

УДК 621.311.22(075.8)

ОПТИМИЗАЦИЯ ОБЪЁМА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОКСОВОЙ ЗАСЫПКИ В СИСТЕМАХ КАТОДНОЙ ЗАЩИТЫ ДЛЯ МОДЕЛИ АНОДНОГО ЗАЗЕМЛЕНИЯ В ФОРМЕ ПОЛУСФЕРЫ

В.Г. Киселев, Е.Н. Рузич, Ч.В. Чунг

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

г. Санкт-Петербург, Россия

kis_vg@mail.ru, rouzith@mail.ru

Резюме: В работе на базе модельных представлений для анодного заземления системы катодной защиты в форме одиночной полусферы, которая расположена на поверхности грунта, и наличия коксовой засыпки рассчитано оптимальное, в смысле критерия «годовые приведённые затраты», количество кокса. Одновременно произведён расчет для аналогичного заземления, но без использования коксовой засыпки, что позволило провести их сравнительный анализ и рассчитать их сравнительную экономическую эффективность в зависимости от удельного сопротивления грунта. В результате данных расчётов предложено модернизированное анодное заземление с нормированным количеством коксовой засыпки, которое обладает повышенной безопасностью по сравнению с традиционным изделием, так как, в частности, позволяет снизить риски для других подземных металлических сооружений, обусловленные генерированием положительных постоянных блуждающих токов системой катодной защиты. Данное качество предлагаемого анодного заземления особенно актуально в городских условиях, а также на территории крупных промышленных объектов, характеризующихся повышенной плотностью подземных металлических сооружений.

Ключевые слова: анодное заземление, коррозия, почвенная коррозия, электрохимическая коррозия, электрохимическая защита от коррозии, катодная защита от коррозии, защита от наружной коррозии, активная защита от коррозии.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-3-4-116-128

OPTIMIZATION OF THE AMOUNT OF COKE FILLING USAGE IN CATHODIC PROTECTION SYSTEMS FOR AN ANODE GROUNDING MODEL IN THE FORM OF A HEMISPHERE

V.G. Kiselev, E.N. Ruzich, C.V. Chung

Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

kis_vg@mail.ru, rouzith@mail.ru

Abstract: In this work, we calculated the optimal amount according to "annualized costs" criteria on the basis of model representations for the anodic grounding of the cathodic protection system in the form of a single hemisphere, which is located on the surface of the ground and contains coke backfilling. At the same time, calculations were made for a similar grounding, but without the use of coke filling, which allowed comparative analysis and calculation of their comparative economic efficiency, depending on the specific resistance of the soil. As a result of these calculations, we proposed a modernized anode ground with a normalized amount of coke filling, that has increased safety in comparison with the traditional product, since it allows to reduce

risks, caused by generation of positive DC stray currents of cathodic protection system, to other underground metal constructions. This quality of the proposed anode grounding is especially important in urban areas and at the territories of large industrial facilities characterized by an increased density of underground metal structures.

Keywords: *sacrificial anode, electrochemical corrosion, corrosion protection, active corrosion protection, cathodic protection, soil corrosion, protection against corrosion, cathodic protection against corrosion.*

Введение

Современное состояние топливно-энергетического комплекса Российской Федерации и коммунального хозяйства в целом характеризуется повышенной аварийностью подземных металлических коммуникаций (ПМК) и высокой степенью их износа, что требует значительных капитальных затрат на их реконструкцию и поддержание в работоспособном состоянии. В этом случае, как показывает практика, наибольшую опасность представляет наружная коррозия ПМК, для борьбы с которой используется целый комплекс антикоррозионных мероприятий, включающий, в том числе, и их катодную поляризацию, которая, особенно в условиях крупных городов и производственных площадок, связана со значительными капитальными и эксплуатационными затратами [1–5]. Кроме того, наблюдается явная интенсификация работ в области электрохимической защиты от коррозии под воздействием переменных блуждающих токов [6–10]. В связи с этим очевидно, что повышение эффективности использования активной антикоррозионной защиты подземных металлических трубопроводов (ПМТ) существенно уменьшает вложения как на сооружение установок катодной защиты, так и на их последующую эксплуатацию [11; 12] и поэтому может считаться приоритетным направлением развития данной технологии. Практика выработала достаточно эффективный способ снижения приведённых затрат на катодную защиту путём применения коксовой засыпки при сооружении анодных заземлений. Как правило, в этом случае положительный эффект достигается как за счёт продления срока службы анодов, так и за счёт снижения затрат на электроэнергию [13], необходимую для функционирования систем электрохимической защиты. Дополнительным фактором, работающим в направлении использования коксовой засыпки, особенно в городских условиях при наличии высокой плотности укладки ПМТ и других подземных металлических сооружений, является уменьшение зоны, опасной в отношении наличия блуждающих токов, в окрестностях анодного заземления. Рассмотрению двух последних вопросов, связанных с применением традиционных модельных представлений, используемых для описания анодного заземления, и посвящена данная статья.

Оптимизация объёма использования коксовой засыпки для модели анодного заземления в форме полусферы, расположенной на поверхности грунта

Рассмотрим простейший вариант катодной защиты подземного трубопровода (рис. 1), включающий преобразователь для катодной защиты 1, кабельные прокладки 2 и 3, анодное заземление 4 и собственно защищаемый металлический трубопровод 5, изолированный от окружающей среды при помощи диэлектрического, например полиэтиленового, покрытия 6. При этом все элементы системы, за исключением преобразователя и части изолированных кабельных прокладок, расположены в грунте 7, а диэлектрическое покрытие имеет такие дефекты 8, что металл трубопровода в их пределах непосредственно контактирует с окружающим его грунтом или грунтовым электролитом.

Примем, что анод для заземления установки катодной защиты (рис. 1 и 2) представляет собой одиночный электрод, выполненный из металла, например железа, в форме полусферы с радиусом r_0 , который расположен на поверхности грунта, как это

показано на рис. 2,а. Удельное сопротивление металла равняется ρ_m , а удельное сопротивление грунта соответственно ρ_g .

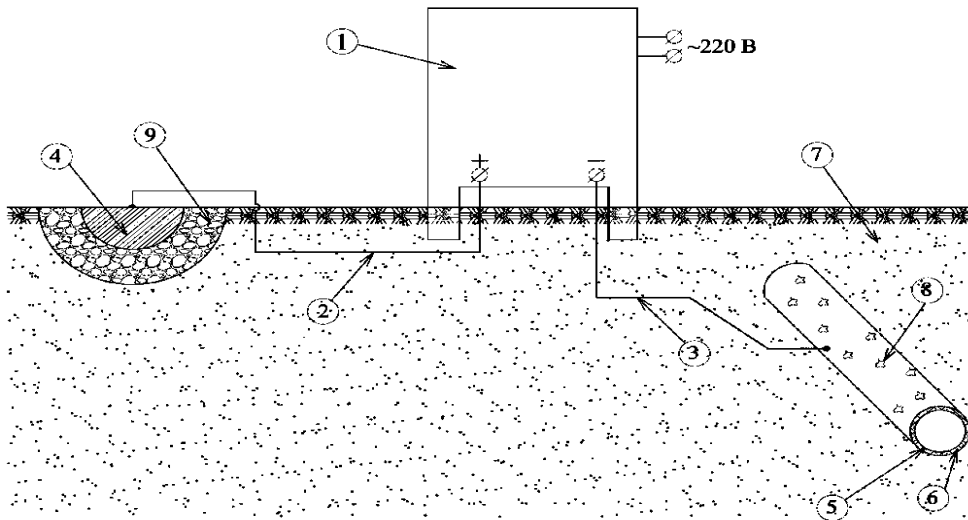


Рис. 1. Схема катодной защиты: 1 – катодная станция (преобразователь); 2, 3 – кабельные прокладки; 4 – анодное заземление; 5 – защищаемый металлический трубопровод; 6 – полиэтиленовое покрытие; 7 – грунт; 8 – дефект; 9 – коксовая засыпка

В силу того, что удельное сопротивление металла крайне мало и значительно меньше удельного сопротивления грунта, то, с одной стороны, можно считать, что поверхность металлической полусферы эквипотенциальна и равна потенциалу на её кабельном вводе, а с другой стороны – не учитывать сопротивление металла анода в дальнейших расчётах. Поэтому, при нахождении рассматриваемой модели в гомогенном грунте и при бесконечном удалении её от трубопровода, сопротивление растекания анодного заземления R_g будет определяться следующим выражением [14, стр. 436]:

$$R_g = \frac{\rho_g}{2\pi r_0}. \quad (1)$$

В свою очередь, если предположить, что анодное заземление находится при тех же самых условиях, в коксовой засыпке (грунт целиком заменён на коксовую засыпку, рис. 2,б), то его сопротивление растекания R_k будет определяться выражением, аналогичным предыдущему [14, с. 436], а именно:

$$R_k = \frac{\rho_k}{2\pi r_0}, \quad (2)$$

где ρ_k – удельное сопротивление коксовой засыпки.

Примем, что r – расстояние от центра анодного заземления (точка a) до некоторой точки (b) в грунте или коксовой засыпке (рис. 2,с и 2,д). В этом случае, учитывая симметрию объекта исследования, сопротивление слоя грунта от окончания радиус-вектора r (точка b) до точки грунта (c) бесконечно удалённой от анодного заземления $R_{gr\infty}$, будет определяться следующей формулой (рис. 2,с):

$$R_{gr\infty} = \frac{\rho_g}{2\pi r}. \quad (3)$$

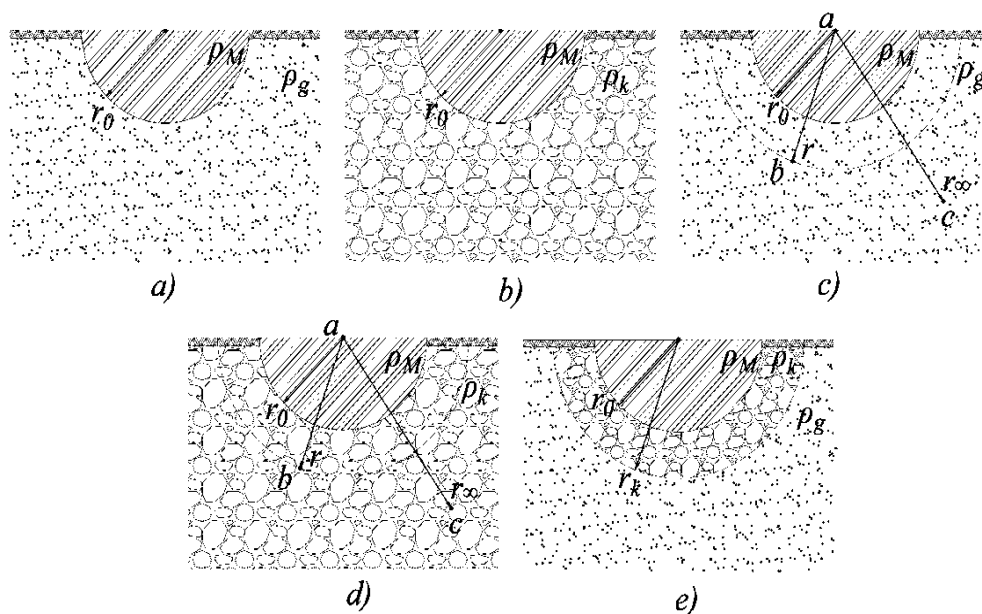


Рис. 2. Модель анодного заземления полусферической формы, расположенная на поверхности земли (грунта)

Аналогично, сопротивление слоя коксовой засыпки от окончания радиус-вектора r (точка b) до точки грунта, бесконечно удалённой от анодного заземления (точка c), в случае если грунт полностью заменён коксовой засыпкой (рис. 2, d), можно будет рассчитать, используя следующее математическое выражение:

$$R_{kr\infty} = \frac{\rho_k}{2\pi r}. \quad (4)$$

Из формул (1) и (3) следует, что сопротивление слоя грунта, находящегося между анодным заземлением и полусферой с радиусом r (рис. 2, c), будет определяться соотношением

$$R_{gr_0r} = \frac{\rho_g}{2\pi} \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r} \right). \quad (5)$$

Аналогично, из формул (2) и (4) следует, что сопротивление слоя коксовой засыпки, находящегося между анодным заземлением и полусферой с радиусом r , в случае, если грунт в системе полностью заменён коксовой засыпкой (рис. 2, d), можно рассчитать с использованием математического выражения

$$R_{kr_0r} = \frac{\rho_k}{2\pi} \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r} \right). \quad (6)$$

Из соотношений (5) и (6), путём вычитания, получаем формулу для расчета изменения величины сопротивления анодного заземления ΔR при замене слоя грунта на коксовую засыпку с радиусом, изменяющимся от r_0 до значения r_k (рис. 2, e). Таким образом, общее сопротивление грунта R_g , определяемое формулой (1), уменьшится на величину ΔR :

$$\Delta R = R_{gr_0r} - R_{kr_0r}. \quad (7)$$

При подстановке в правую часть последнего выражения значений соответствующих величин из предыдущих формул, получаем:

$$\Delta R = \frac{(\rho_g - \rho_k)}{2\pi} \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_k} \right). \quad (8)$$

Использование последнего соотношения совместно с уравнением (1), определяющим сопротивление анодного заземления выбранной нами формы и расположения в грунте, позволяет получить формулу для расчёта сопротивления анодного заземления, расположенного в комбинированной системе: коксовая засыпка – грунт. В этом случае коксовая засыпка расположена в полусфере, ограниченной, соответственно, радиус-векторами r_0 и r_k , за пределами радиус-вектора r_k вплоть до бесконечности находится грунт (рис. 2,е). Сопротивление растекания анодного заземления выбранной нами формы и сочетания коксовой засыпки и грунта R_{kg} будет определяться следующим соотношением:

$$R_{kg} = R_g - \Delta R. \quad (9)$$

При подстановке в правую часть последнего выражения значений соответствующих величин из предыдущих формул, получаем формулу, характеризующую сопротивление растекания анодного заземления при наличии коксовой засыпки:

$$R_{kg} = \frac{\rho_g}{2\pi r_k} + \frac{\rho_k}{2\pi} \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_k} \right). \quad (10)$$

Известно [15, с. 82], что значение катодного защитного тока I_0 , полностью определяется параметрами, характеризующими защищаемое сооружение и окружающую его среду. В этом случае, исходя из схемы катодной защиты (рис. 1), очевидно, что при любых изменениях характеристик анодного заземления величина I_0 должна оставаться постоянной. Это обстоятельство позволяет нам определить потери мощности на анодном заземлении при изменении его рабочих характеристик.

В этом случае годовые расходы на электроэнергию C_g , которые обусловлены электрическим сопротивлением анодного заземления, находящегося в грунте, с учётом формулы Джоуля-Ленца будут определяться следующим выражением:

$$C_g = KktI_0^2 R_g, \quad (11)$$

где K – коэффициент, характеризующий коэффициент полезного действия преобразователя; так, например, при КПД равном 50% величина данного коэффициента будет равна двум; k – стоимость электроэнергии (примем её равной 4,00 руб/(кВт·ч)); t – количество часов в году (8760); I_0 – общий защитный ток, текущий через анодное заземление.

Точно так же расходы на электроэнергию C_k , которые обусловлены электрическим сопротивлением анодного заземления, находящегося в коксовой засыпке, будут определяться формулой, аналогичной предыдущему математическому выражению:

$$C_k = KktI_0^2 R_k. \quad (12)$$

Сочетание последних трёх уравнений позволяет записать соотношение, определяющее расход электроэнергии на анодном заземлении, находящемся в комбинированном грунте, с параметрами, определёнными нами ранее, и состоящем из коксовой засыпки и собственно грунта:

$$C_{kg} = KktI_0^2 R_{kg}. \quad (13)$$

Вместе с тем, общий экономический эффект практически любого мероприятия в области строительства, в том числе и сооружения объектов электрохимической защиты, как правило, принято оценивать с использованием понятия «приведённый годовой эффект», обычно определяемый следующим соотношением:

$$P = \frac{K_0}{T} + E_a, \quad (14)$$

где P – приведённые годовые затраты в рублях; K_0 – капитальные затраты на сооружение объекта в рублях; T – срок службы объекта (количество лет); E_a – годовые эксплуатационные затраты в рублях.

Следует отметить, что использование коксовой засыпки при сооружении анодного заземления, помимо собственно уменьшения потерь мощности на нём, приводит к ряду других положительных эффектов. Так, например, в этом случае [14, стр. 185]: увеличивается срок службы анодов; уменьшается, в силу существенного роста реакционной поверхности, электрохимическое перенапряжение на анодном заземлении; снижается необходимая установочная мощность преобразователя катодной защиты и, по всей видимости, несколько снижаются затраты на профилактическое обслуживание установки катодной защиты. Однако рассмотрение этих вопросов явно выходит за рамки заявленной темы, поэтому в данной работе мы на них останавливаться не будем.

Как следует из формулы (14), общий экономический эффект, обусловленный экономией электроэнергии при использовании коксовой засыпки, несколько снижается за счёт стоимости кокса и дополнительных затрат на его доставку и укладку. В строительстве при грубых оценках стоимости работ принято считать, что стоимость доставки и использования материала равняется его цене. Воспользуемся этим широко распространённым приёмом для оценки работ по укладке кокса при строительстве анодного заземления. В этом случае для комплекса работ по укладке коксовой засыпки, включая и стоимость материалов K_k , получаем следующее выражение:

$$K_k = k_a a D \frac{2\pi}{3} (r_k^3 - r_0^3), \quad (15)$$

где k_a – коэффициент, характеризующий затраты на доставку и укладку коксовой засыпки, по отношению к стоимости самого материала; например, при стоимости материала, равной стоимости работ по его доставке и укладке, он будет равен двум; a – стоимость в рублях единицы веса коксовой засыпки, руб/кг; D – плотность коксовой засыпки, кг/м³.

В таком случае общие капитальные затраты на сооружение анодного заземления K_0 , входящие в формулу (14), будут представлены следующим выражением

$$K_0 = K_a + K_k, \quad (16)$$

где K_a – капитальные затраты, включающие стоимость, доставку и укладку собственно жертвенного анода, которые в нашем случае по условиям задачи неизменны.

Для расчёта годовых приведённых затрат P в соответствии с формулой (14) необходимо определить годовые приведённые капитальные затраты K_0/T и годовые эксплуатационные затраты E_a . Отметим, что величина K_0 , исходя из соотношений (15) и (16), является возрастающей функцией с пределами изменения от некоторой константы до бесконечности и областью определения от r_0 до бесконечности. В то же время функция C_{kg} , с той же самой областью определения, в соответствии с соотношением (13) является убывающей от некоторой константы до нуля. Учитывая, что мы при анализе эксплуатационных затрат анодного заземления учитываем только затраты на электроэнергию, то можно принять что $C_{kg} \approx E_a$. Таким образом, исходя из физической сущности функций K_0 и C_{kg} (и та, и другая зависят от радиус-вектора r) и учитывая, что величина срока службы анодного заземления T , по определению, больше или равна нулю, можно утверждать, что приведённые затраты P , определяемые соотношением (14), имеют некоторое минимальное значение при изменении величины r_k . Для нахождения его воспользуемся тем обстоятельством, что для непрерывных функций в точке экстремума их производная равна нулю. Подставим в соотношение (14) полученные нами значения величин E_a и K_0 , тогда получим следующее выражение:

$$P = k_a a D \frac{2\pi}{3T} (r_k^3 - r_0^3) + \frac{K_a}{T} + K k t I_0^2 \left(\frac{\rho_g}{2\pi r_k} + \frac{\rho_k}{2\pi} \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_k} \right) \right). \quad (17)$$

Продифференцируем последнее выражение по r_k и приравняем полученное соотношение к нулю. После разрешения его относительно r_k получим формулу для вычисления оптимальной величины радиус-вектора r_{kr} :

$$r_{kr} = 4 \sqrt{\frac{(\rho_g - \rho_k) k K t I_0^2}{4\pi^2 a k_a D}}, \quad (18)$$

где r_{kr} — значение вектора r_k , отвечающее оптимальному, в смысле уравнения (14), выбору параметров коксовой засыпки.

Подставим в данную формулу вместо буквенных обозначений конкретные наиболее распространённые значения характеризующих их численных величин ($\rho_k = 0,2$ Ом·м; $k = 4$ руб/(кВт·ч); $K = 2$; $t = 8760$ ч; $T = 10$ лет; $I_0 = 1$ А; $a = 40$ руб/кг; $k_a = 2$; $r_0 = 0,15$ м; $D = 800$ кг/м³; $K_a = 20\,000$ руб.) и проведём вычисления оптимальной «толщины» коксовой засыпки как функции удельного сопротивления грунта. Значения удельного сопротивления грунта ρ_g будем варьировать в пределах от 10 Ом·м (влажная глина; песок, сильно увлажнённый грунтовыми водами) до 100 Ом·м (суглинок полутвёрдый; умеренно увлажнённый песок). Результаты вычисления представим в табличной (табл. 1) и графической (рис. 3) форме.

Таблица 1
Зависимость основных характеристик одиночного полусферического анодного заземления с оптимальными параметрами коксовой засыпки от удельного сопротивления грунта ρ_g

ρ_g , Ом·м	$r_{kr}(r_r)$, м	R_{kg} , Ом	K_a , руб.	K_k , руб.	E_a , руб.	P , руб./год
10	0,228	7,04	20 000	1144	494	2608
20	0,272	11,79	20 000	2253	826	3052
30	0,302	15,95	20 000	3223	1117	3440
40	0,324	19,76	20 000	4114	1385	3796
50	0,343	23,34	20 000	4950	1636	4130
60	0,359	26,74	20 000	5745	1874	4448
70	0,373	30,00	20 000	6507	2103	4753
80	0,386	33,15	20 000	7242	2323	5047
90	0,397	36,20	20 000	7954	2537	5332
100	0,408	39,16	20 000	8647	2745	5609

В качестве базы для сравнения рассмотрим вариант анодного заземления, в котором коксовая засыпка отсутствует. В этом случае вместо формулы (13) для расчёта годовых эксплуатационных затрат на анодном заземлении без коксовой засыпки E_{ag} необходимо использовать модернизированную формулу (11), которую мы обозначим как (11*):

$$E_{ag} \approx C_g = K k t I_0^2 R_g. \quad (11^*)$$

В свою очередь, для расчёта капитальных затрат вместо формулы (16) нужно использовать следующее соотношение:

$$K_0 = K_a. \quad (16^*)$$

Проведём вычисления приведённых затрат для анодного заземления, расположенного в грунте P_g с использованием модернизированной формулы (14), обозначив её через (14*):

$$P_g = \frac{K_0}{T} + E_{ag}, \quad (14^*)$$

Результаты вычислений представим в табличной форме (табл. 2), а в графической форме для сравнения с приведёнными затратами в случае наличия коксовой засыпки покажем на рис. 3.

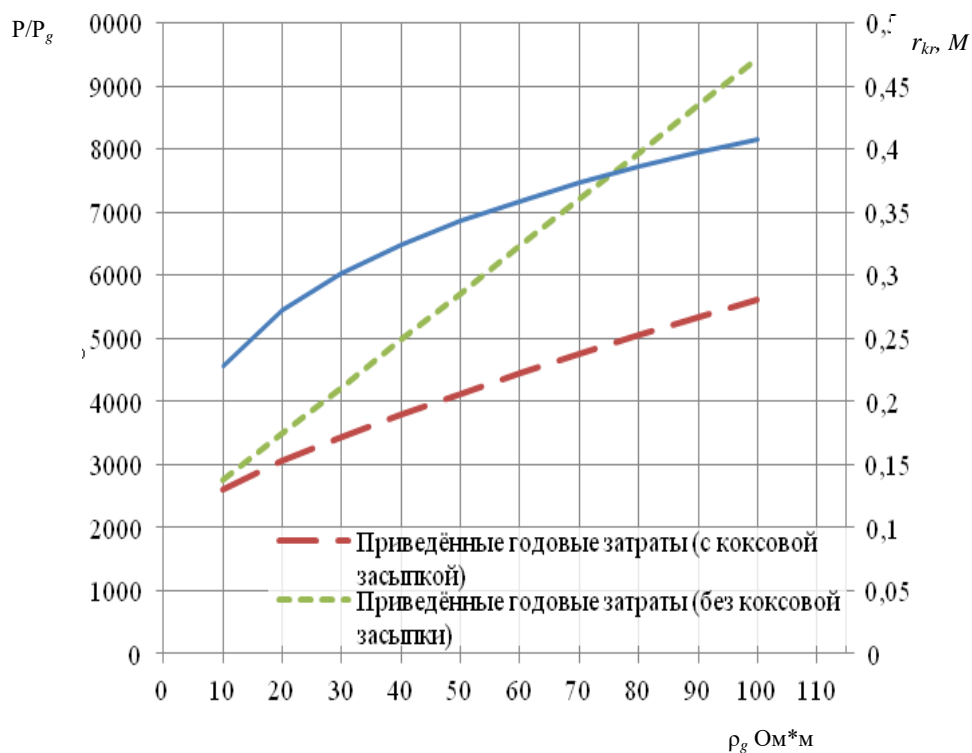


Рис. 3. Зависимость приведённых годовых затрат P и расчетного оптимального радиуса коксовой засыпки (r_{kr}) от удельного сопротивления грунта ρ_g

Таблица 2

Зависимость основных характеристик одиночного полусферического анодного заземления без коксовой засыпки от удельного сопротивления грунта ρ_g

ρ_g , Ом·м	K_a , руб.	E_{ag} , руб./год	P_g , руб./год
10	20 000	744	2744
20	20 000	1488	3488
30	20 000	2232	4232
40	20 000	2976	4976
50	20 000	3720	5720
60	20 000	4464	6464
70	20 000	5208	7208
80	20 000	5952	7952
90	20 000	6696	8696
100	20 000	7439	9439

Простое сравнение табличных данных и графических материалов показывает существенное снижение приведённых затрат при использовании оптимальных параметров коксовой засыпки в процессе сооружения анодного заземления и увеличение данного полезного эффекта с ростом удельного сопротивления грунта.

Влияние объёма использования коксовой засыпки для модели анодного заземления в форме полусферы, расположенной на поверхности грунта, на размеры зоны, опасной в отношении блуждающих токов, исходящих от анодного заземления

Примем, как и ранее, что r – расстояние от центра анодного заземления до некоторой точки в грунте или коксовой засыпке (рис. 2). В этом случае, в соответствии с монографией [14, с. 432 и 436], потенциал анодного заземления φ_{gr_0} , измеренный относительно бесконечно удалённой земли, будет определяться формулой

$$\varphi_{gr_0} = \frac{I_0 \rho_g}{2\pi r_0}. \quad (19)$$

В тоже время, ориентируясь на тот же источник [14, с. 432, 436], потенциал грунта φ_{gr} , расположенного на расстоянии r от центра анодного заземления, может определяться и следующим математическим выражением:

$$\varphi_{gr} = r_0 \frac{\varphi_{gr_0}}{r}. \quad (20)$$

После подстановки в последнюю формулу значения величины φ_{gr_0} из соотношения (19) получаем соотношение

$$\varphi_{gr} = \frac{I_0 \rho_g}{2\pi r}. \quad (21)$$

В соответствии с практическим критерием [15, стр. 171] оценки опасности в отношении блуждающих токов, исходящих от анодного заземления, потенциал грунта относительно бесконечно удалённой земли, равный +0,5 вольта и менее, признаётся не опасным. Данное обстоятельство позволяет рассчитать с использованием формулы (21) размеры окружности с центром, в котором находится анодное заземление, опасной в отношении блуждающих токов. После подстановки в формулу (21) вместо φ_{gr} его значения, равного +0,5 вольт, и проведения соответствующих преобразований получаем для вычисления границы опасной зоны, очерченной на поверхности грунта радиус-вектором r_{gro} , следующее выражение:

$$r_{gro} = \frac{I_0 \rho_g}{\pi}. \quad (22)$$

При использовании коксовой засыпки в части полусферы, ограниченной соответственно радиус-векторами r_0 и r_k , за пределами радиус-вектора r_k , вплоть до бесконечности, будет находиться грунт. В этом случае величину R_{kg} , определяющую общее сопротивление анодного заземления, можно будет рассчитать с использованием формулы (10). В соответствии с законом Ома и уравнением (10), при выбранных нами ранее параметрах, характеризующих анодное заземление, грунт и коксовую засыпку, значение потенциала анодного заземления $\varphi_{kg r_0}$ относительно бесконечно удалённой земли при наличии коксовой засыпки и грунта будет определяться соотношением

$$\varphi_{kg r_0} = I_0 \left[\frac{\rho_g}{2\pi r_k} + \frac{\rho_k}{2\pi} \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_k} \right) \right]. \quad (23)$$

Для нахождения потенциала грунта $\varphi_{kg r}$, расположенного на расстоянии r от центра анодного заземления, в случае наличия только коксовой засыпки перепишем выражение (20) следующим образом:

$$\varphi_{kg r} = r_0 \frac{\varphi_{kg r_0}}{r}. \quad (20^*)$$

Подставив значение потенциала анодного заземления $\varphi_{kg r_0}$ из уравнения (23) в (20*), получим:

$$\varphi_{kgr} = \frac{r_0 I_0}{2\pi} \left[\frac{\rho_g}{r_k} + \rho_k \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_k} \right) \right]. \quad (24)$$

Учитывая, что в соответствии с практическим критерием опасности анодного заземления в отношении блуждающих токов для подземных металлических сооружений потенциал φ_{kgr} должен быть равен +0,5 вольта, величину безопасного радиуса r_B можно вычислить из последней формулы:

$$r_B = \frac{r_0 I_0}{\pi} \left[\frac{\rho_g}{r_k} + \rho_k \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_k} \right) \right]. \quad (25)$$

Однако в ряде случаев более информативной характеристикой, необходимой для анализа данного явления, является определение величины r_{BO} , которая представляет собой частный случай величины r_B , вычисленной при оптимальном, в смысле формулы (18), значении величины радиуса коксовой засыпки. Такой подход позволяет несколько видоизменить формулу (25) и представить её в следующем виде:

$$r_{BO} = \frac{r_0 I_0}{\pi} \left[\frac{\rho_g}{r_{kr}} + \rho_k \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_{kr}} \right) \right]. \quad (26)$$

Проведём вычисление величины r_{BO} как функции удельного сопротивления грунта, воспользовавшись формулой (26) и табл. 1. В качестве базы для сравнения используем вариант анодного заземления без коксовой засыпки (формула 22), которая характеризуется радиус-вектором r_{gro} . В таком случае уменьшение величины опасной зоны, очерченной радиус-вектором, исходящим из центра одиночного анодного заземления, составит величину Δr и будет определяться следующей формулой

$$\Delta r = r_{gro} - r_{BO}. \quad (27)$$

Однако зачастую более информативной характеристикой, необходимой для анализа данного явления, является выигрыш в площади, безопасной в отношении блуждающих токов ΔS , связанный с применением коксовой засыпки для анодного заземления, который можно вычислить с использованием формулы, полученной на основании формулы для расчёта площади кругового кольца:

$$\Delta S = \pi \left(\frac{I_0 \rho_g}{\pi} \right)^2 - \pi \left(\frac{r_0 I_0}{\pi} \left[\frac{\rho_g}{r_{kr}} + \rho_k \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_{kr}} \right) \right] \right)^2. \quad (28)$$

Проведём данные вычисления, а их результаты внесём в табл. 3 и представим в графической форме (рис. 4).

Таблица 3

Зависимость характеристик зоны опасной в отношении блуждающих токов одиночного полусферического анодного заземления от удельного сопротивления грунта ρ_g

ρ_g , Ом·м	r_{kr} , м	r_{gro} , м	r_{BO} , м	Δr , м	ΔS , м ²
10	0,228	3,18	2,11	1,07	18
20	0,272	6,37	3,54	2,83	88
30	0,302	9,55	4,78	4,77	215
40	0,324	12,74	5,93	6,81	399
50	0,343	15,92	7,00	8,92	642
60	0,359	19,11	8,02	11,09	944
70	0,373	22,29	9,00	13,29	1306
80	0,386	25,48	9,94	15,53	1728
90	0,397	28,66	10,86	17,80	2209
100	0,408	31,85	11,75	20,10	2751

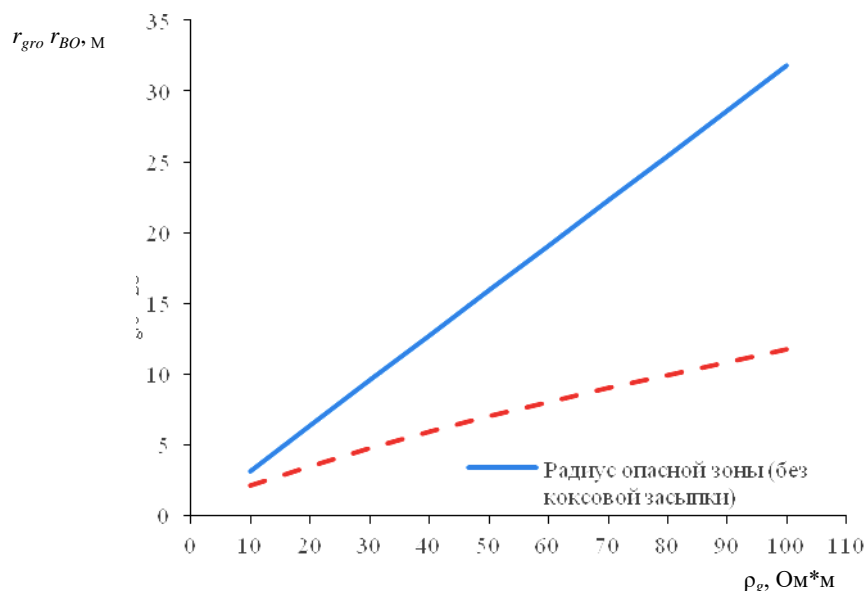


Рис. 4. Зависимость радиуса опасной зоны в случае наличия (r_{BO}) и отсутствия (r_{gro}) коксового наполнителя от удельного сопротивления грунта (ρ_g)

Обсуждение результатов и выводы

В работе на базе модельных представлений для анодного заземления системы катодной защиты в форме одиночной полусферы, которая расположена на поверхности грунта, и наличия коксовой засыпки рассчитано оптимальное, в смысле критерия «годовые приведённые затраты», количество кокса. Одновременно произведён расчет для аналогичного заземления, но без использования коксовой засыпки, что позволило провести их сравнительный анализ и рассчитать сравнительную экономическую эффективность в зависимости от удельного сопротивления грунта. В результате данных расчётов предложено модернизированное анодное заземление с нормированным количеством коксовой засыпки, которое обладает повышенной безопасностью по сравнению с традиционным изделием, так как позволяет снизить риски, обусловленные генерированием положительных постоянных блуждающих токов системой катодной защиты, для других подземных металлических сооружений. Данное качество предлагаемого анодного заземления особенно актуально в городских условиях, а также на территории крупных промышленных объектов, характеризующихся повышенной плотностью подземных металлических сооружений.

В результате проведённых исследований можно сделать следующие **выводы**.

1. Предложена методика расчёта оптимального количества кокса для полусферической модели анодного заземления, гарантирующая снижение приведённых затрат и оценку величины данного снижения при сооружении и последующей эксплуатации анодного заземления системы катодной защиты при различных значениях удельного сопротивления грунта.
2. Предложена методика расчёта снижения зоны, опасной в отношении положительных блуждающих токов для полусферической модели анодного заземления, работающей при оптимальных параметрах в отношении приведённых годовых затрат при различных значениях удельного сопротивления грунта.

Литература

1. Сурис М.А., Липовских В.М. Защита трубопроводов тепловых сетей от наружной коррозии. М.: ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ, 2003. 216 с.
2. Родичев Л.В. Снижение ресурса эксплуатационной безопасности тепловых сетей и методы их защиты. СПб.: Издательство СПбГПУ, 2002. 138 с.
3. Родичев Л.В. Эффективность транспорта тепловой энергии. СПб.: Издательство ООО «Дом Шуан», 2006. 448 с.
4. Мурадов А.В., Исмаилова Г.Г., Хасанов А.А. Некоторые особенности реализации совместной электрической защиты // Нефть, газ и бизнес. 2014. № 4. С. 61–63.
5. Мурадов А.В., Исмаилова Г.Г., Хасанов А.А. Совместная защита двух подземных сооружений // Нефть, газ и бизнес. 2012. № 4. С. 44–46.
6. W. v. Baeckmann, Jakob R. Korrosionsschutz von Gas-und Wasserrohrleitungen. Vulkan-Verlag Essen, 1995, 82 s.
7. Ulrich Bette, Christoph Bornemann. Ergebnisse von Laboruntersuchungen zur Wechselstromkorrosion. 3R International. 2008. № 11. P. 641–645.
8. Ulrich Bette. Ergebnisse des Feldversuchens an einer durch Bahnwechselstrom beeinflussten Rohrleitung. 3R International. 2016. № 6. P. 40–45.
9. Markus Büchler, David Joos. Wechselstromkorrosion an kathodisch geschützten Rohrleitungen. 3R International. 2016. № 6. P. 46–52.
10. Marius Fischer, Arnold Weber. Alternative Schutzstromversorgung in Verteilnetzen. 3R International, 2016, № 6, P. 53–57.
11. Киселев В.Г., Калютик А.А. Влияние покрывного слоя подземных металлических сооружений на коэффициент полезного действия катодной защиты // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2016. № 5–6. С. 27–36.
12. Киселев В.Г., Калютик А.А. Влияние удельного сопротивления грунта в зоне расположения подземного трубопровода на коэффициент полезного действия катодной защиты // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2015. № 11–12. С. 48–55.
13. Киселев В. Г. Основные принципы проектирования катодной защиты подземных металлических сооружений // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. № 4–1 (183). С. 93–99.
14. W. von Baeckmann und W. Schwenk. Handbuch des kathodischen Korrosionsschutzes. Verlag Chemie, 1980. 465 p.
15. Ulrich Bette, Wolfgang Vesper. Taschenbuch für den kathodischen Korrosionsschutz. Vulkan-Verlag Essen, 2005. 367 p.

Авторы публикации

Киселев Владимир Геннадьевич — д-р техн. наук, профессор кафедры «Атомная и тепловая энергетика» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (СПбПУ). E-mail: kis_vg@mail.ru.

Рузич Евгений Николаевич — аспирант кафедры «Атомная и тепловая энергетика» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (СПбПУ). E-mail: rouzith@mail.ru.

Чан Ван Чунг — студент кафедры «Атомная и тепловая энергетика» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (СПбПУ). E-mail: tranvan_trung551987@yahoo.com.

References

1. Suris M.A., Lipovskikh V.M. Zashchita truboprovodov teplovykh setei ot naruzhnoi korrozii. M.: Energoatomizdat, 2003. 216 s.

2. Rodichev L.V. Snizhenie resursa ekspluatatsionnoi bezopasnosti teplovykh setei i metody ikh zashchity. SPb.: Izdatel'stvo SPbGPU, 2002. 138 s.
3. Rodichev L.V. Effektivnost' transporta teplovoi energii. SPb.: Izdatel'stvo OOO «Dom Shuan», 2006. 448 s.
4. Muradov, A.V., Ismailova G.G., Khasanov A.A. Nekotorye osobennosti realizatsii sovmestnoi elektricheskoi zashchity // Neft', gaz i biznes. 2014. № 4. S. 61–63.
5. Muradov A.V., Ismailova G.G., Khasanov A.A. Sovmestnaya zashchita dvukh podzemnykh sooruzhenii // Neft', gaz i biznes. 2012. № 4. S. 44–46.
6. W. v. Baekmann, Jakob R. Korrosionsschutz von Gas-und Wasserrohrleitungen. Vulkan-Verlag Essen, 1995, 82 s.
7. Ulrich Bette, Christoph Bornemann. Ergebnisse von Laboruntersuchungen zur Wechselstromkorrosion. 3R International, 2008. № 11, P. 641–645.
8. Ulrich Bette. Ergebnisse des Feldversuchens an einer durch Bahnwechselstrom beeinflussten Rohrleitung. 3R International, 2016. № 6, P. 40–45.
9. Markus Büchler, David Joos. Wechselstromkorrosion an kathodisch geschützten Rohrleitungen. 3R International, 2016, № 6, P. 46–52.
10. Marius Fischer, Arnold Weber. Alternative Schutzstromversorgung in Verteilnetzen. 3R International, 2016, № 6, P. 53–57.
11. Kiselev V.G., Kalyutik A.A. Vliyanie pokryvnogo sloya podzemnykh metallicheskich sooruzhenii na koeffitsient poleznogo deistviya katodnoi zashchity // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki. 2016. № 5–6. S. 27–36.
12. Kiselev V.G., Kalyutik A.A. Vliyanie udel'nogo soprotivleniya grunta v zone raspolozheniya podzemnogo truboprovoda na koeffitsient poleznogo deistviya katodnoi zashchity // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki. 2015. № 11–12. S. 48–55.
13. Kiselev V. G. Osnovnye printsiipy proektirovaniya katodnoi zashchity podzemnykh metallicheskich sooruzhenii // Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. 2013. № 4–1 (183). S. 93–99.
14. W. von Baekmann und W. Schwenk. Handbuch des kathodischen Korrosionsschutzes. Verlag Chemie, 1980, 465 p.
15. Ulrich Bette, Wolfgang Vesper. Taschenbuch für den kathodischen Korrosionsschutz. Vulkan-Verlag Essen, 2005. 367 p.

Authors of the publication

Kiselev Vladimir Gennad'evich — the doctor of science (Tech.), professor of the department “Nuclear and Heat Power Engineering”, Peter the Great. St. Petersburg Polytechnic University.

Ruzich Evgenij Nikolaevich — PhD student of the department “Nuclear and Heat Engineering”, Peter the Great. St. Petersburg Polytechnic University.

Chan Van Chung – student of the department “Nuclear and Heat Power Engineering”, Peter the Great. St. Petersburg Polytechnic University.

Поступила в редакцию

11 января 2018 года.