

## ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ КОНТРОЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В СИСТЕМАХ КАТОДНОЙ ЗАЩИТЫ ТРУБОПРОВОДОВ

© А. М. Болотнов<sup>1</sup>, Ф. З. Хисаметдинов<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Башкирский государственный университет  
Россия, Республика Башкортостан, 450076 г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32.

<sup>2</sup>Башкирский государственный университет, Сибайский институт (филиал)  
Россия, Республика Башкортостан, 453838 г. Сибай, ул. Ф. Белова, 21.

\*Email: bolotnovam@mail.ru

Предложен алгоритм численного исследования системы катодной защиты подземного трубопровода. Для моделирования электрического поля применен метод фиктивных источников. Данный подход позволяет осуществлять интерпретацию результатов контрольных измерений защитного потенциала, оценку состояния изоляции трубопровода и эффективности катодной защиты в целом. Разработана программа и проведены вычислительные эксперименты для ряда модельных задач.

**Ключевые слова:** компьютерное моделирование, электрическое поле, катодная защита, интерпретация результатов измерений.

### Введение

Одним из наиболее актуальных направлений в продлении сроков эксплуатации подземных трубопроводов является применение систем катодной защиты (СКЗ). Принцип действия катодной защиты заключается в смещении потенциала металла защищаемого сооружения в отрицательную сторону относительно потенциала окружающей среды. Технически работа СКЗ обеспечивается катодными станциями, размещенными вдоль трубопровода [1].

Основными параметрами защиты являются напряжение и плотность тока в системе «анод-грунт-труба». В процессе эксплуатации трубопровода происходят необратимые изменения свойств изоляции, что оказывает влияние на эффективность СКЗ. В связи с этим информация о текущем состоянии изоляции является необходимым фактором функционирования СКЗ [2].

На практике применяются технологии контрольных замеров электрических параметров СКЗ. Полученные данные нуждаются в адекватной интерпретации для оценки текущего состояния изоляции на конкретном участке трубопровода.

В данной работе для решения указанной проблемы применяются методы компьютерного моделирования.

### Постановка задачи и математическая модель

Рассматривается задача расчета электрического поля, создаваемого точечным анодом и протяженным цилиндрическим катодом (трубопроводом). Система декартовых координат определена следующим образом: ось  $Ox$  совпадает с осью трубопровода защищаемого участка  $0 \leq x \leq L$ ; плоскость  $z = H_t$  совпадает с поверхностью земли; анод с интенсивностью стекающего тока  $I_0$  расположен в точке  $p_0 = p_0(L/2, y_0, z_0)$ ; трубопровод подключен к катодной станции в точке  $x = L/2$ .

Известно, что в этом случае потенциал электрического поля  $u = u(p)$  удовлетворяет уравнению Пуассона [3]

$$\operatorname{div}(\sigma(p)\operatorname{grad} u(p)) = I_0 \cdot \delta(p - p_0), \quad (1)$$

где  $\sigma(p)$  – электропроводность среды,  $\delta(p)$  – дельта-функция.

На границе «грунт-труба» потребуем выполнения условия

$$\left( u - c_t \sigma \frac{\partial u}{\partial n} \right) \Big|_{S_{gt}} = u_t, \quad (2)$$

где  $c_t = c_t(x)$  – сопротивление изоляции ( $\text{Ом} \cdot \text{м}^2$ ),  $u_t$  – потенциал металла трубы. Учитывая, что длина трубы значительно превышает ее диаметр, можно считать потенциал металла постоянным в нормальном сечении, т.е. зависящим только от продольной координаты  $u_t = u_t(x)$ .

На границе  $S_{is}$ , соответствующей поверхности земли ( $z = H_t$ ), левой и правой границам защищаемого участка трубы ( $x = 0, x = L$ ), поставим условие «на изоляторе»

$$\frac{\partial u}{\partial n} \Big|_{S_{is}} = 0. \quad (3)$$

В сечении трубы в точке подключения катодной станции  $x = x_0$  должно выполняться условие

$$\frac{du}{dx} \Big|_{x=x_0-0} - \frac{du}{dx} \Big|_{x=x_0+0} = \frac{I_0}{\sigma_{mt} S_{ms}}, \quad k = 1, \dots, N, \quad (4)$$

где  $I_0$  – ток катодной станции,  $\sigma_{mt}$  – электропроводность металла,  $S_{ms}$  – площадь «металлического сечения» трубы.

### Построение дискретной модели

Для построения алгоритма решения задачи используем метод фиктивных источников [4–6]. Защищаемый участок трубопровода ( $0 \leq x \leq L$ ) разбиваем на  $M$  фрагментов, в каждом из которых все параметры полагаем равными своему среднему значению. Каждый фрагмент ассоциируем с фиктивным источником (сток), расположенным в геометрическом центре фрагмента; подключение катодной станции произведено в центре фрагмента с номером  $i_{ks}$ .

Таким образом, для каждого  $i$ -го фрагмента рассматриваются усредненные значения неизвестных величин:

$U_{tm,i}$  – потенциал металла трубы;

$U_{tg,i}$  – потенциал грунта на границе с трубой;

$I_{tg,i}$  – ток, втекающий в фрагмент трубы через боковую поверхность;

$I_{tx,i}$  – продольный ток в металле трубы между соседними фрагментами.

Для каждого фрагмента запишем 1-й закон Кирхгофа:

$$\begin{aligned} I_{tg,1} - I_{tx,1} &= 0, \\ I_{tg,i} + I_{tx,i-1} - I_{tx,i} &= 0, \quad i = 2, \dots, (M-1), \quad i \neq i_{ks}, \\ I_{tg,i_{ks}} + I_{tx,i_{ks}-1} - I_{tx,i_{ks}} - I_0 &= 0, \\ I_{tg,M} + I_{tx,M-1} &= 0, \end{aligned} \quad (5)$$

где положительное направление тока вдоль трубы совпадает с направлением оси  $Ox$ .

Для токов между соседними фрагментами трубы запишем закон Ома

$$U_{tm,i+1} - U_{tm,i} = -R_m I_{tx,i}, i = 1, \dots, M - 1, \quad (6)$$

где  $\rho_t$  – удельное сопротивление металла,  $R_m = \rho_t l_t / S_{ms}$  – продольное сопротивление фрагмента трубы длины  $l_t$ .

Зависимость потенциалов в грунте на границе с трубой, и токов от фиктивных источников (стоков), определяется соотношением [7]:

$$4\pi\sigma U_{tg,i} = \frac{I_0}{R(p_{t,i}; p_0)} - \sum_{j \neq i}^M \frac{I_{tg,j}}{R(p_{t,i}; p_{t,j})} - I_{tg,i} \frac{2}{l_t} \ln \frac{\sqrt{r_t^2 + l_t^2} + l_t}{r_t}, i = 1, \dots, M, \quad (7)$$

где  $r_t$  – внешний радиус трубы,  $p_{t,i}$  – координата  $i$ -го источника,  $R(p, q)$  – расстояние между точками  $p, q$ .

Соотношения (7) обусловлены принципом электростатической аналогии [7], при этом последнее слагаемое необходимо для учета потенциала цилиндрического электрода.

Для фрагментов границы «грунт-труба» справедливости соотношения, являющиеся дискретными аналогами (2)

$$U_{tg,i} - c_{t,i} \frac{I_{tg,i}}{S_t} = U_{tm,i}, i = 1, \dots, M, \quad (8)$$

где  $c_{t,i}$  – сопротивления изоляции  $i$ -го фрагмента трубы с площадью  $S_t$ .

Система (5)–(8) представляет собой дискретную модель, из которой однозначно определяется защитный потенциал

$$U_{pr,i} = U_{tg,i} - U_{tm,i}, i = 1, \dots, M, \quad (9)$$

при заданных значениях входных параметров [4–6].

При плановом обслуживании трубопроводов проводятся контрольные замеры потенциалов металла трубы и грунта. При этом возникает проблема оценки остаточного сопротивления изоляции трубопровода для выбора оптимальных режимов эксплуатации СКЗ.

В этом случае, в терминах сформулированной модели, защитный потенциал  $U_{pr,i}$  превращается в заданную величину, а сопротивление изоляции  $c_{t,i}$  становится неизвестным. Однако, в такой постановке граничные условия (8) превращаются в нелинейные из-за слагаемого  $c_{t,i} \frac{I_{tg,i}}{S_t}$ .

Чтобы в этом случае перейти к линейной задаче, введем обозначение для удельной поверхностной проводимости изоляции:  $\sigma_{gt,i} = 1/c_{t,i}$ . Тогда из (8), (9) следует:

$$U_{pr,i} \times \sigma_{gt,i} - \frac{I_{tg,i}}{S_t} = 0, i = 1, \dots, M. \quad (10)$$

Система (5)–(10) состоит из  $5M$  линейных уравнений с  $5M$  неизвестными; здесь защитный потенциал является заданной величиной, полученной в результате измерений, а поверхностная проводимость изоляции – неизвестной.

### Вычислительные эксперименты

При анализе результатов контрольных измерений на различных участках трубопроводов наблюдается локальный минимум защитного потенциала в точке замера, ближайшей к аноду. В рассмотренной модели указанная «аномалия» не учитывается. Авторами данной работы было исследовано несколько возможных причин, объясняющих причины падения защитного потенциала в окрестности анодной станции. Внесенные в математическую модель дополнения позволяют получить численные результаты, согласующиеся с данными натурных измерений, в том числе и в диапазоне локального минимума потенциала.

Предложенные алгоритмы программно реализованы на языке C++ в свободной среде разработки Code::Blocks. Проведено исследование модельной задачи, состоящее из четырех этапов.

1. На основе модели (5)–(8) проведен расчет потенциала при сопротивлении изоляции трубы  $c_t = 5000$  Ом·м<sup>2</sup>. Значения остальных параметров приведены в табл.

Параметр	Значение
Длина защищаемого участка трубы, м	1500
Координата точки $x$ подключения СКЗ к трубе, м	750
Расстояние от анода до трубы, м	200
Глубина до центра анода, м	2.5
Ток катодной станции $I_0$ , А	0.5
Внешний диаметр трубы, м	0.557
Толщина стенки трубы, мм	8
Глубина залегания трубы, м	1.5
Удельное сопротивление грунта, Ом·м	100
Удельное сопротивление стали, Ом·м	2.45e-7

2. На основе модели (5)–(10) проведены расчеты, в которых полученные на первом этапе значения потенциала использовались в качестве исходных данных, а сопротивление изоляции входило в число неизвестных. Целью этапа являлось сравнение полученных значений сопротивления изоляции со значениями, принятыми на первом этапе в качестве исходных данных.

3. Проведены расчеты, аналогичные этапу 1, для трубопровода с локальным повреждением изоляции так, что среднее по фрагменту сопротивление равнялось  $c_t^* = 500$  Ом·м<sup>2</sup>.

4. Выполнены расчеты, аналогичные этапу 2, где в качестве входных данных использовались результаты этапа 3. Проведено сравнение вычисленных значений сопротивления изоляции трубы со значениями, принятыми на третьем этапе в качестве исходных данных.

Распределения основных расчетных величин приведены на рис. Результаты показывают, что защитный

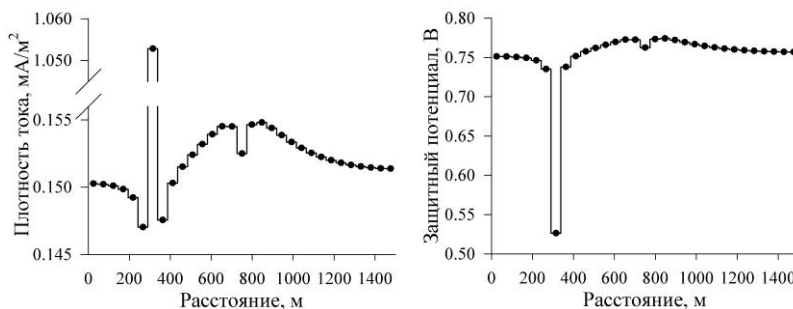


Рис. Плотность тока и защитного потенциала вдоль трубопровода.

потенциал в окрестности повреждения изоляции уменьшается, для плотности тока характерно значительное увеличение, при этом меняется и общая картина электрического поля. Полученные на 4 этапе результаты, отражающие состояние изоляции трубы, совпадают с исходными данными 3 этапа.

### Заключение

Построена математическая модель электрического поля катодной защиты трубопроводов, позволяющая, в частности, определять остаточное сопротивление изоляции по заданным значениям защитного потенциала. Разработана программа на языке C++ для компилятора GNU GCC в интегрированной среде разработки Code::Blocks и проведены вычислительные эксперименты. Анализ численных результатов позволяет сделать выводы о возможности применения данного подхода для решения задач, связанных с интерпретацией данных контрольных измерений для СКЗ подземных трубопроводов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Глазов Н. П. Подземная коррозия трубопроводов, ее прогнозирование и диагностика. М.: Газпром, 1994. 92 с.
2. Ткаченко В. Н. Анализ поля токов катодной защиты трубопроводной сети // Защита металлов. 2006. Т.42. №5. С. 132–135.
3. Ильин В. П. Численные методы решения задач электрофизики. М.: Наука, 1985. 336 с.
4. Болотнов А. М., Глазов Н. П., Киселев В. Д., Хисаметдинов Ф. З. Математическое моделирование и численное исследование электрических полей в системах с протяженными электродами // Вестник Башкирского университета. 2006. №2. С. 17–21.
5. Болотнов А. М., Глазов Н. Н., Глазов Н. П., Шамшетдинов К. Л., Киселев В. Д. Математическая модель и алгоритм расчета электрического поля катодной защиты трубопровода протяженными анодами // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2008. Т. 44, №4. С. 438–441.
6. Болотнов А. М., Гарифуллина С. Р., Глазов Н. Н., Глазов Н. П., Башаев М. А. Компьютерное моделирование электрических полей в системах катодной защиты трубопроводов // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2009. №5. С. 27–32.
7. Шимони К. Теоретическая электротехника. М.: Мир, 1964. 773 с.
8. Болотнов А. М., Махмутов М. М., Хисаметдинов Ф. З. Математическое моделирование тепловых и электрических полей в цилиндрических областях // Вестник Башкирского университета. 2005. Т.10, №3. С. 18–22.
9. Болотнов А. М., Закиева Г. Н. Применение интервальных вычислений при компьютерном моделировании электрических полей в электролитах // Вестник Башкирского университета. 2014. Т.19, №3. С. 799–803.
10. Махмутов М. М., Хисаметдинов Ф. З., Мансуров Я. Я. Совместное математическое моделирование физических полей в электролитах // Мат. моделирование и краевые задачи: Тр. Второй Всерос. научн. конф. Самара: СамГУ. 2005. С. 173–176.
11. Махмутов М. М., Хисаметдинов Ф. З., Мансуров Я. Я. Расчет параметров электрического поля на поверхности цилиндрического электрода в неоднородной среде // Сб. тр. регион. науч.-техн. конф. Магнитогорск: МаГТУ, 2004. С. 182–185.
12. Болотнов А. М., Хисаметдинов Ф. З. Компьютерное моделирование электрических полей катодной защиты подземных трубопроводов // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. 2015. Т.3. №1. С. 2–8.
13. Болотнов А. М. Хисаметдинов Ф. З. Валеев А. А. Исследование состояния изоляции трубопровода по данным натуральных измерений параметров электрического поля катодной защиты // Опыт реализации Федерального государственного образовательного стандарта в образовательных учреждениях: Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции – Сибай: РИЦ БашГУ, 2015. С. 45–52.

Поступила в редакцию 20.06.2015 г.

## APPLICATION OF COMPUTER MODELING FOR INTERPRETATION OF CONTROL MEASUREMENTS DATA IN PIPELINES CATHODIC PROTECTION SYSTEMS

© A. M. Bolotnov<sup>1</sup>, F. Z. Khisametdinov<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Bashkir State University  
32 Zaki Validi St., 450076 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia.

<sup>2</sup>Bashkir State University, Sibay branch  
21 Belov St., 453838 Sibay, Republic of Bashkortostan, Russia.

Phone: +7 (347) 273 66 35.

\*Email: bolotnovam@mail.ru

One of the most relevant directions of underground pipelines operation terms extension is the use of cathodic protection systems (CPS). The principle of cathodic protection functioning is in the shift of the protected construction metal potential to a negative side concerning the potential of its environment. Technically the functioning of CPS is ensured by the cathodic stations placed along the pipeline. The key parameters of protection are tension and density of current in “anode-soil-pipe” system. In the process of use of the pipeline the irreversible changes of isolation properties, having the impact on the CPS efficiency, occur. In this regard, the information on the current state of isolation is a necessary factor of functioning of CPS. In practice the electric parameters control measurements technology is used. The data obtained need an adequate interpretation for the estimation of the pipeline isolation current state on the concrete section. In this work, the methods of computer modeling are used for the solution of the problem described. In the analysis of control measurements results the local minimum of protective potential in the measurement point, closest to the anode, is observed on various pipeline sections. The authors of this work studied several possible reasons explaining the protective potential decrease near anode station. The additions made to the mathematical model make possible to receive the numerical results coordinated with natural measurements data, including the potential local minimum range. The analysis of numerical results allows us to conclude the possibility of the approach application for the solution of the tasks connected with interpretation of control measurements data for the underground pipelines CPS.

**Keywords:** *computer modeling, electric field, cathodic protection, interpretation of results of measurements.*

Published in Russian. Do not hesitate to contact us at [bulletin\\_bsu@mail.ru](mailto:bulletin_bsu@mail.ru) if you need translation of the article.

### REFERENCES

1. Glazov N. P. Podzemnaya korrozija truboprovodov, ee prognozirovanie i diagnostika [Underground corrosion of pipelines, its prognosis and diagnostics]. Moscow: Gazprom, 1994.
2. Tkachenko V. N. Zashchita metallov. 2006. Vol. 42. No. 5. Pp. 132–135.
3. Il'in V. P. Chislennyye metody resheniya zadach elektrofiziki [Numerical methods of solution of electrophysics problems]. Moscow: Nauka, 1985.
4. Bolotnov A. M., Glazov N. P., Kiselev V. D., Khisametdinov F. Z. Vestnik Bashkirskogo universiteta. 2006. No. 2. Pp. 17–21.
5. Bolotnov A. M., Glazov N. N., Glazov N. P., Shamshetdinov K. L., Kiselev V. D. Fizikokhimiya poverkhnosti i zashchita materialov. 2008. Vol. 44, No. 4. Pp. 438–441.
6. Bolotnov A. M., Garifullina S. R., Glazov N. N., Glazov N. P., Bashaev M. A. Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologii. 2009. No. 5. Pp. 27–32.
7. Shimoni K. Teoreticheskaya elektrotehnika [Theoretical electrical engineering]. Moscow: Mir, 1964.
8. Bolotnov A. M., Makhmutov M. M., Khisametdinov F. Z. Vestnik Bashkirskogo universiteta. 2005. Vol. 10, No. 3. Pp. 18–22.
9. Bolotnov A. M., Zakieva G. N. Vestnik Bashkirskogo universiteta. 2014. Vol. 19, No. 3. Pp. 799–803.
10. Makhmutov M. M., Khisametdinov F. Z., Mansurov Ya. Ya. Mat. modelirovanie i kraevye zadachi: Tr. Vtoroi Vseros. nauchn. konf. Samara: SamGTU. 2005. Pp. 173–176.
11. Makhmutov M. M., Khisametdinov F. Z., Mansurov Ya. Ya. Sb. tr. region. nauch.-tekhn. konf. Magnitogorsk: MaGTU, 2004. Pp. 182–185.
12. Bolotnov A. M., Khisametdinov F. Z. Matematicheskoe i programmnoe obespechenie sistem v promyshlennoi i sotsial'noi sferakh. 2015. Vol. 3. No. 1. Pp. 2–8.
13. Bolotnov A. M., Khisametdinov F. Z., Valeev A. A. Opyt realizatsii Federal'nogo gosudarstvennogo obrazovatel'nogo standarta v obrazovatel'nykh uchrezhdeniyakh: Materialy IV Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii – Sibai: RITs BashGU, 2015. Pp. 45–52.

*Received 20.06.2015.*