

48

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ эластомерных анодов

А.В. Поляков

ООО «Системы Эффективного Теплоснабжения»,
Санкт-Петербург

Среди материалов, используемых в настоящее время для изготовления анодных заземлений для установок катодной защиты подземных металлических сооружений, эластомерные проводящие материалы занимают особое место.

Поскольку проводящие свойства эластомеров определяются количеством графитного наполнения, скорость их растворения (погонная, на единицу длины) под действием электрического тока, протекающего через поверхность контакта с грунтом, близка к параметрам аналогичных материалов, например, применяемых для изготовления электродов типа ЭГТ, что в этом отношении делает их конкурентоспособными с этими электродами. Благодаря своим механическим свойствам эластомерные материалы позволяют изготавливать электроды кабельного типа. Эти электроды дают возможность создавать непрерывные протяженные анодные заземлители. Протяженные анодные заземлители имеют ряд преимуществ, основными из которых являются:

1. Улучшение электрохимической защиты трубопроводов за счет более равномерного продольного распределения тока.

2. Более полное использование выходного тока защитной установки благодаря уменьшению тока, ответвляющегося на смежные металлические подземные сооружения.

В течение более двух десятков лет работы по реализации этих преимуществ проводились в двух направлениях:

- совершенствование анодных материалов с целью увеличения диапазона рабочего тока;
- разработка методики проектирования этих заземлителей и руководящих документов по их применению.

В результате выполнения работ по первому из указанных направлений к настоящему времени были разработаны электроды кабельного типа, допускающие эксплуатацию при погонном токе до 150 мА/м [1]. Результатом проведения работ явился выпуск РД-106-05 «Правила применения эластомерных электродов...» [2]. В этом документе обобщен накопленный опыт использования протяженных анодов.

КАТОДНАЯ ЗАЩИТА ОТ КОРРОЗИИ



ПРЕДЛАГАЕМ анодные заземлители серии «Менделеевец»

Использование заземлителей «Менделеевец» позволяет:

- обеспечить бесперебойную работу систем катодной защиты в течение 30 лет
- применять различные конструкции заземлителей в зависимости от условий эксплуатации
- сократить трудоемкость и продолжительность монтажных работ
- снизить затраты по обслуживанию систем ЭХЗ



ПРОВОДИМ РАБОТЫ по диагностике коррозионного состояния подземных трубопроводов

ПРОИЗВОДИМ современное электрометрическое оборудование



Тел./факс: (495) 938-22-21
E-mail: a-complex@mtu-net.ru



Тел./факс: [48762] 2-14-77
E-mail: adm@ch-s.ru

Более полная информация расположена на сайте компании

www.ch-s.ru

Основной недостаток этого документа связан с тем, что содержащиеся в нем требования и рекомендации по проектированию систем защиты от коррозии с использованием анодов этого типа основаны на их аппроксимации линиями с распределенными параметрами. Применение такой аппроксимации было предложено свыше 50 лет назад для оценки защитных параметров трубопроводов и при определенных условиях давало неплохие результаты. Широкое распространение этот метод получил благодаря относительно простому математическому аппарату и возможности использования простых вычислительных средств, однако область его применения не была достаточно четко определена. В настоящее время в связи с интенсивным развитием и широким применением компьютерной техники указанная возможность потеряла актуальность и на первое место выдвигается необходимость более полного учета особенностей, связанных с работой анодных заземлений.

Для определения круга задач, которые должны найти отражение в руководящих материалах, рассмотрим последовательно следующие вопросы:

1. Оценка границы применимости приближенных формул.
2. Распределение плотности тока в поперечном сечении трубопровода.

3. Распределение тока, стекающего с протяженного анода, между смежными подземными сооружениями.

4. Пути повышения надежности протяженных анодов.

Для нахождения распределения плотности тока, стекающего с протяженного анода, рассмотрим модель в виде кругового цилиндра длиной L заданного радиуса a , равного радиусу анода, расположенного в проводящей среде (например, грунте) с

удельным сопротивлением ρ_s . Для этого цилиндра заданы погонные продольное сопротивление r и переходное (поперечное) сопротивление R , численно равные соответствующим параметрам протяженного анода. Если совместить начало координат с одним из концов анода, а ось x — с осью анода, можно записать следующие соотношения, связывающие между собой параметры, характеризующие состояние анода,

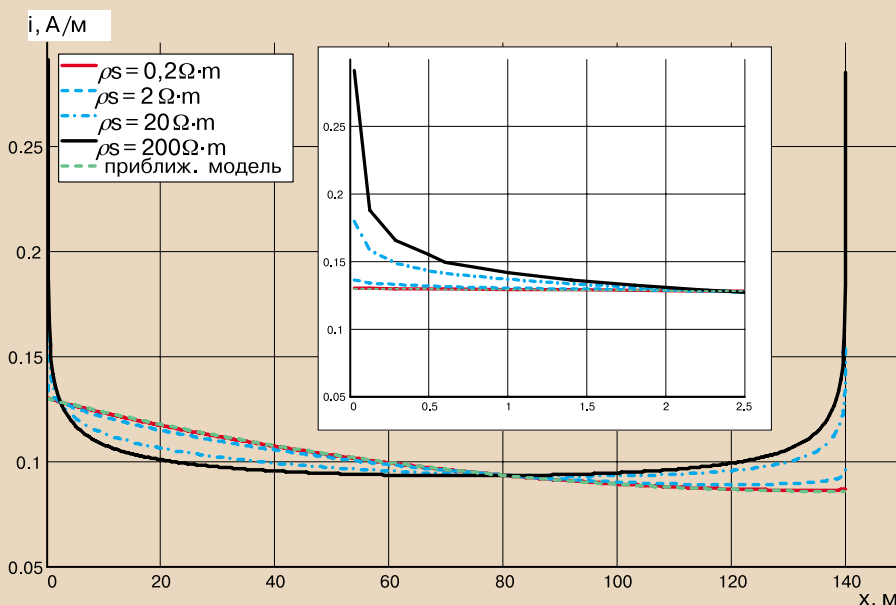


Рис. 1. Продольное распределение погонной плотности тока, стекающего с анода, при различных значениях удельного электрического сопротивления грунта.

$$R \cdot i(x) + U(x) = U_m(x), \quad (1)$$

где $i(x)$ — погонный ток, стекающий в грунт через контур поперечного сечения с координатой x , $U(x)$ — потенциал¹ в среде в точке на поверхности анода, $U_m(x)$ — потенциал внутреннего проводника анода.

$$\frac{d^2 U_m(x)}{dx^2} = r \cdot i(x), \quad (2)$$

Распределение потенциала U в проводящей среде удовлетворяет уравнению Лапласа

$$\nabla^2 U = 0 \quad (3)$$

Полный ток, стекающий с анода в среду, равен I_0 .

Точное решение уравнения (3) с граничными условиями (1), позволяющее найти все необходимые параметры, представляет значительные сложности. Следуя [3]–[5], найдем приближенное решение, которое совпадает с точным решением практически во всех точках, за исключением окрестностей концевых точек длиной не более нескольких радиусов цилиндра. С этой целью будем считать, что потенциал U создается источниками тока $i(x)$, распределенными вдоль оси цилиндра. При этих условиях выражение для определения значений потенциала может быть представлено в виде

$$U(P, Q) = \rho_s \cdot \int_0^L i(Q) \cdot G(P, Q) \cdot dQ \quad (4)$$

где $P(X, Y, Z)$ — точка наблюдения (в которой определяется потенциал электрического поля), $Q(x, y, z)$ — точки расположения источников тока, $G(P, Q)$ — функция Грина. Для проводящего полупространства² эта функция (в декартовой системе координат) имеет вид

$$G(X, Y, Z, x, y, z) = \frac{1}{4 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{(X-x)^2 + (Y-y)^2 + (Z-z)^2}} + \frac{1}{\sqrt{(X-x)^2 + (Y-y)^2 + (Z+z)^2}} \right)$$

С учетом выражения (4) соотношение (1) принимает вид

$$R \cdot i(x) + \rho_s \cdot \int_0^L i(Q) \cdot G(P, Q) \cdot dQ = U_m(x) \quad (5)$$

Интегральное слагаемое в этом соотношении учитывает распределение потенциала на поверхности анода и взаимное влияние различных точек на ней. Обозначим через $u(x)$ падение напряжения на переходном сопротивлении, $R \cdot i(x) = u(x)$. Уравнение (5)

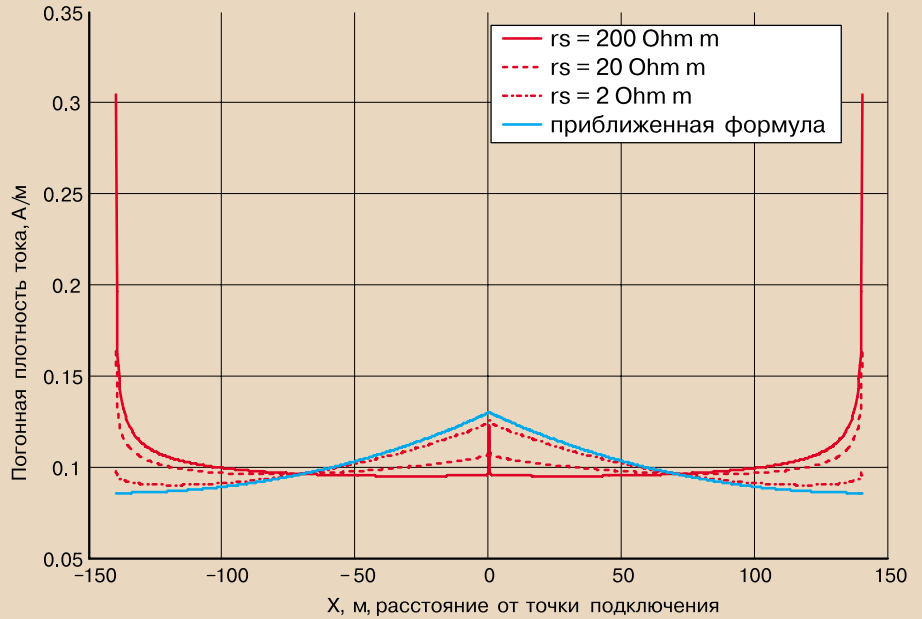


Рис. 2. Продольное распределение тока на эластомерных анодах с центральным подключением

в этих условиях можно видоизменить следующим образом

$$u(x) + \frac{\rho_s}{R} \int_0^L u(Q) \cdot G(P, Q) \cdot dQ = U_m(x) \quad (6)$$

Из этого соотношения видно, что если выполняется неравенство

$$\frac{\rho_s}{R} \ll 1 \quad (7)$$

то $u(x) = U_m(x)$.

Для определения функции $U_m(x)$ с учетом (2) получим следующее дифференциальное уравнение

$$\frac{d^2 U_m(x)}{dx^2} = \xi^2 \cdot U_m(x), \quad (8)$$

где $\frac{r}{R} = \xi^2$, которое совпадает с уравнением, на решении которого основаны результаты [2].

Таким образом, чем меньше значение безразмерного параметра

$$k = \frac{\rho_s}{R} \quad (\text{левая часть в неравенстве (7)},$$

тем ближе приближенное решение, описываемое уравнением (8), к точному. Физически значения параметра k характеризуют соотношение между падением напряжения, создаваемого в проводящем слое анода стекающим с него током, с потенциалом, создаваемым во внешней среде тем же током. Поэтому можно ожидать, что при значениях $k \gg 1$, при которых потенциал в среде оказывается больше

падения напряжения в проводящем слое, продольное распределение плотности тока будет приближаться к распределению тока вдоль эквипотенциального электрода [4]. Этот вывод подтверждается результатами расчета распределения тока вдоль анода, для чего были решены интегро-дифференциальные уравнения (2) и (5) при различных значениях удельного сопротивления внешней среды. Расчеты были выполнены для анода, параметры которого приведены в [1]: длина $L = 140$ м, диаметр $d = 0,05$ м, глубина расположения анода $h_0 = 2$ м, погонное переходное сопротивление $R = 14$ Ом·м, погонное продольное сопротивление $r = 6,8 \cdot 10^{-4}$ Ом/м. Средняя погонная плотность тока анода принималась равной $i_0 = 0,1$ А/м³. Удельное электрическое сопротивление внешней среды ρ_s варьировалось в диапазоне 0,2–200 Ом·м. Графики изменения погонной плотности тока в зависимости от положения точки наблюдения на оси анода приведены на рис. 1. Как видно из этих данных, лишь при значениях $\rho_s = 0,2$ Ом·м и $\rho_s = 2$ Ом·м⁴ приближенное продольное распределение плотности стекающего тока, рассчитанное из решения уравнения (8), практически совпадает с точными значениями. Параметр k в этих случаях удовлетворяет неравенству $k < 0,1$. При значениях удельного электрического сопротивления грунта $\rho_s = 200$ Ом·м, что соответствует значению параметра $k > 10$, продольное распределение плотности тока практически не отличается от распределения тока на поверхности

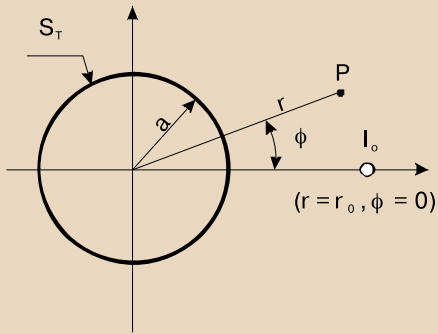


Рис. 3. Расчетная модель для расчета неравномерности распределения плотности защитного тока по поверхности S_T трубопровода.

эквипотенциального электрода⁵.

Характерной особенностью распределения плотности тока на поверхности эквипотенциального электрода является ярко выраженный концевой эффект, т. е. резкое увеличение значений плотности тока по мере приближения к оконечностям электрода. Как видно из рис. 1, этот эффект становится заметен при $k > 1$ и проявляется в максимальной степени при $k > 10$. Поскольку возникновение этого эффекта обусловлено взаимным влиянием участков поверхности анода посредством электрического поля в среде, параметры концевого эффекта не могут быть рассчитаны исходя из приближенного уравнения (8), вывод которого основан на пренебрежении именно влиянием электрического поля в среде. В этих условиях попытки учета влияния среды с повышенным значением удельного электрического

сопротивления на продольное распределение плотности тока по аноду [2] посредством некоторого увеличения поперечного сопротивления R обречены на неудачу.

Вместе с тем концевой эффект чрезвычайно важен для оценки надежности эластомерных анодов, установленных в грунте. Благодаря этому эффекту плотность тока вблизи оконечностей анода в несколько раз превышает среднее значение (рис. 1). Скорость растворения анодного материала согласно закону Фарадея пропорциональна стекающему току. Поэтому концевые участки анода, в частности участки, где расположен узел подключения кабеля, будут растворяться с большей скоростью, чем участки в средней зоне. Как только в концевой зоне растворится весь графит, начнется растворение центрального проводника. После этого анод выйдет из строя, хотя в средней его части остается достаточно большой запас анодного материала. Это происходит в 2,5–3 раза быстрее, чем могло бы быть, исходя из срока службы анода, рассчитанного по среднему значению плотности тока. Возможно, что при больших значениях плотности тока неприятности усугубляются тем, что оконечности анода подвергаются дополнительным термическим воздействиям, поскольку в оконечностях выделяется почти в 10 раз больше тепла, чем на таких же (по длине) участках в средней части анода.

Влияние концевого эффекта на срок

службы эластомерных анодов можно значительно уменьшить, если использовать аноды, в которых узел подключения питающего кабеля расположен в средней части. Такой принцип подключения используется, например, в конструкции трубчатых железокремнистых анодов, производимых канадской компанией ANOTEC (см. www.anotec.com). Преимущество эластомерных анодов в данном случае заключается в том, что использование центрального узла подключения не требует разработки специальных конструкции и технологии ее монтажа, как это потребовалось для железокремнистых анодов. Эффективность предлагаемого мероприятия видна из графиков на рис. 2, где приведены расчетные кривые распределения тока вдоль анода. Как видно из приведенных данных, значения плотности тока вблизи узла подключения отличаются от средних значений не более чем на 20–30 % даже при относительно большом значении удельного сопротивления грунта. Это показывает, что влияние концевого эффекта на состояние центрального узла подключения и, следовательно, на срок службы эластомерного анода практически исключается.

Рекомендации по применению протяженных анодов [1, 2, 6] разработаны в предположении равномерности распределения тока в каждом поперечном сечении трубопровода. В реальных условиях это распределение может быть неравномерным. Степень неравномерности зависит от расстояния между анодом и трубопроводом и параметров среды и изолирующего покрытия трубопровода. Оценка указанной неравномерности и определение условий, при которых она не будет выходить за допустимые пределы, были выполнены на основе рассмотрения расчетной модели рис. 3 (в плоскопараллельном приближении). На этой модели защищаемый трубопровод аппроксимировался бесконечно протяженным круговым цилиндром радиусом a , находящимся в проводящей среде с удельным сопротивлением ρ_s . Удельное поперечное сопротивление на поверхности трубопровода принималось равным ρ_c . Протяженный анод аппроксимировался линейным источником тока с погонной интенсивностью I_0 . Распределение потенциала электрического поля U , создаваемого в среде при протекании тока между анодом и трубопроводом, удовлетворяет (в безразмерной форме) уравнению Пуассона

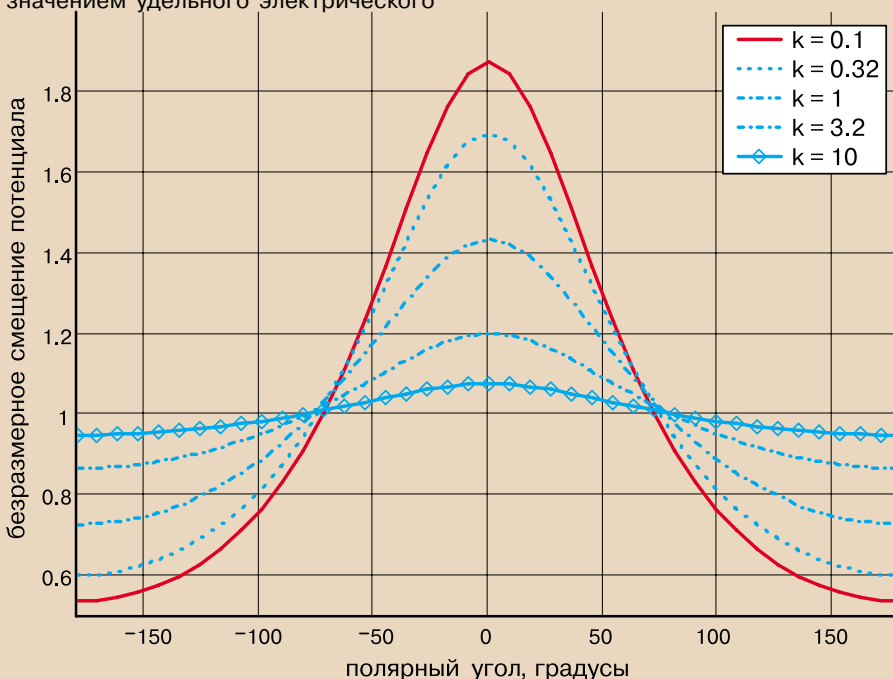


Рис. 4. Распределение смещения потенциала по контуру поперечного сечения трубопровода при различных значениях параметра k ; $r_0 = 3,0$.

Ежемесячное издание

ТЕРРИТОРИЯ НЕФТЕГАЗ

GO

<http://www.neftegas.info>



Журнал «Территория НЕФТЕГАЗ», как одно из наиболее известных отраслевых изданий, старается держать своих читателей в курсе самых новых технологий нефтегазовой отрасли, освещать самые интересные новости и события. В этом нам помогают ведущие специалисты крупных отраслевых предприятий, сотрудники научно-исследовательских институтов, независимые авторы, находящиеся во всех регионах России и странах ближнего зарубежья.

Участие во всех крупных отраслевых выставках и подписка позволяет нам постоянно расширять круги наших коллег и партнеров.

С ежемесячной электронной версией журнала, а так же с годовым планом нефтегазовых выставок, можно ознакомиться на нашем сайте.



Адрес редакции
119501, г. Москва, а/я 891
Тел.: (495) 787 85 29,
506 60 00
Тел./факс: (495) 961 11 61
e-mail: info@neftegas.info
www.neftegas.info

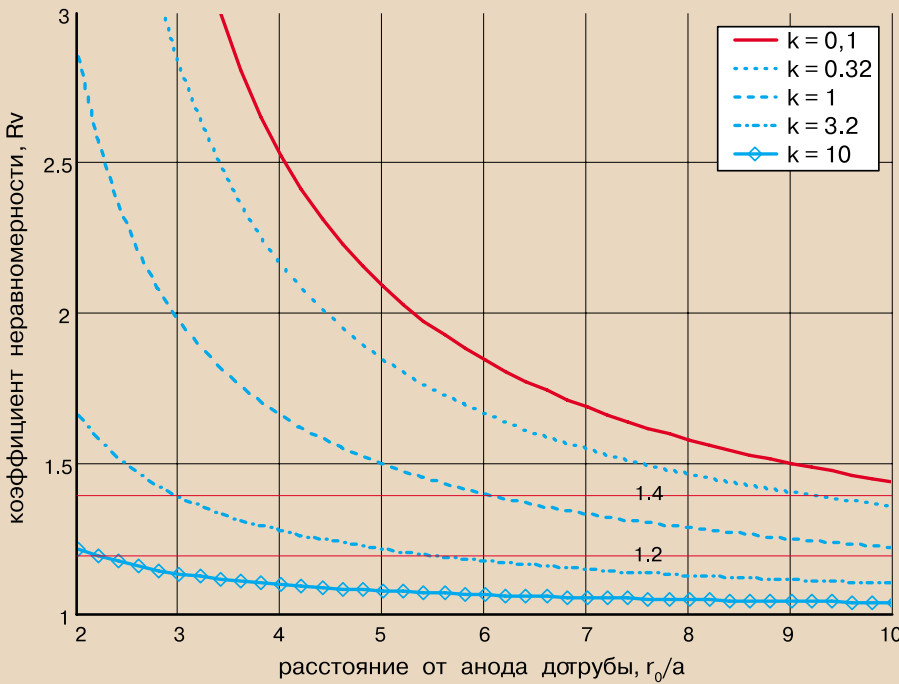


Рис. 5. Зависимость коэффициента неравномерности от расстояния между анодом и трубопроводом при различных значениях параметра k .

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} =$$

$$= -\frac{1}{r} \cdot \delta(r - r_0) \cdot \delta(\phi) \quad (9)$$

граничным условиям на поверхности трубопровода

$$U - k \cdot \frac{\partial U}{\partial r} = C \Big|_{r=1} \quad (10)$$

и условию на бесконечности (условие электронной нейтральности)

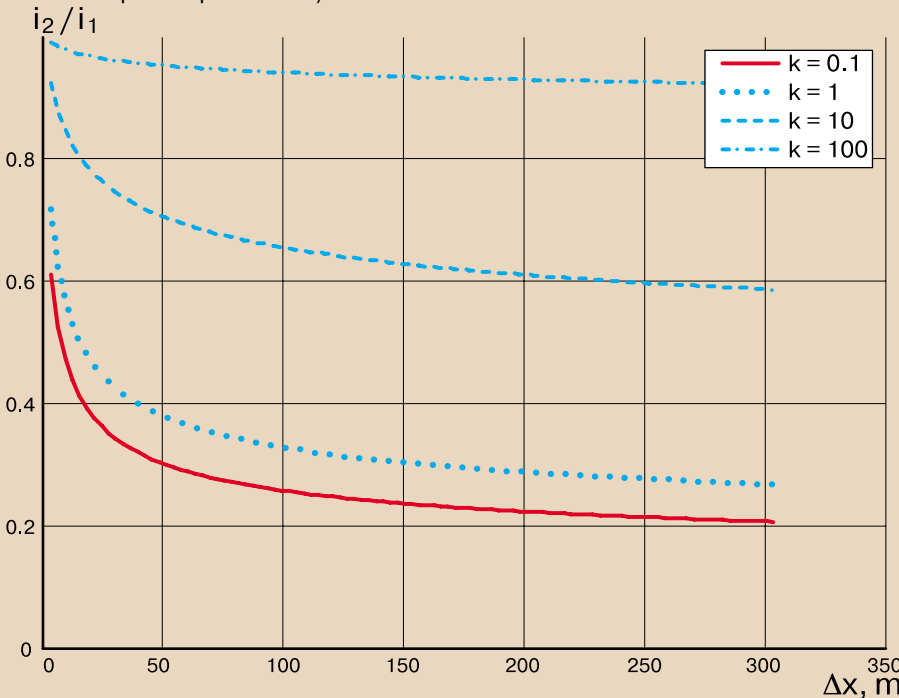


Рис. 7. Зависимость отношения токов, замыкающихся на трубопроводы, от расстояния Δx между трубопроводами

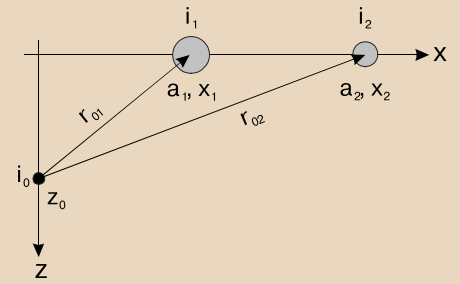


Рис. 6. Расчетная модель для оценки части тока, ответвляющегося на смежные трубопроводы

циала U , найденному (в безразмерном виде) методом конечных интегральных преобразований, было определено смещение потенциала V в различных точках на поверхности трубопровода, которое определяется выражением

$$V \cdot \frac{2 \cdot \pi}{k} = 1 + 2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{r_0} \right)^n \cdot \frac{\cos(n \cdot \phi)}{1 + k \cdot n}$$

По этой формуле были рассчитаны графики зависимости смещения потенциала от положения точки на трубопроводе (рис. 4) и зависимости коэффициента неравномерности R_v , $R_v = V_{\max}/V_{\min}$ от расстояния между трубопроводом и анодом при различных значениях параметра k (рис. 5).

Как видно из приведенных данных, только при больших значениях параметра k ($k > 10$) распределение плотности тока в поперечном сечении трубопровода практически равномерно при любом расстоянии между анодом и трубопроводом. Если это неравенство не выполняется, минимально допустимое расстояние между анодом и трубопроводом должно определяться исходя из допустимого значения коэффициента неравномерности R_v . Так, например, для значения $R_v = 1,4$ (это соответствует отклонениям от среднего значения смещения потенциала, приблизительно $\pm 20\%$) и $k = 1$ минимально допустимое расстояние между трубопроводом и анодом (рис. 5) составляет 6 радиусов трубопроводов ($r_0 = 6 \cdot a$). Таким образом, место расположения протяженного анода должно выбираться с учетом диаметра трубопровода, удельного электрического сопротивления грунта и удельного переходного сопротивления покрытия на поверхности трубопроводов. Значение последней величины в зависимости от типа изолирующего покрытия может изменяться в процессе эксплуатации в широких пределах благодаря старению материалов. По-

этому представляется целесообразным выбирать место расположения анодов таким образом, чтобы снижение удельного переходного сопротивления покрытия на трубопроводе с течением времени не приводило к снижению качества электрохимической защиты трубопровода именно в то время, когда эта защита становится все более необходимой. Это условие выполняется, если принять, что $r_0 = 10 \cdot a$, т. е. минимальное расстояние между анодом и трубопроводом должно составлять 5 диаметров трубопровода.

Как отмечалось выше, существует мнение о том, что приближение анода к защищаемому трубопроводу уменьшает часть тока, ответвляющегося на смежные подземные трубопроводы, которые не подлежат электрохимической защите (по разным причинам), но имеют металлический контакт с защищаемым трубопроводом. Количественную оценку реально достигаемого эффекта можно получить на основе анализа плоскопараллельной расчетной модели в виде двух трубопроводов, находящихся в среде с удельным объемным сопротивлением ρ_s и соединенных по металлу один с другим, и линейного источника тока (рис. 6). Целью анализа является определение отношения токов, замыкающихся на трубопроводы. Трубопроводы имеют радиусы a_1 и a_2 и расположены на оси x в точках с координатами x_1 и x_2 соответственно. Линейный источник тока с погонной производительностью i_0 расположен на оси z в точке с координатой z_0 . При анализе будем предполагать, что распределения плотности тока в поперечных сечениях трубопроводов равномерные. Обозначив токи, замыкающиеся на трубопроводы i_1 и i_2 , а через u_1 и u_2 значения, которые потенциал электрического поля U в среде принимает на поверхностях трубопроводов, граничные условия на поверхностях трубопроводов можно представить в следующей форме

$$u_m + R_m \cdot i_m = U_m, \quad m = 1, 2 \quad (12)$$

где U_m — потенциал металла; неизвестная величина, значение которой должно быть определено из условия электронейтральности

$$i_0 + i_1 + i_2 = 0 \quad (13)$$

R_m — погонное значение переходного сопротивления изолирующих покрытий на поверхностях трубопроводов, $R_m = \frac{\rho_{\Gamma m}}{2 \cdot \pi \cdot a_m}$, $\rho_{\Gamma m}$ — удельное поперечное сопротивление изолирующих покрытий. Для построения системы линейных уравнений, решение кото-

рой позволит определить искомые значения i_1 и i_2 , воспользуемся следующими соотношениями⁷

$$u_m = V_m + \bar{U}_m, \quad (14)$$

$$V_m = - \frac{i_0 \cdot \rho_s}{2 \cdot \pi} \cdot \ln(r_{0m}),$$

$$\bar{U}_1 = - \frac{i_1 \cdot \rho_s}{2 \cdot \pi} \ln(a_1) - \frac{i_2 \cdot \rho_s}{2 \cdot \pi} \ln|x_1 - x_2|$$

Для уменьшения числа параметров, от которых зависит решение, указанные соотношения были приведены к безразмерному виду. При этом использовались следующие масштабные коэффициенты и безразмерные параметры: $N_1 = i_0$, $N_U = \frac{i_0 \cdot \rho_s}{2 \cdot \pi}$, $k_1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_1}{\rho_s}$, $k_2 = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_2}{\rho_s}$. В результате решения системы линейных уравнений для отношения токов, замыкающихся на разные трубопроводы, получено следующее выражение

$$\frac{i_2}{i_1} = \frac{k_1 + \ln\left(\frac{r_{01} \cdot |x_1 - x_2|}{a_1 \cdot r_{02}}\right)}{k_2 + \ln\left(\frac{r_{02} \cdot |x_1 - x_2|}{a_2 \cdot r_{01}}\right)} \quad (15)$$

Оценка влияния расстояния между трубопроводами на отношение токов выполнена в предположении, что трубопроводы имеют одинаковые размеры и одинаковые параметры изолирующих покрытий. На рис. 7 приведены графики зависимости этого отношения от расстояния между трубопроводами при различных значениях параметра k (при расчетах принималось, что $k_1 = k_2$). Как видно из этих графиков, расстояние между трубопроводами заметно влияет на распределение токов только при малых значениях параметра k ($k \leq 1$). При больших значениях k отношение токов обратно пропорционально отношению значений параметра k и практически не зависит от расстояния между трубопроводами. При определенных условиях (если, например, переходное сопротивление изолирующего покрытия на защищаемом сооружении много больше, чем на смежном сооружении) ток, ответвляющийся на смежное подземное сооружение, будет значительно превосходить ток, замыкающийся на защищаемое сооружение. Таким образом, приближение анода к защищаемому сооружению практически не приводит к существенному перераспределению тока между подземными сооружениями. Поэтому возможность ответвления тока на смежные подземные сооружения при использовании эласто-

мерных протяженных анодов надо учитывать так же, как и при использовании сосредоточенных анодов.

ВЫВОДЫ

1. Распределение тока вдоль протяженного анода зависит от параметров грунта и в общем случае не может быть определено из приближенного уравнения (даже при некоторой его коррекции).
2. В грунте на протяженном аноде проявляется влияние краевого эффекта: резкое увеличение плотности тока в концевых зонах, что может явиться причиной преждевременного выхода анода из строя.
3. При расстоянии между анодом и трубопроводом менее 5 диаметров распределение по контуру поперечного сечения анода плотности тока, стекающего в землю, может быть в значительной степени неоднородным, что снижает эффективность электрохимической защиты.
4. Приближение анода к защищаемому трубопроводу незначительно улучшает распределение тока анода между защищаемым трубопроводом и смежным, имеющим с ним металлический контакт, но не подлежащим защите от коррозии.
5. Влияние краевого эффекта на эксплуатационные качества анода может быть значительно уменьшено при подключении питающего кабеля в средней части анода.

ПРИМЕЧАНИЯ

- 1 — Относительно бесконечно удаленной точки.
- 2 — Граница раздела сред совпадает с плоскостью $Z = 0$.
- 3 — Это соответствует полному току анода 14 А.
- 4 — Такие значения удельного электрического сопротивления характерны для морской воды.
- 5 — При принятых значениях продольного сопротивления электрода и его длины.
- 6 — Потенциал металла относительно бесконечно удаленной точки.
- 7 — Соотношение для U_2 получается из (14) заменой индексов 1 на 2 и 2 на 1.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.А. Делекторский, Н.В. Стефов, М.А. Сурис, Н.П. Глазов, К.Л. Шамшетдинов. «Новые протяженные гибкие аноды для защиты теплосетей от коррозии и особенности их применения». Новости теплоснабжения. № 3, 2005.
2. В.Е. Копытин. «Особенности расчета параметров катодной защиты с эластомерными электродами анодного заземления протяженного типа». Коррозия ТЕРРИТОРИИ НЕФТЕГАЗ. Приложение к журналу «Территория Нефтегаз». № 2, ноябрь 2005.
3. Ю.Я. Иоссель, Г.Э. Кленов. «Математические методы расчета электрохимической коррозии и защиты металлов. Справочник». М.: Металлургия, 1984.
4. В.В. Бургсдорф, А.И. Якобс. «Заземляющие устройства электростанов». М.: Энергоатомиздат, 1987.
5. В.Т. Иванов, Н.П. Глазов, В.А. Макаров. «Математическое моделирование электрохимической защиты». В сборнике «Итоги науки и техники. Коррозия и защита от коррозии». Том 13, М., 1987.
6. Типовая инструкция по защите трубопроводов тепловых сетей от наружной коррозии. РД 153-34.0-20.518-2003. Издательство «Новости теплоснабжения», Москва, 2003.
7. Ю.Я. Иоссель, Г.Э. Кленов, Р.А. Павловский. «Расчет и моделирование контактной коррозии судовых конструкций». Л. Судостроение, 1979.