

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ КАТОДНО-ПОЛЯРИЗУЕМОГО ТРУБОПРОВОДА С УЧЕТОМ ВНЕШНЕГО И ВНУТРЕННЕГО ИЗОЛЯЦИОННОГО ПОКРЫТИЯ

*В.Н. Кризский<sup>1</sup>, П.Н. Александров<sup>2</sup>, О.В. Косарев<sup>1</sup>, Я.А. Лунтовская<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>2</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Российская Федерация

Формирование математических моделей для корректного расчета параметров систем катодной защиты с целью защиты трубопровода от образования коррозии на металле труб является актуальной задачей. Однако далеко не все модели учитывают необходимые факторы, оказывающие влияние на достоверность рассчитываемых показателей, на основании которых проводится анализ и принятие соответствующих решений о дальнейшей эксплуатации трубопровода. Авторами статьи рассмотрена задача расчета электрических параметров системы катодной защиты подземного трубопровода, находящегося в однородном полупространстве, с учетом переходного сопротивления внешнего и внутреннего покрытия изоляции.

*Ключевые слова:* катодная электрохимическая защита; магистральный трубопровод; математическое моделирование электрического поля; внешнее и внутреннее сопротивление изоляции.

## Введение

Образование коррозии под изоляцией трубопроводов является значимой проблемой для различных областей промышленности, к примеру, таких как нефтяная, газовая и химическая. Восстановление рабочего состояния и устранение последствий аварий требует большого количества временных и материальных ресурсов и, как следствие, приостанавливает рабочий процесс транспорта сырья.

Одной из причин возникновения аварий является несвоевременное обнаружение и недостоверная оценка текущего состояния трубопровода. Для минимизации потерь от разрушений и простоев, связанных с коррозией, разрабатывается комплекс мер по ее обнаружению и предотвращению [1]. В действительности предпринимаемые методы помогают лишь замедлить коррозию, а не избавиться от нее. Стоит отметить, что основным материалом при производстве труб является углеродистая сталь, которая имеет главный недостаток – низкую стойкость к коррозии. Коррозионные процессы усиливаются в ходе накопления влаги на поверхности металла труб. Влияние агрессивных газов в воде, перепадов температур, блуждающих токов также могут стать причинами образования коррозионно-деформированных состояний металла [2].

Объектом исследования в данной статье является подземный магистральный трубопровод. По имеющейся нормативной документации [3–5] защиту металла труб от коррозии обеспечивают с применением комплексной защиты – изоляционными покрытиями и катодной поляризацией. Переходное сопротивление изоляции – показатель, характеризующий состояние изоляционного покрытия, с помощью которого можно определить расход тока катодной защиты, – применяется для оценки качества защиты. В случае уменьшения значения переходного сопротивления, требуется увеличить ток катодных станций и их количество или провести работы по восстановлению изоляционного покрытия на поврежденном участке трубопровода. Зная значения величины переходного сопротивления изоляции, можно оценить влияние на

него внешних факторов, определить состояние изоляционных материалов в процессе эксплуатации без нарушения и вскрытия траншеи.

В исследованиях [6, 7] описываются случаи, где причиной образования коррозии являются повреждения, образующиеся на изоляционном покрытии. На практике параметры катодной защиты и полученные данные в ходе вычислений необходимо адекватно интерпретировать для оценки текущего состояния изоляции на конкретном участке трубопровода. При проведении контроля [8–11] состояния магистрального трубопровода проводят измерения электрических и магнитных полей на поверхности грунта или в воздухе, над трубопроводом. Анализ электрических и магнитных полей позволяет найти сегменты трубы, находящиеся в критическом состоянии. На основании полученных при мониторинге данных [12–14] строят математическую модель [15–18], которая включает в себя все значимые параметры системы «грунт-труба», так как математическое и компьютерное моделирование позволяет получать дополнительные данные о состоянии трубопровода и режимах функционирования систем катодной защиты.

Проблема формирования математических моделей является актуальной. Учет параметров систем катодной защиты и внешних факторов с целью получения адекватной практики модели позволит оценить состояние трубопровода с необходимой точностью [19–23]. При определении основных факторов коррозии металла трубопровода и уровня их влияния выполняется комплексный анализ всех возможных деградиационных процессов [24].

В данной работе поставлена и исследована задача о влиянии переходного сопротивления внешней и внутренней изоляции на параметры катодной защиты и состояние трубопровода. Определение метрических значений взаимосвязи внешнего и внутреннего переходного сопротивлений изоляционного покрытия подземных магистральных трубопроводов ранее в научной литературе не рассматривалось.

## 1. Математическая модель задачи и метод ее решения

Рассмотрим однородное полупространство, разделенное плоской границей на горизонтальные слои  $\Omega_0, \Omega_1$ , где  $\Omega_0$  – воздух,  $\Omega_1$  – слой грунта (рис. 1). Расположим систему декартовых координат  $(x, y, z)$  с началом на поверхности «воздух/грунт» и осью  $O_z$ , направленной вниз.

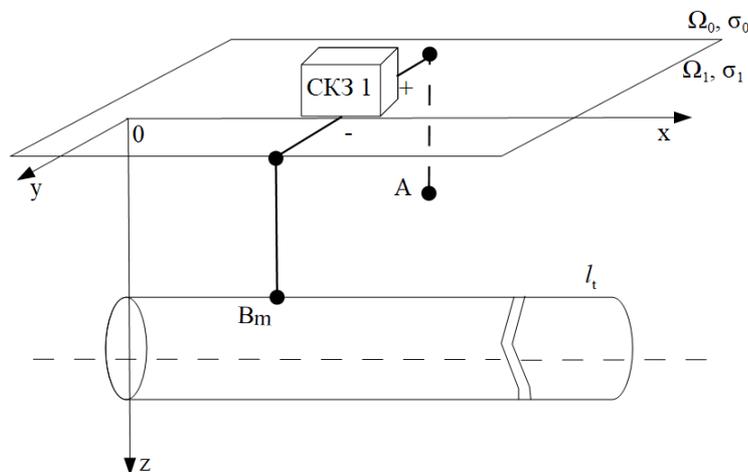


Рис. 1. Схема катодной защиты в однородном полупространстве

Трубопровод  $l_t$  – катодный заземлитель, расположен в слое  $\Omega_1$ . Станция катодной защиты (СКЗ 1) генерирует защитный постоянный электрический ток в грунт через точечный анодный заземлитель в точке  $A$ , через который в систему поступает ток. В точке  $B_m$  осуществляется дренаж электрического тока с поверхности трубопровода к станции катодной защиты.

Математическая модель для потенциала электрического тока имеет вид:

$$\Delta U_g(P) = -\frac{I_A}{\sigma_g} \delta(P - A), \quad (1)$$

$$\Delta U_m(P) = 0; \Delta U_{liq}(P) = 0, \quad (2)$$

$$\left. \frac{\partial U_g(P)}{\partial z} \right|_{(z=0)} = 0; U_g(P) \mapsto 0, P \mapsto \infty, \quad (3)$$

$$\left. \frac{\partial U_m(P)}{\partial x} \right|_{(x=0; L_t)} = 0; \left. \frac{\partial U_{liq}(P)}{\partial x} \right|_{(x=0; L_t)} = 0, \quad (4)$$

$$U_g(P) - C_{gm}(P) \sigma_g \left. \frac{\partial U_g(P)}{\partial n} \right|_{s_{gm}} = U_m(P), \quad (5)$$

$$U_{liq}(P) + C_{mliq}(P) \sigma_{liq} \left. \frac{\partial U_{mliq}(P)}{\partial n} \right|_{s_{mliq}} = U_m(P), \quad (6)$$

$$\left[ \left. \frac{\partial U_m(P)}{\partial x} \right] \right|_{B_m} = \frac{I_A}{\sigma_m S_m}. \quad (7)$$

Здесь:  $A$  – точечный анод,  $B_m$  – точка дренажа,  $P$  – произвольная точка полупространства. Индексы в приведенных уравнениях обозначают следующее:  $g$  – грунт,  $m$  – металл трубы,  $liq$  – жидкость,  $gm$  – «грунт-металл»,  $mliq$  – «металл-жидкость».

Уравнения в представленной математической модели описывают следующие процессы:

(1) – распределение потенциала электрического тока в грунте  $U_g$ , где  $I_A$  – ток, поступающий в систему;

(2) – распределение потенциала электрического тока в металле трубы  $U_m$  и транспортируемой жидкости  $U_{liq}$ ;

(3) – условие непротекания тока на границе «воздух-грунт» и условие регулярности решения на бесконечности;

(4) – условие протекания тока на торцевых границах для металла и транспортируемой жидкости;

(5) – условие протекания тока на границе  $s_{gm}$  – «грунт-металл», где  $c_{gm}(P)$  – переходное сопротивление, отражающее состояние внешнего изоляционного покрытия трубы в точке  $P$ ,  $\sigma_g$  – электрическая проводимость грунта.

(6) – условие протекания тока на границе  $s_{mliq}$  – «металл-жидкость», в котором  $c_{mliq}(P)$  – переходное сопротивление, отражающее состояние внутреннего изоляционного покрытия трубы в точке  $P$ ,  $\sigma_{liq}$  – электрическая проводимость жидкости.

(7) – условие подключения катодной станции к трубопроводу, где  $S_m$  – площадь поперечного сечения металла,  $\sigma_m$  – электрическая проводимость металла.

Отличие представленной математической модели от других в том, что в ней учитывается параметр переходного сопротивления внутреннего изоляционного слоя «металл-жидкость»  $c_{mliq}$ .

Метод решения: метод дискретизации [25]. Разделим трубопровод  $l_t$  на  $M_t$  равных сегментов. Предположим, для каждого сегмента электрические параметры постоянны и равны некоторому среднему значению (рис. 2). Анод является источником тока, каждый сегмент трубы является стоком тока.

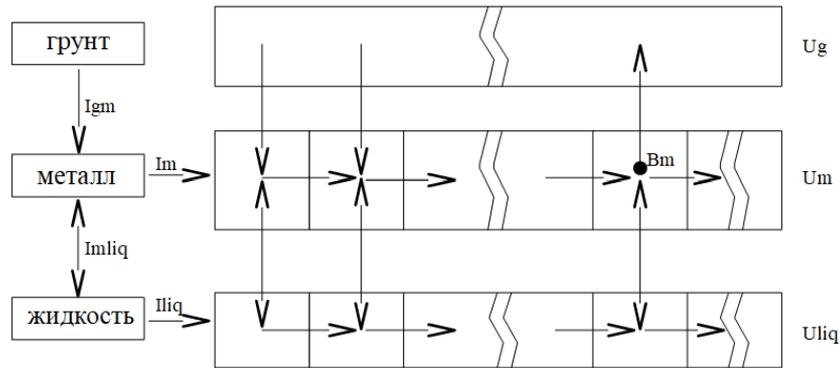


Рис. 2. Сегменты сред с неизвестными величинами

Рассмотрим следующие усредненные значения неизвестных величин для каждого сегмента: потенциал в металле  $U_m$ ; потенциал в грунте  $U_g$ ; потенциал в жидкости  $U_{liq}$ ; величина тока, втекающего из грунта через боковую поверхность трубы  $I_{gm}$ ; продольный ток в металле трубы между соседними фиктивными сегментами  $I_m$ ; ток, текущий по жидкости  $I_{liq}$ ; ток, текущий из металла в жидкость  $I_{mliq}$ .

Дискретная модель строится следующим образом: втекающие и вытекающие токи, по закону Кирхгофа, запишем в виде уравнений (8) и (9). Для токов, которые протекают вдоль трубы, применим дискретный аналог закона Ома между соседними сегментами (10) и (11), где  $R_m$  и  $R_{liq}$  – продольные сопротивления металла/жидкости между соседними сегментами. Дискретный аналог граничных условий третьего рода на границе «грунт-металл» и «металл-жидкость» имеют вид (12), (13). Используя принцип суперпозиции полей, запишем формулу для потенциала электрического тока в любой точке вмещающего трубу однородного полупространства в виде (14), где  $G(P, A/P)$  – функция Грина вмещающего пространства. Полученная дискретная модель имеет следующий вид:

$$I_{gm,j} + I_{m,j-1} - I_{m,j} - I_{mliq,j} - \delta(B_{m,j}, B_m)I_A = 0; j = \overline{1, M_t}, I_{m,0} = 0; I_{m,M_t} = 0, \quad (8)$$

$$I_{mliq,j} + I_{liq,j-1} - I_{liq,j} = 0; j = \overline{1, M_t}, I_{liq,0} = 0; I_{liq,M_t} = 0, \quad (9)$$

$$U_{m,j+1} - U_{m,j} = -R_m I_m; R_m = \frac{L_t}{M_t \sigma_m S_m}, j = \overline{1, M_t-1}, \quad (10)$$

$$U_{liq,j+1} - U_{liq,j} = -R_{liq} I_{liq}; R_{liq} = \frac{L_t}{M_t \sigma_{liq} S_{liq}}, j = \overline{1, M_t-1}, \quad (11)$$

$$U_{g,j} - \frac{c_{gm,j} I_{gm,j}}{S_{gm,j}} = U_m; j = \overline{1, M_t}, \quad (12)$$

$$U_{liq,j} + \frac{c_{mliq,j} I_{mliq,j}}{S_{mliq,j}} = U_m; j = \overline{1, M_t}, \quad (13)$$

$$U_{g,j} = I_A G(P_{g,j}, A) - \sum_{k=1}^{M_t} I_{gm,k} G(P_{g,j}, P_{m,k}), j = \overline{1, M_t}. \quad (14)$$

Дискретная модель (8) – (14) представляет собой систему линейных алгебраических уравнений со следующими неизвестными:  $U_m$ ;  $U_g$ ;  $U_{liq}$ ;  $I_{gm}$ ;  $I_m$ ;  $I_{liq}$ ;  $I_{mliq}$ .

## 2. Результаты вычислений

Алгоритм задачи программно реализован в системе MathCad. Исходные данные для вычислений представлены в таблице.

Таблица

Исходные данные			
Наименование физической величины	Обозначение физической величины	Значение физической величины	Единица измерения
Длина	$L_t$	10000	м
Количество сегментов	$M_t$	601	шт.
Длина сегмента трубы	$l_{st}$	16,64	м
Сила тока анода	$I_A$	1,1	А
Глубина залегания трубопровода (по оси)	$h_t$	1,7	м
Внешний диаметр трубы	$D_t$	0,53	м
Толщина стенки трубы	$h_{tm}$	0,008	м
Удельное электрическое сопротивление металла	$\sigma_{Rm}$	$2,45 \cdot 10^{-7}$	Ом·м
Электрическая проводимость воздуха	$\sigma_0$	0	Ом·м <sup>-1</sup>
Электрическая проводимость металла	$\sigma_m$	$4,082 \cdot 10^6$	Ом·м <sup>-1</sup>
Электрическая проводимость грунта	$\sigma_g$	0,01	Ом·м <sup>-1</sup>
Электрическая проводимость жидкости (соленой воды)	$\sigma_{liq}$	0,04	Ом·м <sup>-1</sup>
Площадь поперечного сечения металла трубы	$S_m$	0,13	м <sup>2</sup>
Площадь поперечного сечения поверхности по которой протекает жидкость	$S_{liq}$	0,207	м <sup>2</sup>
Площадь внешней боковой поверхности участка трубы (грунт)	$S_{gt}$	1,665	м <sup>2</sup>
Площадь внутренней боковой поверхности участка трубы (жидкость)	$S_{mliq}$	1,615	м <sup>2</sup>
Переходное сопротивление изоляции на границе грунт-труба (внешняя)	$c_{gt}$	14685,6	Ом·м <sup>2</sup>
Переходное сопротивление изоляции на границе металл-жидкость	$c_{mliq}$	10000	Ом·м <sup>2</sup>
Координаты точки анодного заземлителя	$A$	(5000; 350; 25)	м
Координаты точки $P_{m1}$ в среде	$P_{m1}, P_{m2}$	(8,319; 0; 1,7)(24,958; 0; 1,7)	м

В ходе вычислений были введены мультипликативные коэффициенты  $k_{gm}$ ,  $k_{mliq}$ , которые отражают степень сходимости переходных сопротивлений на границах «грунт-металл» и «металл-жидкость». Рассмотрены следующие значения коэффициентов  $k_{gm} = k_{mliq} = 0,0001; 0,001; 0,01; 0,1; 0,5; 0,75; 0,9; 1$ . Сегмент № 150, находящийся на расстоянии 2487,52 м от начала координат, был взят в качестве исследуемого. При реализации алгоритма были получены следующие зависимости, представленные на рис. 3 – 7.

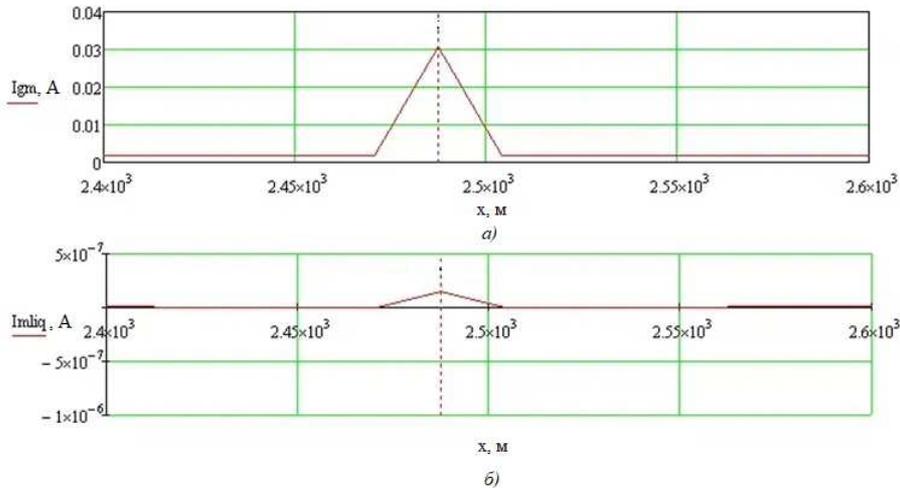


Рис. 3. Ток, текущий через границу: а) «грунт-металл» и б) «металл-жидкость»

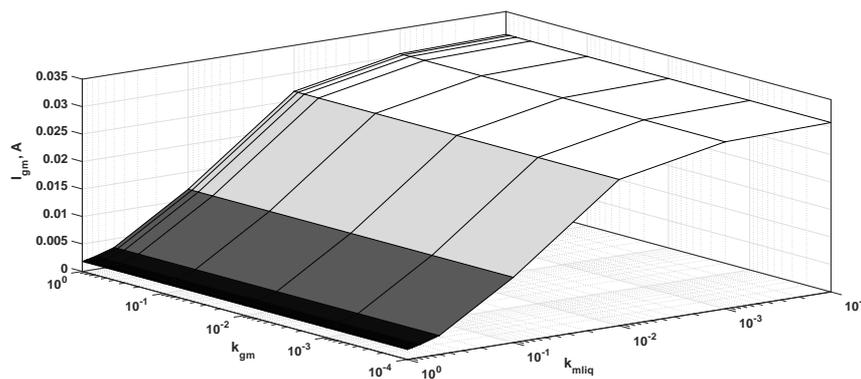


Рис. 4. График зависимости силы тока от коэффициентов  $k_{gm}$  и  $k_{mliq}$  на границе «грунт-металл»

В качестве примера на рис. 3 представлен график тока при значениях мультипликативных коэффициентов, равных  $k_{gm} = k_{mliq} = 0,0001$ , на котором можно отметить пиковый всплеск тока. При истончении и повреждении изоляции на графиках появляются пиковые всплески соотносимые с величиной повреждения изоляции.

Были выявлены следующие зависимости силы тока и защитного потенциала на границах «грунт-металл» и «металл-жидкость» приведенные на рис. 4 – 7. Для визуализации результатов вычисления графики на рис. 4, 5 развернуты относительно

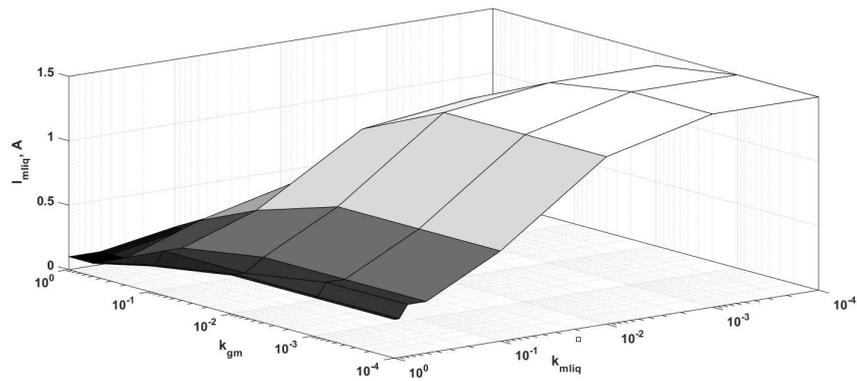


Рис. 5. График зависимости силы тока от коэффициентов  $k_{gm}$  и  $k_{mliq}$  на границе «металл-жидкость»

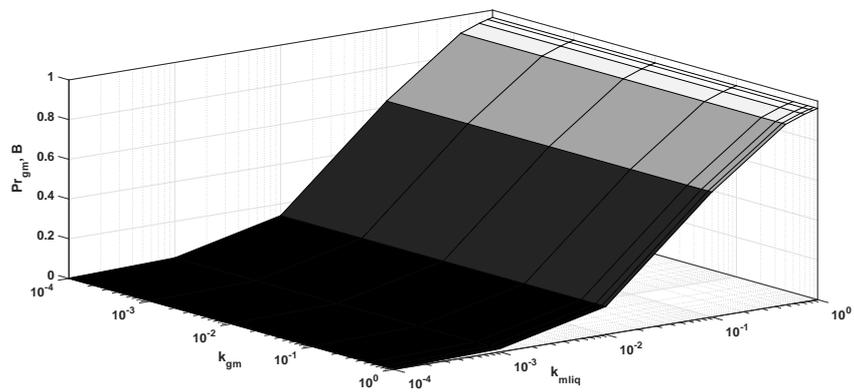


Рис. 6. График зависимости защитного потенциала от коэффициентов  $k_{gm}$  и  $k_{mliq}$  на границе «грунт-металл»

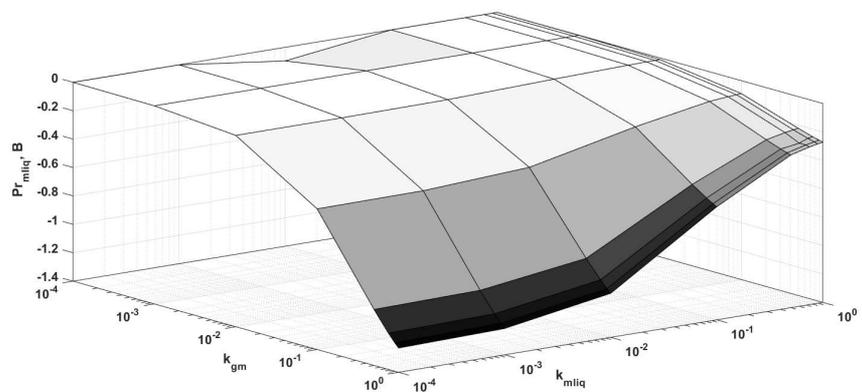


Рис. 7. График зависимости защитного потенциала от коэффициентов  $k_{gm}$  и  $k_{mliq}$  на границе «металл-жидкость»

оси  $x$ , а графики на рис. 6, 7 – относительно оси  $y$ , шкалы по осям  $x$  и  $y$  представлены в логарифмическом формате.

График на рис. 4 демонстрирует влияние переходного сопротивления внутреннего слоя изоляции, которое в меньшей степени влияет на ток, протекающий на границе «грунт-металл», чем переходное сопротивление внешнего слоя изоляции. Влияние состояния переходного сопротивления внутреннего слоя изоляции на ток, протекающий на границе «металл-жидкость», показано на рис. 5. Аналогичные эффекты наблюдаются на рис. 6, 7.

Анализ полученных результатов показывает, что переходное сопротивление внутреннего слоя изоляции оказывает влияние на ток и защитный потенциал системы катодной защиты. Следовательно, при разработке математической модели систем катодной защиты подземных трубопроводов следует учитывать внутреннее переходное сопротивление изоляционного покрытия.

## Выводы

В статье рассмотрена математическая модель распределения поля электрического тока в системе катодной защиты магистрального трубопровода, расположенного в однородном полупространстве, с учетом переходного сопротивления внешнего и внутреннего изоляционного покрытия. Данная задача решена с применением метода дискретизации. Из результатов вычислительного эксперимента следует, что аномалии потенциала и силы тока могут служить индикаторами местоположения поврежденного сегмента, а величины потенциала и силы тока зависят от степени повреждения.

## Литература

1. Идрисов, Р.Х. Анализ аварийности магистральных трубопроводов России / Р.Х. Идрисов, К.Р. Идрисова, Д.С. Кормакова // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2019. – № 2. – С. 44–46.
2. Bolobov, V.I. Use of Magnetic Anisotropy Method for Assessing Residual Stresses in Metal Structures / V.I. Bolobov, G.G. Popov // Key Engineering Materials. – 2020. – № 10. – P. 10–15.
3. Болобов, В.И. Методика испытаний трубопроводных сталей на стойкость к «ручейковой» коррозии / В.И. Болобов, Г.Г. Попов // Записки Горного института. – 2021. – Т. 252. – С. 854–860.
4. Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии: ГОСТ Р 51164-98. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1998.
5. Методика определения остаточного ресурса изоляционных покрытий подземных трубопроводов. Руководящий документ: РД 39Р-00147105-025-02. – М.: Изд-во научно-технической литературы «Монография», 2002.
6. Бахтизин, Р.Н. Оценка влияния внутреннего давления, вызывающего дополнительный изгиб трубопровода / Р.Н. Бахтизин, Р.М. Зарипов, Г.Е. Коробков и др. // Записки Горного института. – 2020. – Т. 242. – С. 160–168.
7. Dzhala, R. Determination of Components of Transient Resistance of Underground Pipeline / R. Dzhala, V. Dzhala, R. Savula и др. // Procedia Structural Integrity. – 2019. – № 16. – P. 218–222.
8. Ayadi, A. A Framework of Monitoring Water Pipeline Techniques Based on Sensors Technologies / A. Ayadi, O. Ghorbel, M.S. BenSalah и др. // Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences. – 2020. – V. 34, № 3. – P. 47–57.
9. Pengyu Zhao. Designing Strategy for Corrosion-Resistant Mg Alloys Based on Film-Free and Film-Covered Models / Pengyu Zhao, Tao

- Ying, Fuyong Cao // Journal of Magnesium and Alloys. – 2021. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213956721002280?via3Dihub> (дата обращения: 08.11.2022 г.)
10. Кремчеев, Э.А. Состояние метрологического обеспечения систем мониторинга на базе беспилотных воздушных судов / Э.А. Кремчеев, А.С. Данилов, Ю.Д. Смирнов // Записки Горного института. – 2019. – Т. 235. – С. 96–105.
  11. Григорьев, Б.С. Математическое моделирование дробления грунта и многофазного течения бурового раствора при бурении скважин / Б.С. Григорьев, А.А. Елисеев, Т.А. Погарска и др. // Записки Горного института. – 2019. – Т. 235. – С. 16–22.
  12. Shpenst, V.A. Devices for Diagnostics of Electric Power Facilities Using Unmanned Aircraft Systems / V.A. Shpenst, O.Yu. Morozova, A.A. Beloshitsky // Journal of Instrument Engineering. – 2021. – V. 64, № 6. – P. 503–508.
  13. Shpenst, V.A. Comparison of Domestic Unmanned Aircraft Systems as Diagnostic Tools for Electric Power Facilities / V.A. Shpenst, O.Yu. Morozova, A.A. Beloshitskiy // Testing. Diagnostics. – 2021. – V. 24, № 2. – P. 58–63.
  14. Morozova, O.Y. Analysis of Typical Electric Power Facilities Requiring Remote Monitoring / O.Y. Morozova // Electrical and Electronic Engineering. – 2020. – P. 1255–1257.
  15. Matos, L.C. Analysis of an Educational Cathodic Protection System with a Single Drainage Point: Modeling and Experimental Validation in Aqueous Medium / L.C. Matos, J.I. Martins // Materials. – 2018. – № 11. – P. 1–10.
  16. Кризский, В.Н. Об адекватности математической модели токораспределения в системе катодной защиты трубопровода / В.Н. Кризский, С.В. Викторов // Материалы IX Международной молодежной научно-практической конференции. – 2019. – С. 229–231.
  17. Mustafin, M.G. Adjustment of Planned Surveying and Geodetic Networks Using Second-Order Nonlinear Programming Methods / M.G. Mustafin, D.A. Bykasov // Computation. – 2021. – № 9. – P. 1–18.
  18. Hameed, K.W. Mathematical Model for Cathodic Protection in a Steel-Saline Water System / K.W. Hameed, A.S. Yaro, A.A. Khadom // Journal of Taibah University for Science. – 2015. – V. 10, № 1. – P. 64–69.
  19. Mansouri, A. Three-Dimensional Modeling of In-Ground Cathodic Protection Systems with Deforming Anodes / A. Mansouri, A.E. Binali, Najeeb Khan и др. // Scientific Reports. – 2021. – № 1. – P. 1–10.
  20. Shafeek, H. Corrosion Monitoring in Pipelines with a Computerized System / H. Shafeek, H.A. Soltan, M.H. Abdel-aziz // Alexandria Engineering Journal. – 2021. – № 6 (60). – P. 5771–5778.
  21. Imanieh, I. Corrosion Protection of Aluminum by Smart Coatings Containing Layered Double Hydroxide (LDH) Nanocontainers / I. Imanieh, A. Afshar // Journal of Materials Research and Technology. – 2019. – № 3. – P. 3004–3023.
  22. Rabbani, M. Electromagnetic Effect of Lightning Return Stroke to Buried Energy Pipelines / M. Rabbani, A.M. Oo // Energy Procedia. – 2019. – № 160. – P. 467–474.
  23. Dvoynikov, M. New Concept of Hydrogen Production and Storage in Arctic Region / M. Dvoynikov, G. Buslaev, A. Kunshin и др. // Resources. – 2021. – № 10. – P. 1–18.
  24. Mazakov, E.B. Traffic Management at the Enterprises of the Mineral Industry / E.B. Mazakov, K.V. Matrokhina, V.Y. Trofimets. – London: CRC Press, 2021.
  25. Кризский, В.Н. Математическое моделирование магнитного поля катодно-поляризуемого трубопровода / В.Н. Кризский, П.Н. Александров, С.В. Викторов // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей. – Т. 1 (46). – Пермь, 2019. – С. 207–212.

Владимир Николаевич Кризский, доктор физико-математических наук, профессор, кафедра информатики и компьютерных технологий, Санкт-Петербургский горный университет (г. Санкт-Петербург, Российская Федерация), krizsky@rambler.ru.

Павел Николаевич Александров, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (г. Москва, Российская Федерация), Alexandr@igemi.troitsk.ru.

Олег Валерьевич Косарев, кандидат технических наук, доцент, кафедра информатики и компьютерных технологий, Санкт-Петербургский горный университет (г. Санкт-Петербург, Российская Федерация), oleg.v.kosarev@yandex.ru.

Яна Алексеевна Лунтовская, аспирант, кафедра информационных систем и вычислительной техники, Санкт-Петербургский горный университет (г. Санкт-Петербург, Российская Федерация), yanaluntovskaya@yandex.ru.

*Поступила в редакцию 9 ноября 2022 г.*

---

MSC 68U20

DOI: 10.14529/mmp230102

## MATHEMATICAL MODELLING OF THE CATHODICALLY POLARIZED PIPELINE ELECTRIC FIELD TAKING INTO ACCOUNT EXTERNAL AND INTERNAL INSULATION COATING

*V.N. Krizskiy<sup>1</sup>, P.N. Alexandrov<sup>2</sup>, O.V. Kosarev<sup>1</sup>, Y.A. Luntovskaya<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russian Federation

<sup>2</sup>Schmidt Institute of the Earth physics of the Russian Sciences Academy, Moscow, Russian Federation

E-mail: krizsky@rambler.ru, Alexandr@igemi.troitsk.ru, oleg.v.kosarev@yandex.ru, yanaluntovskaya@yandex.ru

Formation of mathematical models for correct calculation of cathodic protection system parameters in order to protect pipelines from corrosion formation on pipe metal is an urgent task. However, not all models take into account the necessary factors influencing the reliability of calculated indicators, on the basis of which the analysis and appropriate decisions about further pipeline operation are made. The authors of the article considers a task of calculation of electric parameters of cathodic protection system for underground pipeline, located in a homogeneous half-space taking into account transition resistance of external and internal layers of insulation. To solve this problem the discretization method was used.

*Keywords: cathodic protection; main pipeline; mathematical modeling of electric field; external and internal insulation resistance.*

## References

1. Idrisov R.H., Idrisova K.R., Kormakova D.S. Analysis of Accident Rate of Main Pipelines of Russia. *Transport and Storage of Oil Products and Hydrocarbon Raw Materials*, 2019, no. 2, pp. 44–46.
2. Bolobov V.I., Popov G.G. Use of Magnetic Anisotropy Method for Assessing Residual Stresses in Metal Structures. *Key Engineering Materials*, 2020, no. 10, pp. 10–15.
3. Bolobov V.I., Popov G.G. Methodology of Testing Pipeline Steels for Resistance to Brook Corrosion. *Notes of the Mining Institute*, 2021, vol. 252, no. 6, pp. 854–860. DOI: 10.31897/PMI.2021.6.7

4. *Steel Trunk Pipelines. General Requirements for Corrosion Protection: GOST R 51164-98.* Moscow, IPK Publishing House of Standards, 1998.
5. *Methodology for Determination of Residual Service Life of Insulation Coatings of Underground Pipelines. Guiding document: RD 39R-00147105-025-02.* Moscow, Publishing House of Scientific and Technical Literature "Monograph", 2002.
6. Bakhtizin R.N., Zaripov R.M., Korobkov G.E. et al. Assessment of the Effect of Internal Pressure Causing Additional Bending of the Pipeline. *Notes of the Mining Institute*, 2020, vol. 242, pp. 160–168. DOI: 10.31897/PMI.2020.2.160
7. Dzhala R., Dzhala V., Savula R. et al. Determination of Components of Transient Resistance of Underground Pipeline. *Procedia Structural Integrity*, 2019, no. 16, pp. 218–222.
8. Ayadi A., Ghorbel O., BenSalah M.S. et al. A Framework of Monitoring Water Pipeline Techniques Based on Sensors Technologies. *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences*, 2020, vol. 34, no. 3, pp. 47–57.
9. Pengyu Zhao, Tao Ying, Fuyong Cao. Designing Strategy for Corrosion-Resistant Mg Alloys Based on Film-Free and Film-Covered Models. *Journal of Magnesium and Alloys*. Available at: URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213956721002280?via3Dihub> (accessed on: 08.11.2022)
10. Kremcheev E.A., Danilov A.S., Smirnov Y.D. State of Metrological Support of Monitoring Systems Based on Unmanned Aircraft. *Notes of the Mining Institute*, 2019, vol. 235, pp. 96–105. DOI: 10.31897/pmi.2019.1.96
11. Grigoryev B.S., Eliseev A.A., Pogarskaya T.A. et al. Mathematical Modeling of Soil Crushing and Multiphase Flow of Drilling Mud During Well Drilling. *Notes of the Mining Institute*, 2019, vol. 235, pp. 16–22. DOI: 10.31897/pmi.2019.1.16
12. Shpenst V.A., Morozova O.Yu., Beloshitsky A.A. Devices for Diagnostics of Electric Power Facilities Using Unmanned Aircraft Systems. *Journal of Instrument Engineering*, 2021, vol. 64, no. 6, pp. 503–508.
13. Shpenst V.A., Morozova O.Yu., Beloshitskiy A. A Comparison of Domestic Unmanned Aircraft Systems as Diagnostic Tools for Electric Power Facilities. *Testing. Diagnostics*, 2021, vol. 24, no. 2, pp. 58–63.
14. Morozova O.Y. Analysis of Typical Electric Power Facilities Requiring Remote Monitoring. *Electrical and Electronic Engineering*, 2020, pp. 1255–1257.
15. Matos L.C., Martins J.I. Analysis of an Educational Cathodic Protection System with a Single Drainage Point: Modeling and Experimental Validation in Aqueous Medium. *Materials*, 2018, no. 11, pp. 1–10.
16. Krizsky V.N., Viktorov S.V. On Adequacy of Mathematical Model of Current Distribution in System of Cathodic Protection of Pipeline. *Proceedings of IX International Youth Scientific-Practical Conference*, 2019, pp. 229–231.
17. Mustafin M.G., Bykasov D.A. Adjustment of Planned Surveying and Geodetic Networks Using Second-Order Nonlinear Programming Methods. *Computation*, 2021, no. 9, pp. 1–18.
18. Hameed K.W., Yaro A.S., Khadom A.A. Mathematical Model for Cathodic Protection in a Steel-Saline Water System. *Journal of Taibah University for Science*, 2015, vol. 10, no. 1, pp. 64–69.
19. Mansouri A., Binali A.E., Najeeb Khan et al. Three-Dimensional Modeling of In-Ground Cathodic Protection Systems with Deforming Anodes. *Scientific Reports*, 2021, no. 1, pp. 1–10.
20. Shafeek H., Soltan H.A., Abdel-Aziz M.H. Corrosion Monitoring in Pipelines with a Computerized System. *Alexandria Engineering Journal*, 2021, no. 6 (60), pp. 5771–5778.
21. Imanieh I., Afshar A. Corrosion protection of Aluminum by Smart Coatings Containing Layered Double Hydroxide (LDH) Nanocontainers. *Journal of Materials Research and Technology*, 2019, no. 3, pp. 3004–3023.

22. Rabbani M., Oo A.M. Electromagnetic Effect of Lightning Return Stroke to Buried Energy Pipelines. *Energy Procedia*, 2019, no. 160, pp. 467–474.
23. Dvoynikov M., Buslaev G., Kunshin A. New Concept of Hydrogen Production and Storage in Arctic Region. *Resources*, 2021, no. 10, pp. 1–18.
24. Mazakov E.B., Matrokhina K.V., Trofimets V.Y. *Traffic Management at the Enterprises of the Mineral Industry*. Advances in Raw Material Industries for Sustainable Development Goals, London, CRC Press, 2021.
25. Krizsky V.N., Aleksandrov P.N., Viktorov S.V. Mathematical Modeling of Magnetic Field of Cathode-Polarized Pipeline. *Issues of Theory and Practice of Geological Interpretation of Gravitational, Magnetic and Electric Fields*, 2019, pp. 207–212.

*Received November 9, 2022*