

# ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ СИСТЕМЫ КАТОДНОЙ ЗАЩИТЫ МАГИСТРАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДА

М.А. Башаев, к.т.н., доцент, с.н.с., ОАО «ВНИИСТ»

К числу мер, направленных на повышение энергетической эффективности и энергосбережения, относится оптимизация режимов установок катодной защиты. Методика проведения измерений и определения оптимальных режимов станции катодной защиты (СКЗ) компрессорной станции (КС) изложена в Р Газпром 9.4-006-2009.

Одним из пунктов программы в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности является оптимизация режимов работы оборудования [1]. Вопросам повышения энергосбережения при осуществлении электрохимической защиты (ЭХЗ) подземных трубопроводов с помощью оптимизации режимов установок катодной защиты посвящен ряд работ, в том числе [2, 3]. Результаты нашли отражение в методике проведения измерений и определения оптимальных режимов СКЗ КС, изложенной в Р Газпром 9.4-006-2009 [4]. В основе методики лежит минимизация суммарной мощности ( $P_i$ ) всех «М» СКЗ системы ЭХЗ:

$$\{\sum P_i\}_{min} = \{\sum_{i=1}^m I_i^2 R_i\}_{min} \quad (1)$$

при соблюдении ограничений на разности потенциалов «труба – земля» – ( $U_i$ ) для всех  $N$  точек сети трубопроводов:

$$|U_{min}| \leq |U_i| \leq |U_{max}| \quad (2),$$

где  $I_i$  – ток  $i$ -й СКЗ;

$R_i$  – сопротивление внешней цепи  $i$ -й СКЗ.

Для решения этой задачи необходимо получить зависимость защитных разностей потенциалов «труба – земля» ( $U_{зк}$ ) от токов всех СКЗ системы ЭХЗ рассматриваемого участка. Предполагается, что эти зависимости ли-

нейны и могут быть представлены системой уравнений:

$$\begin{cases} U_1 = U_{e1} + A_{11} I_1 + A_{21} I_2 + \dots + A_{n1} I_n \\ U_2 = U_{e2} + A_{12} I_1 + A_{22} I_2 + \dots + A_{n2} I_n \\ U_i = U_{ei} + A_{1i} I_1 + A_{2i} I_2 + \dots + A_{ni} I_n \\ U_k = U_{ek} + A_{1k} I_1 + A_{2k} I_2 + \dots + A_{nk} I_n \end{cases} \quad (3)$$

В методике предполагается экспериментальное определение коэффициентов  $A_{ik}$ . Достаточно простая и эффективная методика на практике применима к ограниченным площадям (промышленные площадки, ограниченные городские районы и т.д.), так как требует проведения измерений потенциалов трубопроводов во множестве точек, повторяемых при многократном (в соответствии с определенным планом эксперимента) изменении режимов всех СКЗ. Для линейных трубопроводов такая методика практически неприменима, так как точки измерения потенциалов и СКЗ удалены друг от друга на десятки километров.

Один из возможных путей решения проблемы – замена реального трубопровода математической моделью с последующей вычислительной процедурой определения оптимальных режимов СКЗ. Для этого, во-первых, требуется, чтобы модель была адекватна объекту в отношении цели моделирования. Во-вторых, желательно использовать имеющуюся информацию по

трубопроводу без необходимости проведения дополнительных измерений (исследований).

Используем методы численного моделирования, предложенные в работах [5, 6]. В них реальный трубопровод представляется в виде  $N$  дискретных отрезков, в пределах которых его параметры неизменны и соответствуют средним значениям. Каждый такой отрезок представляется фиктивным источником тока (узлом дискретизации). В основе обеих моделей лежат одни и те же физические закономерности.

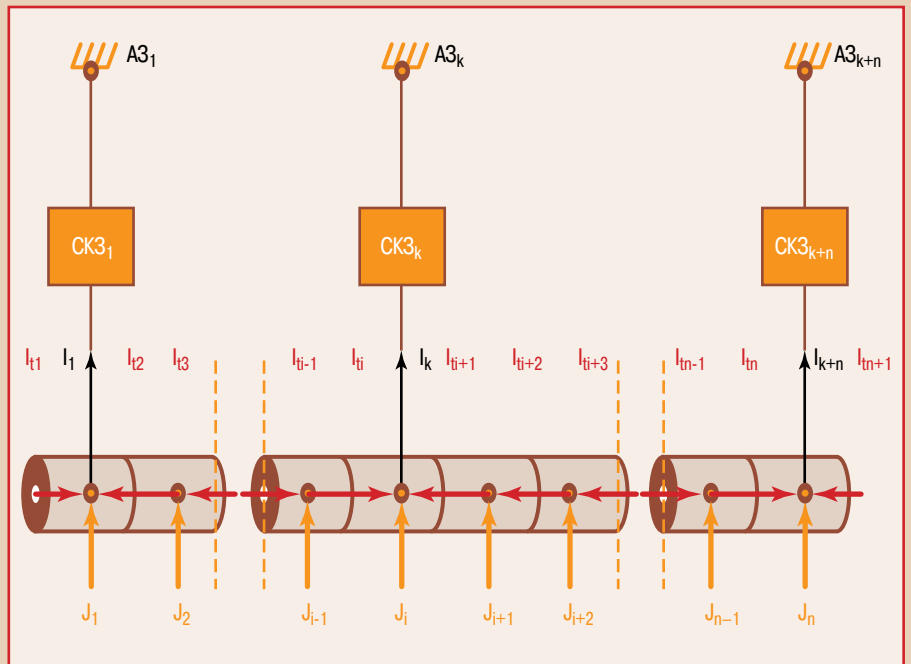
Фрагмент конечно-разностной системы уравнений для  $i$ -го узла дискретизации модели при условии, что никакие другие поля, кроме образованных токами защиты, не действуют, а модель предназначена для расчета **наложенной** разности потенциалов (т.е. без учета потенциала свободной коррозии –  $U_e$ ), можно представить так:

$$\begin{cases} \frac{R_{из.i}}{\pi D_t L_i} J_i + \phi_{3,i} + \phi_{t,i} = 0 \\ J_i + \sum_i^{i+1} \frac{\phi_{t,i+1} - \phi_{t,i}}{L_i R_{пп,i}} + \delta_i I_k = 0 \quad \delta_i = \begin{cases} 1 & \text{при } i = k_A \\ 0 & \text{при } i \neq k_A \end{cases} \\ \phi_{3,i}(p_s) = \frac{p_r}{4\pi} \left( \sum_i \frac{J_i}{R(p_s, p_i)} - \sum_k \frac{I_k}{R(p_s, p_k)} \right) \end{cases} \quad (4),$$

где  $\phi_{t,i}$  – потенциал металла  $i$ -го отрезка трубы, В;  
 $R_{из,i}$  – удельное электрическое сопротивление изоляционного покрытия, Ом $\cdot$ м;  
 $R_{пр,i}$  – удельное электрическое сопротивление металла трубы, Ом/м;  
 $D_i, L_i$  – диаметр и длина  $i$ -го отрезка трубы, м;  
 $\phi_{э,i}$  – потенциал точки земли, лежащей на поверхности  $i$ -го отрезка трубы, В;  
 $i = 1, \dots, N$  ( $N$  – количество участков дискретизации);  
 $k = 1, \dots, M$  ( $M$  – количество СКЗ);  
 $k_d$  – точка дренажа СКЗ;  
 $R(p_s, p_i)$  – расстояние от точки  $p_s$ , в которой определяется потенциал, до точки  $p_i$ , в которой находится ФИ, м;  
 $R(p_s, p_k)$  – расстояние от точки  $p_s$ , в которой определяется потенциал, до точки  $p_k$ , в которой находится анодное заземление СКЗ, м.

В последнее уравнение системы (4) входят слагаемые не только от анодов и защищаемого участка трубы, но и от «зеркальных» относительно свободной поверхности земли отображений анодов и трубы, введенных для учета границы раздела «земля – воздух».

Система (4) содержит три неизвестные величины, средние на участке  $i$ : потенциал металла трубы –  $\phi_{t,i}$ , потенциал точки земли на поверхности изоляционного покрытия трубы –  $\phi_{э,i}$  и ток утечки через изоляционное покрытие трубы –  $J_i$ . Удельное электрическое сопротивление изоляционного покрытия  $R_{из,i}$ , удельное электрическое сопротивление металла трубы –  $R_{пр,i}$ , а также геометрические параметры ( $D_i, L_i$ ), коор-



**Рис. 1.** Дискретная модель токораспределения системы ЭХЗ, где  $I_k$  – ток СКЗ,  $J_i$  – ток «утечки» через изоляцию,  $I_{ti}$  – продольный ток трубы,  $\bigcirc$  – фиктивный источник тока – ФИ (узел дискретизации)

динаты точек установки анодных заземлений и точек дренажа СКЗ, необходимые для расчета  $R(p_s, p_i)$ ,  $R(p_s, p_k)$ , и токи СКЗ должны быть известны. Таким образом, количество уравнений системы равно количеству неизвестных. Применяв систему (4) ко всем  $N$  узлам дискретизации, получим систему, состоящую из  $3N$  уравнений с  $3N$  неизвестными. Решение этой системы позволяет определить разность потенциалов «труба – близкая земля» –  $U_{k,i}$  при заданных токах СКЗ:

$$U_{k,i}(I_k)_{k=1..M} = \phi_{э,i} - \phi_{t,i} \quad (5),$$

т.е. в итоге определить коэффициенты уравнений системы (3) расчетным путем.

Описанная выше модель применима для расчетов линейной части МТ. Но если точка дренажа СКЗ находится в поле защитного заземления системы электробезопасности, а тем более труб свайного фундамента, то для получения зависимости разности потенциалов «труба – земля» в точке дренажа –  $U_d$  от токов СКЗ такая модель непригодна. Для описания зависимости  $U_d$  от токов СКЗ примем следующие допущения: значение  $U_d$  зависит только от той СКЗ, которая подключена в этой точке дренажа, и только от той части тока СКЗ, которая натекает на защитное заземление. Тогда систему (3) можно дополнить следующими «М» уравнениями:

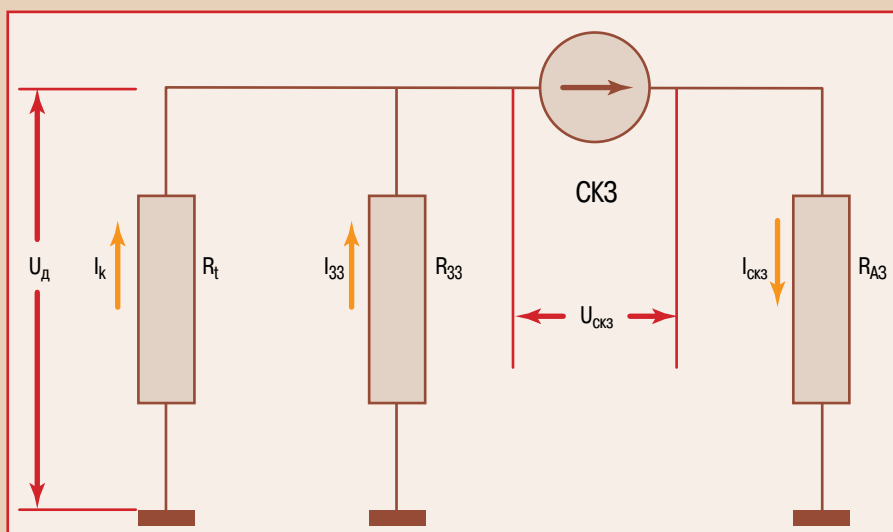
$$U_{d,j} = B_j I_{зз,j} \quad (3a),$$

где  $J = 1..M$ , соответствует количеству СКЗ участка;

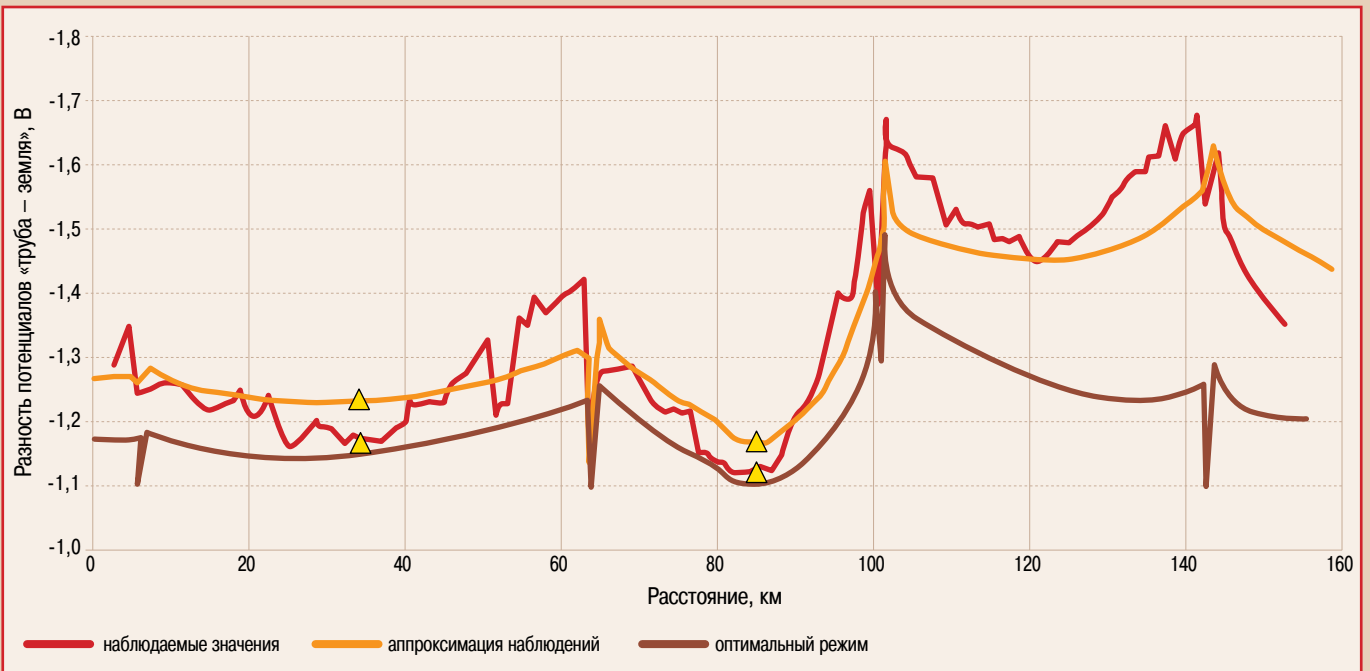
$U_{d,j}$  – разность потенциалов «труба – земля» в  $j$ -точке дренажа;

$I_{зз,j}$  – часть тока СКЗ, натекающая на защитное заземление в  $j$ -точке дренажа;

$B_j = U'_{d,j} / I'_{зз,j}$  – коэффициент, определяемый по  $U'_{d,j}$  и  $I'_{зз,j}$ , т.е. значениям разности потенциалов в точке дренажа и току на защитном заземлении на момент обследования МТ.



**Рис. 2.** Схема замещения установки катодной защиты:  $R_t$  – входное сопротивление трубопровода,  $R_{зз}$  – сопротивление защитного заземления,  $R_{Aз}$  – сопротивление анодного заземления



**Рис. 3. Распределение разности потенциалов «труба – земля» вдоль трассы МТ\***

\* Минимальный по абсолютной величине защитный потенциал  $|U_{\min}|$  принят равным  $-1,1$  В, т.е. с запасом на возможную ошибку  $\approx 0,05$  В (требования ГОСТ 51164 для данных условий эксплуатации:  $-0,9$  В). На рисунке 3 точки, в которых имеет место максимальное расхождение наблюдений и расчетов с помощью модели, отмечены знаком  $\Delta$

Как видно, не весь ток СКЗ –  $I_{СКЗ,i}$  расходуется на собственно защиту трубопровода (на его поляризацию). Следовательно, для расчета коэффициентов  $A_{i,j}$  системы (3) путем решения системы (4) в уравнения системы (4) следует подставлять не ток СКЗ, а лишь ту его часть, которая остается за вычетом тока, натекающего на защитное заземление –  $I_{зз,j}$ . Токи защиты  $I_{k,i}$  для системы (4):

$$I_{k,i} = I_{СКЗ,i} - I_{зз,i} \quad (6)$$

где  $j = 1 \dots M$ .

Объединенная система (3) + (3а), которая является основной частью не-

равенств (2), содержит две переменные величины – токи  $I_{k,j}$  и  $I_{зз,j}$ . Эти величины зависимы, и их взаимосвязь определим из приведенной упрощенной схемы замещения установки катодной защиты (рис. 2).

Сопротивления схемы замещения определим по известным параметрам СКЗ и потенциалу в точке дренажа:

$$R_t = U_d / I_k \quad (7)$$

$$R_{зз} = U_d / I_{зз} \quad (8)$$

$$R'_{A3} = \frac{U_{СКЗ}}{I_{СКЗ}} - \frac{R_t \times R_{зз}}{R_t + R_{зз}} \quad (9)$$

В формуле (9)  $R'_{A3}$  – сумма сопротивлений анодного заземления (АЗ и дренажных кабелей).

Соотношения токов в соответствии со схемой замещения:

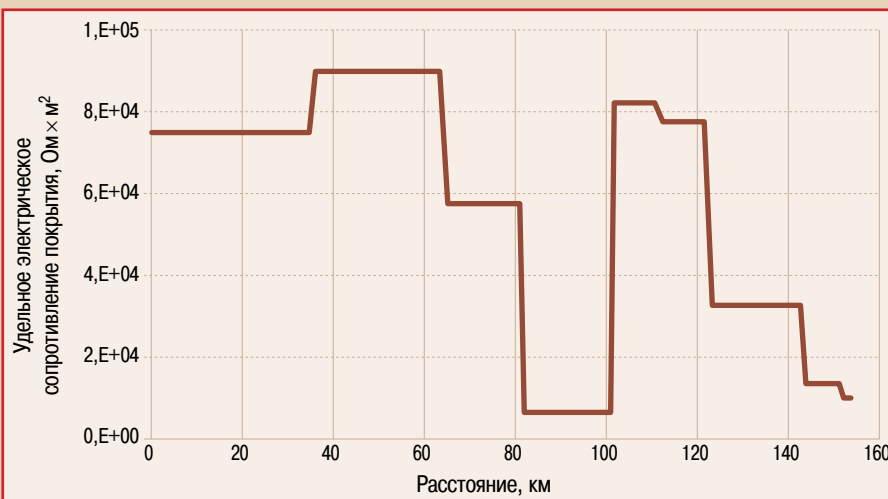
$$I_{зз} = \frac{R_t}{R_{зз}} I_k = D \times I_k, I_{СКЗ} = (1+D) \times I_k \quad (10)$$

В соответствии с (7) – (10) минимизируемую функцию (1) можно представить:

$$\left\{ \sum P_i \right\}_{\min} = \left\{ \sum_{k,i} [R_{t,i} + D^2 R_{зз,i} + (1+D)^2 R'_{A3,i}] \right\}_{\min} \quad (11)$$

Таким образом, алгоритм оптимизации режимов СКЗ участка МТ включает следующие шаги:

- Необходимо из данных обследования получить: распределение разности потенциалов «труба – земля» вдоль трассы, значения токов СКЗ, которые обеспечивают эти потенциалы, а также данные о распределении токов СКЗ между трубопроводом и защитным заземлением системы электробезопасности. Кроме того, данные о диаметре, толщине стенок трубы, глубине заложения трубопровода, координатах точек дренажа и расположения АЗ.
- На основании данных о распределении разности потенциалов и токов СКЗ рассчитать распределение удельного электрического сопротивления изоляции по участкам, которые в даль-



**Рис. 4. Расчетные значения удельного электрического сопротивления изоляционного покрытия**

**Таблица. Начальные и оптимальные параметры СКЗ**

Показатели	Исходная регулировка					Результат оптимизации				
	СКЗ 1	СКЗ 2	СКЗ 3	СКЗ 4	Сумма	СКЗ 1	СКЗ 2	СКЗ 3	СКЗ 4	Сумма
Ток СКЗ, А	12,9	13,7	11,2	14,7	52,5	10,1	12,7	10,8	7,9	47,5
Напряжение СКЗ, В	13,0	7,0	7,3	7,0	–	10,2	6,5	7,0	3,8	–
Мощность, Вт	167,4	96,0	82,1	102,8	448,2	102,2	82,3	75,7	29,7	289,8

Все расчеты проведены с использованием EXCEL 2007, без привлечения других программ.

нейшем используются как центры дискретизации (N участков).

- Полученную информацию использовать для записи модели трубопровода в виде системы, состоящей из 3N уравнений (4). Подставив в модель токи защиты СКЗ ( $I_{k,i}$ ), найти распределение разности потенциалов «труба – земля» и проверить адекватность модели, сравнив данные наблюдений и расчета. В случае достаточной сходимости результатов рассчитать с помощью модели коэффициенты систем уравнений (3) и (3а), необходимые для расчета разности потенциалов «труба – земля». Коэффициенты рассчитываются применительно к токам защиты  $I_{k,i}$ .

- Из полученных 3N + M уравнений для расчета разности потенциалов «труба – земля» выбирают лишь те, которые определяют значения в точках минимального и максимального значений потенциалов на участках между СКЗ (при необходимости добавляют соседние точки). Обычно количество таких точек – от 2 (M+1) до 3 (M+1). Эти уравнения используются для формирования системы неравенств (2).

- Проводится минимизация функции (11) при соблюдении неравенств (2), в результате которой определяются защитные токи  $I_{k,i}$  и в соответствии с (10) – токи СКЗ  $I_{СКЗ}$ . Соответственно опреде-

ляются напряжения и мощность СКЗ. Приведенный алгоритм применен для оптимизации системы ЭХЗ участка трубопровода протяженностью 153 км, защищенного четырьмя СКЗ, расположенными на 6-м, 64-м, 101-м и 143-м км трассы. Диаметр трубопровода – 1,02 м, расстояние от трубопровода до АЗ составило 200 м. Данные о распределении разности потенциалов «труба – земля», полученные при обследовании, приведены на рисунке 3 (наблюдаемые значения). Защитные токи СКЗ определялись отдельно в левом и правом плечах защиты. Ток, натекающий на защитное заземление, определялся как разность токов защиты и общего тока СКЗ. При определении токов каждой СКЗ учитывалось влияние токов соседних СКЗ путем измерения тока в плечах СКЗ при ее отключении.

Удельное сопротивление изоляционного покрытия рассчитывалось для каждого плеча защиты как отношение средней наложенной разности потенциалов «труба – земля» к средней плотности защитного тока данного плеча.

$$R_{из,i} = \Delta \bar{U}_{k,i} / J_{k,i} \quad (12),$$

где  $J_{k,i} = I_{k,i} / \pi d L_i$  – средняя плотность тока на одном из плеч участка l.

Полученные значения  $R_{из,i}$  приведены на рисунке 4.

Подставив  $R_{из,i}$  и токи защиты  $I_{k,i}$  в модель (4), рассчитали значения разности потенциалов «труба – земля», представленные на рисунке 3 (аппроксимация наблюдений). Коэффициент корреляции наблюдаемых и рассчитанных разностей потенциалов «труба – земля» оказался равным 0,92, что позволяет рассчитывать на применимость модели для оптимизации параметров СКЗ. Рассчитав с помощью модели (4) коэффициенты уравнений (3) и (3а), сформировали систему неравенств (2) и провели минимизацию функции (11) методом обобщенного приведенного градиента. Начальные и оптимальные параметры СКЗ приведены в таблице. Распределение разности потенциалов «труба – земля» в оптимальном режиме приведено на рисунке 3 (оптимальный режим).

Из таблицы следует, что в результате оптимизации мощность снизилась на 35%, но в абсолютном измерении снижение на 150 Вт не столь убедительно. Это объясняется тем, что рассматриваемый трубопровод находился в эксплуатации непродолжительное время и имел достаточно качественное изоляционное покрытие и АЗ с малым сопротивлением растекания.

### Литература:

- Приказ Федеральной службы по тарифам от 30.03.2012 № 214-э «Об установлении требований к программам в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности субъектов естественных монополий, оказывающих услуги по транспортировке газа по магистральным газопроводам».
- Фатрахманов Ф.К., Винокурцев Г.Г. Определение оптимальных параметров установок катодной защиты при защите коммуникаций промплощадок. Защита технологического оборудования от коррозии // Сборник трудов ВНИПИГАЗ. – Баку: ВНИПИГАЗ, 1983.
- Винокурцев А.Г. и др. Новые технические средства для исследования эффективности электрохимической защиты систем городского газоснабжения // Коррозия «Территории «НЕФТЕГАЗ», 2006, апрель.
- Р Газпром 9.4-006-2009 «Инструкция по электрометрическому обследованию подземных технологических трубопроводов компрессорных станций».
- Ткаченко В.Н. Электрохимическая защита трубопроводов. – Волгоград, 2005.
- 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.