2. С и л а т о к а п р о т е к т о р а $I_n$ .

Другим параметром, необходимым для расчета протекторной защиты, является средняя сила тока протектора  $I_n$ . Величина  $I_n$  определяется из формулы:

$$I_n = \frac{E_{cm} - E_0^{np}}{r_{ex} + r_{каб} + R_n^{np}}, (A) \quad (8)$$

где  $E_{cm}$  - стационарный потенциал трубопровода в данной среде (В)

$E_0^{np}$  - электродный потенциал протектора (В)

$r_{ex}$  - входное сопротивление трубопровода в месте контакта с кабелем протектора (Ом)

$r_{каб}$  - сопротивление соединительного кабеля (Ом)

$R_n^{np}$  - переходное сопротивление протектора (Ом)

$E_0^{np}$  - табличная величина для соответствующего металла протектора.

Если  $E_0^{np}$  неизвестно, то разность потенциалов ( $E_{cm} - E_0^{np}$ ) принимают равной 1В.



Поскольку  $(r_{каб} + r_{ex}) \ll R_n^{np}$ , то величину  $I_n$  находят из приближенного выражения:

$$I_n = \frac{\Delta E_n}{R_n^{np}}, (A) \quad (9)$$

### 2.1.3.3. Плотность защитного тока $i_{защ}$ .

Величина  $i_{защ}$  на 1 км длины защищаемого трубопровода равна:

$$i_{защ} = \frac{\Delta E_{защ} \cdot \alpha}{r_m}, (A / км) \quad (10)$$

$$\text{где } \Delta E_{защ} = E_{см} - E_{защ}, (B) \quad (11)$$

$$\alpha = 1,2 \div 1,3$$

$r_m$  – сопротивление 1 км трубопровода (ом·км).

Зная общую длину трубопровода  $L$  (км), определяют величину защитного тока  $I_{защ}$ .

$$I_{защ} = i_{защ} \cdot L, (A) \quad (12)$$

Теперь, зная необходимую величину защитного тока  $I_{защ}$  и силу тока, которую может обеспечить один протектор  $I_n$  находят количество протекторов  $N$ .

$$N = \frac{I_{защ}}{I_n}, (\text{штук}) \quad (13)$$

При однородных грунтах, т.е. в грунтах, имеющих примерно равное сопротивление на всех участках трассы, протекторы располагают поодиночке на равном расстоянии друг от друга. При групповом расположении протекторов в неоднородных грунтах следует учитывать их взаимное экранирование. Величина  $N$  в этом случае будет равна:

$$N = \frac{I_{защ}}{I_n \eta_{\varepsilon}}, (\text{штук}) \quad (14)$$

где  $\eta_{\varepsilon}$  – коэффициент взаимного экранирования,  $\eta_{\varepsilon} \approx 0,6$ .

Для надежности защиты принимаемое число протекторов.  $N_{np} = 1,5 \div 2 N$ .

Наконец, при расчете необходимо определить срок службы протектора. Это будет время, через которое необходимо производить замену протекторов, т.к. их материал расходуется при защите. Срок службы протекторов  $T$  определяется по формуле:

$$T = \frac{M \cdot q_m \cdot \eta_u \cdot \eta_n}{8736 \cdot I_n}, (\text{год}) \quad (15)$$

где  $M$  - масса протектора (кг)

$q_m$  - токоотдача материала протектора (теоретическая) (А·час/кг)

$\eta_n$  - коэффициент полезного действия протектора. Эта величина зависит от материала и колеблется от 0,5<sub>Mg</sub> до 0,98<sub>Zn</sub>

8736 - среднее число часов в году (час/год)

$\eta_u$  - коэффициент использования протектора. Он равен 0,95 ÷ 0,98

$I_n$  - сила тока протектора, А

#### 2.1.4. Достоинства и недостатки протекторной защиты.

Катодная защита с помощью протекторов – достаточно простой и надежный способ защиты. При правильном ее использовании система защиты не требует больших технических затрат. Однажды смонтированная система работает достаточно долго без обслуживания, нуждаясь лишь в периодическом контроле потенциала защищаемой поверхности и замене протекторов. Важнейшим её достоинством является автономность, т.к. система протекторной защиты не зависит от наличия электроснабжения и ввиду небольшой разницы потенциалов обычно не создает помех для окружающих объектов. Ввиду малости напряжений обычно не возникает проблем по технике безопасности. Системы с протекторами поэтому можно размещать и на взрывоопасных участках.

Для защиты от грунтовой коррозии протекторы могут быть размещены вплотную к защищаемому объекту в той же траншее, так что практически не требуется дополнительных земляных работ.

Принципиальными недостатками протекторной защиты является низкая ЭДС, что ограничивает применение протекторов в плохопроводящих средах, безвозвратные потери металла и возможное загрязнение окружающей среды.

### 2.2. К а т о д н а я   з а щ и т а   в н е ш н и м   т о к о м .

#### 2.2.1. Применимость метода, его достоинства и недостатки.

Катодную защиту внешним током (КЗВТ) широко применяют для защиты подземных и гидротехнических сооружений. Практически катодную защиту можно применять всегда, когда это экономически обосновано и имеются источники электроэнергии. Применимость катодной защиты зависит от характера катодной реакции коррозионного процесса. Если коррозия протекает с водородной деполяризацией, то для достижения полной защиты металла необходим защитный ток, плотность которого во много раз превышает плотность коррозионного тока. Практически это означает, что использование катодной защиты в таких условиях невозможно из-за больших количеств выделяющегося водорода и значительных

энергетических затрат. Например, для защиты стали в 0,3 М  $\text{H}_2\text{SO}_4$  защитная плотность тока должна быть примерно  $300 \text{ А/м}^2$ . Если же коррозия металла идет с кислородной деполяризацией, например, в грунтах, то защитная плотность тока в основном зависит от скорости диффузии кислорода. При этом величина защитного тока будет расти только при увеличении степени аэрации.

Обычно КЗВТ используется совместно с различными изоляционными покрытиями наружной поверхности защищаемого сооружения:

- высокая эффективность (почти 100% защита);
- возможность защиты протяженных металлических поверхностей, имеющих поврежденную изоляцию и вообще лишенных её в средах с различным удельным сопротивлением;
- возможность регулирования защитного тока в процессе эксплуатации;
- возможность автоматизации процесса защиты.

К недостаткам метода можно отнести высокую начальную стоимость работ, необходимость систематического контроля и профилактического ремонта, а также возможное вредное влияние на соседние незащищенные металлические конструкции.

### 2.2.2. О р г а н и з а ц и я К З В Т.

Установка катодной защиты состоит из источника постоянного тока, анодного заземления и соединительных кабелей.

Защищаемая конструкция присоединяется к отрицательному полюсу источника тока, к его положительному полюсу подключают второй электрод – анодный заземлитель. Место контакта с конструкцией называется точкой дренажа. Принципиальную схему метода можно представить следующим образом (рис. 6)

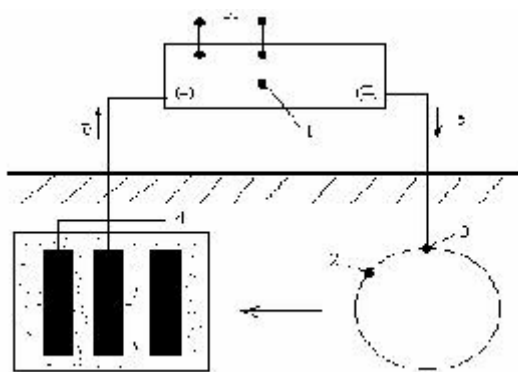


рис. 6

1 – источник постоянного тока

2 – защищаемое сооружение

3 – точка дренажа

4 – анодное заземление

Работа катодной защиты возможна лишь в том случае, когда защищаемая конструкция и анодное заземление находятся в электронном и электролитическом контакте. Электронный контакт достигается с помощью металлических проводников, электролитический обеспечивается электропроводностью грунта. При этом поверхность защищаемого металла поляризуется катодно и на ней протекают процессы катодного восстановления, чаще всего – кислорода. Аноды служат для съема на землю положительных зарядов и на них протекают преимущественно анодные процессы окисления. Поэтому в данном случае, в отличие от протекторной защиты, необходимо заботиться о том, чтобы аноды были изготовлены из материалов, наиболее стойких к окислению.

Для питания постоянным током обычно используют выпрямители, преобразующие переменный ток промышленной частоты в постоянный.

В простейшем случае КЗВТ сооружения может производиться от нерегулируемого источника с настраиваемым постоянным напряжением на выходе. Они получили название преобразователей потенциала с ручным управлением.

Такая система защиты может быть использована, если параметры защищаемого объекта остаются стабильными во времени. Тогда задается от источника постоянная величина защитного потенциала, нерегулируемая во времени. Если параметры защищаемого объекта меняются во времени, то следует при организации КЗВТ использовать автоматические катодные станции, поддерживающие потенциал защищаемого объекта в заданном режиме.

Преобразователи с автоматическим управлением оборудованы устройством для стабилизации заданной разности потенциалов между защищаемым сооружением и землей. Они называются автоматическими станциями катодной защиты. Блок-схема автоматической станции катодной защиты представлена на рис. 7.

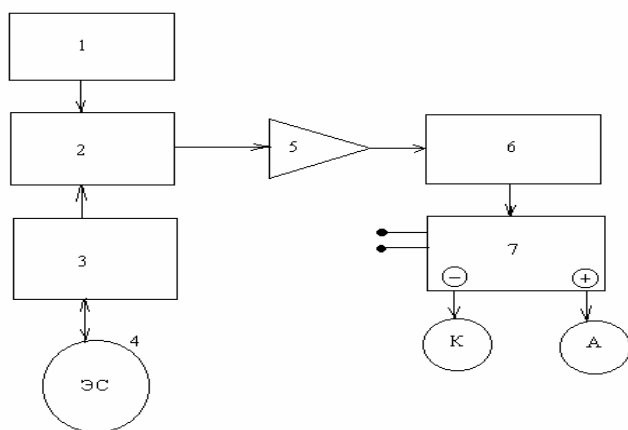


рис 7.

С помощью блока, задающего потенциал 1, устанавливается требуемый защитный потенциал. Это значение потенциала сравнивается с помощью блока сравнения 2 с потенциалом защищаемой конструкции, измеренной по отношению к тому же электроду сравнения 4 с помощью блока измерения потенциала 3. Разность потенциалов после усиления блоком усилителя 5 подается на блок управления 6, корректирующего силу поляризующего тока, идущего от выпрямителя 7.

Конструктивно станции катодной защиты могут быть различными, однако, принципиальная схема у них одна.

### 2.2.3. Расчет параметров КЗВТ.

Исходными данными для расчета являются параметры проектируемого сооружения, а также удельное сопротивление грунта по трассе сооружения.

Поверхность трубопровода  $S$  определяется из соотношения.

$$S = \sum_{i=1}^n d_i l_i 10^3 \quad (\text{м}^2) \quad (16)$$

где  $d_i$  – диаметр сооружения, мм

$l_i$  – длина участка сооружения с данным размером диаметра, м

При совместной защите газопровода, водовода и теплотрассы общая защищаемая поверхность будет равна:

$$\sum S = S_{\text{газ}} + S_{\text{вод}} + S_{\text{тепл}} \quad (17)$$

Доля поверхности каждой магистрали определяется как:

$$\left. \begin{aligned} b &= (S_{\text{вод}} / \sum S) \cdot 100\% - \text{доля поверхности водовода} \\ c &= (S_{\text{тепл}} / \sum S) \cdot 100\% - \text{доля поверхности теплотрассы} \\ d &= (S_{\text{газ}} / \sum S) \cdot 100\% - \text{доля поверхности газопровода} \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Плотность поверхности каждого трубопровода, приходящаяся на единицу площади занимаемой территории  $S_{\text{тер}}$  ( $\text{м}^2/\text{га}$ ), определяется из выражений:

$$\left. \begin{array}{l} \text{для водовода} \quad e = S_{\text{вод}}/S_{\text{тер}} \\ \text{для теплотрассы} \quad f = S_{\text{тепл}}/S_{\text{тер}} \\ \text{для газопровода} \quad d = S_{\text{газ}}/S_{\text{тер}} \end{array} \right\} \quad (19)$$

$S_{\text{тер}}$  – выражается в гектарах.

Средняя плотность тока  $i$  (мА/м<sup>2</sup>) находится из выражения:

$$i = 30 - (99b + 128c + 33,9d + 3,33e + 0,61f + 4,96r_r) \cdot 10^{-3} \quad (20)$$

Если значение средней плотности тока, вычисленное по формуле, будет меньше 6 мА/м<sup>2</sup>, то в дальнейших расчетах принимается  $i = 6$  мА/м<sup>2</sup>.

Суммарный защитный ток  $I_{\text{защ}}$ , необходимый для обеспечения катодной защиты подземных сооружений равен:  $I_{\text{защ}} = \alpha \cdot i \cdot \sum S$

$\alpha$  – коэффициент неравномерности распределения, равный 1,2÷1,3

Количество катодных установок приближенно определяется по формуле:  $n = I_{\text{защ}}/25$ , т.к. сила тока одной станции не должна, по возможности, превышать 25 А.

После размещения катодных установок на плане необходимо проверить зону действия каждой из них. Для этой цели определяется радиусы действия каждой катодной установки.

$$R_k = \sqrt{\frac{I_{kc}}{i k}} \quad (21)$$

где  $I_{kc}$  – ток катодной станции, А

$k$  - удельная плотность сооружений, равная  $\sum S/S_{\text{тер}}$

Если площади полученных окружностей, радиусы которых соответствуют радиусам действия катодных установок, а центры находятся в точках размещения анодных заземлителей, не охватывают всей защищаемой территории, необходимо изменить места расположения катодных установок (либо значения их токов) и вновь выполнить проверку.

#### 2.2.4. Анодные заземлители при КЗВТ

Анодное заземление является одним из важнейших элементов катодной защиты. От правильного выбора и расположения анодного заземления по отношению к защищаемому объекту зависит эффективность и надежность катодной защиты.

Для обеспечения достаточной долговечности работы установки катодной защиты аноды должны быть изготовлены из материалов, стойких к окислению в условиях эксплуатации, т.к. их замена часто связана с большими затратами.

Как показывает опыт эксплуатации, наибольшему разрушению подвергаются стальные аноды ( $\approx 9,1$  кг/А. год). Это основной недостаток стальных анодов. Поэтому они применяются вместе с коксовыми активаторами, которые уменьшают скорость растворения анодов за счет снижения плотности тока.

Известно применение в качестве анодного материала алюминия. При этом допустимая плотность анодного тока значительно выше, чем в случае остальных анодов. Малый электрохимический эквивалент  $Al$  обеспечивает и меньший расход массы анода. Ограничением применения алюминия является его стоимость. Он может применяться для защиты конструкций, работающих в водных средах, не содержащих галогенов, где алюминий пассивируется.

Графит, пропитанный воском или смолами, является легко доступным и сравнительно дешевым материалом. Однако он имеет малую механическую прочность. Выделяющиеся при его работе газы также способствуют его механическому разрушению, поэтому области применения графита ограничены, хотя стойкость графитовых электродов в  $10 \div 15$  раз выше остальных.

Находят применение для изготовления анодов сплавы свинца. Они обладают хорошими электрохимическими и технологическими свойствами. При их анодной поляризации в области плотностей тока  $200 \div 500$  А/м<sup>2</sup> на поверхности свинцовых сплавов ( $Ag$ ,  $Sb$ ) образуется тонкая пленка проводящей двуокиси свинца ( $PbO_2$ ), которая делает анод устойчивым к растворению.

Поэтому перед установкой таких анодов их поверхность подвергают предварительной обработке – анодному окислению – с целью получения пленки двуокиси свинца, надежно защищающей анод от быстрого растворения.

Очень высокими свойствами в качестве анодных материалов обладают сплавы свинца с включениями из благородных металлов – платины или платинированного титана. Включения вплавляют или запрессовывают в анод в виде проволоки или полос.

Такие добавки улучшают условие образования пленки  $PbO_2$  и способствуют её регенерации в случае механического повреждения. Эти аноды практически не растворимы и сохраняют в течение многолетней эксплуатации постоянное сопротивление растеканию тока в установках катодной защиты.

Использоваться они могут в любых природных средах. Преимуществом таких анодов являются небольшие размеры и возможность придания им любой формы.

Платинированный титан ( $Ti + Pt$ ) с электрохимической точки зрения ведет себя также как платина, хотя стоимость его во много раз ниже.

Широко применяют сейчас железокремниевые аноды, изготавливаемые из высококремнистых  $>16\% \text{ Si}$  чугунов – ферросилидов. Скорость их анодного растворения не превышает  $0,5 \div 0,6 \text{ кг/А. год}$ . Они тоже могут эксплуатироваться во всех природных средах, содержащих  $\text{Cl}^-$  – ионы, ферросилид должен быть легирован молибденом или хромом.

Чем выше содержание кремния в сплаве, тем лучше его электрохимические свойства – высокая хрупкость и твердость.

К важнейшим факторам, характеризующим свойства анода и определяющим его практическую пригодность, относятся скорость его коррозии и допустимая плотность тока.

В каждом случае следует стремиться к оптимальному распределению тока и потенциала на защищаемой поверхности, что обеспечивается наименьшим сопротивлением растеканию тока анода.

Сопротивление растеканию тока зависит, прежде всего от сопротивления окружающей анод среды, от его размеров, формы, а также от их расположения в грунте.

Сопротивление растеканию тока с заземлителя снижается при увеличении его диаметра и длины. Причем, при увеличении длины снижение  $R$  идет быстрее, чем при увеличении радиуса заземлителя. Поэтому по мере заглубления заземлителей кривая распределения тока делается более плавной. Кроме того, более глубокие слои грунта, как правило, имеют большую влажность, что увеличивает их электропроводность и ещё больше снижает сопротивление растеканию тока. По этой же причине анодные заземлители следует устанавливать в местах наибольшего увлажнения грунта, т.е. в местах его наименьшего сопротивления.

Т.к. вследствие явления электроосмоса прианодное пространство обезвоживается, рекомендуется устанавливать аноды ниже уровня грунтовых вод.

Для увеличения электропроводности грунта аноды помещают в специальную засыпку, состоящую из токопроводящих веществ. Чаще всего для этого используют гранулированный кокс, активированный уголь, графит или смеси из этих веществ.

Засыпка облегчает удаление образующихся на аноде газов. Кроме того, на поверхности зерен засыпки, которые должны быть в среднем размером  $2 \div 10 \text{ мм}$ , частично протекают электродные реакции, благодаря чему увеличивается рабочая поверхность анода и уменьшается его растворение.

Конструкция заземления должна обеспечивать как необходимую стабильность растеканию тока, так и долговечность заземления.

Анодные заземления наиболее часто выполняют в виде параллельно соединенных электродов, расположенных как вертикально, так и горизонтально на глубине  $5 \div 8 \text{ м}$ . Их называют поверхностными анодными заземлителями.



В крупных городах, имеющих густую и разветвленную сеть подземных коммуникаций, применяются глубинные заземления, занимающие в плане минимальную площадь. Эти заземления устанавливаются на глубине, превышающей 12÷15 м и их сооружение требует применения сложной буровой техники.

Поскольку устройство анодного заземления требует значительных затрат, то расчет анодного заземления ведут с учетом технико-экономических показателей. Например, число анодных заземлителей определяют из соотношения:

$$n = I_k \sqrt{51,5 R_1 C_3 / C_a \eta \eta_3 \eta_u} \quad (22)$$

где  $I_k$  – сила тока катодной станции, А

$R_1$  – сопротивление растеканию тока одиночного электрода, Ом

$C_3$  – стоимость 1 кВт-часа электроэнергии, руб./кВт-час

$C_a$  – стоимость одного анода, руб.

$\eta$  – КПД катодной станции

$\eta_3$  – коэффициент экранирования заземлений (учитывает их взаимное влияние)

$\eta_3 \approx 0,9 \div 0,96$

$\eta_u$  – коэффициент использования анода.

Величина  $R_1$  рассчитывается по формулам, соответствующим условиям их расположения.

Например, для вертикального электрода в активирующей засыпке  $R_1$  равно:

$$R_1 = (0,16/l_a) \rho_r (\ln(2l_a/d_a) + 0,5 \ln((4h+l_a)/(4h-l_a)) + (\rho_a/\rho_2) \ln(d_a/d_3))$$

где  $\rho_2$  – сопротивление грунта, Ом. М

$\rho_a$  – удельное сопротивление активатора

$l_a$  – длина электрода,  $d_3$  – его диаметр, м.

$h$  – средняя глубина установки (расстояние от уровня земли до середины электрода)

$d_a$  – диаметр активирующей засыпки, м.

Для других способов прокладки анодного заземления существуют другие формулы расчета их сопротивления, полученные на основании расчета параметров соответствующих электрических цепей.

Срок службы анодного заземления рассчитывается по формуле:

$$T = \frac{Q}{\alpha k I_{az}} \quad (24)$$

где  $T$  – срок служба заземления, год

$Q$  – масса металла заземления, кг

$\alpha$  – коэффициент запаса ( $\approx 1,3$ )

$k$  – электрохимический эквивалент металла заземления, кг/А•год

$I_{аз}$  – сила тока, стекающего с заземлителя, А

Срок службы анодного заземления должен быть не менее 10 лет.

#### 2.2.5. Вторичные явления при катодной защите

При работе установки катодной защиты в приэлектродном слое, прилегающем к защищаемой поверхности, в результате протекания электродной реакции происходят изменения, прежде всего меняется pH приэлектродного слоя.

Изменение pH приводит к тому, что на поверхности защищаемого объекта делается возможным выпадение карбоната кальция.

Образование осадков особенно заметно при эксплуатации защиты в морской воде или в жесткой пресной воде.

Катодные осадки карбонатов труднорастворимы и оказывают благоприятное воздействие на работу катодной станции, т.к. на оголенных участках сооружения образуется естественная хорошо прилегающая изоляционная пленка. Это ведет к уменьшению необходимого защитного тока.

При исследовании формирования солевой пленки на стали при катодной защите показано, что вначале растут отдельные кристаллы. С течением времени их количество увеличивается и постепенно почти вся поверхность покрывается солевой пленкой. Качество осадков зависит от плотности защитного тока.

При больших плотностях защитного тока осадок образуется быстро, но он получается крупнозернистым, дендритообразным, имеющим слабую адгезию к металлу. При меньших плотностях тока ( $\sim 0,2 - 0,3 \text{ А/м}^2$ ) осадок мелкозернистый.

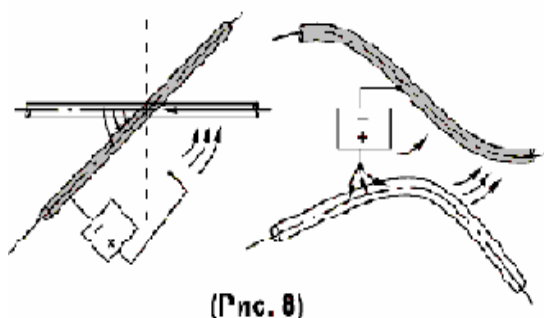
Если поверхность стали покрыта продуктами коррозии, кристаллы осадка образуются в порах и на открытых участках. Установлено, что осадки с наилучшими защитными свойствами образуются при двухступенчатом режиме поляризации – сначала большими токами, а затем токами, обеспечивающими защитный потенциал.

При этом образуются наиболее мелкокристаллические уплотненные осадки.

#### 2.2.6. Влияние КЗВТ на соседние металлические конструкции.

Установка катодной защиты может быть источником коррозионной опасности для находящихся вблизи нее и не имеющих электрохимической защиты металлических

конструкций. При этом наиболее опасны случаи пространственного пересечения незащищенных трасс с защищенными или их сближение. (Рис. 8)



Часть анодного тока (это уже блуждающий ток) проходит по незащищенной конструкции и покидает ее в месте пересечения или сближения с защищаемым объектом. В этих местах наблюдается весьма интенсивное коррозионное разрушение незащищенного объекта вследствие сдвига

потенциала в положительную сторону и анодной ионизации металла.

Степень воздействия катодной защиты на соседние конструкции зависит от многих факторов: от параметров работы катодной станции, расположения анодных заземлителей, взаимного расположения конструкции, их формы, материала и т.п.

Это воздействие определяется на основании измерений потенциала соседней конструкции до и после включения защиты. Если после включения защиты происходит значительный сдвиг потенциала незащищенных конструкций в положительную сторону (20 - 30 мВ и выше), то это воздействие считается опасным.

Уменьшение или полную ликвидацию вредного воздействия токов катодной защиты можно осуществлять следующим образом:

- увеличением расстояния между анодным заземлением и соседней конструкцией;
- устройством защиты соседней конструкции;
- включением всех конструкций данной зоны в общую систему катодной защиты.

Выбор способа снижения влияния зависит от каждого конкретного случая.

#### 2.2.7. Электрические измерения при эксплуатации катодной защиты

Литература к разделу: [2, 4, 5].

Определение коррозионной опасности на металлических сооружениях, подготовка и реализация антикоррозионных мероприятий требуют выполнения большого количества разнообразных электроизмерительных работ. Эти работы проводятся как при наладке, так и при эксплуатации средств электрической защиты.

Выполняются эти измерения специальным персоналом антикоррозионной службы. Проводятся измерения различных электрических величин – силы тока, сопротивления, потенциала и т.д.

Периодичность замеров зависит от вида защиты и условий ее эксплуатации и указывается в инструкциях по обслуживанию оборудования.

Как правило, в начальный период эксплуатации рекомендуется более частый контроль работы защитных устройств. При стабилизации режима работы частота контрольных измерений обычно снижается. При изменении режима работы защитного оборудования число контрольных замеров должно возрастать.

Все измерения, проводимые как на вновь прокладываемых трассах, так и на уже эксплуатирующихся, можно разделить на две группы:

1. Измерения, выполняемые с целью определения коррозионной опасности.
2. Измерения, выполняемые с целью определения эффективности электрохимической защиты.

К первой группе измерений, прежде всего, относится измерение коррозионной активности грунтов.

#### 2.2.7.1. Определение коррозионной активности грунтов

Определение коррозионной активности грунтов вдоль трассы защищаемого сооружения особенно важно при бесканальной прокладке трубопроводов, когда сооружение имеет электрический контакт с грунтом на всем протяжении трассы. Для возможности сравнения коррозионной активности грунтов разработан государственный стандарт на этот параметр ГОСТ 9015-74.

В соответствии с этим ГОСТом коррозионная активность грунтов по отношению к стали может быть определена по трем параметрам:

- по удельному электрическому сопротивлению грунта,  $\rho_r$ . Чем меньше  $\rho_r$ , тем больше коррозионная опасность;
- по потере массы стальных образцов, помещенных в аналогичные условия. Чем больше потеря массы в сопоставимых условиях, тем выше коррозионная активность грунта;
- по плотности поляризующего тока, необходимого для поддержания

определенной разности потенциалов (по ГОСТу  $\Delta E=0,5$  В). Чем больше необходимая плотность тока, тем меньше опасность коррозии.

Удельное сопротивление грунта может быть измерено различными способами.

#### 2.2.7.2. Измерение удельного сопротивления

Метод основан на классическом определении удельного электрического сопротивления материалов по закону Ома, при помощи специальной ячейки – резистометра.

$$\rho_z = K \frac{\Delta U_1}{I} \quad (25)$$

где  $\rho_z$  – удельное сопротивление грунта, Ом·м

$\Delta U_1$  – падение напряжения на участке l, В

$I$  – сила поляризующего тока, А

$K$  – коэффициент, равный отношению площади  $S$ , через которую протекает ток, к длине участка  $l$  ( $K=S/l$ ). Это так называемая «константа прибора».

Схема установки представлена на рисунке 9.

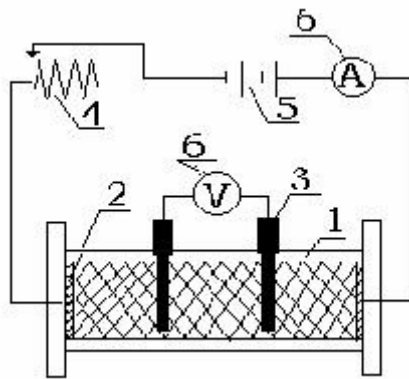


Рисунок 9.

1 – корпус резистометра

2 – питающие электроды

3 – электроизмерительные приборы

4 – переменный резистор

5 – источник постоянного тока

6 – электроизмерительные приборы (А, В)

Измерительная ячейка представляет собой емкость из непроводящего материала, объемом  $1 \text{ дм}^3$ . Внутри расположены два квадратных свинцовых электрода, площадью  $1 \text{ дм}^2$ . Ячейка заполняется грунтом, который затем тщательно утрамбовывают. При различных значениях  $I$  определяют падение напряжения на участке  $l$  и рассчитывают  $\rho_z$  по формуле:

$$\rho_z = 0,1 \frac{\Delta U_1}{I} \quad (26)$$

Метод используют в лабораторных условиях.

Существует метод и при использовании четырехэлектродной установки. Этот

метод может быть использован как в лаборатории, так и в промышленных условиях. В этом случае измерительные электроды (стержневые) размещают в одну линию, которая совпадает с осью трассы, как показано на рис. 10.

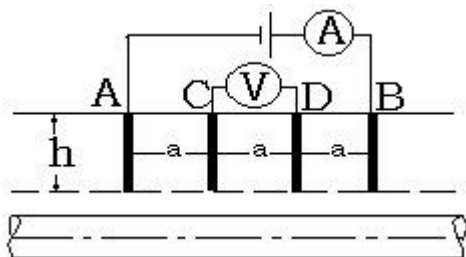


рис. 10

Если расстояние между электродами равно, допустим, величине «а», а глубина забивки  $h$  постоянна, то удельное сопротивление грунта  $\rho_r$  рассчитывают по формуле 27:

$$\rho_r = 2\pi a \frac{\Delta U}{I} \quad (27)$$

Необходимое условие: величина  $h$  не должна быть более  $1/20$  «а». Только в этом случае расчет ведется по такой упрощенной формуле. Электроды чаще всего бывают латунными или медными.

Возможно определение коррозионной активности грунтов и по потере массы стальных образцов.

Этот метод применим только в лабораторных условиях. Исследуемые образцы готовят так, как и для любых гравиметрических испытаний – зачищают, обезжиривают, взвешивают. Затем погружают в пробу грунта и подключают к положительному полюсу источника постоянного тока. К отрицательному его полюсу присоединяют вспомогательный электрод.

Образцы выдерживают в течение 24 часов при плотности тока  $3 - 5 \text{ А/дм}^2$ . После отключения тока образцы очищают от продуктов коррозии и снова взвешивают. По величине потери массы судят о коррозионной активности грунтов. Коррозионная активность грунтов определяется также по величине поляризующего тока.

Метод также используется только в лабораторных условиях. Два стальных электрода помещают в пробу грунта, присоединив к полюсам источника постоянного тока.

Задают различные величины поляризующего тока и в момент разрыва цепи измеряют разность потенциалов между электродами.

На основании полученных данных строят диаграмму  $\Delta U - I$  (плотность

поляризующего тока). По диаграмме определяют величину  $I$ , соответствующую разности потенциалов, равной 0,5 В. Чем выше значение  $i$ , при  $\Delta U=0,5$  В, тем большей коррозионной активностью обладает грунт.

Различают низкую, среднюю, повышенную, высокую и весьма высокую коррозионную активность грунтов. Если по одному из определяемых параметров – ( $\rho_r$ ,  $\Delta m$  или  $i$ ) устанавливается высокая коррозионная активность грунта, то ее определение по другим показателям уже не имеет смысла. По отношению к стали деление грунтов по коррозионной активности представлено в таблице.

Таблица Коррозионная активность грунтов.

Коррозионная активность	Удельное сопротивление грунта, Ом·м	Потеря массы образцов, $\frac{g \cdot dm^2}{сут}$	Средняя плотность поляризующего тока, $i$ , мА/см <sup>2</sup>
Низкая	Свыше 100	До 1 г	До 0,05
Средняя	20-100	1-2 г	0,05-0,2
Повышенная	10-20	2-3 г	0,2-0,3
Высокая	5-10	3-4 г	0,3-0,4
Весьма выс.	До 5	Свыше 4	Свыше 0,4

#### 2.2.7.3. Определение переходного сопротивления «трубопровод – грунт».

Величина переходного сопротивления  $R_n$  может быть определена различными методами, наиболее часто используют метод «мокрого контакта».

В месте измерения переходного сопротивления покрытие на трубопроводе очищают от грунта по длине не менее 0,5 м. На очищенную поверхность по периметру накладывают тканевое покрытие, смоченное в 3%-ном растворе NaCl. Поверх тканевой прокладки накладывают металлический электрод (бандаж).

Схематически этот способ представлен на рис. 11

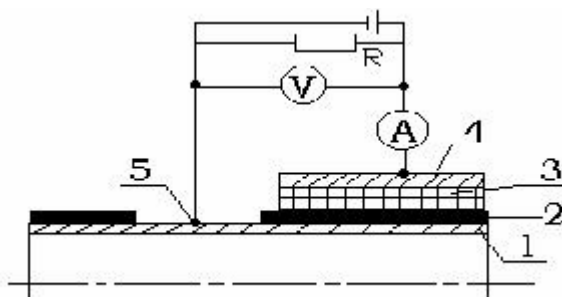


Рис.11.

- |   |                            |
|---|----------------------------|
| 1 – стенка трубопровода                             | 2 – изолирующее покрытие   |
| 3 – тканевая прокладка                              | 4 – металлический электрод |
| 5 – контакт со стенкой трубопровода (металлический) |                            |

Делителем напряжения R устанавливают определенное напряжение (~30 В). Измеряют ток в цепи с помощью амперметра и установленное напряжение – вольтметром. Переходное сопротивление рассчитывают по формуле:

$$R_n = \frac{US}{I} \quad \text{где } S \text{ – площадь электрода – бандажа, м}^2.$$

Переходное сопротивление измеряется и с помощью других методов (метод Никольского, метод Цикермана), но метод «мокрого контакта» - прямой метод.

#### 2.2.7.4. Определение участков затопления трубопроводов.

На участках затопления или заноса грунтом будет происходить интенсивное разрушение подземного трубопровода. Поэтому своевременное обнаружение таких участков очень важно. Обнаружение коррозионноопасных зон производится при помощи измерения изменения потенциала вдоль трассы.

Прибор состоит из генератора, приемника и поискового контура. Поисковый контур может иметь поверхностные контакты или штыревые (в случае возможного влияния внешних электрических цепей). Схематически работу схемы можно представить следующим образом (рис. 12)

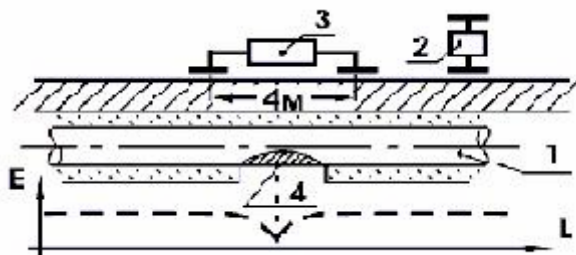


Рисунок 12.

- |                 |  |
|-----------------|--|
| 1 – трубопровод | 2 – генератор  |
| 3 – приемник    | 4 – место контакта с грунтом (или место затопления). |



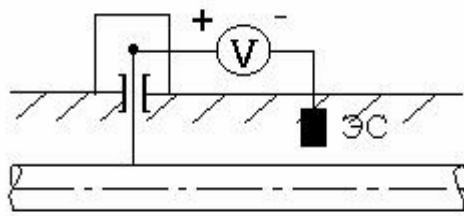


рис. 13

Генератор генерирует звуковые волны, улавливаемые приемником (чаще телефоном). По уровню звука можно определить место падения напряжения на трубопроводе.

#### 2.2.7.5. Измерение разности потенциалов «сооружение – грунт».

Разность потенциалов между подземным сооружением и грунтом измеряют при помощи высокоомных показывающих или самопишущих приборов (рис 13).

Положительная клемма измерительного прибора присоединяется к металлическому сооружению в месте контрольно – измерительного пункта (КИП), отрицательная – к электроду сравнения – временному или стационарному. Стационарный – заглублен до минимального расстояния от защищаемой конструкции. Временный также лучше заглубить на эту же величину. Если сделать этого невозможно, следует расположить ЭС на поверхности грунта над осью сооружения. С помощью регистрирующего прибора определим разность потенциалов между грунтом и сооружением. Зная потенциал электрода сравнения, можно определить и потенциал конструкции. Однако измеренную величину потенциала нельзя отождествлять с защитным потенциалом, т.к. при измерении обязательно надо учесть величину омического падения напряжения в грунте. То есть измеряемая величина  $E_{изм}$  равна сумме нескольких слагаемых:

$$E_{изм} = E_{см} + \Delta E_{см} + \Delta U_{см} \quad (29)$$

где  $E_{см}$  – стационарный потенциал материала конструкции

$\Delta E_{см}$  – смещение стационарного потенциала при катодной поляризации

$\Delta U_{см}$  – омическое падение напряжения.

Защитный потенциал есть сумма первых двух слагаемых

$$(E_{см} + \Delta E_{см}) = E_{защ}$$

Омическая составляющая вносит существенный вклад в измеряемую величину, т.к.  $\Delta U_{см}$  может достигать нескольких вольт. Омическая составляющая измеряемой величины потенциала зависит от сопротивления грунта между поверхностью конструкции и той точкой среды, где установлен электрод сравнения, а также от величины тока в цепи.

Учет омической составляющей потенциала может быть произведен с помощью релаксационных методов, т.е. методов, основанных на изменении потенциала при отключении поляризации и исследовании процесса спада потенциала.

Методы основаны на том, что при отключении поляризации омическая составляющая снимается не мгновенно, а через промежуток времени  $\sim 10^{-8}$  сек. Этот процесс можно

обнаружить на осциллографе с большим временем послесвечения. Чем круче идет кривая спада потенциала, тем меньше омическая составляющая измеряемой величины.

Метод отключений, как еще его иначе называют, имеет ряд ограничений. Прежде всего, он достаточно надежен только в случае, когда величина переходного сопротивления на границе «трубопровод – грунт» велика. В противном случае происходит практически мгновенный спад потенциала до стационарного значения.

Релаксационные методы не могут быть также использованы при наличии поля блуждающих токов из-за больших искажений измеряемой величины.

Избежать этих ограничений можно, если использовать так называемый датчик электрохимического потенциала. Это специальный электрод, соединенный с трубопроводом и приобретающий его потенциал. Этот электрод изолируется от влияния блуждающих токов и от грунта. Поэтому процесс отключения этого датчика от трубопровода и позволяет определить омическую составляющую в чистом виде.

### 3. Электродренажная защита

Особое внимание при проработке данного раздела следует обратить на определение характера блуждающих токов, так как от этого зависит выбор способа защиты сооружений.

Литература по теме [3, 4, 5].

#### 3.1. Возникновение блуждающих токов.

Металлические конструкции, находящиеся в грунте или водоемах вблизи электрического оборудования, линии электропередач, электрических транспортных линий и т.п., подвергаются коррозии, вызываемой блуждающими токами.

Коррозионному поражению блуждающими токами подвергаются различные подземные трубопроводы, силовые и телефонные кабели, подземные трубопроводы, силовые и телефонные кабели, подземные и подводные металлические опоры и т.п. Наличие блуждающих токов также снижает эффективность катодной защиты подземных сооружений.

Наиболее опасны токи от установок, работающих на постоянном токе, например, электрифицированные железные дороги или электрический городской транспорт. Однако, блуждающие токи от линий переменного тока высокого напряжения также могут вызывать коррозионное разрушение. Особенно чувствительны к ним алюминиевые оболочки кабелей.

В некоторых странах часто применяется передача постоянного тока высокого напряжения способом, при котором одним из проводников служит грунт, вода морей, озер

и т.п. Такой метод имеет неоспоримые преимущества – низкая стоимость оборудования, малые потери энергии. Однако при этом резко возрастает опасность коррозионного разрушения подземных или подводных металлических сооружений. Источником блуждающих токов являются также установки катодной защиты.

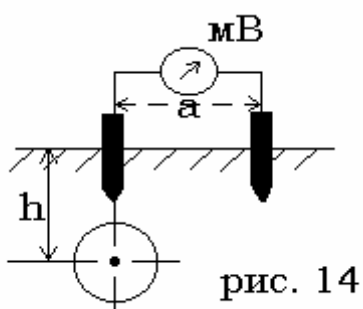
Блуждающие токи можно разделить на статические и динамические.

Статические блуждающие токи характеризуются постоянной во времени амплитудой. Примером могут служить блуждающие токи электролизных цехов.

Динамические блуждающие токи непрерывно меняют свою амплитуду и направление. При этом возникающие анодные зоны на конструкции будут подвергаться усиленной коррозии.

Обнаруживается наличие блуждающих токов в системе по колебаниям потенциала конструкции.

Существует много методов определения направления и плотности блуждающих токов. Принципиальная схема этих методов может быть показана рисунком 14.



Метод заключается в определении разности потенциалов между двумя неполяризующимися электродами сравнения, один из которых установлен над исследуемой конструкцией, а другой в стороне на расстоянии «а». Если электрод, находящийся над конструкцией, является более положительным, значит в этом месте объекта существует анодная зона и

конструкция будет разрушаться. Если подобрать величину «а», равную утроенной глубине залегания трубопровода (h), то стекающий анодный ток определяется из выражения:

$$i_a = 2,73 \frac{\Delta E}{\rho_z} \quad (30)$$

где  $\Delta E$  – измеренная разность потенциалов, В

$\rho_z$  – сопротивление грунта, Ом·м.

В других соотношениях «а» и h формула несколько усложняется

$$i_a = 2,73 \frac{\Delta E}{\rho_z \lg \frac{a^2 + h^2}{h^2}} \quad (31)$$

### 3.2. Способы защиты от блуждающих токов

### 3.2.1. Предупредительные меры

Существуют так называемые предупредительные меры защиты от БТ, которые по своему назначению делятся на две группы.

К первой группе относятся такие способы, которые обеспечивают ограничение силы блуждающих токов от различных источников. Эти способы реализуются непосредственно на источниках блуждающих токов.

Ко второй группе относятся такие способы, которые обеспечивают защиту подземных металлических сооружений от проникновения в них блуждающих токов. Они осуществляются на защищаемом сооружении.

#### 3.2.1.1. Ограничение силы блуждающих токов

В группу способов, ограничивающих величину блуждающих токов, следует отнести:

- увеличение переходного сопротивления между источником блуждающих токов и грунтом, т.е. изолирование источника утечки от грунта. Для этого укладка железнодорожных рельсов ведется на железобетонных шпалах или деревянных шпалах, пропитанных специальным непроводящим составом. Опоры линий электропередач устанавливают на бетонных или каменных основаниях с обязательным отводом от них грунтовых вод.

Дополнительно производится окрашивание подземных фундаментов опор специальными электроизоляционными составами, оклейка электроизоляционными материалами или выполнение их из специальных непроводящих бетонов.

Снижение токов утечки с рельсового пути трамваев обеспечивается увеличением проводимости рельсового пути с одновременным увеличением переходного сопротивления на границе «рельса – грунт» применением специальных засыпок с высоким омическим сопротивлением.

На промышленных предприятиях, потребляющих постоянный ток в технологических процессах, снижение плотности блуждающих токов также достигается усилением электрической изоляции оборудования от строительных конструкций.

В качестве изоляторов используют фарфор, базальт, диабаз, стекло, специальные пластмассы и т.п. материалы с удельным сопротивлением не ниже  $10^{10}$  Ом·см.

Не следует применять для изоляции пористые материалы, обладающие повышенной способностью поглощать влагу (бетон, керамику) без специальной обработки их водоотталкивающими и электроизолирующими составами.

Утечка токов с трубопроводов может быть ограничена применением неэлектропроводящих материалов для их изготовления: стекла, полиэтилена.

Другими средствами, направленными на снижение величины токов утечки, являются требования, регламентирующие электрические характеристики питающих электросетей.

### 3.2.1.2. Защита подземных сооружений от проникновения блуждающих токов

К этой группе способов следует отнести такие мероприятия, как рациональный выбор трассы защищаемого сооружения – обход грунтов с повышенной электропроводностью, водоемов или затопляемых участков, ограничение сближения с электрифицированными дорогами или другими источниками блуждающих токов.

К этой же группе способов относят и применение высококачественной изоляции защищаемых конструкций – специальные окраски или покрытия из полимерных материалов.

Прокладка подземных коммуникаций в специальных каналах, шахтах, траншеях с использованием специальных электроизолирующих засыпок также снижает опасность коррозии блуждающими токами.

Значительный эффект дает также увеличение продольного сопротивления подземного защищаемого сооружения за счет его электрического секционирования с помощью электроизолирующих фланцев и муфт.

Электроизолирующие фланцы (ИФ) чаще всего применяют на газопроводах, что значительно увеличивает их продольное сопротивление (рис. 15). Электросопротивление изолирующего фланцевого соединения  $R$  на трубопроводе зависит от внутреннего диаметра трубопровода  $d$ , толщины изолирующей прокладки  $\delta$  и удельного сопротивления  $\rho$  транспортируемой по трубопроводу среды.

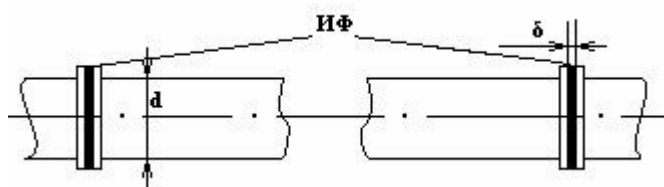


Рис. 15

Зависимость  $R$  от  $\delta$  при постоянном  $\rho$  ( $R=4\rho\delta/dl\pi$ ) выглядит следующим образом (рис. 16).

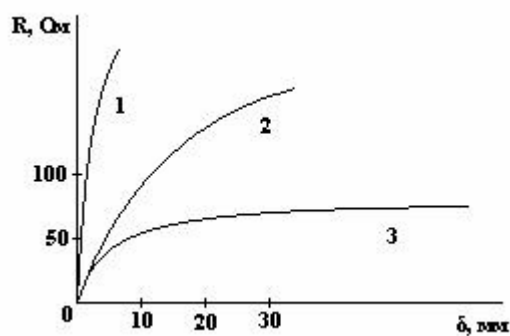


Рис. 16

1 – диаметр  $d=25$  мм ; 2 – диаметр  $d=100$  мм; 3 – диаметр  $d=150$  мм

Т.е. при увеличении диаметра трубопровода сопротивление ИФ резко падает.

Использование изолирующих фланцев такой конструкции на трубопроводах, транспортирующих горячую воду или пар, без дополнительных мер защиты не допустимо. Дело в том, что, как показывает эксперимент, участки трубопровода, примыкающие к прокладке, разрушаются особенно интенсивно вследствие концентрации анодного тока. Поэтому внутреннюю поверхность трубопровода, примыкающих к ИФ, необходимо надежно изолировать защитным покрытием на ширину до 100 мм. Однако, качественная изоляция трубы на участке установки фланца весьма трудновыполнимое мероприятие.

Поэтому вместо защитного покрытия предлагается электрохимическая дополнительная защита трубопровода на участке установки изолирующего фланца.

Один из вариантов такой защиты может быть выполнен с помощью концентрических протекторов (рис. 17).

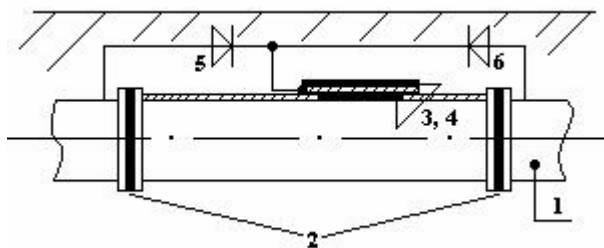


Рис. 17

1 – трубопровод; 2 – изолирующие фланцы

3, 4 – внешний и внутренний концентрические протекторы; 5, 6 – диоды

Это один из случаев применения поляризованных протекторов.

Наибольшая эффективность от применения изолирующих фланцев достигается при большом переходном сопротивлении защищаемого объекта относительно грунта. Для увеличения переходного сопротивления в местах установки ИФ (участки по 10 м в каждую сторону) защищаемое сооружение должно иметь изолирующее покрытие усиленного типа.

Изолирующие фланцы изготавливают из изоляционного материала – паронита, имеющего высокие прочностные и изоляционные свойства. Для изготовления фланцев листы паронита следует тщательно высушить, т.к. высокие диэлектрические свойства имеет только просушенный материал.

Для защиты материала от насыщения влагой после просушки его следует сразу покрыть бакелитовым лаком. Крепление фланцев производится также непроводящими материалами – шпильки и втулки из текстолита.

Правильно изготовленные ИФ при испытании в сухом помещении не дают короткого замыкания при напряжении до 1000 В, в эксплуатационных условиях пробивное напряжение должно быть не менее 100 В.

При эксплуатации ИФ необходимо систематически, не реже 1 раза в месяц, определять их сопротивление.

Изолирующие фланцы рекомендуется применять в зоне действия блуждающих токов в следующих случаях:

- на отводах от магистрального трубопровода боковых ветвей для уменьшения опасности перетекания блуждающих токов;
- на пересечениях трубопроводов с электрифицированными железными дорогами или линиями электропередач постоянного тока для предупреждения попадания блуждающих токов;
- при использовании катодной защиты в поле действия блуждающих токов для снижения затрат электроэнергии и повышения эффективности катодной защиты;
- на выводах трубопроводов в постройки с металлическими каркасами для предотвращения перетекания в них блуждающих токов.

Увеличение продольного сопротивления сооружения может быть достигнуто также установкой специальных изолирующих муфт. Установку изолирующих муфт (ИМ) производят в местах соединения кабелей с разнородными металлическими оболочками, на вводах кабелей в усилительные устройства и т.п.

Схема ИМ представлена на рис. 18.

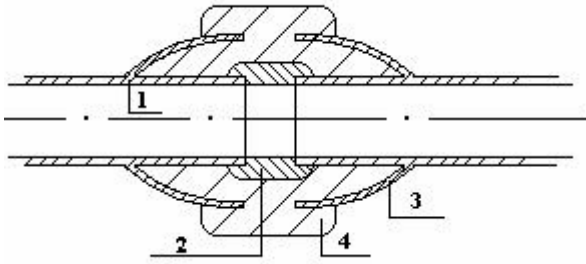


Рис. 18

1 – свинцовая оболочка кабеля

2 – полиэтиленовый пояс

3 – металлическая «юбка»

4 – заливка из эпоксидного компаунда

Конструкция муфт может быть различной. Они бывают разъемными или изготавливаются непосредственно при прокладке линий.

Установка таких ИМ на силовых и кабелях связи снижает также возможность коррозии блуждающими токами.

Если все выше перечисленные предупредительные мероприятия не обеспечили защиты от проникновения в конструкцию блуждающих токов, то необходимо предусмотреть электродренажную защиту сооружения.

### 3.2.2. Способы электродренажной защиты.

Эти способы заключаются в отведении блуждающих токов от защищаемых сооружений к их источнику. Для этого создается металлическое соединение с помощью электродренажного кабеля защищаемой конструкции с отрицательным полюсом источника блуждающих токов (чаще всего - рельсом электрифицированной дороги), в месте наибольшего сдвига потенциала конструкции в положительную сторону.

При этом происходит значительное понижение анодного потенциала защищаемой конструкции или даже ее катодная поляризация. Снижение анодного потенциала тем больше, чем выше напряжение дренажного тока.

Недостатком метода является увеличение утечки тока в землю.

Схематически дренаж блуждающих токов может быть представлен на рис. 19.



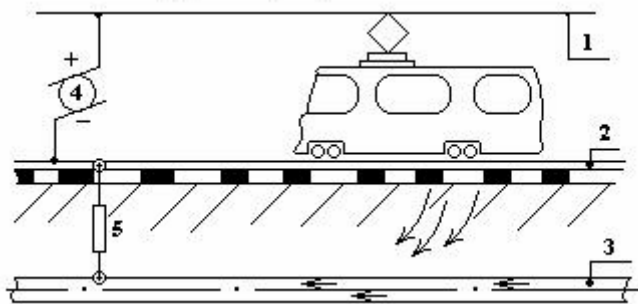


Рис. 19

- |  |                    |
|--|--------------------|
| 1 - контактный провод                      | 2 - рельс          |
| 3 - трубопровод, подлежащий дренажированию | 4 - генератор тока |
| 5 - дренажное соединение                   |                    |

Это так называемая установка прямого дренажа.

Устройство подобного типа характеризуется возможностью протекания дренированного тока в обоих направлениях, поэтому его можно применять только тогда, когда рельс в точке дренажа имеет постоянный отрицательный потенциал по отношению к защищаемой конструкции.

Эффективная работа таких устройств возможна лишь при значительной разности потенциалов между точками его подключения – не менее 1 В. Это все ограничивает применение прямого дренажа.

Для избежания возможности протекания тока от рельса к защищаемой конструкции по дренажу кабелю при изменении потенциала применяется поляризованный дренаж.

В его схеме кроме переменного сопротивления имеется вентильный элемент, обеспечивающий протекание тока только в одном направлении – от защищаемой конструкции к источнику блуждающих токов.

Схематически поляризованный дренаж представлен на рис. 20.

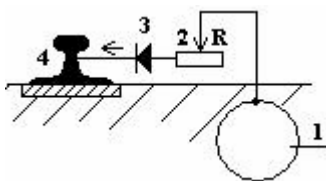


Рис. 20

- |  |                                |
|--|--------------------------------|
| 1 – защищаемый трубопровод                 | 2 – регулируемое сопротивление |
| 3 – вентильный элемент (диод) или дроссель | 4 – источник блуждающих токов  |

Поляризованный дренаж используется в тех случаях, когда рельс почти все время имеет отрицательный потенциал по отношению к защищаемой конструкции и изменение его полярности может происходить только на короткое время.

Если же источник токов имеет постоянно меняющийся потенциал, то применение поляризованного дренажа будет малоэффективным. В этом случае следует использовать усиленный дренаж.

В схеме усиленного дренажа кроме перечисленных выше элементов входят дополнительные элементы входит дополнительный источник тока, обеспечивающий сохранение необходимой поляризации защищаемого объекта даже тогда, когда источник БТ имеет более положительный потенциал (рис. 21).

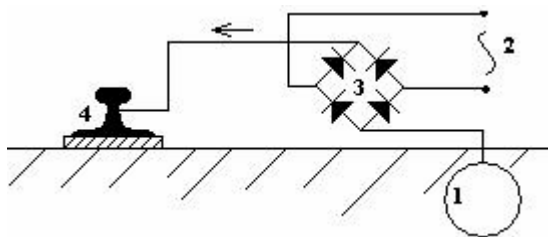


Рис. 21

1 – защищаемый объект

2 – источник тока

3 – диодный мост

4 – источник БТ

Однако, усиленный дренаж применяется ограниченно, так как имеет множество недостатков, главным из которых является чрезмерное потребление электроэнергии разрушение рельсов, вступающих в данном случае в роли анодов.

Защита от БТ может быть осуществлена также с помощью поляризованных управляемых протекторных систем. В этом случае к защищаемому сооружению 1, как и при катодной протекторной защите, подключают эффективный анод 2, но в цепь «сооружение – протектор» дополнительно включают вентильный элемент, например, диод 3 (рис. 22).

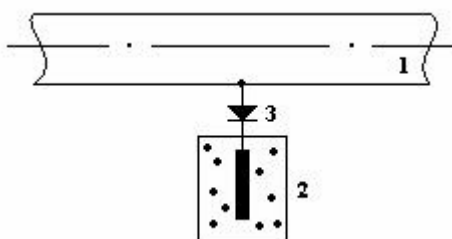


Рис. 22

При наличии БТ система включается только тогда, когда защищаемое сооружение поляризуется анодной составляющей БТ и его потенциал смещается в положительную сторону. При этом блуждающий ток стекает в грунт не с поверхности защищаемой конструкции, а с эффективного анода, который интенсивно растворяется, что приводит к смещению потенциала конструкции в сторону отрицательных значений.

Такую схему можно применять, если нет необходимости ограничивать высокие катодные потенциалы защищаемой конструкции, например, в случае защиты неизолированных стальных подземных конструкций, когда не опасаются «перезащиты». В случае необходимости ограничения потенциала с катодной стороны следует применять систему на транзисторах (рис. 23).

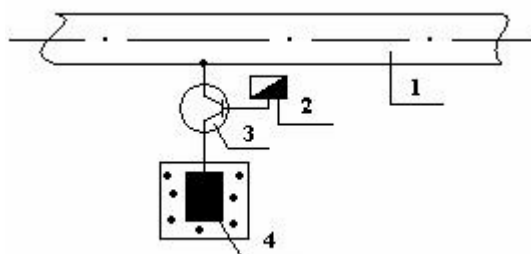


Рис. 23

- |                       |                        |
|-----------------------|------------------------|
| 1 – защищаемый объект | 2 – электрод сравнения |
| 3 – транзистор        | 4 – эффективный анод   |

Ток протекает через цепь только в том случае, когда потенциал базы транзистора, определяемый электродом сравнения, отрицательнее потенциала защищаемого сооружения. По мере сближения потенциала вспомогательного электрода и сооружения ток в цепи базы уменьшается до установления минимального разбаланса потенциалов «электрод сравнения – сооружение». Уровень защитного потенциала устанавливают путем подбора соответствующего электрода сравнения.

Если существует опасность поражения конструкции как анодной, так и катодной составляющей БТ, то следует применять двоянные поляризованные протекторные установки (рис. 24).

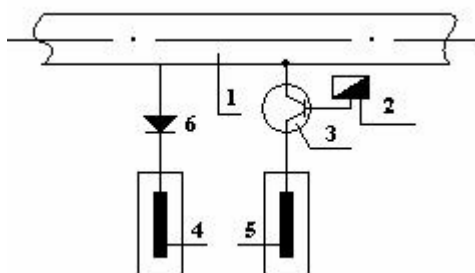


Рис. 24

- |                                 |          |
|---------------------------------|----------|
| 1 – 4 – то же, что и на рис. 23 |          |
| 5 – эффективный катод;          | 6 – диод |

В этом случае при воздействии знакопеременных блуждающих токов могут быть реализованы два случая:

1. Если сооружение поляризуется анодной составляющей блуждающих токов и потенциал сооружения положительнее, чем потенциал эффективного анода, последний подключается через диод к сооружению и поляризует его. При этом эффективный катод отключен.
2. Если сооружение поляризуется катодной составляющей блуждающих токов и его потенциал отрицательнее потенциала эффективного анода, цепь эффективного анода закрыта. Работает эффективный катод.

Подбором диодов и транзисторов определенного типа устанавливаются наилучшие условия работы систем поляризованных протекторов.

Достоинством поляризованных протекторов является их эффективное действие при наличии блуждающих токов, возникших от нескольких независимых источников.

Однако, при большом расстоянии (свыше 1 км) от защищаемой конструкции до рельсов электрифицированного транспорта поляризованные протекторы не в состоянии обеспечить надежный защитный потенциал. В этом случае для защиты от блуждающих токов следует применять катодную защиту от внешнего источника.

Эффективность такой защиты будет зависеть от многих факторов и в первую очередь от расположения катодных заземлителей.

Аноды следует помещать между защищаемой конструкцией и рельсами электрифицированного транспорта напротив участков, имеющих наиболее положительный потенциал относительно рельсов. В этом случае целесообразно использовать автоматические станции катодной защиты, т.к. имеются постоянные колебания потенциала в системе.

В городских условиях, когда имеется высокая концентрация подземных коммуникаций различного назначения, следует предусматривать, как уже упоминалось, совместную защиту всех подземных сооружений, расположенных рядом.

### 3.2.3. Расчет параметров электродренажной защиты

Радиус действия одной усиленной дренажной установки ориентировочно определяют по формуле:

$$R=60\sqrt{J\Delta p/i_a k} \text{ (м)} \quad (32)$$

где  $J\Delta p$  – средняя сила тока дренажа, А

$i_a$  – плотность блуждающих токов, А/м<sup>2</sup>

$k$  – удельная плотность сооружений в данной зоне

$k=\Sigma S/S_{\text{тер}}$ , где  $\Sigma S$  – суммарная защищаемая поверхность, м<sup>2</sup>

$S_{\text{тер}}$  – площадь занимаемая защитными сооружениями, га.

Ток дренажа  $I_{др}$  приближенно определяется из выражения:

$$I_{др} = U_{др} / (R_{каб} + R_{вх}) \quad (33)$$

$U_{др}$  – нормальное напряжение на выходе дренажа, В

$R_{каб}$  – сопротивление дренажного кабеля, Ом

$R_{вх}$  – среднее значение входного сопротивления стального трубопровода, Ом (в месте контакта с дренажным кабелем).

Расположение дренажной защиты должно быть таким, чтобы обеспечить перекрывания всех зон, где возможна коррозия блуждающими токами.

### 3.2.4. Э л е к т р и ч е с к и е   и з м е р е н и я   п р и   э л е к т р о д р е н а ж н о й з а щ и т е

Силу блуждающего тока, протекающего по сооружению, можно измерить несколькими способами:

- непосредственным включением в цепь амперметра.

Измерение силы тока путем непосредственного включения амперметра в разрыв цепи.

Сооружение может быть осуществлено только в редких случаях, например, при проведении монтажных работ на новых или при ремонте существующих сооружений. Наиболее часто такой способ используют для измерений в кабельных системах. Возможно измерение силы тока по методу компенсации.

Этот метод достаточно точный, но он применим только в том случае, когда нет частых изменений силы и направления тока в сооружении. Схема метода показана рисунком 25.

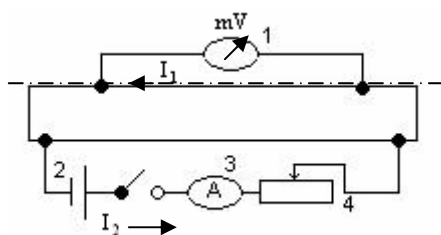


рис. 25

1 – милливольтметр

2 – источник постоянного тока

3 – амперметр

4 – реостат

Источник постоянного тока 2 обеспечивает ток  $I_2$ , направленный навстречу току  $I_1$ , текущему по сооружению. Реостатом 4 меняют сил тока  $I_2$  до тех пор, пока стрелка миллиамперметра не станет на 0. Измеряемая за это время сила тока и есть искомая величина.

Известен способ измерения силы тока по методу падения напряжения.

Определение силы тока по методу падения напряжения заключается в измерении падения напряжения между двумя точками сооружения и величины омического сопротивления на этом участке.

Средняя сила тока, протекающего по сооружению  $I_{cp}$  будет равна:

$$I_{cp} = \Delta U / (R * L) \quad (34)$$

где  $\Delta U$  – измеренное падение напряжения на участке  $L$ , В

$R$  – сопротивление 1м сооружения, Ом

$L$  – длина участка, м

#### 4. АНОДНАЯ ЗАЩИТА.

При изучении этого раздела следует обратить особое внимание на условия, в которых возможно применение анодной защиты.

Литература [3,5,6].

##### 4.1 Общие представления об анодной защите

Использование катодной защиты в агрессивных средах основной химической промышленности малоэффективно в связи с высокими плотностями необходимых защитных токов, а также вследствие интенсивного выделения водорода.

Интерес к электрохимическим способам защиты в химической промышленности возрос в связи с развитием нового метода – анодной электрохимической защиты. Этот метод оказался наиболее применим именно в условиях химических производств.

Сущность метода заключается в наложении анодной поляризации, приводящей к формированию пассивного состояния защищаемого металла и поддержанию его длительное время.

Применению анодной защиты благоприятствует широкое использование в Химической промышленности легкопассивирующихся металлов – нержавеющей сталей, титана и др. Поддержание пассивного состояния металла приводит к значительному снижению скорости его растворения.

Анодную защиту в химической промышленности используют не только с целью увеличения срока службы оборудования, но и для сохранения чистоты агрессивной среды, являющейся химическим продуктом.

## 4.2 Определение возможности и целесообразности анодной защиты

Анодная защита может быть использована в тех случаях, если аноднополяризуемый металл, подлежащий защите, обнаруживает область пассивного состояния шириной не более 50 мВ в данной агрессивной среде. Скорость растворения металла в пассивной области должна быть ничтожно малой: не более  $0,6 : 0,7 \text{ А/м}^2$ .

Если в конструкции использовано несколько металлов, то области их пассивного состояния должны хотя бы частично перекрываться (не менее 50 мВ по потенциалу).

Не менее важным условием успешного применения анодной защиты достаточно малая скорость коррозии металла выше ватерлинии, т.е. над раствором, поскольку защита осуществляется только в жидкой электропроводной среде.

Наиболее подходящим объектом для анодной защиты в промышленных системах является цилиндрический сосуд, в котором объем и состав электролита остаются неизменными. Из химического оборудования для анодной защиты наиболее пригодны аппараты непрерывного действия, а также теплообменники из нержавеющей стали или титана.

Анодную защиту можно применять и для трубопроводов, поскольку скорость коррозии металла в устойчивом пассивном состоянии мало зависит от параметров потока жидкости.

К основным достоинствам анодной защиты следует отнести:

- значительное удлинение срока службы металлических конструкций (часто изготавливаемых из дорогостоящих материалов: титана высоколегированных сплавов);
- возможность замены в некоторых случаях дорогостоящих материалов более дешевыми, например, углеродистой сталью;
- торможение некоторых видов локальной коррозии;
- возможность защиты сложнопрофильных конструкций. Уменьшение загрязнения химических сред продуктами коррозии (пищевая, фармацевтическая промышленность);
- небольшие эксплуатационные расходы вследствие использования относительно низкой силы тока для поддержания пассивного состояния.

Однако, способ анодной защиты имеет и недостатки:

- достаточно высокая стоимость применяемого оборудования;
- необходимость непрерывной безаварийной работы сложной контрольно-регулирующей аппаратуры.

### 4.3 Определение параметров анодной защиты

Основные параметры анодной защиты, определяющие условия ее эксплуатации и эффективность действия, находятся путем анализа потенциостатических анодных кривых (рис 26) защищаемого металла, снятых в данной среде в условиях максимально приближенных к эксплуатационным.

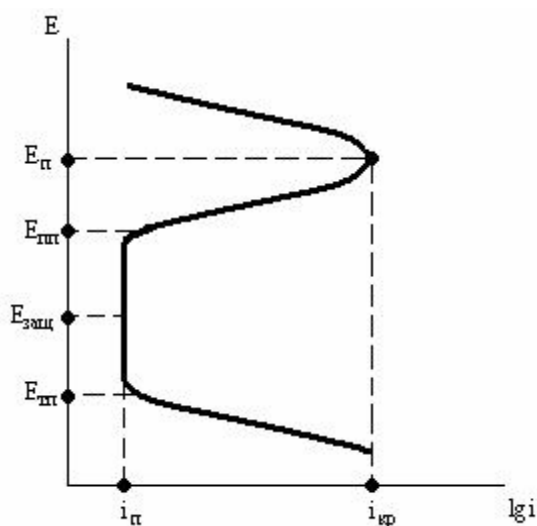


рис. 26

Параметрами анодной защиты являются:

- протяженность области устойчивой пассивации (для определения  $E_{\text{зщ}}$ )  $\Delta E_{\text{п}} = E_{\text{тп}} - E_{\text{пп}}$ ;
- плотность тока в области устойчивого пассивного состояния  $i_{\text{п}}$  (для определения пассивного состояния);
- плотность критического тока пассивации, необходимого для перевода металла в устойчивое пассивное состояние  $i_{\text{кр}}$ ;
- эффективность анодной защиты определяется отношением скоростей растворения металла без защиты к скорости растворения под защитой при данном потенциале.

### 4.4 Анодная защита с катодными протекторами

Для смещения потенциала защищаемого металла в пассивную область можно использовать катодный протектор – более положительный электрод.

Необходимая пассивации и поддержания пассивного состояния сила тока определяется соотношением поверхностей анода и катода, а также соотношением скоростей анодной и катодной реакции.

В качестве протекторов могут быть использованы материалы, стационарный



потенциал которых в данной среде, находится в области пассивного состояния защищаемого металла. Материал протектора должен быть устойчив в данной агрессивной среде и на его поверхности при смещении потенциала в отрицательную сторону должна протекать электрохимическая реакция, ток которой расходуется на поддержание устойчивого пассивного состояния защищаемого металла.

В наибольшей степени всем этим требованиям, конечно, удовлетворяют благородные металлы: платина, палладий, золото. Однако такие протекторные материалы не находят широкого применения ввиду высокой стоимости.

Известно применение в качестве катодных протекторов и других металлов - никеля, титана – для защиты углеродистой стали; висмута и сурьмы – для защиты титана.

Известно также применение в некоторых случаях в качестве протекторного материала нержавеющей сталей и сплава «хастеллой».

Однако, в этих случаях площадь протектора, как правило, должна превышать площадь защищаемой поверхности, что, конечно, не всегда возможно.

Из всех применяющихся при анодной защите протекторных материалов наиболее пригодным следует назвать графит. Он устойчив в многих агрессивных средах, обеспечивает относительно высокую плотность тока и достаточно дешев и доступен.

В качестве графитовых протекторов можно использовать отходы при изготовлении графитовых электродов, футеровочные плитки из графита или другие изделия, выпускаемые нашей промышленностью.

Достаточно положительные стационарные всех известных графитовых материалов, лежащие в области устойчивого пассивного состояния стали, определяют принципиальную пригодность графита в качестве катодного протектора. Анодная защита с помощью протекторов может быть использована только в том случае, когда условия эксплуатации защищаемого объекта стабильны во времени, величина критического тока пассивации и тока в пассивном состоянии не велика, т.е. металл находится в пассивном состоянии уже при потенциале коррозии.

#### 4.5. Анодная защита от внешнего источника тока

##### 4.5.1. Анодная защита с регулированием потенциала

Если протяженность пассивной области металла достаточно велика, разница в величинах максимального тока и тока в пассивном состоянии мала, электролит имеет достаточную электропроводность и условия работы стабильны, то можно использовать систем анодной защиты, поддерживающую на защищаемом объекте постоянное напряжение.

Защита при постоянном напряжении весьма эффективна при защите углеродистой стали в концентрированной серной кислоте, где область пассивного состояния – почти 2В, максимальный ток выше тока пассивации всего в 3:10 раз и электропроводность среды высока. Применим такой способ и для защиты титана в хорошо проводящих средах.

Напряжение, задаваемое источником питания, распределяется следующим образом:

$$U = (E_a - E_k) + IR \quad (35)$$

где  $U$  – задаваемое напряжение, В

$E_a$ ;  $E_k$  – потенциалы анода и катода, В

$R$  – сопротивление электролита, Ом

Схема анодной защиты в этом случае достаточно проста (рис.27). В данном случае нет необходимости применять дорогостоящие потенциостаты, достаточно использовать стабилизированный источник постоянного тока.

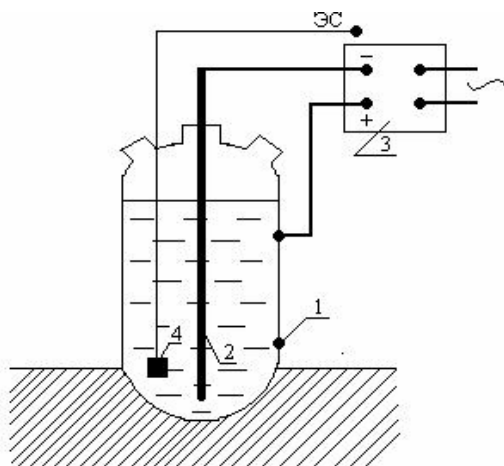


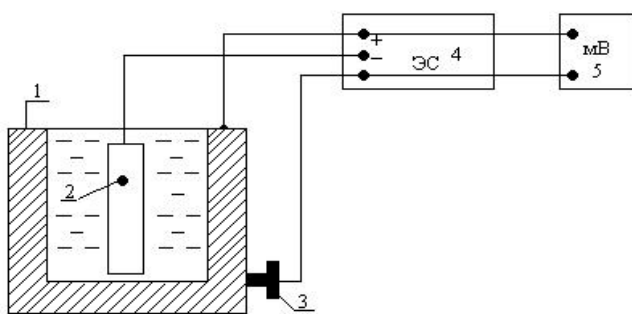
рис. 27

1 – защищаемое устройство; 2 – катод;  
3 – источник питания; 4 – электрод сравнения.

Для периодического контроля работы анодной защиты в этом случае может быть использован электрод сравнения и прибор для измерения потенциала защищаемой поверхности. Если же условия эксплуатации конструкции изменяются во времени, вызывая колебания потенциала защищаемой конструкции, то для анодной защиты необходимо использовать схем с регулированием и контролем потенциала.

#### 4.5.2. Анодная защита с регулированием и контролем потенциала

Этот метод электрохимической защиты основан на переводе поверхности металла из состояния активного растворения в устойчивое пассивное и поддержания этого состояния пропусканием электрического тока от специального регулируемого источника. Как правило, в качестве таких источников используются потенциостаты или источники постоянного тока, электронные схемы которых обеспечивают поддержание определенного значения потенциала защищаемого металла. Схематически этот способ защиты представлен на рис. 28.



1 – защищаемая конструкция  
 2 – катод  
 3 – электрод сравнения  
 4 – потенциостат  
 5 – прибор для измерения потенциала защищаемой конструкции  
 рис. 28

#### 4.5. 3. Электроды сравнения в промышленных системах анодной защиты.

Конструкции электродов сравнения для анодной защиты следует изучать по (6).

Обязательным условием практически во всех случаях анодной защиты является контроль потенциала защищаемой конструкции. Эффективность и надежность анодной защиты во многом зависит от способности электрода сравнения сохранять постоянство своего потенциала в условиях эксплуатации на протяжении всего срока службы.

Электроды сравнения в зависимости от их конструктивного решения могут быть выносными или погружными. Выносные или внешние электроды сравнения помещают в отдельном сосуде и его электролитический контакт с агрессивной средой обеспечивается с помощью ключа или моста. В качестве выносного электрода сравнения может быть использован любой из известных электродов – хлорсеребряный, каломельный и т. д.

Выносные электроды сравнения чаще всего применяют при анодной защите аппаратов, работающих под давлением, при высоких температурах или в каких-то других экстремальных условиях.

Недостатком такой конструкции электродов является необходимость использования электролитического моста. Имеется большое число патентов как наших так и зарубежных на конструкции таких мостов. Однако ни одну из них нельзя признать надежной. Это связано с отсутствием возможности следить за тем, чтобы отверстие моста в реакционной ёмкости не засорялось, и поддерживался постоянный электролитический контакт.

Поэтому на практике стараются по возможности отказываться от выносных электродов сравнения и использовать погружные, т.е. такие, которые погружаются прямо в реакционную ёмкость.

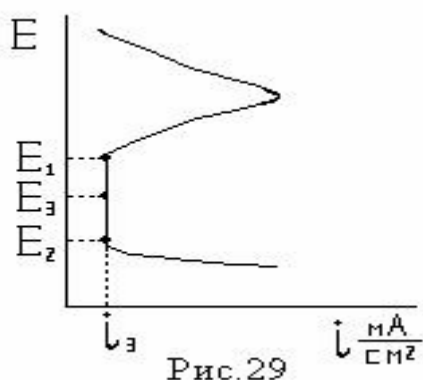
### 5. КОМБИНИРОВАННАЯ АНОДНАЯ И АНОДНО–ПРОТЕКТОРНАЯ ЗАЩИТА.

Для надёжной работы анодной защиты внешним током необходима постоянная

поляризация анодным током от внешнего источника. Даже кратковременные перебои в электроснабжении могут привести к нарушению защиты. Общепринятым способом предотвращения таких случаев является немедленное переключение защищаемого объекта на протекторы. Т.е. система должна позволять как анодную поляризацию, так и защиту катодным протектором. Это и будет метод анодно - аноднопротекторной защиты.

Сочетание анодной и анодно-протекторной защиты представляет собой высоконадежный способ. Такой метод предусматривает возможность регулирования защитного тока в широких пределах, как в случае анодной защиты. Наличие же протектора делает метод нечувствительным к кратковременным перебоям в подаче электроэнергии.

При таком методе защиты регулятором потенциала устанавливают область регулирования от верхнего до нижнего предела пассивного состояния. Потенциал протектора должен быть примерно в середине области регулирования (рис.29)



При включении поляризующего тока потенциал протектора и объекта смещается до значения  $E_2$ . Затем поляризацию отключает, потенциал защищаемого объекта смещается в сторону отрицательных значений, однако заряд, накопленный протектором, уменьшает скорость спада потенциала.

При достижении системой значения потенциала  $E_1$  снова включается внешний источник тока и цикл повторяется.

По мере формирования устойчивого пассивного состояния защищаемого объекта плотность необходимого защитного тока снижается.

Когда плотность тока протектора станет достаточной для обеспечения величины  $I_{\text{защ.}}$ , спад потенциала системы прекратится и защита будет обеспечиваться только протектором.

Это состояние сохранится до тех пор, пока не возникнут условия, приводящие к изменению необходимого защитного тока, например резкое изменение уровня электролита, концентрации раствора или его температуры.

При такой организации способа защиты включение регулятора потенциала необходимо только в пусковой период или при изменении параметров защиты за счет изменения технологического режима. При стационарном технологическом режиме защита осуществляется только током протектора. При запуске анодно - аноднопротекторной защиты диаграмма изменения потенциала поверхности защищаемого аппарата будет выглядеть следующим образом (рис.30).

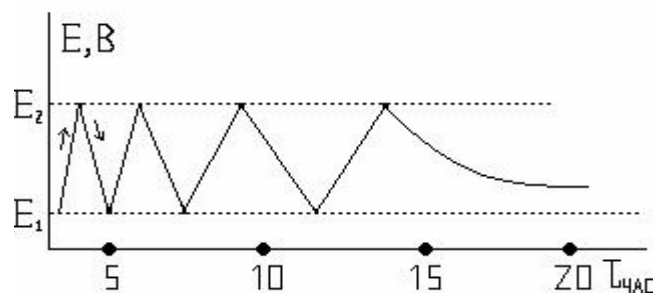


Рис.30

Как видно из диаграммы, записанной автоматическим потенциометром, в первые циклы работы при запуске системы защиты эффективность работы протектора невелика и спад потенциала происходит очень быстро. Однако через 5-6 циклов эффективность действия протектора возрастает и через сутки спад потенциала до более отрицательной границы пассивного состояния происходит в течение нескольких (10-15) часов. Без подключения протектора время спада потенциала остаётся малым и в некоторых случаях не превышает нескольких минут. Спад потенциала происходит тем медленнее, чем меньше поляризуемость протектора. Очень малой поляризуемостью обладают предварительно окисленные графитовые протекторы, которые и используются при анодной – аноднопротекторной защите.

## 6. ЭКОНОМИКА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ

Сразу следует отметить, что точное определение экономических эффектов, достигаемых при использовании электрохимической защиты, затруднено. Насколько просто определить стоимость изготовления и эксплуатации конструкции, настолько трудно рассчитать эффект от исключения непрогнозируемых косвенных потерь от коррозии. Можно считать, исходя из аналогий, что стоимость электрохимической защиты не превышает 1% от стоимости защищаемой конструкции, при чём эта стоимость складывается из сравнительно высоки капитальных затрат и низких затрат эксплуатационных.

Например, поляки подсчитали, что стоимость 30 км промышленного газопровода высокого давления равна примерно 55 млн. злотых. Защита этого участка газопровода осуществляется от трёх катодных станций стоимостью 480 тыс. злотых, т.е. 0,87% от стоимости газопровода.

Ежегодные эксплуатационные расходы системы катодной защиты 39 тыс. злотых, т.е. 0,07% стоимости газопровода. В эту величину входит стоимость электроэнергии (~14 тыс. злотых) и стоимость надзора и планово-предупредительного ремонта системы защиты ~25 тыс. злотых. В случае 25-летней эксплуатации газопровода без катодной защиты ежегодные амортизационные отчисления составляют примерно 4% от стоимости участка трассы.

Удлинение срока эксплуатации газопровода при использовании катодной защиты примерно 10 лет. В этом случае доход от использования катодной защиты определится как сумма амортизационных отчислений за эти 10 лет минус стоимость катодных станций и расходов на их обслуживание за 35 лет работы.

$$10 \cdot 55 \cdot 0,04 - (0,48 + 35 \cdot 0,039) \sim 20 \text{ млн. злотых.}$$

Если же к этому расчётному эффекту добавить не поддающиеся расчёту эффекты от исключения аварий газопровода, то экономия, достигаемая применением катодной защиты, будет ещё более значительной. Приведённый пример свидетельствует о высокой рентабельности применения электрохимической защиты.

Практика показывает, что наиболее рентабельна электрохимическая защита конструкций, имеющих изолирующее покрытие высокого качества.

Рентабельность и эффективность применения электрохимических методов защиты подтверждается опытом её многолетней эксплуатации во многих странах. Электрохимическая защита повсеместно считается наиболее эффективной и высокоэкономичной технологией защиты.

### С п и с о к л и т е р а т у р ы :

1. Бэкман В., Швенк В. Катодная защита от коррозии. (Перевод под ред. И.В. Стрижевского). М.: Металлургия, 1984. 467 с.
2. Стрижевский И.В., Сурис М.А. Защита подземных теплопроводов от коррозии. □М.: Энергоатомиздат, 1983 267 с.
3. Фрейман Л.И., Макаров В.А., Брыксин И.Е. Потенциостатические методы в коррозионных исследованиях и электрохимической защите. Л.:, 1972, 152 с.
4. Стрижевский И.В. и др. Защита металлических сооружений от подземной коррозии. М.: Недра, 1981, 147 с.
5. Иоссель Ю.Я., Кленов Т.Э. Математические методы расчёта электрохимической коррозии и защиты металлов. – М.: металлургия, 1984, 185 с.
6. Кузуб В.С. Анодная защита металлов от коррозии. – М.: Химия, 1983, 138 с.