



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
УПРАВЛЕНИЕ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ  
КВАЛИФИКАЦИИ

Кафедра «Конструирование изделий из полимерных  
композиционных материалов»

## **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

к проведению практических занятий  
по дисциплине

# **«Проектирование катодной защиты подземных трубопроводов»**

Авторы  
Жукова И.Ю.  
Кучеренко С.В.  
Мишуров В.И.

Ростов-на-Дону, 2014



## Аннотация

В методических указаниях рассмотрены вопросы теории и практики коррозии и катодной защиты подземных трубопроводов. Приведены методы расчета напряжения и тока на станции катодной защиты, необходимые для обеспечения защитного потенциала трубопровода. Содержит библиографический список. Предназначено для студентов направления 240100 Химическая технология всех форм обучения.

## Авторы

д.т.н., доцент  
Жукова И.Ю.

к.х.н., доцент  
Кучеренко С.В.

к.х.н., доцент  
Мишуров В.И.





## Оглавление

<b>Введение .....</b>	<b>4</b>
Основные параметры, определяющие качество катодной защиты.....	4
Основные модельные представления, положенные в основу расчета катодной защиты трубопроводов.....	6
Защита магистрального трубопровода с помощью нескольких станций катодной защиты.....	14
Защита трубопровода небольшой протяженности с помощью одной станции катодной защиты .....	17
Расчет анодного заземления .....	18
Расчет сопротивления растеканию .....	19
тока с анодного заземления .....	19
Определение расстояния анодного заземлителя от магистрального трубопровода.....	20
Расчет срока службы анодных заземлителей.....	21
Расчет падения напряжения в дренажном кабеле .....	21
Расчет необходимого напряжения на выходе СКЗ .....	21
Выбор источника питания СКЗ.....	22
<b>Библиографический список .....</b>	<b>23</b>



## ВВЕДЕНИЕ

Увеличение объемов добычи и транспортировки природного газа и нефти в России, а соответственно – рост протяженности подземных трубопроводов – особенно остро ставит проблему обеспечения надежности их эксплуатации. В нефтегазовой отрасли 65 % всех отказов оборудования по причине коррозии приходится на долю подземной коррозии. К основным сложностям при идентификации коррозионных процессов в условиях подземной прокладки относятся: невозможность визуального контроля, значительные погрешности измерительной аппаратуры и сложности в интерпретации результатов измерений, большие трудозатраты при проведении обследований и т.д. Основной проблемой подземных металлических трубопроводных коммуникаций является защита их от коррозии. Коррозионно-опасные участки магистральных трубопроводов могут быть защищены с помощью катодной защиты.

Расчет параметров катодной защиты магистральных трубопроводов в основном производится с учетом влияния коррозионно-опасных факторов (рН, влажности, температуры, пористости, удельного сопротивления, типа грунта) и справочной информации о свойствах применяемых материалов. Степень достоверности рассчитанных и измеренных в реальности показателей катодной защиты невелика. Основными причинами этого являются приближенность расчетных формул и несоответствие реальных физико-химических показателей тем, которые были использованы в расчетах. Поэтому на практике существуют приемы корректировки: пробные включения защиты, применение значительных коэффициентов резервирования мощности и др.

Таким образом, методические указания полностью не отражают какой-либо отраслевой стандарт, а излагают физические и математические основы проектных расчетов параметров электрохимической защиты. Настоящее руководство призвано помочь в выборе подходящей методики, если она не регламентируется правилами, или найти возможную причину значительного расхождения между проектными и реальными параметрами катодной защиты.

### **Основные параметры, определяющие качество катодной защиты**

Защита трубопровода от коррозии с помощью катодной поляризации заключается в предотвращении окисления атомов металла на его поверхности. Этого удастся добиться, если сместить потенциал металла относительно грунта на достаточную величину.



## Проектирование катодной защиты подземных трубопроводов

ну в катодную область. Насколько надо сдвинуть потенциал в отрицательную область, чтобы подавить реакцию окисления металла, зависит от условий, в которых протекает коррозия. Потенциал металл – грунт относится к классу электродных потенциалов, которые устанавливаются самопроизвольно на любой границе металла со средой. Абсолютное значение этого потенциала определить нельзя. Его измеряют по отношению к некоторому принятому электроду сравнения, потенциал которого достаточно стабилен. В электрохимии универсальным электродом сравнения является нормальный водородный электрод (н.в.э.). Его потенциал принят за ноль при любой температуре. В технике катодной защиты используют насыщенный медносульфатный электрод. Его потенциал относительно водородного электрода равен +0,300 В (н.в.э.) при температуре 20°C. В скобках за величиной потенциала указывают, относительно какого электрода этот потенциал измерен.

В связи с характером протекающих на электроде процессов в электрохимии различают равновесный потенциал, стационарный и потенциал электрода под током. Первый из них характеризует равновесие между окислительной и восстановительной реакциями. Стационарный потенциал ( $E_s^{st}$ ) устанавливается самопроизвольно в отсутствие внешнего тока в цепи. При этом потенциале в естественных условиях протекает коррозия металла. Потенциал электрода под воздействием внешнего тока может смещаться в зависимости от направления тока в катодную или анодную стороны. При смещении потенциала в отрицательную область, т.е. в катодную сторону, подавляются реакции окисления, и существенно замедляется скорость коррозии. В зависимости от состава среды и других условий для достижения одного и того же эффекта подавления коррозии требуется различная величина смещения потенциала. Поэтому в практике защиты трубопроводов существует т.н. минимальное значение защитного потенциала. Это значение ( $E_s^{min}$ ) выбирают исходя из условий эксплуатации трубопровода по справочным данным. На всем протяжении трубопровода потенциал должен быть отрицательнее принятого минимального значения. Катодную поляризацию трубопровода осуществляют с помощью подвода постоянного тока от источника питания – станции катодной защиты (СКЗ). Одним проводом СКЗ соединена с трубопроводом, а другим – с анодным заземлителем. В задачу расчета входит определение необходимых напряжения и тока СКЗ, которые требуются для обеспечения защитного потенциала на всем протяжении зоны защиты. Общее напряжение ис-



## Проектирование катодной защиты подземных трубопроводов

точника питания складывается последовательно из падения напряжения на следующих участках цепи:

- на проводнике от СКЗ к аноду,  $U_A$ ;
- на сопротивлении растекания анодной группы,  $V_A$ ;
- в земле на пути к трубопроводу,  $V_3$ ;
- в слое изоляции и на межфазной границе,  $E_3$ ;
- в трубопроводе,  $V_T$ ;
- на проводнике от трубопровода к СКЗ,  $U_K$ .

Все указанные составляющие падения напряжения с той или иной степенью точности могут рассчитаны. Таким способом можно найти напряжение на выходе СКЗ. Для обеспечения заданного защитного потенциала потребуется определенная сила тока, которую также можно рассчитать. Таким образом, можно определить основные электрические характеристики СКЗ.

В задачи проектировщика катодной защиты трубопровода входит также расчет срока службы анодных заземлителей, выбор рациональной схемы размещения, типа и количества анодных заземлителей. Кроме инженерных, требуются и технико-экономические расчеты, связанные с выбором типа изоляции трубопровода, мониторингом коррозионного состояния трубопровода и т. п. В данном руководстве рассматриваются только инженерные проблемы проектирования СКЗ.

### Основные модельные представления, положенные в основу расчета катодной защиты трубопроводов

Для обеспечения эффективной защиты необходимо, чтобы на всем протяжении защищаемого участка трубопровода сохранялся достаточный для подавления коррозионных процессов катодный потенциал. Добиться этого можно двумя способами. Первый способ предполагает равномерную поляризацию всего участка. Для этого необходимо расположить вдоль всей трассы аноды и подвести к ним электропитание с помощью проводников с малым электрическим сопротивлением или рассредоточить вдоль трассы большое количество маломощных источников тока. Такой подход чаще всего оказывается экономически невыгодным. Рациональней установить в определенном месте достаточно мощную станцию, поместив около неё группу анодов. В этом случае защитный ток течет по грунту от анодов, попадает на трубопровод и собирается к токоотводу в месте подключения (точке дренажа). При этом по мере удаления от точки токоотвода катодный потенциал уменьшается. Зонай защитного действия будет являться область по обе стороны от токоотвода, в которой потенциал



## Проектирование катодной защиты подземных трубопроводов

трубы по отношению к грунту будет отрицательнее принятого значения защитного потенциала. Самый высокий катодный потенциал, т.е. самое отрицательное его значение, будет на участке трубы, находящемся против анода. Понятно, что при прочих равных условиях, чем отрицательнее будет потенциал трубы в точке дренажа, тем протяженнее будет зона защиты (рис. 1).

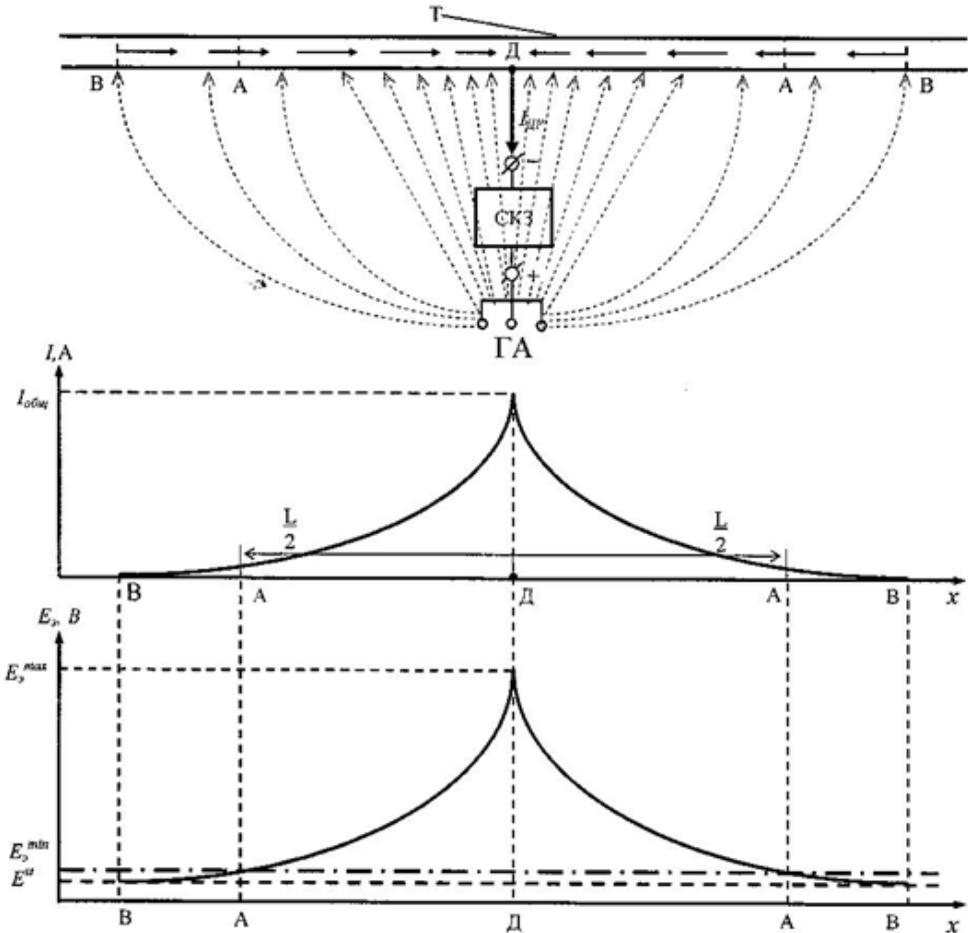


Рис. 1. Схема распределения потенциала и тока при катодной защите трубопровода.

Т — трубопровод, СКЗ — станция катодной защиты, ГА — группа анодов, Д — точка подвода тока к трубе (точка дренажа),  $L/2$  — половина длины зоны защиты,  $I$  — ток в теле трубы,  $I_{общ}$  — максимальное значение тока в трубе,  $E_э$  — электродный потенциал



## Проектирование катодной защиты подземных трубопроводов

трубы,  $E_3^{max}$  – значение потенциала в точке дренажа,  $E^{st}$  – стационарный (бестоковый) потенциал стального трубопровода в грунте, который устанавливается в точке В,  $E_3^{mix}$  – принятое значение защитное потенциала, которое достигается в точке А. Стрелками показано направление тока в трубе (сплошные стрелки) и в грунте (пунктирные)

Однако при этом необходимо, чтобы потенциал в точке дренажа не достиг опасного значения, при котором начнется интенсивное выделение водорода и возникнет наводороживание металла.

Таким образом, математическая модель должна описывать распределение потенциала по длине трубопровода и позволить определить силу тока в трубе. Исходными данными для расчета обычно являются допустимые потенциалы в точке дренажа и на границе защитной зоны, а определяемыми величинами – длина зоны защиты, рабочий ток, а также ряд технических показателей оборудования.

Чтобы представить сложность поставленной задачи, постараемся коротко перечислить факторы, определяющие распределение потенциала и тока в реальных условиях. Во-первых, поскольку ток протекает по грунту, неопределенным оказывается сечение проводника т.е. грунта. Для математического описания распределения потенциала в таких однородных средах используют уравнение Лапласа – это дифференциальное уравнение второго порядка в частных производных. Для его решения необходимо задать граничные условия, в качестве которых выступают уравнения электрохимической кинетики на границе металл- грунт, с учетом различных переходных сопротивлений. Граничные условия представлены обычно нелинейными уравнениями, поэтому решение возможно только численными методами. Однако сложности этим не исчерпываются. В уравнения, в виде коэффициентов, входят многочисленные физико-химические параметры, которые точно неизвестны и существенно меняются по длине трассы. К таким параметрам относятся электропроводность грунта, сопротивление изоляции трубы (о ее необходимости будет указано в дальнейшем), концентрация деполяризатора. Важное значение имеют также толщина диффузионного слоя, температура в зоне электрохимической реакции, наличие продуктов коррозии на поверхности стали, значение стационарного потенциала и ряд других показателей, которые в явном виде могут не входить в уравнения, но оказывают влияние на характер протекания



## Проектирование катодной защиты подземных трубопроводов

коррозионных процессов. Необходимы также известные с достаточной точностью показатели: проводимость металлических компонентов системы, сечение трубы, проводников и т. п. В связи с изменением всех вышеперечисленных параметров, как во времени, так и в пространстве, задача точного описания данной системы оказывается принципиально невыполнимой.

Представленная на рис. 1 схема позволяет построить сравнительно простую и физически понятную модель катодной защиты.

Исходными уравнениями являются дифференциальные соотношения, определяющие изменение потенциала в металле и земле по длине трубопровода и меняющийся потенциал между землей и поверхностью трубы вдоль трубопровода. Для записи основных уравнений введем и поясним некоторые обозначения и параметры (рис. 2).

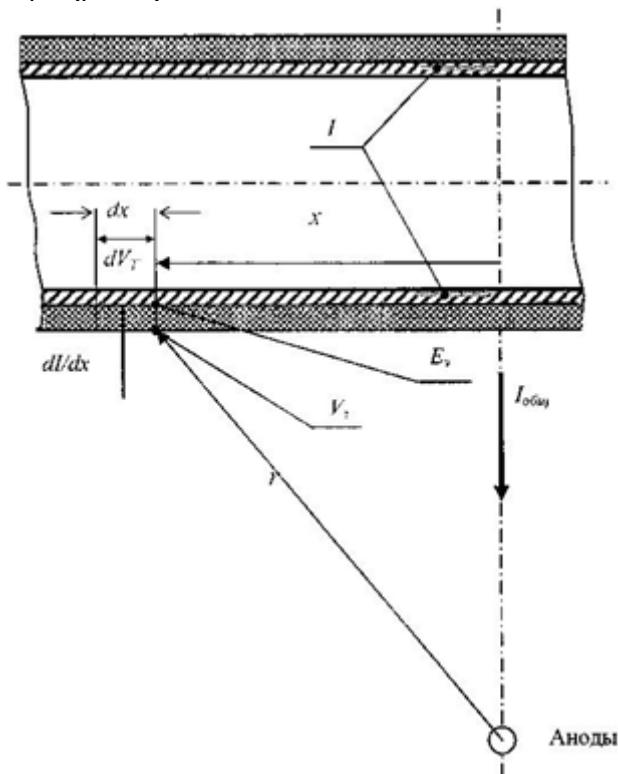


Рис. 2. Распределение потенциалов и токов по длине трубопровода.

**Пояснение обозначений в тексте.**



## Проектирование катодной защиты подземных трубопроводов

Будем считать, что ток от источника течет на анод (он представлен точкой), от анода по земле к трубопроводу, затем через изоляцию непосредственно в металл, далее по металлу трубы к точке дренажа и, наконец, возвращается к источнику постоянного тока. Таким образом, электрическая цепь оказывается замкнутой. Примем  $V_T$  – потенциал трубопровода, т. е. падение напряжения в теле трубы от точки дренажа до точки  $x$ ;  $V_3$  – потенциал земли относительно анода в точке  $x$ ;  $E_3$  – электрохимический потенциал, между металлом и грунтом, определяющий локальную плотность защитного тока.

Потенциал  $E_3$  можно выразить следующим образом:

$$E_3 = -dI \cdot \rho_{из} \frac{\delta_{из}}{\pi \cdot D \cdot dx} \quad (1)$$

Здесь приняты следующие обозначения:  $I$  – сила тока в трубопроводе. А;  $\rho_{из}$  – удельное сопротивление изоляции. Ом·м;  $\delta_{из}$  – толщина изоляционного слоя, м;  $D$  – диаметр трубы, м. Знак минус в правой части равенства указывает на то, что ток возрастает при смещении потенциала в отрицательную сторону, т.е. ток является катодным.

Приведенное соотношение можно интерпретировать следующим образом,  $\frac{dI}{dx}$  – это приращение тока в трубе за счет натекания защитного тока на элементе длины  $dx$ . Если натекающий на элементе длины трубопровода ток разделить на площадь этого элемента длины, то получается выражение для локальной габаритной защитной плотности тока, т.е.:

$$i = \frac{dI}{\pi \cdot D \cdot dx} \quad (1П)$$

Размерность этой величины А/м<sup>2</sup>, а по физическому смыслу она представляет собой скорость электрохимического восстановления деполяризатора (обычно растворенного молекулярного кислорода или ионов водорода) на металлической поверхности трубы. Если в качестве деполяризатора выступают ионы водорода, то при очень отрицательном (большом катодном) потенциале скорость выделения газообразного водорода будет очень велика. Это может привести к отслаиванию изоляции и наводороживанию металла трубы. Наводороживание стали повышает ее хрупкость и может привести к разрыву трубопровода.

Для удобства расчета, уравнение (1) интерпретируют следующим образом.  $E_3$  – падение напряжения на сопротивлении слоя изоляции по нормали к поверхности трубы шириной  $dx$  под действием тока, натекающего на трубопровод на этом элементе длины. В этом случае выделяют комплекс величин, характери-



## Проектирование катодной защиты подземных трубопроводов

зующий сопротивление погонного метра слоя изоляции в направлении по нормали к поверхности  $R_{из}$ :

$$R_{из} = \rho_{из} \frac{\delta_{из}}{\pi \cdot D} \quad (2)$$

Величина  $R_{из}$  имеет размерность Ом·м, но это не удельное сопротивление изоляционного материала, как можно подумать исходя из размерности, а сопротивление полотна изоляции толщиной  $\delta_{из}$  и площадью  $1 \text{ м} \cdot \pi \cdot D \text{ м}^2$ .

Уравнение для потенциала приобретает вид:

$$E_z = - \frac{R_{из}}{dx} dI \quad (3)$$

Здесь  $R_{из}/dx$  – сопротивление уже не погонного метра, а слоя изоляции шириной  $dx$ .

Потенциал  $V_T$  в теле трубы меняется по координате  $x$  и зависит от удельного сопротивления металла трубопровода ( $\rho_T$ ), толщины стенки ( $\delta_T$ ) и его диаметра. Поскольку сила тока по длине трубопровода изменяется, то можно записать лишь дифференциальное соотношение:

$$dV_T = I \cdot \rho_T \frac{dx}{\pi \cdot D \cdot \delta_T} \quad (4)$$

Из приведенного соотношения можно выделить величину, характеризующую погонное сопротивление трубопровода:

$$R_T = \frac{\rho_T}{\pi \cdot D \cdot \delta_T} \quad (5)$$

В этом уравнении погонное сопротивление, в отличие от уравнения (2), имеет размерность Ом/м. Это связано со смыслом, который вкладывается в эти величины. В первом случае это сопротивление полотна изоляции в направлении его толщины. Сопротивление этого полотна будет падать по мере увеличения площади сечения, т. е. при увеличении длины. Во втором случае сопротивление трубопровода измеряется вдоль оси и оно будет расти по мере увеличения длины.

С учетом введенного обозначения, уравнение (4) примет вид:

$$\frac{dV_T}{dx} = IR_T \quad (6)$$

Для расчета распределения поля в земле можно воспользоваться очень простой моделью для точечного источника тока. Хотя на практике анодная группа имеет не столь простую форму, но принципиально характер изменения поля от этого не меняется. На достаточном удалении от анодов можно считать, что поле распределяется равномерно по всем направлениям в форме полусферы. Изменение потенциала в земле определяется падением



## Проектирование катодной защиты подземных трубопроводов

напряжения в сферическом слое от тока, стекающего с анода (рис. 3):

$$dV_3 = -I_{общ} \cdot dR_3 \quad (7)$$

Здесь  $I_{общ}$  – общий ток, стекающий с анода, А;  $dV_3$  – изменение потенциала земли на некотором расстоянии от анода, по отношению к бесконечно удаленной точке, В;  $dR_3$  – изменение сопротивления шарового слоя, Ом.

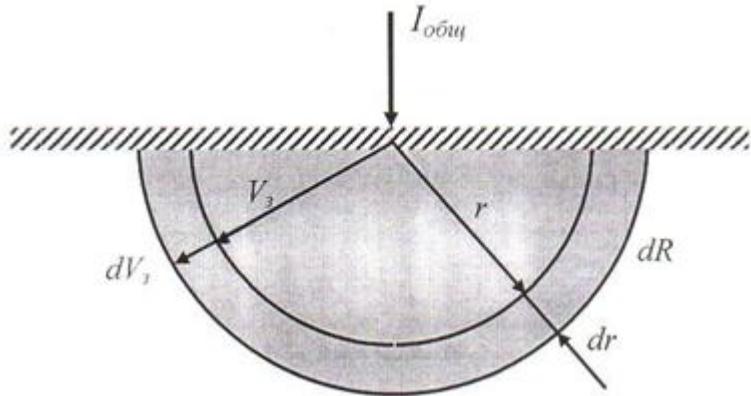


Рис. 3. К выводу выражения для сопротивления растеканию тока с точечного анода.

### Пояснение обозначений в тексте.

Знак минус указывает на уменьшение потенциала по мере удаления от источника. Для сопротивления шарового слоя имеем:

$$dR_3 = \rho_{зп} \cdot \frac{dr}{2\pi r^2} \quad (8)$$

где  $\rho_{зп}$  – удельное сопротивление грунта, Ом·м,  $r$  – расстояние от анода до шарового слоя, м.

В знаменателе дроби стоит величина поверхности полушеры, а в числителе – толщина слоя. Подставляя выражение (8) в уравнение (7) и интегрируя, получаем:

$$\int dV_3 = - \int I_{общ} \rho_{зп} \frac{dr}{2\pi r^2}$$

и далее:

$$V_3 = I_{общ} \rho_{зп} \frac{1}{2\pi r} + C$$

Постоянную  $C$  находим из условия,  $V_3=0$  при  $r \rightarrow \infty$ .

Окончательно получаем:



## Проектирование катодной защиты подземных трубопроводов

$$V_3 = I_{общ} \rho_{зп} \frac{1}{2\pi r} \quad (9)$$

Радиус – расстояние до произвольного участка трубопровода от анода (рис. 2) можно представить как  $r = \sqrt{(y^2 + x^2)}$ . Учитывая, что ток распространяется не в полусферу, а в четверть, из уравнения (9) получаем:

$$V_3 = I_{общ} \rho_{зп} \frac{1}{\pi \sqrt{(y^2 + x^2)}} \quad (10)$$

Разность потенциалов между землей и трубопроводом равна  $E_3$ , т.е.:

$$E_3 = V_3 - V_T \quad (11)$$

Продифференцируем уравнения (11) и (10) по координате  $x$ :

$$\frac{dE_3}{dx} = \frac{dV_3}{dx} + \frac{dV_T}{dx} \quad (12)$$

$$\frac{dV_3}{dx} = -I_{общ} \rho_{зп} \frac{x}{\pi (y^2 + x^2)^{3/2}}$$

Подставив в уравнение (12) значения производных из уравнений (13) и (6), получаем:

$$\frac{dE}{dx} = -I_{общ} \rho_{зп} \frac{x}{\pi (y^2 + x^2)^{3/2}} - IR_T \quad (14)$$

С другой стороны, продифференцировав уравнение (3) по  $x$  имеем:

$$\frac{dE_3}{dx} = -R_{уз} \frac{d^2 I}{dx^2} \quad (15)$$

Подставив (15) в (14) получаем линейное неоднородное дифференциальное уравнение второго порядка с постоянными коэффициентами:

$$\frac{d^2 I}{dx^2} - \frac{R_T}{R_{уз}} I = \frac{I_{общ} \rho_{зп} x}{\pi R_{уз} (y^2 + x^2)^{3/2}} \quad (16)$$

Продифференцировав уравнение (14) получим:

$$\frac{d^2 E_3}{dx^2} = -\frac{I_{общ} \rho_{зп}}{\pi} \left[ -\frac{3x^2}{(y^2 + x^2)^{5/2}} + \frac{1}{(y^2 + x^2)^{3/2}} \right] - R_T \frac{dI}{dx} \quad (17)$$

и, воспользовавшись подстановкой  $\frac{dI}{dx}$  из уравнения (3), получаем второе дифференциальное уравнение:

$$\frac{d^2 E_3}{dx^2} - \frac{R_T}{R_{уз}} E_3 = \frac{I_{общ} \rho_{зп}}{\pi} \left[ -\frac{3x^2}{(y^2 + x^2)^{5/2}} + \frac{1}{(y^2 + x^2)^{3/2}} \right]$$



## Проектирование катодной защиты подземных трубопроводов

(18)

Для уравнений (16) и (18) приводятся приближенные решения:

$$I = C_1 e^{\alpha x} + C_2 e^{-\alpha x} - \frac{I_{общ} \rho_{зп}}{\pi R_{из}} \operatorname{Arsh} \frac{x}{y}$$

(19)

$$E_s = C_3 e^{\alpha x} + C_4 e^{-\alpha x} - \frac{I_{общ} \rho_{зп}}{\pi \sqrt{(y^2 + x^2)}}$$

(20)

Здесь  $C_1, C_2, C_3, C_4$  – константы интегрирования, которые надо определить из граничных условий,  $\alpha$  – имеет размерность  $\text{м}^{-1}$  и характеризует ослабление защитного потенциала по мере удаления от точки дренажа:

$$\alpha = \sqrt{\frac{R_{ж}}{R_{из}}} \quad (21)$$

Приведенные решения не являются точными и при подстановке в исходные уравнения не обращают их в ноль. Поэтому даже при полном соответствии реальной системы принятой модели решение не позволит получить точное распределение потенциала и тока по длине трубопровода. Однако с учетом множества исходных допущений и неточности параметров, входящих в уравнение, его считают допустимым.

Для практических расчетов, наиболее важными являются два случая катодной защиты трубопровода: защита магистрального трубопровода несколькими станциями и защита короткого трубопровода с помощью одной станции.

### **Защита магистрального трубопровода с помощью нескольких станций катодной защиты**

Распределение тока и потенциала вдоль трубопровода приведено на рис. 4. В точке дренажа по трубопроводу протекает максимальный ток и наблюдается самый высокий катодный (т.е. самый отрицательный) потенциал. На расстоянии  $l$  по обе стороны от точки дренажа должен установиться минимально допустимый защитный потенциал.



Проектирование катодной защиты подземных трубопроводов

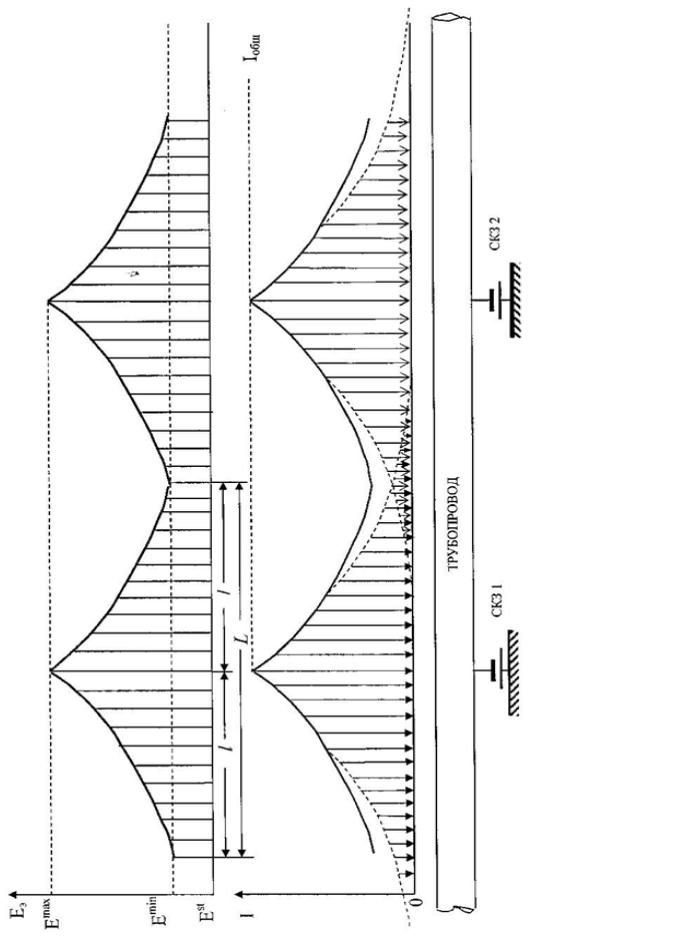


Рис. 4. Распределение тока и потенциала (сплошные линии) по длине трубопровода при защите несколькими станциями катодной защиты. Стрелки разного типа соответствуют току от различных станций

Поскольку по абсолютной величине изменение потенциала в этой точке проходит через минимум, то  $dE_3/dx=0$ . Основываясь на этих граничных условиях, можно найти константы  $C_3$  и  $C_4$  из уравнения (20). Решая систему:

$$x=0 \rightarrow E_3^{max} = C_3 + C_4 + \frac{I_0 \delta_{щ} \rho_{zr}}{\pi y} \quad (22)$$

$$x=l \rightarrow 0 = \alpha C_3 e^{\alpha l} - \alpha C_4 e^{-\alpha l} - \frac{I_0 \delta_{щ} \rho_{zr} l}{\pi (y^2 + l^2)^{3/2}} \quad (23)$$

находят значения констант и подставляют их в уравнение (20) получают:



## Проектирование катодной защиты подземных трубопроводов

$$E_3 = E_3^{max} \frac{ch[\alpha(l-x)]}{ch(\alpha l)} - \frac{I_{общ} \rho_{2p}}{\pi} \left[ \frac{sh(\alpha x)}{\alpha(y^2+l^2)^{\frac{3}{2}} ch(\alpha l)} + \frac{1}{\sqrt{(y^2+x^2)}} - \frac{ch[\alpha(l-x)]}{y ch(\alpha l)} \right] \quad (24)$$

Подобным образом из уравнения (19) и тех же граничных условий находят постоянные  $C_1$  и  $C_2$ . После подстановки их значений в уравнение (19) получаем выражение, описывающее изменение тока по длине трубопровода:

$$I = I_{общ} \left[ \frac{sh[\alpha(l-x)]}{sh(\alpha l)} - \frac{\rho_{2p} l sh(\alpha l)}{\pi R_T (y^2+l^2)^{\frac{3}{2}} sh(\alpha l)} - \frac{\rho_{2p}}{\pi R_{uz}} Arsh \frac{x}{l} \right] \quad (25)$$

Обычно для инженерных расчетов необходимо при заданном допустимом максимальном катодном потенциале в точке дренажа определить силу защитного тока. С этой целью можно продифференцировать уравнение (25), подставить полученное выражение в уравнение (3) и, положив  $x=l$ , решить относительно  $I_{общ}$ .

Получаем:

$$I_{общ} = \frac{E_3^{max} th(\alpha l)}{2z + \frac{\rho_{2p}}{\pi y} th(\alpha l) + \frac{\rho_{2p} l}{\pi \alpha (y^2+l^2)^{\frac{3}{2}} ch(\alpha l)}} \quad (26)$$

где  $z$  – входное сопротивление трубопровода:

$$z = \frac{1}{2} \sqrt{R_T R_{uz}} \quad (27)$$

В выражение (26) входит только одна неизвестная  $l$ , которая называется плечом защиты СКЗ. Это расстояние от точки дренажа до места, где достигается минимальный катодный потенциал, при котором еще обеспечивается защита трубопровода. Он определяется на основе справочных данных и отраслевых стандартов. Выражение, из которого можно найти величину  $l$  при известных значениях  $E_3^{max}$  и  $E_3^{min}$ , находят подстановкой уравнение (26) в уравнение (24). В уравнении (24) принимают  $x=l$  и  $E_3 = E_3^{min}$ . В выражении  $l$  явно не определено и может быть рассчитано подбором или численными методами с применением ЭВМ.

Чаще для расчета параметров катодной защиты трубопровода несколькими СКЗ используют приближения:

$$L = \frac{2}{\alpha} arch \left[ \frac{2\pi z y}{\frac{E_3^{min}}{E_3^{max}} \left( 2\pi z y + \rho_{2p} th \frac{\alpha L}{2} \right) - \frac{2\rho_{2p} y}{L} th \frac{\alpha L}{2}} \right] \quad (28)$$



## Проектирование катодной защиты подземных трубопроводов

$$I_{ДР} = \frac{E_3^{max} \cdot \pi h \frac{\alpha L}{2}}{z + \frac{\rho_{зр}}{2\pi y} \frac{\alpha L}{2}} \quad (29)$$

Здесь введены следующие обозначения:  $L=2l$  – общая протяженность зоны защиты одной СКЗ,  $I_{ДР}=2I_{общ}$  – ток дренажа, распространяющийся на обе половины зоны защиты (рис. 3).

Решение уравнения (28) осуществляется методом последовательных приближений. В качестве первого приближения рассчитывают  $L$  из выражения

$$L = \frac{2}{\alpha} \operatorname{arch} \left[ \frac{2\pi zy}{\frac{E_3^{min}}{E_3^{max}} (2\pi zy + \rho_{зр})} \right] \quad (28A)$$

и затем подставляют его в уравнение (28). Далее  $L$  изменяют в большую или меньшую сторону так, чтобы его значение в левой и правой частях уравнения совпали. Полученное значение  $L$  (в метрах) используют для расчета тока дренажа по уравнению (29).

### Защита трубопровода небольшой протяженности с помощью одной станции катодной защиты

Для защиты трубопровода с помощью одной СКЗ его длина не должна превышать удвоенного плеча защиты ( $L$ ), если СКЗ подключена в середине трубопровода (рис. 4). Граничными условиями для уравнения (20) будут  $E_3 = E_{ДР} \leq E_3^{max}$ , а при  $x=l$   $E_3 = E_3^{min}$ .  $E_{ДР}$  – это такое значение катодного потенциала, при котором на концах трубопровода достигается минимальный защитный потенциал.

Используя граничные условия по уравнению (20), находят постоянные  $C_3$  и  $C_4$  и после подстановки в то же уравнение получают зависимость  $E_3$  от  $x$ :

$$E_3 = \frac{\left( E_{ДР} - \frac{I_{общ}\rho_{зр}}{\pi y} \right) \cdot \operatorname{sh}[\alpha(l-x)] + \left( E_3^{min} - \frac{I_{общ}\rho_{зр}}{\pi \sqrt{(y^2+x^2)}} \right) \cdot \operatorname{sh}\alpha x}{\operatorname{sh}\alpha l} + \frac{I_{общ}\rho_{зр}}{\pi \sqrt{(y^2+x^2)}} \quad (30)$$

Для определения постоянных интегрирования  $C_1$  и  $C_2$  первоначально используют граничные условия:

$$x=0, I=I_{общ}$$

$$x=l, E_3 = E_3^{min} = -R_{уз} \left. \frac{dI}{dx} \right|_{x=l}$$

Из уравнений (19) и (20) получают следующую систему уравнений:



## Проектирование катодной защиты подземных трубопроводов

$$I_{\text{общ}} = C_1 + C_2$$

$$E_s^{\text{min}} = R_{\text{уз}} \left( C_2 \alpha e^{-\alpha l} - C_1 \alpha e^{\alpha l} + \frac{I_{\text{общ}} \rho_{\text{уз}}}{\pi R_{\text{уз}} \sqrt{(y^2 + x^2)}} \right)$$

После подстановки полученных выражений в формулу (19) получают уравнение:

$$I = I_{\text{общ}} \left( \frac{\text{ch}[\alpha(l-x)]}{\text{ch}(\alpha l)} - \frac{\rho_{\text{зр}}}{\pi R_{\text{уз}}} \text{Arsh} \frac{x}{y} + \frac{\rho_{\text{зр}} \text{sh} \alpha x}{2\pi z \sqrt{(y^2 + x^2)}} \right) - E_s^{\text{min}} \frac{\text{sh} \alpha x}{2z \text{ch} \alpha l} \quad (31)$$

Из последнего уравнения после дифференцирования с учетом условия  $x=0$   $E_{\text{ДР}} = -R_{\text{уз}} \left. \frac{dI}{dx} \right|_{x=0}$  получают выражение:

$$I_{\text{общ}} = \frac{E_{\text{ДР}} \text{ch} \alpha l - E_s^{\text{min}}}{2z \left( \text{sh} \alpha l + \frac{\rho_{\text{зр}}}{2\pi z y} \text{ch} \alpha l - \frac{\rho_{\text{зр}}}{\pi z \sqrt{(y^2 + l^2)}} \right)} \quad (32)$$

Из этого соотношения вычисляют общую токовую нагрузку на плечо защиты и затем ток дренажа:

$$I_{\text{ДР}} = 2I_{\text{общ}} \quad (33)$$

Для определения электрохимического потенциала в точке дренажа нельзя воспользоваться уравнением (30). Необходимо в уравнение для тока (31) подставить условие, что ток на границе зоны защиты равен нулю. Решение этого уравнения с учетом формулы (32) относительно  $E_{\text{ДР}}$ , после некоторых упрощений позволяет получить расчетную формулу (34). Если СКЗ подключают не посередине участка, но в качестве /выбирают большее плечо:

$$E_{\text{ДР}} = E_s^{\text{min}} \left[ \frac{\text{sh}^2 \alpha l + \frac{\rho_{\text{зр}}}{2\pi z y} \text{sh} \alpha l \cdot \text{ch} \alpha l + 1}{\text{ch} \alpha l} \right] \quad (34)$$

### Расчет анодного заземления

Анодные заземления обычно изготавливают из низкосортной стали или чугуна. Расход заземлителя из железа составляет в соответствии с законом Фарадея 9,15 кг/А·год. Для уменьшения потерь металла металлический заземлитель устанавливают в специальную засыпку из кокса. Необходимо, чтобы влага не проникала вглубь засыпки, тогда между металлом и угольной засыпкой имеет место электронная проводимость. В этом случае электрохимический процесс происходит на поверхности и в объеме засыпки, а не на поверхности металла. Процесс растворения железа частично заменяется выделением кислорода, что приводит к существенному (до 5÷38 раз) снижению расхода металла.

Анодное заземление выполняется в одном из трех вариантов: горизонтальном, вертикальном и комбинированном.



## Расчет сопротивления растеканию тока с анодного заземления

Сопротивление растеканию со всех анодов ( $R_A$ , Ом) рассчитывается по формуле:

$$R_A = \frac{R_B R_\Gamma}{R_B + R_\Gamma} \quad (35)$$

Здесь  $R_B$  – общее сопротивление растеканию с вертикальных анодов,  $R_\Gamma$  – то же для горизонтальных анодов.

Эти сопротивления рассчитываются по формулам:

$$R_B = \frac{R_{1B}}{n_B \eta_B}; R_\Gamma = \frac{R_{1\Gamma}}{n_\Gamma \eta_\Gamma} \quad (36)$$

Индекс 1 означает, что данная величина относится к единичному аноду,  $n$  – количество анодов в группе,  $\eta$  – коэффициент экранирования соответствующей группы анодов.

Расчетные формулы для одиночных заземлителей приведены в таблице 1. Если используются заземлители только одного типа, то вместо уравнения (35) используют одно из выражений (36).

Коэффициент экранирования рассчитывается из приближенного соотношения:

$$\eta \approx \frac{1}{1 + \left( \frac{\rho_{\text{гп}}}{\pi s R_1} \right) \ln(0,66 \cdot n)} \quad (37)$$

где  $s$  – расстояние между анодами в группе, м;  $R_1$  – сопротивление растеканию одиночного анода (рассчитывается по формулам табл. 1);  $n$  – количество анодов в группе.

Таблица 1 Расчетные формулы для заземлителей

№ п/п	Форма заземлителя	Формула	Условия	Обозначения
1	Стержневой вертикальный	$R_{1B} = (\rho/2\pi) \ln(4l/d)$	Без заглубления, $\gg d$	$l$ – длина стержня, м, $d$ – диаметр, м, $\rho$ – удельное сопротивление грунта, Ом·м
2	Горизонтальный	$R_{1\Gamma} = (\rho/\pi) \ln(2l/d)$	Без заглубления, $\gg d$	обозначения такие же, как в п. 1



3	Стержневой вертикальный	$R_{1B} = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \left( \frac{2l}{d} \sqrt{\frac{4t+3l}{4t+l}} \right)$	С заглублением, $t > > d, l > > d$	$t$ – заглубление головки анода, м; остальные обозначения такие же, как в п. 1
4	Горизонтальный	$R_{1r} = (\rho/2\pi l) \ln(2l^2/td)$	С заглублением, $t > > d, l > > d$	обозначения такие же, как в п. 1,3

В зависимости от количества анодных заземлителей меняется соотношение между расходами на материалы и установку и потерей мощности на сопротивлении растекания. С учетом стоимости всех составляющих можно рассчитать количество анодов, обеспечивающее минимум расходов:

$$n_{\text{опт}} = I_{\text{ДР}} \sqrt{R_A k t_{\text{год}} / (a K_A w \eta)} \quad (38)$$

Здесь  $n_{\text{опт}}$  – оптимальное количество анодов,  $R_A$  – сопротивление растеканию группы анодов (по уравнению (35)), Ом;  $k$  – суммарная плата за электроэнергию, руб/кВт·час;  $t_{\text{год}}$  – количество непрерывной работы в году, час/год;  $K_A$  – стоимость одного анода с установкой, руб;  $a$  – коэффициент годовых выплат (в расчете на срок службы 20 лет без обслуживания, принимают равным  $0,11 \text{ год}^{-1}$ );  $w$  – КПД преобразователя, в долях единицы.

При расчете оптимального количества анодов, вначале рассчитывают  $\eta$  по формуле (37), где  $l$  принимают ориентировочно (3–6). Затем, с учетом технико-экономических показателей и рассчитанного  $\eta$  по уравнению (38) находят  $n_{\text{опт}}$ . Если значение первоначально принятого числа анодов сильно отличается от оптимального, то расчет по уравнениям (37) и (38) повторяют с новыми значениями  $l$  и  $\eta$ .

### Определение расстояния анодного заземлителя от магистрального трубопровода

При увеличении расстояния между анодным заземлителем и трубопроводом возрастает длина зоны защиты, снижаются потери напряжения в грунте. Однако увеличение зоны защиты требует увеличения тока дренажа, а увеличение расстояния приводит к росту длины линий постоянного тока. Поэтому определение оптимального расстояния задача скорее экономическая, чем техническая. Оптимальное расстояние в каждом конкретном случае будет определяться соотношением цен на оборудование, материалы, электроэнергию; стоимостью доставки, монтажа и обслуживания оборудования. Обычно расстояние до трубопровода составляет от 50 до 400 м.



## Проектирование катодной защиты подземных трубопроводов

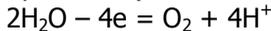
### Расчет срока службы анодных заземлителей

Обычно для расчета используются справочные данные и отраслевые нормативы. Срок службы определяют по формуле:

$$T = \frac{M_a \eta_m}{q_a I_{ДР}} \quad (39)$$

Здесь –  $M_a$  масса металла в анодах, кг;  $\eta_m$  – коэффициент использования анодной массы;  $q_a$  – электрохимический эквивалент металла, кг/А·год. Электрохимический эквивалент железа составляет 9,15 кг/А·год.

Однако на аноде, точнее на коксовой засыпке, протекают другие реакции (не анодного растворения железа):



поэтому реально количество растворяющегося металла значительно меньше. Практическое значение  $q_a$  составляет 0,5–7 кг/А·год, в зависимости от качества анода и условий эксплуатации. Нельзя допустить, чтобы в результате потери массы анода нарушился контакт или существенно возросло сопротивление растеканию. Это обстоятельство учитывает коэффициент  $\eta_m$ , который обычно принимают равным 0,7–0,8.

### Расчет падения напряжения в дренажном кабеле

Расчет сопротивления кабеля проводится в соответствии с законом Ома по формуле:

$$R_{\text{каб}}^{AK} = \rho_{\text{пр}} \frac{l_{\text{каб}}}{S_{\text{каб}}} \quad (40)$$

Здесь  $R_{\text{каб}}^{AK}$  – сопротивление кабеля от СКЗ до анодов или трубопровода, Ом;  $\rho_{\text{пр}}$  – удельное сопротивление проводника, Ом·м;  $l_{\text{каб}}$  – длина кабеля, м;  $S_{\text{каб}}$  – площадь сечения проводника, м<sup>2</sup>.

Для расчета падения напряжения в подводящих проводниках, необходимо рассчитать  $U_A$  и  $U_K$  на анодном и катодном участках кабеля:

$$U_A = I_{ДР} \cdot R_{\text{каб}}^A, \quad U_K = I_{ДР} \cdot R_{\text{каб}}^K \quad (41)$$

### Расчет необходимого напряжения на выходе СКЗ

Напряжение на выходе СКЗ должно быть равно падению напряжения на всех участках цепи. Поскольку падение напряжения на отдельных участках цепи определяется меняющимся по координате током, то правильным будет являться комбини-



## Проектирование катодной защиты подземных трубопроводов

рованный расчет, включающий как собственно величины падения напряжений, так и разности потенциалов между отдельными участками цепи. Таким образом, напряжение на СКЗ должно быть:

$$U_{СКЗ} = -(E_s^{max} - E_s^{st}) + I_{др}R_A + U_A + U_K \quad (42)$$

В приведенном соотношении падение напряжения в грунте включено в неявном виде. Оно входит в слагаемое, заключенное в скобках.

### Выбор источника питания СКЗ

Мощность на выходе СКЗ определяют исходя из общего напряжения и силы дренажного тока:

$$W_{вых} = U_{СКЗ} \cdot I_{др} \quad (43)$$

С учетом необходимой мощности на выходе и КПД по справочнику выбирают конкретную марку источника питания. Мощность источника следует выбирать с 1,5–2-х кратным запасом, имея в виду, что удельное сопротивление грунта в зимний период может повышаться, а при ухудшении качества изоляции, потребуется дренажный ток большей силы.



## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Неверов А.С., Родченко Д.А., Цырлин М.И. Коррозия и защита материалов. – Форум, 2013. – 224 с.
  2. Семенова И.В. Коррозия и защита от коррозии / И.В. Семенова, Г.М. Флорианович, А.В. Хорошилов; под ред. И.В. Семеновой. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 371 с.
  3. Экилик Г.Н. Электрохимические методы защиты металлов. Методическое пособие по спецкурсу. - Ростов-на-Дону: Изд-во РГУ, 2004. - 50 с.
  4. Бекман В. Катодная защита: справочн. издание. – М.: Metallurgia, 1992. – 176 с.
  5. Томашов Н.Д. Теория коррозии и коррозионно-стойкие конструкционные сплавы / Н.Д. Томашов, Г.М. Чернова. – М.: Metallurgia, 1986. – 359 с.
  6. Бекман В. Катодная защита от коррозии: справочн. издание / В.Бекман, В. Швенк. – М.: Metallurgia, 1984. – 496 с.
  7. Иоссель Ю.Я., Кленов Г.Э. Математические методы расчета электрохимической коррозии и защиты металлов: справочник / Ю.Я. Иоссель, Г.Э. Кленов. – М.: Metallurgia, 1984. – 272 с.
  8. Техника борьбы с коррозией / Р. Юхневич и др. – М.: Химия, 1980. – 224 с.
- Противокоррозионная защита трубопроводов и резервуаров: учебник / Е.И. Дизенко, В.Ф. Новоселов, П.И. Тугунов, В.А. Юфин. – М.: Недра, 1978. – 199