

## Алгоритм расчета сопротивления изоляции подземного трубопровода на основе данных измерений защитного потенциала в системах катодной защиты

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

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

<sup>2</sup> Башкирский государственный университет, Сибайский институт (филиал)  
Россия, г. Сибай, 453833, улица Белова, 21.

\*Email: [khisametdinovfz@mail.ru](mailto:khisametdinovfz@mail.ru)

Предлагается алгоритм для численного исследования состояния изоляции подземного трубопровода с использованием результатов измерений разности электрических потенциалов грунта и защищаемого объекта в системах катодной защиты. Для моделирования электрического поля применен метод фиктивных источников. Разработана программа и проведены вычислительные эксперименты на основе реальных данных.

**Ключевые слова:** компьютерное моделирование, электрическое поле, трубопровод, катодная защита, глубинный анод.

**Введение.** Эффективным методом борьбы с коррозией подземных магистральных трубопроводов является катодная защита (КЗ). На практике КЗ обеспечивается системой катодных станций, расположенных на некотором расстоянии друг от друга. Параметры КЗ на конкретном участке трубы в той или иной степени зависят от режимов работы каждой из катодных станций, однако наиболее существенное влияние оказывает ближайшая катодная станция. Поэтому, в качестве приближенной модели для исследования параметров КЗ, можно рассматривать участок трубопровода, защищаемый одной катодной станцией, считая, что нет электрического взаимодействия через границы участка (Рис. 1).

Принцип КЗ основан на смещении электрического потенциала металла защищаемого сооружения в отрицательном (катодном) направлении относительно потенциала свободной коррозии ( $U_e$ ). Сумму потенциала  $U_e$  и катодного смещения потенциала защищаемого объекта называют защитным потенциалом [1]. В работе статье принято  $U_e = const$ , а все расчеты проводятся для потенциала  $U_{pr}$ , равного абсолютному значению катодного смещения потенциала объекта.

При проектировании и эксплуатации КЗ важнейшей задачей является выбор таких параметров, при которых потенциал будет принадлежать заданному интервалу [2]. В процессе эксплуатации трубопровода характеристики изоляции трубы подвержены изменению. В результате происходит изменение общей электрохимической картины,

что сказывается на эффективности КЗ. В связи с этим на практике применяют технологию контрольных замеров потенциала. Результаты измерений, при правильной интерпретации, позволяют получить информацию о состоянии изоляции трубы на конкретном участке [3–5].

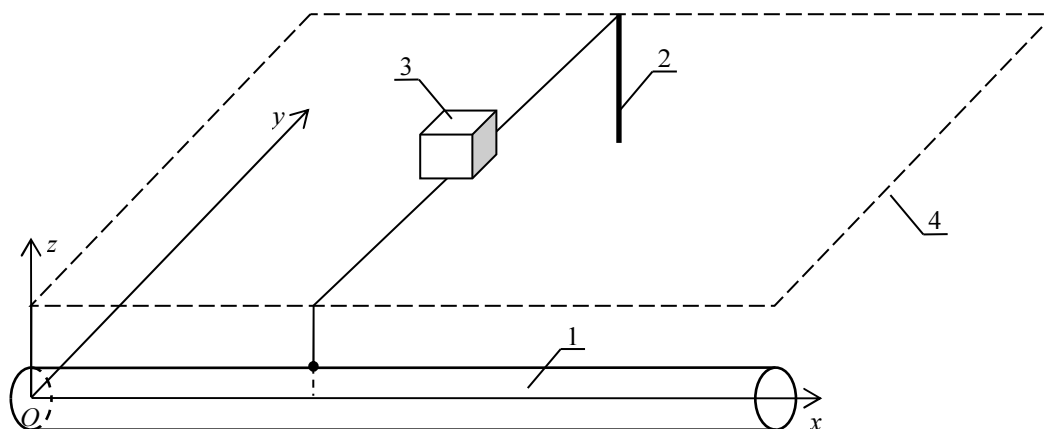


Рис. 1. Схема катодной защиты (1-трубопровод, 2- заглубленный анод, 3-катодная станция, 4- поверхность земли).

При анализе результатов измерений наблюдается локальный минимум потенциала в точке замера, ближайшей к аноду. Наличие указанного эффекта не зависит от срока эксплуатации трубопровода. Причиной этого может являться снижение потенциала грунта вблизи границы "грунт-труба". Это возможно, если на участке присутствует дополнительный катод, роль которого могут играть защитные заземления катодной станции и других объектов.

В данной работе рассматривается подход к компьютерному моделированию параметров катодной защиты трубопровода, позволяющий исследовать состояние изоляции трубопровода на основе данных контрольных измерений потенциала.

**Постановка задачи и построение математической модели.** Рассматривается задача расчета параметров электрического поля, создаваемого точечным анодом и протяженным цилиндрическим катодом (трубой). Система декартовых координат определена следующим образом: ось  $Ox$  совмещена с осью трубопровода  $0 \leq x \leq L$ ; плоскость  $z = H_t$  совпадает с поверхностью земли; анод с интенсивностью тока  $I_0$  расположен в точке  $p_0 = (x_0, y_0, z_0)$ ; трубопровод подключен к катодной станции в точке  $x = x_0$ . Для учета эффекта дополнительного катода введем точечный сток интенсивности  $I_s$ , расположенный в точке  $p_s = (x_s, y_s, z_s)$ .

Известно, что потенциал электрического поля  $u = u(p)$  в этом случае удовлетворяет уравнению Пуассона [6]:

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

где  $\sigma(p)$  – удельная электропроводность среды, См/м;  $\delta(p)$  – дельта-функция Дирака.

Потенциал на границе "грунт-трубопровод" удовлетворяет условию

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

где  $c = c(x)$  – сопротивление изоляционного покрытия (Ом·м<sup>2</sup>),  $u_t$  – потенциал металла трубы. Учитывая, что длина трубы значительно превышает ее диаметр, считаем потенциал металла постоянным в нормальном сечении и 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 в грунте ( $x = 0$ ,  $x = L$ ), ставим граничное условие 2 рода

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

В точке подключения катодной станции к трубопроводу  $x = x_0$  потребуем выполнения условия

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

где  $\sigma_{mt}$  – электропроводность металла трубы,  $S_{ms}$  – площадь металла в нормальном сечении трубы.

**Построение дискретной модели.** Алгоритм решения задачи основан на методе фиктивных источников [7.8]. Для этого интервал  $0 \leq x \leq L$  условно разбивается на  $M$  равных фрагментов, в каждом из которых электрохимические параметры предполагаются постоянными. С геометрическим центром каждого фрагмента ассоциирован фиктивный источник (ФИ) или сток. Точечный анод рассматривается как один источник с координатой  $p_0 = (x_0, y_0, z_0)$  и стекающим с него током  $I_0$ . Для учета утечки введем точечный сток с координатой  $p_s = (x_s, y_s, z_s)$  и интенсивностью  $I_s$ . Подключение катодной станции к трубе произведено в центре фрагмента с номером  $i_{ks}$ , равным целой части выражения  $(x_0/l_t + 1)$ .

Таким образом, для каждого  $i$ -го фрагмента ( $i = 1, \dots, M$ ) рассматриваются средние значения неизвестных величин:

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

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

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

$I_{tx,i}$  – продольный ток в металле трубы между соседними ФИ;

$U_{pr,i}$  – защитный потенциал.

С использованием введенных обозначений запишем 1 закон Кирхгофа для каждого фрагмента:

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

Для тока, текущего вдоль трубы, из закона Ома следует:

$$U_{tm,i+1} - U_{tm,i} = -R_{tm}I_{tx,i}, (6)$$

где  $R = \rho_t \frac{l_t}{S_{ms}}$  – продольное сопротивление металла трубы между соседними ФИ,  $\rho_t$  – удельное сопротивление трубной стали,  $l_t$  – длина фрагмента трубы.

Зависимость потенциала в грунте на границе с трубой, и токов от фиктивных источников (стоков), можно выразить на основе соотношения, обусловленного принципами электростатической аналогии [6]:

$$\begin{aligned}
 4\pi\sigma U_{tg,i} &= \frac{I_0}{R(p_{t,i},p_0)} - \frac{I_s}{R(p_{t,i},p_s)} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^M \frac{I_{tg,j}}{R(p_{t,i},p_{t,j})} - \\
 &- \frac{I_{tg,i}}{L^2} \left( L \ln \frac{\sqrt{L^2 + R_t^2} + L}{\sqrt{L^2 + R_t^2} - L} - 2\sqrt{L^2 + R_t^2} + 2R_t \right), i \neq i_{ks}, \\
 4\pi\sigma U_{tg,i} &= \frac{2I_0}{L} \ln \frac{\sqrt{\frac{L^2}{4} + h_a^2} + \frac{L}{2}}{h_a} - \frac{2I_s}{L} \ln \frac{\sqrt{\frac{L^2}{4} + h_s^2} + \frac{L}{2}}{h_s} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^M \frac{I_{tg,j}}{R(p_{t,i},p_{t,j})} - \\
 &- \frac{I_{tg,i}}{L^2} \left( L \ln \frac{\sqrt{L^2 + R_t^2} + L}{\sqrt{L^2 + R_t^2} - L} - 2\sqrt{L^2 + R_t^2} + 2R_t \right), i = i_{ks}, (7)
 \end{aligned}$$

где  $r_t$  – внешний радиус трубы,  $p_{t,i}$  – координата  $i$ -го ФИ,  $R(p,q)$  – расстояние между точками  $p$  и  $q$ . При расчетах в (7) применим принцип зеркальных отражений [6] и учтем дополнительные источники и стоки.

Граничные условия для  $i$ -го фрагмента трубопровода, являющиеся аналогами (2), имеют вид:

$$U_{tg,i} - C_i \frac{I_{tg,i}}{S_t} = U_{tm,i}, (8)$$

где  $C_i$  – сопротивление изоляционного покрытия,  $S_t$  – площадь боковой поверхности фрагмента.

Из определения защитного потенциала следует:

$$U_{pr,i} = U_{tg,i} - U_{tm,i}, (9)$$

Рассмотрим ситуацию, когда для каждого фиктивного источника значения потенциала  $U_{pr,i}$  заданы (получены в результате контрольных замеров), а сопротивления изоляционного покрытия  $C_i$  – неизвестны. В такой постановке система (5)–(9) становится нелинейной из-за слагаемого  $C_i \frac{I_{tg,i}}{S_t}$  в (8). Вводя обозначение для удельной «поверхностной проводимости» изоляции трубы

$$\sigma_{gt,i} = \frac{1}{C_i}, \quad (10)$$

из (8) получим

$$U_{pr,i} \times \sigma_{gt,i} - \frac{I_{tg,i}}{S_t} = 0. \quad (11)$$

Полученная система (5)–(7), (9), (11) состоит из  $5M-1$  линейных уравнений с  $5M-1$  неизвестными, в число которых входит поверхностная проводимость (10). Решая данную систему, становится возможным найти сопротивление изоляции  $C_i$  для каждого фрагмента трубы.

**Вычислительные эксперименты.** На основе предложенной модели были разработаны программы [7] на языке C++ и проведены численные эксперименты на основе результатов контрольных измерений в системах катодной защиты реального трубопровода (Табл.).

Таблица. Основные параметры задачи

Параметр	Значение
Расстояние от анода до трубы, м	200
Глубина до центра анода, м	2.5
Внешний диаметр трубы, м	0.557
Толщина стенки трубы, мм	8
Глубина залегания трубы, м	1.5
Удельное сопротивление грунта $\rho_{zp}$ , Ом·м	70, 100, 200
Удельное сопротивление стали, Ом·м	2.45e-7
Расстояние от заземлителя катодной станции до трубы, м	2, 10, 100
Ток утечки через заземлители, в % от тока защиты	1, 5, 20
Глубина до центра заземлителя КС, м	2.5
Длина защищаемого участка трубы, м	16000
Координата точки $x$ подключения СКЗ к трубе, м	7500
Ток защиты $I_0$ , А	7.76
Количество точек замера потенциала	17

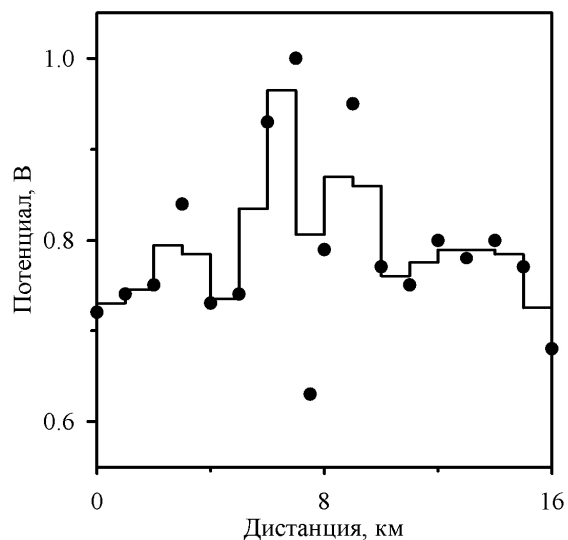


Рис. 2. Защитный потенциал (точки – полученный в результате замеров, линия – усредненный по фрагментам трубы).

Для проведения расчетов результаты точечных замеров предварительно были усреднены по фрагментам трубы (Рис. 2).

При проведении расчетов для реального трубопровода отдельные входные параметры могут быть заданы только приблизительно. В связи с этим, были проведены эксперименты для исследования чувствительности модели к изменению этих параметров (Рис. 3–5).

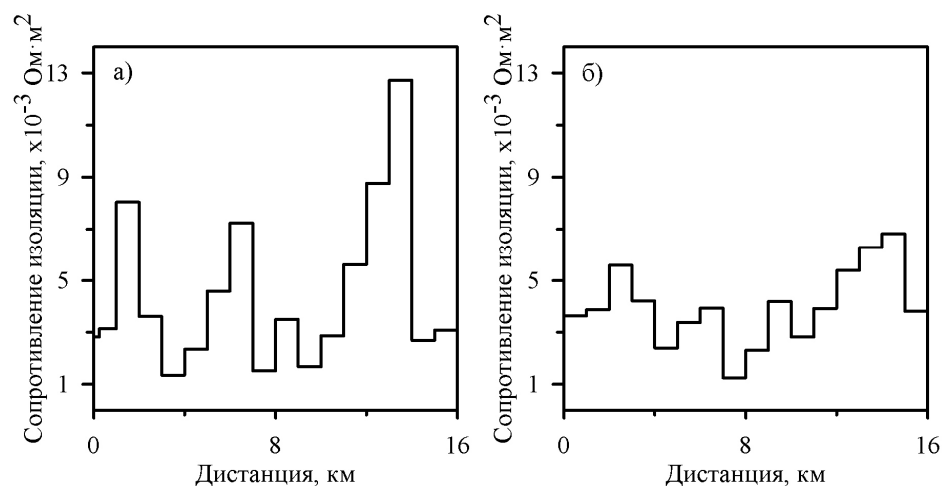


Рис. 3. Распределение сопротивления изоляции трубы: а) при  $\rho_{гр}=70 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ; б) при  $\rho_{гр}=200 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ .

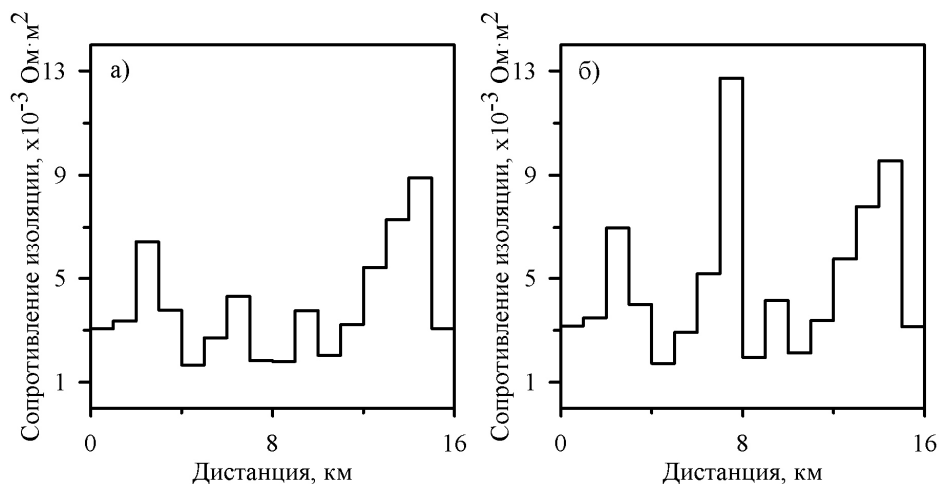


Рис. 4. Распределение сопротивления изоляции трубы: а) при утечке 1%; б) при утечке 20%.

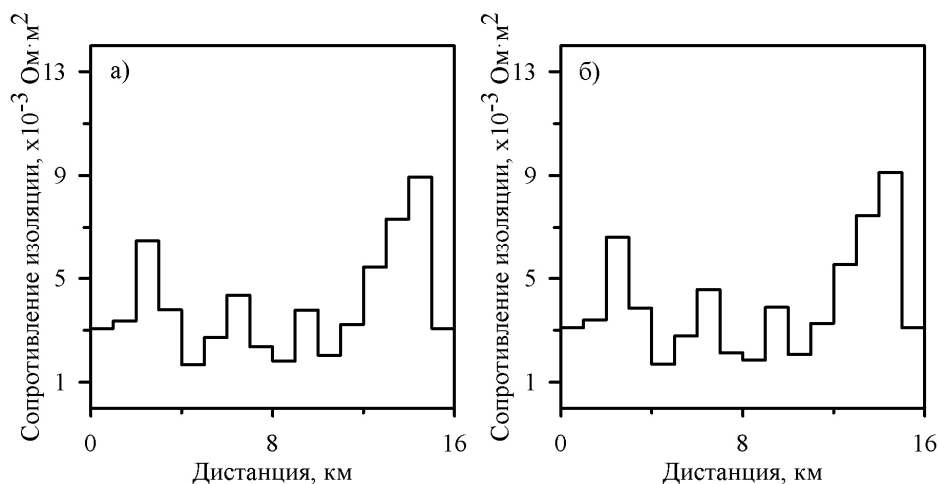


Рис. 5. Распределение сопротивления изоляции трубы; расстояние от трубы до утечки а) 2 м; б) 100 м.

Как видно из результатов эксперимента, изменение удельного сопротивления грунта, интенсивности утечки и ее расстояния от трубы оказывает наибольшее влияние на полученное сопротивление изоляции для фрагмента трубы, ближайшего к аноду. Общая качественная картина распределения сопротивления изоляции существенно не меняется.

**Заключение и выводы.** На основе метода фиктивных источников построена модель, позволяющая исследовать параметры КЗ подземного трубопровода на основе результатов контрольных измерений. Разработана программа на языке C++ и проведены вычислительные эксперименты на основе результатов измерений защитного потенциала для отдельных участков реального трубопровода.

Полученные результаты согласуются с имеющимися экспериментальными данными и подтверждают устойчивость модели относительно изменения входных параметров. Данный подход может быть применен для решения практических задач, связанных с интерпретацией данных контрольных измерений в системах катодной защиты подземных трубопроводов.

### Литература

1. Улиг Г. Г., Ревя Р. У. Коррозия и борьба с ней. Введение в коррозионную науку и технику: Пер. с англ. Л.: Химия, 1989. 445 с.
2. Глазов Н. П. Подземная коррозия трубопроводов, ее прогнозирование и диагностика. М.: Газпром, 1994. 92 с.
3. Мальцев Ю. Н., Лапин А. Е., Романов И. Г. и др. Прогнозирование коррозионных повреждений магистрального газопровода // Известия Самарского научного центра Российской академии наук.-2009. Т.11, №5(2). С. 301–304
4. Абакачева Е. М., Сафронов Е. Ф., Киреев К. А. и др. Исследование защитных антикоррозийных покрытий магистральных трубопроводов бесконтактным методом // Башкирский химический журнал. -2009. Т.16, №4. С. 167–172.
5. Болотнов А. М., Хисаметдинов Ф. З. Применение компьютерного моделирования для интерпретации данных контрольных измерений в системах катодной защиты трубопроводов // Вестник Башкирского университета. –2015. Т.20, №3. С. 786–789.
6. Шимони К. Теоретическая электротехника. – М.: Мир, 1964. 773 с.
7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016660596. Исследование состояния изоляции трубопровода по данным натурных измерений электрического поля / Хисаметдинов Ф. З. (RU). Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ от 16.09.2016.

Статья рекомендована к печати кафедрой прикладной математики и информационных технологий Сибайского института (филиал) БашГУ  
(канд. физ.-мат. наук, доц. кафедры А. А. Вышинский)



## **The algorithm for computation the insulation resistance of an underground pipeline based on the measurements of protective potential**

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

<sup>1</sup> *Bashkir State University*

*32 Zaki Validi Street, 450076 Ufa, Russia.*

<sup>2</sup> *Bashkir State University, Sibay Branch (Institute)*

*21 Belova Street, 453833 Sibay, Russia.*

*\*Email: khisametdinovfz@mail.ru*

The article suggests the algorithm for the numerical study of the state of underground pipeline insulation, with the use of the difference of electrical potentials of earth and the protected object measurement results in cathodic protection systems. The program is developed and the computational experiments based on real data are presented in the article.

**Keywords:** computer simulation, electric field, pipeline, cathodic protection, deep anode.