

ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ НА ОСНОВАНИИ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Объектом данного исследования являются стальные магистральные газопроводы предприятия «Лентрансгаз» в Ленинградской области. В процессе эксплуатации газопроводов весьма важным является контроль их состояния. В результате теоретических исследований разработана физико-математическая модель геоэлектрической системы газопровод – грунт, которая описывает распределение плотности тока утечки катодной защиты в около-трубном пространстве на основании решения обратной задачи электрометрии. При решении обратной задачи по данным наземных измерений определяются токи утечки, значения которых в достаточно точной мере характеризуют состояние трубопровода.

The object of the given research is steel cross-country gas pipelines of the Lentransgaz Company in the Leningrad region. Status monitoring is important in operation of gas pipelines. As the result of theoretical research a physical and mathematical model of the pipeline-ground geoelectric system was developed, which describes distribution of surface-leakage current densities in the cathodic protection system basing on the inverse electrometric problem solution. By solving the inverse electrometric problem immediate surface-leakage currents are determined according to ground measurements, which magnitude characterizes the pipeline condition rather exactly.

Проектный срок эксплуатационной надежности магистральных газопроводов не превышает 25 лет. Для увеличения срока их безотказной работы используют катодную защиту. Несмотря на это, аварии на трубопроводах происходят довольно часто. Для принятия инженерных решений по увеличению срока эксплуатации трубопроводов необходимо знать реальное состояние подземных коммуникаций. При эксплуатации трубопроводов необходимы постоянные наблюдения за их техническим состоянием, своевременное выявление коррозионно-опасных участков и их ремонт.

Для контроля состояния газопроводов и оценки степени их коррозионной опасности сотрудниками СПГИ (ТУ) под руководством профессора О.Ф.Путикова был разработан специальный комплекс технического диагностирования, основанный на геоэлектрохимических и электрометрических методах. Комплекс электрометрических методов включает измерения стационарных

электрических и магнитных компонент электромагнитного поля и поляризационных потенциалов газопровода в грунте с включенной и выключенной катодной защитой.

Электрометрическим исследованиям отводится вспомогательная роль, связанная с обнаружением участков газопровода, где наблюдаются геоэлектрические условия, сопутствующие развитию электрохимической коррозии металла труб. Данные комплексных электрометрических исследований обеспечивают надежное выявление мест и оценку степени нарушения изоляционного покрытия газопроводов. Поэтому электрометрические материалы рассматриваются в качестве вспомогательных и необходимых для выбора мест проведения и интерпретации данных геоэлектрохимических исследований. Электрохимические процессы, сопутствующие коррозии, определяются электрическими токами различной природы, протекающими в грунте. Поэтому главная задача электрометрических

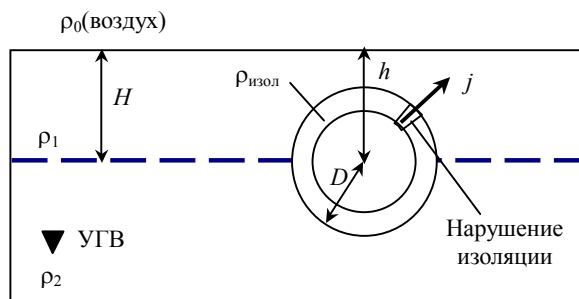


Рис. 1. Модель трубопровода с нарушением изолирующего слоя в двухслойной вмещающей среде

исследований сводится к определению плотности электрических токов в околотрубном пространстве.

Определить пространственное распределение плотности тока j в околотрубном пространстве по данным электрометрических наблюдений, выполненных на дневной поверхности над газопроводом, возможно на основании решения обратной задачи электрометрии. Исходными данными являются априорная информация о газопроводе и результаты полевых электрометрических наблюдений.

Для решения этой задачи рассмотрим комплексную геоэлектрическую модель, включающую описание как трубопровода, так и вмещающего его геологического разреза. Модель геологического разреза представим в виде горизонтально-слоистой двухслойной среды. Отличия геоэлектрических свойств слоев определяются изменением состава или степени водонасыщенности слагающих их грунтов. На практике эта граница обычно соответствует положению уровня грунтовых вод. Увеличивать количество слоев в рассматриваемой модели нецелесообразно, так как трубопровод имеет обычно неглубокое заложение в грунтах, представленных двумя литологическими разностями: поверхностными и коренными геологическими отложениями.

Модель трубопровода, покрытого изолирующим слоем и расположенного в двухслойной вмещающей среде, имеет в сечении вид, представленный на рис.1. Величины ρ_1 и ρ_2 являются удельными электрическими сопротивлениями верхнего и нижнего слоя грунта соответственно. Граница раздела

этих слоев находится на глубине H . Ось трубопровода, имеющего диаметр D , располагается на глубине h . Величина $\rho_{\text{изол}}$ определяет удельное электрическое сопротивление изоляции трубопровода. В связи с различным состоянием изоляции значения $\rho_{\text{изол}}$ считаются переменными.

Плотность тока утечки катодной защиты j зависит от качества изоляции, т.е. от $\rho_{\text{изол}}$. Относительное изменение плотности тока по окружности трубы служит характеристикой качества изоляции по окружности. Очевидно, что это изменение зависит от значений ρ_1 или ρ_2 вмещающей среды в точке вытекания (втекания) тока и ее пространственного положения относительно границ раздела.

Переменная составляющая электрического тока, текущего вдоль трубы во вмещающей среде и непосредственно по трубе, создает на поверхности только поле, параллельное оси трубы, т.е. поперечная составляющая отсутствует. Наличие поперечной составляющей тока является прямым свидетельством утечки через изоляцию и определяется по поперечной составляющей электрического поля. При этом равномерное ее распределение вдоль оси говорит об общем износе изоляции, а локальные аномалии – о пробоях и повреждениях.

Введем коэффициент, равный отношению поперечного и продольного градиентов электрического потенциала катодной защиты в околотрубном пространстве. Эта величина характеризует качество изоляции покрытия трубопровода и может быть условно определена как эффективный коэффициент утечки тока катодной защиты:

$$\delta_e = \frac{\Delta U_n}{\Delta U_t}, \quad (1)$$

где ΔU_n и ΔU_t – нормальная (перпендикулярная) и тангенциальная (продольная) к оси трубопровода разность потенциалов электрического поля соответственно (при постоянном расстоянии между измерительными электродами).

Для идеально изолированной трубы этот коэффициент равен нулю. Он растет

при старении изоляции. Связь его конкретных значений с общепринятыми грациями качества изоляции следует определять индивидуально для каждого протяженного участка трубопровода по данным пробных вскрытий.

Для изучения геоэлектрохимических процессов важнее знать реальную плотность токов утечки. Она определяет интенсивность и направленность геоэлектрохимических процессов на поверхности металла. Определение реальной плотности тока на поверхности изолированной трубы по данным наземных измерений является классической обратной задачей геофизики.

Представим в упрощенном виде геоэлектрическую модель вертикального сечения трубопровода со стекающими с нее токами утечки, значения которых подлежат определению по данным измерений на поверхности. Для этого разместим равномерно шесть источников тока на поверхности по окружности трубопровода (рис.2). Эти источники соответствуют местам локальных утечек тока катодной защиты (ТКЗ).

Предположим для определенности, что все источники, кроме источника 4, находятся в верхнем слое. Заметим, что граница, разделяющая слои, может располагаться как ниже всех источников, так, и наоборот, выше.

Дискретное расположение точек утечки по углам правильного шестиугольника представляется практически вполне достаточным для восстановления реальной картины непрерывного распределения токов по окружности трубы. Определив по данным наземных наблюдений градиентов электрического поля конкретные значения токов утечек в этих узлах, нетрудно вычислить

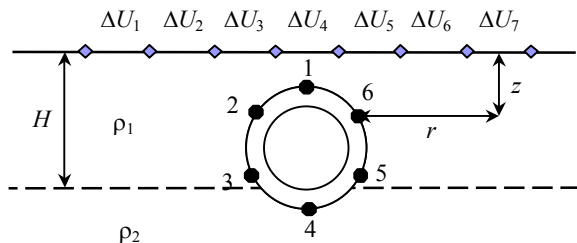


Рис.2. Модель размещения источников тока, соответствующих местам локальных утечек ТКЗ, и схема измерений приращения потенциала ΔU на поверхности

непрерывное распределение токов по окружности трубопровода методами интерполяции.

Для решения задачи определения этих токов строгими математическими методами достаточно выполнить семь измерений приращения потенциала на поверхности земли перпендикулярно оси трубопровода. Обратная задача электротометрии при известных значениях глубины и диаметра трубопровода в этом случае решается однозначно. Оптимальный шаг измерений градиента электрического поля на поверхности целесообразно выяснить экспериментально в полевых условиях, руководствуясь тем, что по данным полевых наблюдений особенности электрического поля (экстремумы) трубопровода должны быть определены.

Потенциал источника n , находящегося в верхнем слое двухслойной среды,

$$U_{n1}(r, z) = \frac{J_n \rho_1}{4\pi} \left\{ \frac{1}{\sqrt{r_n^2 + (z - z_n)^2}} + \frac{1}{\sqrt{r_n^2 + (z + z_n)^2}} + \sum_{i=1}^{\infty} k_{21}^i \left[\frac{1}{\sqrt{r_n^2 + (z - z_n - 2iH)^2}} + \frac{k_{21}}{\sqrt{r_n^2 + (z + z_n + 2iH)^2}} + \frac{1}{\sqrt{r_n^2 + (z + z_n - 2iH)^2}} + \frac{1}{\sqrt{r_n^2 + (z - z_n + 2iH)^2}} \right] \right\}, \quad (2)$$

где $n = 1, 2, 3, 5, 6$; J_n – ток в n -м источнике; r_n – расстояние по горизонтали от n -го источника; z – глубина точки измерения; $k_{21} = (\rho_2 - \rho_1) / (\rho_2 + \rho_1)$ – коэффициент отражения источников.

Соответственно потенциал источника $n = 4$, находящегося в нижнем слое двухслойной среды,

$$U_{n21}(r, z) = \frac{J_n \rho_2}{4\pi} (1 - k_{21}) \times \sum_{i=0}^{\infty} k_{21}^i \left[\frac{1}{\sqrt{r_n^2 + (2iH + z_n + z)^2}} + \frac{1}{\sqrt{r_n^2 + (2iH + z_n - z)^2}} \right]. \quad (3)$$

Для нахождения потенциалов, измеряемых на поверхности, в формулах (2) и (3)

полагаем $z = 0$. При $z \neq 0$ формулы (2) и (3) нужны для вычисления поля непосредственно в околотрубном пространстве. После нахождения токов по данным поперечных наземных измерений, их непрерывно пропорционально интерполируют по всей окружности.

Распределение токов по нескольким сечениям путем решения соответствующей

системы линейных уравнений дает пространственную картину токов утечки и возможность оценки распределения по поверхности вдоль оси трубы.

По полученным таким образом данным легко вычислить значения плотности токов утечки во вмещающей среде. Эти сведения необходимы для определения степени интенсивности электрохимических процессов, происходящих в околотрубном пространстве под действием утечки ТКЗ.

Научный руководитель д.т.н. проф. *В.В.Глазунов*