

Методическое обоснование оценки сопротивления изоляции трубопровода на подводном переходе по результатам контроля защитных потенциалов

В данной статье описывается метод оценки сопротивления изоляции трубопровода на подводном переходе по результатам контроля защитных потенциалов.

Ключевые слова / Keywords:

- коррозия, трубопровод, подводный переход, диагностика, техническое состояние, коррозионный дефект, изоляционное покрытие, установка катодной защиты, старение изоляции, скорость старения, обводнение, анализ, защитный потенциал, сопротивление изоляции;
- corrosion, pipeline, main pipeline underwater transition, diagnostics, availability index of product, corrosion defects, insulating cover, cathodic protection unit, insulation dep recation, aging rate, water supply, evaluation, protection potential, insulation resistance



С.А. Артемьева
Главный специалист
ООО «Трансэнерго-
строй», Москва

Как хорошо известно, при катодной защите распределение тока защиты и, следовательно, суммарного защитного потенциала вдоль трубопровода, представляющего собой линейный проводник с распределенной утечкой (приемом извне) тока, растекающегося из точечного источника – анодного заземления (АЗ) установки катодной защиты (УКЗ), – описывается обратной экспоненциальной функцией, согласно уравнению Зунде. При совместном действии двух смежных УКЗ это уравнение трансформируется, в также известное, уравнение Роджерса:

$$j_x = j_0 \cdot e^{-Ax}, \quad (1)$$

Полагая, что функция (1) представляет собой математическую модель реального участка трубопровода, включающего переход через водную преграду, как это показано на **рисунке 1**:

Теоретические основы метода

Представляет интерес оценить размеры участка грунта, через который протекает не менее 90% тока защиты.

Исходя из соотношения:

$$i_3 = \int_0^{\infty} j_x \cdot d_x \quad (2)$$



И.В. Вьюницкий
Кандидат химических наук, заместитель генерального директора по НИР ООО «Трансэнергострой», Москва



В.В. Притула
Председатель Координационного Совета по проблемам защиты от коррозии, академик РАЕН, д.т.н., профессор, советник президента ОАО ВНИИСТ



рисунк 1.
Схема участка катодной защиты с подводным переходом трубопровода



рисунок 2.
Соотношение плотности тока утечки в проводнике с линейными координатами растекания тока от точечного источника

при заданном соотношении следует:

$$\int_0^1 j_x dx = 0,9 \int_0^\infty j_x dx, \quad (3)$$

Принимая адекватность величин j_x в левой и правой частях уравнения (3), получим:

$$\int_0^1 e^{Ax} dx = 0,9 \int_0^\infty e^{Ax} dx$$

или иначе:

$$A(e^{-A \cdot 1} - e^{-A \cdot 0}) = 0,9A(e^{-A \cdot \infty} - e^{-A \cdot 0}), \quad (4)$$

Условием полного подобия любой модели и реального объекта является соотношение критерия подобия равного 1. Для уравнения (4) таким критерием подобия является величина A , определяющая кинетику токораспределения в обеих частях уравнения (4). В этом случае можно записать:

$$\frac{1}{e^l} - 1 = 0,9 \left(\frac{1}{e^\infty} - 1 \right); \quad \frac{1}{e^l} = 1 + 0,9 \cdot (-1);$$

или иначе

$$\frac{1}{e^l} = 0,1; \quad e^l = 10;$$

При этом условии $l=2,3$. Или в графической форме, представленной на **рисунок 2**.

Исходя из условия соотношения (**рисунок 2**), можно в первом приближении полагать, что линейный размер области Δy_A (**рисунок 1**) составляет $0,23y_A$. В этом случае, при растекании тока с точечного анодного заземления не менее 90% тока защиты, формируется общая «трубка тока» в грунте вдоль защищаемого трубопровода общим сечением $1,23y_A \cdot 1,23h_3$, где h_3 – глубина заложения нижнего торца электродов анодного заземления, как это показано на **рисунок 3**.

Дальнейший ход решения задачи, заявленной в названии данной публикации, заключается в оценке влияния наличия водной преграды на характер токораспределения вдоль трубопровода и вызываемое этим изменение кинетики износа (старения) изоляционного покрытия на участке подводного перехода трубопровода.

1) При условии гомогенности среды в интервале DL сопротивление «трубки тока» равно:

$$R_3 = (DO + OK + KL) \cdot 1,23^2 \cdot h_3 \cdot y_A \cdot \rho_3 = 1,5 \cdot h_3 \cdot y_A \cdot \rho_3 \cdot DL \quad (5)$$

где ρ_3 – удельное сопротивление грунтовой среды;

2) Наличие водной преграды более высокой проводимости, чем грунт, на участке ОК вызывает снижение общего сопротивления «трубки тока», в соответствии с соотношением:

$$R_3^* = (DO + KL) \cdot 1,5 \cdot h_3 \cdot y_A \cdot \rho_3 + OK \cdot 1,5 h_3 \cdot y_A \cdot \rho_B = 1,5 \cdot h_3 \cdot y_A [(DO + KL) \cdot \rho_3 + OK \cdot \rho_B] \quad (6)$$

где ρ_B – удельное сопротивление водной среды;

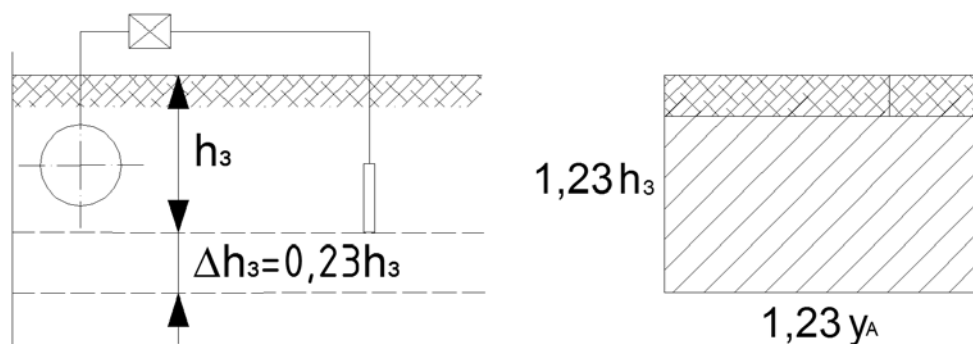


рисунок 3.
Схема расположения АЗ

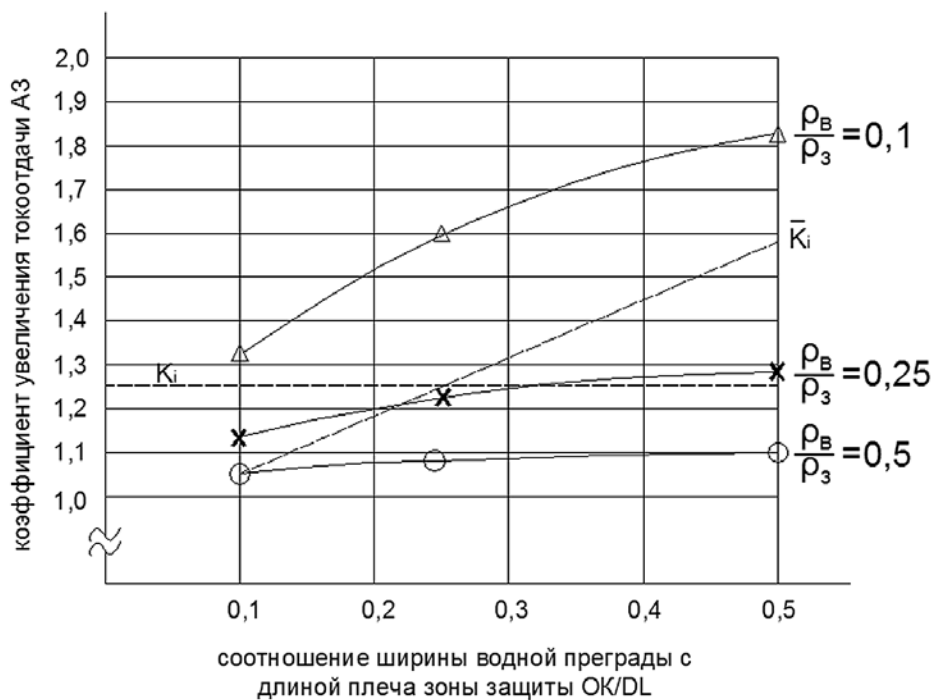


рисунок 4.
Диапазон изменений показателя K_i в различных условиях

Соотношение изменения сопротивления в этом случае составляет:

$$\frac{R_3^*}{R_3} = \frac{(DL - OK) \cdot \rho_3 + OK \cdot \rho_v}{DL \cdot \rho_3} = 1 - \frac{OK}{DL} + \frac{OK}{DL} \cdot \frac{\rho_v}{\rho_3} = 1 - \frac{OK}{DL} \left(1 - \frac{\rho_v}{\rho_3}\right) \quad (7)$$

Анализ уравнения (7) показывает, что снижение сопротивления «трубки тока» или рост, при прочих равных условиях, токоотдачи анодного заземления контролирует два фактора: соотношение ширины водной преграды и длины участка (плеча) зоны защиты УКЗ, а также соотношение удельных сопротивлений водной и грунтовой сред.

Исходя из реальных условий, представляют интерес для дальнейшего анализа три типичных случая:

$$OK = 0,1DL \quad (8)$$

$$OK = 0,25DL \quad (9)$$

$$OK = 0,5DL \quad (10)$$

По тем же соображениям для анализа примем средние значения удельного сопротивления грунтовой среды $\rho_3 \approx 40 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ и водной среды $\rho_v \approx 20 \text{ Ом} \cdot \text{м}$;

При этих условиях получим значения коэффициента увеличения токоотдачи анодного заземления K_i , равные:

$$K_{R1} = \frac{R_3^*}{R_3} = 1 - 0,1(1 - 0,5) = 0,95 \text{ или } K_{i1} = 1,05$$

$$K_{R2} = 1 - 0,25(1 - 0,5) = 0,875 \text{ или } K_{i2} = 1,14$$

$$K_{R3} = 1 - 0,5(1 - 0,5) = 0,75 \text{ или } K_{i3} = 1,33$$

В случае изменения соотношения $\frac{\rho_v}{\rho_3}$ до подобных значений 0,25 и 0,1 величины K_i соответственно изменяются до значений:

$$k_{i1}^* = 1,08; k_{i1}^{**} = 1,1$$

$$k_{i2}^* = 1,23; k_{i2}^{**} = 1,29$$

$$k_{i3}^* = 1,6; k_{i3}^{**} = 1,82$$

Полагая равновероятными возможности изменения соотношений $\frac{OK}{DL}$ и $\frac{\rho_v}{\rho_3}$ в интервалах от 0,1 до 0,5, средние математические ожидания коэффициентов K_i составляют: $\bar{K}_{i1} = 1,076$; $\bar{K}_{i2} = 1,218$ и $\bar{K}_{i3} = 1,57$, или в целом для участков подводных переходов трубопроводов $\bar{K}_i = 1,272$.

В первом приближении можно полагать, что наличие водной преграды на каком-либо плече зоны защиты УКЗ увеличивает влияние тока катодной защиты на изоляционное покрытие трубопровода в зоне переходов на 30%. Графически все расчетные значения величин K_i показаны на **рисунке 4**.

Результат такого изменения токораспределения на распределение защитных потенциалов представлен на **рисунке 5**.

При отсутствии водной преграды действуют следующие функционалы:

$$\Delta\varphi_D = iz_{\text{вх}} \quad (11)$$

$$\Delta\varphi_0 = \frac{\Delta\varphi_D}{Ch(\alpha \cdot OD)} \quad (12)$$

$$\Delta\varphi_K = \frac{\Delta\varphi_D}{Ch(\alpha \cdot DK)} \quad (13)$$

Отсюда легко получить:

$$\frac{\Delta\varphi_0}{\Delta\varphi_K} = \frac{\Delta\varphi_D Ch(\alpha \cdot DK)}{\Delta\varphi_D Ch(\alpha \cdot OD)} = \frac{Ch(\alpha \cdot DK)}{Ch(\alpha \cdot OD)} = \frac{Ch[\alpha \cdot (OD + DK)]}{Ch(\alpha \cdot OD)}$$

Наличие водной преграды и ее влияние на изменение сопротивления «трубки тока» вносит изменения в соотношения с (11) по (13):

$$\Delta\varphi_D^* = K_i iz_{\text{вх}} \quad (14)$$

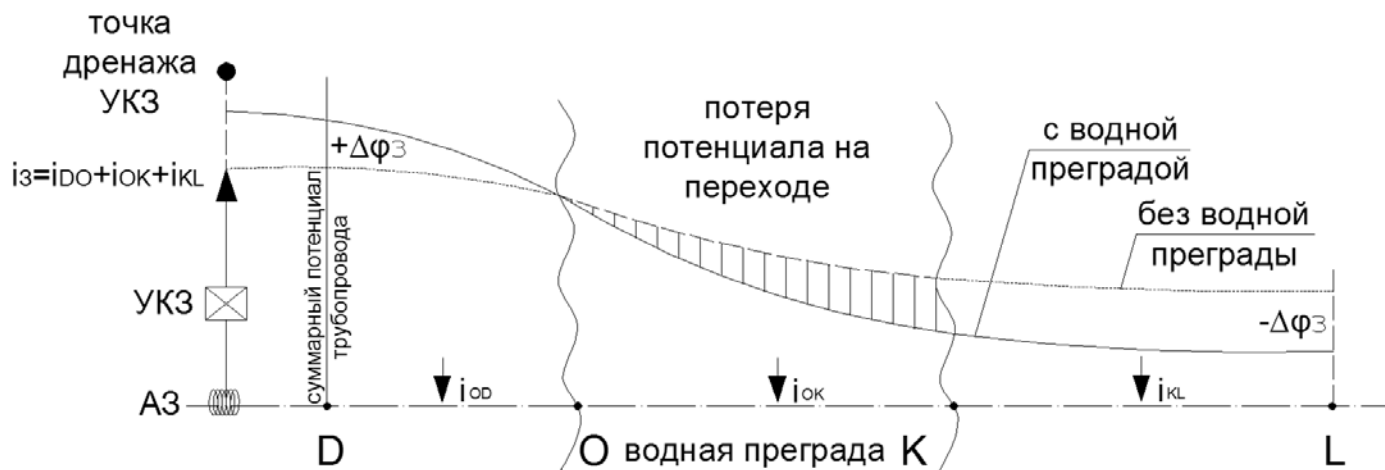


рисунок 5. Схема изменения распределения потенциалов при наличии подводного перехода трубопровода

$$i_{OD}^* = K_i i \frac{z_{BX}}{z_{OD}} \quad (15)$$

$$i_{OK}^* = K_i i \frac{z_{BX}}{z_{DK}} \quad (16)$$

$$i_{KL}^* = K_i i \frac{z_{BX}}{z_{DL}} \quad (17)$$

Отсюда далее получаем:

$$\frac{i_{OK}^*}{i_{OD}^*} = \frac{k_i \cdot i \cdot z_{BX} \cdot z_{OD}}{k_i \cdot i \cdot z_{BX} \cdot z_{DK}} = \frac{z_{OD}}{z_{DK}} > 1 \quad (18)$$

То есть, при прочих равных условиях, получаем подтверждение вывода об увеличении токопередачи из окружающей среды в трубопровод на участке подводного перехода по отношению к его подземным участкам.

Рассмотрим далее в анализе функции, учитывающие величины входных сопротивлений участков OD и DK, которые необходимо знать для оценки величины сопротивления изоляции на подводном переходе по данным измерения потенциалов трубопровода на подводном участке:

$$z_{OD} = \sqrt{r_T R_3} \cdot \text{cth} \left(\sqrt{\frac{r_T}{R_3}} \cdot OD \right) \quad (19)$$

$$z_{DK} = \sqrt{r_T \left[\frac{R_3}{1 + \frac{OK}{OD}} + \frac{R_B}{1 + \frac{OD}{OK}} \right]} \cdot \text{cth} \left(\sqrt{\frac{r_T \cdot (OD + OK)}{\frac{R_3}{OD} + \frac{R_B}{OK}}} \right) \quad (20)$$

Для удобства можно преобразовать уравнение (19) в следующем виде:

$$z_{OD} = \sqrt{r_T R_3} \cdot \text{cth} \left(\sqrt{\frac{r_T \cdot OD^2}{R_3}} \right) \quad (21)$$

где:

r_T – продольное сопротивление трубопровода;

R_3 – переходное сопротивление трубопровода на грунтовом участке;

R_B – переходное сопротивление трубопровода на подводном участке.

ВЫВОДЫ



Совмещая уравнения (14), (15) и (21), получим возможность рассчитывать искомую величину R_3 , а уравнения (14), (15), (16) и (20) – искомую величину R_B , характеризующие изменения состояния изоляционного покрытия, вызванные влиянием подводного перехода. Базой такого совмещения служат в обоих случаях значения суммарных защитных потенциалов, измеренных в различных точках обоих участков. В подтверждение достоверности данной методики оценки сопротивления изоляции, был проведен контрольный расчет потенциалов, соответствующих участкам трубопровода общей длиной 5 км, с ожидаемыми сопротивлениями изоляции 1000 Ом*м на грунтовом и 500 Ом*м на подводном участках, при их защите общим током 2А (продольное сопротивление трубопровода $r_T=5 \cdot 10^{-4}$ Ом/м). Результат расчета показал математическое ожидание положенного потенциала $\Delta\phi_K=0,298$ В. Реально замеренная величина потенциала трубопровода в точке К составила $\Delta\phi_K^*=0,312$ В, что с относительной ошибкой – 4,48% подтверждало справедливость оценки сопротивления изоляции трубопровода. На подводном переходе, с величиной сопротивления изоляции 500 Ом*м, т.е. при сроке его службы около 25 лет, соответствовал действующей величине постоянной старения изоляции $0,13 \text{ год}^{-1}$, а не $0,105 \text{ год}^{-1}$, как на подземном участке трубопровода.

1. Улиг Г.Г., Ревя Р.У. Коррозия и борьба с ней. Л.: Химия, 1989.

2. Колотыркин Я.М. Металл и коррозия. М.: Металлургия, 1985.

3. Томашов Н.Д. Теория коррозии и защита металлов. М.: Изд-во АН СССР.