

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ЭХЗ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Иваненков В.В., Гиззатуллин Р.Р., Гумеров К.М.

В статье разработаны алгоритм и программа, позволяющие численно моделировать распределение потенциалов и токов в подземном стальном трубопроводе, исходя из результатов обследования методами электрометрических измерений. В качестве критерия допустимости дальнейшей эксплуатации изношенного изоляционного покрытия рассматривается возможность обеспечения защитного потенциала в нормативных пределах на всём трубопроводе. Приведён ряд примеров, которые показывают, что численное моделирование позволяет на этапе планирования оценить эффективность разных принимаемых практических решений (продолжить эксплуатацию без ремонта, заменить изоляцию некоторых участков, установить дополнительные станции катодной защиты, изменить режимы работы СКЗ).

Как известно, при длительной эксплуатации подземных стальных трубопроводов их изоляционное покрытие изнашивается быстрее, чем сам трубопровод (металл). Если при этом ещё система электрохимической защиты (ЭХЗ) не может создать требуемый уровень защитных потенциалов, то ускоряется коррозия самого трубопровода. Поэтому контролю эффективности ЭХЗ уделяется большое внимание: два раза в год измеряются потенциалы “труба-земля” вдоль всего трубопровода и один раз в пять лет проводится обследование методом электрометрических измерений. В результате обследований обычно получается следующий объём информации:

- уточняется глубина залегания трубопровода и проводимость грунта (удельное сопротивление);
- распределение потенциала “труба-земля” вдоль трубопровода;
- градиенты потенциалов на поверхности земли;
- иногда (редко) получают распределение переходного сопротивления изоляции.

По этим данным определяются дефектные участки изоляции, но остаются без ответа следующие вопросы:

1. Обязательно ли необходимо ремонтировать изоляционное покрытие на всех обнаруженных дефектных участках? Таких участков, как правило, набирается очень большое количество. А на некоторых участках ремонт затруднён (пашня, болото, бездорожье).

2. Возможно ли обеспечить полную электрохимическую защиту данного трубопровода с полученным набором дефектов? Каковы будут при этом энергозатраты? Как изменится картина (распределение потенциалов и энергозатраты), если ликвидируем некоторые дефекты изоляции?

3. Сколько времени можно эксплуатировать трубопровод без ремонта изоляции, учитывая уже накопленный износ?

На эти важные для практики вопросы можно ответить методом моделирования работы ЭХЗ. Поскольку свойства изоляционного покрытия (например, переходного сопротивления) неодинаковы вдоль трубопровода, моделирование целесообразно выполнить численно, например, методом конечных элементов.

Для этого “разобьем” участок трубопровода между двумя смежными станциями катодной защиты (СКЗ) на конечные элементы одинаковой длины h (рис. 1). Конечные элементы обозначим номерами $i-2, i-1, i, i+1, i+2$ и так далее. Все величины, относящиеся к одному элементу, обозначим соответствующими буквами, снабдив их индексом данного элемента. На рисунке 1 показаны разбиение трубопровода на конечные элементы и соответствующие обозначения.

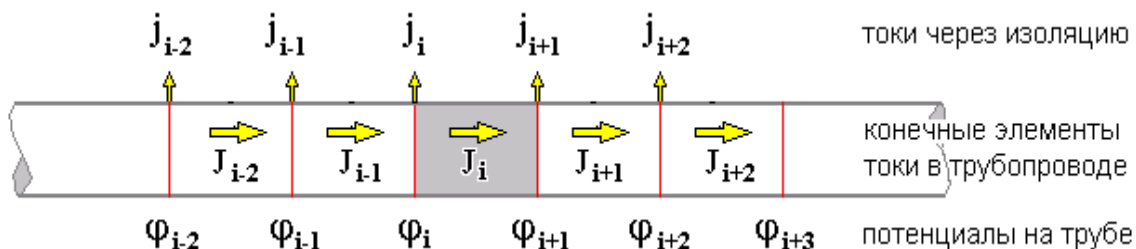


Рисунок 1. Конечно-элементная сетка и обозначения

В расчётной модели примем следующие обозначения:

D_i, δ_i – наружный диаметр и толщина стенки i -го элемента, м;

$\rho_{m(i)}$ – удельное сопротивление металла трубы, Ом·м;

$$R_{m(i)} = \frac{h \cdot \rho_{m(i)}}{\pi \cdot D_i \cdot \delta_i} \text{ – сопротивление трубы на } i\text{-м конечном элементе, Ом;}$$

$\tilde{\rho}_{uz(i)}$ – удельное переходное сопротивление изоляции на i -м конечном элементе, Ом·м²;

$R_{uz(i)} = \frac{\tilde{\rho}_{uz(i)}}{\pi \cdot D_i \cdot h}$ – переходное сопротивление изоляции трубы i -го конечного элемента (Ом).

Из условия сохранения зарядов следует выражение

$$j_i = J_{i-1} - J_i \quad (1)$$

Из закона Ома для трубы и изоляции следуют выражения:

$$J_i = \frac{(\varphi_i - \varphi_{i+1})}{R_{M(i)}}; \quad J_{i-1} = \frac{(\varphi_{i-1} - \varphi_i)}{R_{M(i-1)}}; \quad j_i = \frac{\varphi_i}{0,5 \cdot (R_{uz(i-1)} + R_{uz(i)})} \quad (2)$$

Подставляя выражения (2) в условие (1), получим линейное уравнение относительно наложенных (омических) потенциалов на узлах конечно-элементной сетки:

$$\varphi_i = \frac{\frac{\varphi_{i-1}}{R_{M(i-1)}} + \frac{\varphi_{i+1}}{R_{M(i)}}}{\frac{1}{R_{M(i-1)}} + \frac{1}{R_{M(i)}} + \frac{2}{R_{uz(i-1)} + R_{uz(i)}}} \quad (3)$$

Количество уравнений типа (3) равно количеству узлов конечно-элементной сетки. Искомые величины – наложенные потенциалы на узлах $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \dots, \varphi_{i-1}, \varphi_i, \varphi_{i+1}, \dots, \varphi_n$. Потенциалы на СКЗ играют роль граничных условий и задаются в виде исходных данных.

Отметим, что измеряемый потенциал трубы состоит из двух составляющих: наложенного (омического) и поляризационного (за счёт разности химического состава металла и окружающей среды). Естественный поляризационный потенциал трубных сталей составляет приблизительно – 0,6±0,1 В. Чтобы потенциал “труба-земля” находился диапазоне от – 1,05 В до – 3,5 В, установленном нормой [1], наложенный потенциал должен быть в диапазоне от –0,55 В до –2,9 В.

Если решением получим, что потенциалы на всех точках находятся в пределах нормативных требований (с учётом естественной поляризации), то данный режим работы ЭХЗ можно считать приемлемым.

Решение системы уравнений (3) выполняется с помощью программы, текст которой имеет следующий вид (на языке Fortran):

```

C      Моделирование распределения токов и потенциалов
C      ZAB - протяжённость участка АВ, (м)
C      ROM - удельное сопротивление металла трубы, (Ом*м)
C      ROZ - удель переходн сопротивл изоляции, (Ом*м*м)
C      F - потенциалы в точках Z, (Вольт)
C      Z - координата (расстояние от точки А), (м)
C      TI - ток в I-сечении, (А)
C      TJ - ток через изоляцию трубы длиной 1 м, (А/м)
C      RM1 - сопротивление трубы длиной 1 м, (Ом/м)
C      RZ1 - сопротивление изоляции трубы длиной 1 м, (Ом*м)
C      FA,FB,FC - потенциалы на СКЗ (точки А, В, С)
C      DIMENSION RM(20000),RZ(20000),F(20000),TI(20000)
*      *,TJ(20000),PER(20000)
      READ(1,*) ZAB,ROM,H
      READ(1,*) FA,FB
      IA=10
      IB=IA+ZAB/H
      PI=3.1415926
      READ(1,*) KZ
      DO 1 K=1,KZ
      READ(1,*) Z1,Z2,DDZ,TLZ,ROZ
      I1=IA+Z1/H
      I2=IA+Z2/H
      DO 1 I=I1,I2
      RM(I)=(ROM*H)/(PI*DDZ*TLZ)
      RZ(I)=ROZ/(PI*DDZ*H)
      PER(I)=ROZ
1      F(I)=0.
      F(IA)=FA
      F(IB)=FB
      I11=IA+1
      I22=IB-1
      ID=(IB-IA)/5
      DO 2 M=1,2000
      DO 2 I=I11,I22
      S1=F(I-1)/RM(I-1)+F(I+1)/RM(I)
      S2=2/(RZ(I-1)+RZ(I))+1/RM(I-1)+1/RM(I)
2      F(I)=S1/S2
      DO 4 I=IA,IB
      TI(I)=(F(I)-F(I+1))/RM(I)
      TJ(I)=2*F(I)/(RZ(I-1)+RZ(I))
      Z=(I-10)*H
      RM1=RM(I)/H
      RZ1=RZ(I)*H
4      WRITE(2,101) I,Z,F(I),TI(I),TJ(I),RM1,RZ1,PER(I)
100     FORMAT(2X,20E14.4)
101     FORMAT(I6,20E12.3)
      STOP
      END

```

Программа позволяет также варьировать граничные условия, менять режимы работы СКЗ, устанавливать дополнительные СКЗ, выбирать оптимальные решения. Рассмотрим несколько примеров.

Пример 1. Участок трубопровода между двумя СКЗ (допустим, № 5 и № 6) имеет протяжённость $l = 10\,000$ м. По данным диагностики, на данном участке можно выделить 10 областей, в пределах которых переходное сопротивление приблизительно постоянно (таблица 1).

Таблица 1

Распределение переходного сопротивления на участке трубопровода протяжённостью 10 км между СКЗ-5 и СКЗ-6; срок эксплуатации 20 лет

Расстояние от СКЗ-5		протяжённость, м	диаметр D, мм	толщина стенки, δ , мм	переходное сопротивление $\tilde{\rho}_{из}$, Ом·м ²
начало, м	конец, м				
0 (СКЗ-5)	240	240	530	8	102
240	300	60	530	9	57
300	1 450	1 150	530	8	550
1450	2 300	850	530	9	1 243
2300	3 400	1 100	530	8	744
3400	5 700	2 300	530	8	345
5700	8 500	2 800	530	7	520
8500	8 540	40	530	7	30
8540	9 130	590	530	8	120
9130	10 000 (СКЗ-6)	870	530	8	350

Используем конечно-элементную сетку с элементами длиной по $h = 10$ м. При этом получим 1000 конечных элементов, что даёт хорошую точность численных решений. Исходные данные имеют следующий вид:

10000. 0.245E-6 10. -1.5 -1.5 10 0. 240. 0.530 0.008 102. 240. 300. 0.530 0.009 57. 300. 1450. 0.530 0.008 550. 1450. 2300. 0.530 0.009 1243. 2300. 3400. 0.530 0.008 744. 3400. 5700. 0.530 0.008 345. 5700. 8500. 0.530 0.007 520. 8500. 8540. 0.530 0.007 30. 8540. 9130. 0.530 0.008 120. 9130. 10000. 0.530 0.008 350.	\mathcal{L}, ρ_m, h φ_A, φ_B Число интервалов = 10 Данные таблицы 1
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------

Результаты расчётов при разных режимах работы СКЗ приведены в таблице 2, где приняты обозначения:

U_5, U_6 – наложенные потенциалы в точках дренажа СКЗ-5 и СКЗ-6;

J_5, J_6 – токи, направляемые от СКЗ-5 и СКЗ-6 на данный участок трубопровода;

$U_{мин}$ – наименьшее значение наложенного потенциала на участке;

W – полезная мощность ЭХЗ на данном участке трубопровода.

Таблица 2

Параметры распределения потенциалов и токов на участке трубопровода при сроке эксплуатации 20 лет

СКЗ-5		СКЗ-6		$U_{мин}, В$	$W, Вт$
$U_5, В$	$J_5, А$	$U_6, В$	$J_6, А$		
~ 1,0	15,1	~ 1,0	16,3	~ 0,47	31,4
~ 1,5	22,7	~ 1,5	24,5	~ 0,71	70,8
~ 2,0	30,3	~ 2,0	32,7	~ 0,94	126
~ 2,5	37,8	~ 2,5	40,8	~ 1,17	196,5
~ 3,0	45,4	~ 3,0	49,0	~ 1,41	283,2
~ 3,5	53,0	~ 3,5	57,2	~ 1,65	385,7
<i>Допустимые режимы выделены курсивом</i>					

Из результатов расчётов видно (таблица 2), что на данном участке трубопровода необходимый защитный потенциал на всех точках трассы обеспечивается при наложенных потенциалах на СКЗ-5 и СКЗ-6 в диапазоне от минус 1,2 В до минус 2,9 В. Ток, направляемый от СКЗ-5 на данный участок, должен находиться в диапазоне от 18,2 ампер до 43,9 ампер; ток от СКЗ-6 – в диапазоне от 19,6 до 47,4 ампер.

Таким образом, несмотря на то, что на некоторых участках трубопровода переходное сопротивление упало до 30 Ом·м², что недопустимо с точки зрения нормативных требований, система ЭХЗ эффективна.

С помощью программы можно оценивать возможности ЭХЗ на перспективу. Для этого исходим из следующих положений:

1) при старении изоляционного покрытия переходное сопротивление снижается по экспоненциальному закону:

$$\tilde{\rho}_{из} = \rho_0 \cdot \exp(-\tau \cdot T_{э}), \quad (4)$$

где ρ_0 – исходное значение переходного сопротивления изоляции;

$T_{\text{Э}}$ – время эксплуатации;

τ – параметр, характеризующий скорость старения (данный параметр может быть разным для разных участков трубопровода);

2) начальное переходное сопротивление изоляции соответствует нормативному значению для данного вида покрытия.

Значение параметра τ определяется по формуле:

$$\tau = -\frac{1}{T_{\text{Э}}} \cdot \ln \left(\frac{\tilde{\rho}_{uz}}{\rho_0} \right). \quad (5)$$

Пример 2. Рассмотрим тот же участок трубопровода при следующих дополнительных условиях: исходное значение переходного сопротивления $\rho_0 = 1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2$; срок эксплуатации $T_{\text{Э}} = 30 \text{ лет}$. В таблице 3 приведены результаты расчётов.

Таблица 3

Параметры распределения потенциалов и токов на участке трубопровода при сроке эксплуатации 30 лет

СКЗ-5		СКЗ-6		$U_{\text{мин}}, \text{В}$	$W, \text{Вт}$
$U_5, \text{В}$	$J_5, \text{А}$	$U_6, \text{В}$	$J_6, \text{А}$		
~ 1,0	29,1	~ 1,0	27,1	~ 0,31	56,2
~ 1,5	43,6	~ 1,5	40,6	~ 0,46	126,3
~ 2,0	58,1	~ 2,0	54,1	~ 0,61	224,4
~ 2,5	72,7	~ 2,5	67,7	~ 0,76	351,0
~ 3,0	87,2	~ 3,0	81,2	~ 0,92	505,2
~ 3,5	102	~ 3,5	94,7	~ 1,07	688,5
<i>Допустимые режимы выделены курсивом</i>					

Из таблицы 3 следует, что если не ремонтировать трубопровод ещё 10 лет, то для обеспечения необходимым защитным потенциалом всего участка требуется эксплуатировать СКЗ при более напряжённых режимах: наложенный потенциал на СКЗ должен находиться в диапазоне от минус 1,8 В до минус 2,9 В; ток, направляемый от СКЗ-5 на данный участок, должен находиться в диапазоне 52,3 – 84,3 ампер; ток от СКЗ-6 – в диапазоне 48,7 – 78,5 ампер. Энергозатраты на ЭХЗ сильно возрастают.

Такие режимы обеспечивают защиту трубопровода, несмотря на сильный износ изоляции, но малоприемлемы. Поэтому необходимо предпринимать практические шаги: либо восстанавливать покрытие, либо ставить дополнительные СКЗ.

Пример 3. Допустим, в середине данного участка трубопровода установлена дополнительная станция катодной защиты (СКЗ № 56). В таблице 4 приведены параметры распределения потенциалов и токов для этого случая при том же сроке эксплуатации (30 лет).

Таблица 4

Параметры распределения потенциалов и токов после установки дополнительного СКЗ при сроке эксплуатации 30 лет

$U_5=U_6=U_{56}$, В	J_3 , А	J_{56} , А	J_6 , А	$U_{мин}$, В	W , Вт
<i>~ 1,0</i>	23,6	12,6+14,7	23,9	~ 0,55	74,8
<i>~ 1,5</i>	35,4	18,8+22,1	35,9	~ 0,82	168,3
<i>~ 2,0</i>	47,2	25,1+29,4	47,8	~ 1,09	299,0
<i>~ 2,5</i>	59,0	31,4+36,8	59,8	~ 1,36	467,5
<i>~ 3,0</i>	70,8	37,7+44,1	71,8	~ 1,63	673,2
<i>~ 3,5</i>	82,6	43,9+51,5	83,7	~ 1,91	916,0
<i>Допустимые режимы выделены курсивом</i>					

Результаты расчётов показывают, что установкой дополнительных СКЗ достигается существенный положительный эффект: обеспечивается нормальная защита трубопровода при более низких режимах работы СКЗ. Этот эффект достигается за счёт того, что распределение напряжений становится более равномерным, исключаются высокие потенциалы (рисунок 2).

Программа позволяет количественно оценивать предельные остаточные ресурсы изоляции ($T_{э1}$ и $T_{э2}$), после которых ни при каких режимах СКЗ невозможно поддерживать потенциалы в допустимом диапазоне.

Пример 4. На рисунке 3 показано снижение потенциала на участке трубопровода с увеличением срока эксплуатации; при этом на всех СКЗ поддерживается максимально допустимый наложенный потенциал минус 2,9 В.

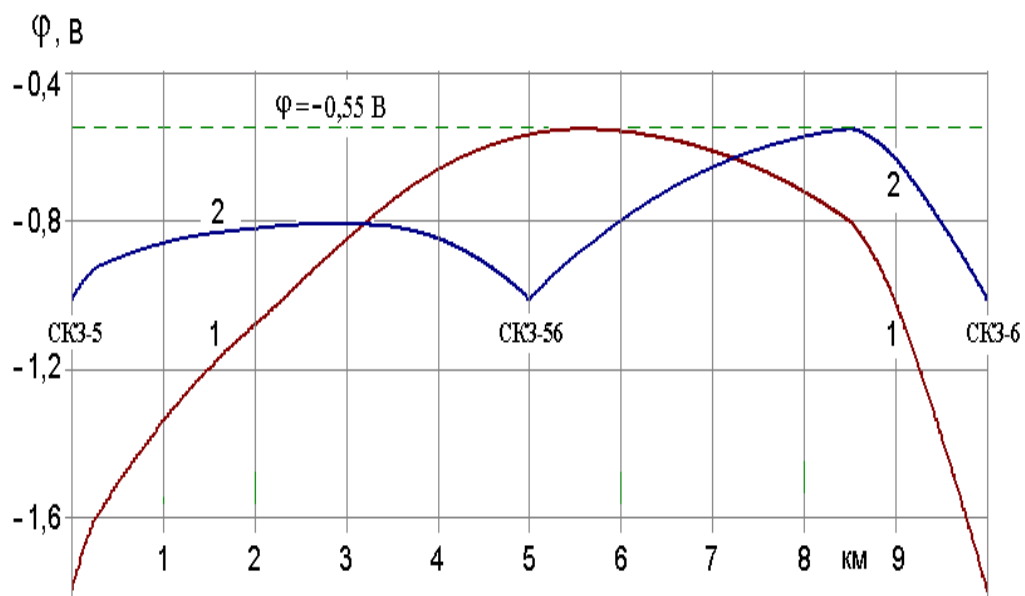


Рисунок 2. Изменение распределения потенциалов с установкой дополнительной СКЗ-56:
1 – включены СКЗ-5 и СКЗ-6; 2 – дополнительно включен СКЗ-56

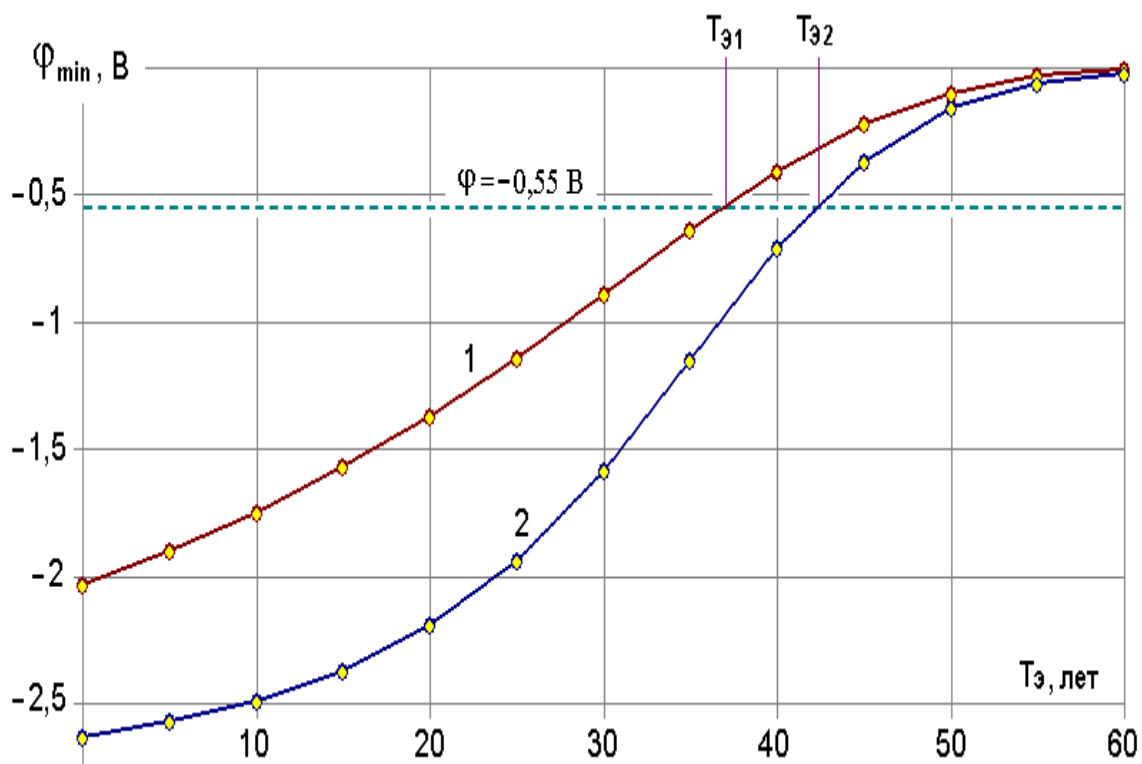


Рисунок 3. Снижение потенциала на трубопроводе при увеличении срока эксплуатации:
1 – включены СКЗ-5 и СКЗ-6; 2 – дополнительно включен СКЗ-56

Таким образом, разработана программа, позволяющая моделировать распределение потенциалов и токов при различных положениях и режимах работы СКЗ, выбрать оптимальные режимы, оценивать остаточный ресурс изоляционного покрытия.

Литература

1. СНиП 2.05.06-85. Магистральные трубопроводы.
2. ГОСТ 9.602-2005. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии.
3. ГОСТ Р 51164-98 Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии.