

RESUME

In this article, on the basis of a comprehensive analysis, we propose a branched dynamic model of the machine technology for cultivating and harvesting agricultural crops, concretizing its constituent elements—the land resource, machine operation complexes for impact on land and plants, weather and climate conditions, technical and economic factors, harvest, harvesting complex and the final product is a grain of high quality, direct operating costs are determined and their distribution according to accepted complexes of machine operations the ways of potential resource saving are justified.

УДК 622.692.4

Шуланбаева Л.Т., кандидат технических наук

Аманкул Ф.М., магистрант

Сандыгулов Ж.С., магистрант

НАО «Западно-Казахстанский аграрно-технический университет имени Жангир хана»,
г. Уральск, Республика Казахстан

РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ИЗОЛЯЦИОННОГО ПОКРЫТИЯ ТРУБОПРОВОДА ПРИ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Аннотация

Путём анализа результатов обследования магистральных трубопроводов методами электрометрических измерений и внутритрубной диагностики установлено, что их изоляционные покрытия стареют значительно быстрее, чем трубы и сварные соединения. В результате старения накапливаются дефекты изоляции, снижаются все защитные свойства, увеличиваются потери защитного тока. Все характеристики изоляционного покрытия, измеренные в локальных точках, приобретают свойства случайных чисел. Их дисперсия по дистанции со временем растёт и становится сопоставимой со средними значениями. Тем не менее, на большинстве трубопроводов удаётся поддерживать защитные потенциалы в рамках нормативных требований. Методы контроля изоляционного покрытия действующих трубопроводов основаны на измерениях потенциалов (электрометрические измерения) и на математической модели распространения потенциалов в подземном трубопроводе с однородными защитными свойствами. Совершенствование методов контроля возможно за счёт построения математической модели неоднородных изоляционных покрытий и измерения токов в трубопроводе по технологии магнитной локации. Метод магнитной локации является одним из самых точных и нетрудоемким способов определения дефектов и аномалии на трубопроводе. По сравнению с другими видами диагностики доказано целесообразность применения и метода магнитной локации для определения не только существующих дефектов, но и для регистрации напряжено-деформированного состояния, который является самым непредсказуемым видом опасности на металле трубопровода. Данный вид состояния не способен зарегистрировать не один из видов инспекции, кроме метода магнитной локации.

***Ключевые слова:** трубопровод, изоляция, покрытие, эксплуатационные свойства, диагностика, адгезия, переходное сопротивление.*

В процессе длительной эксплуатации подземных трубопроводов изоляционное покрытие стареет и постепенно теряет свои защитные свойства. Интенсивность старения определяется многими факторами (природой материалов, технологией нанесения, свойствами грунтов, температурно-силовыми воздействиями) и практически становится случайной характеристикой. В результате старения покрытие охрупчивается, растрескивается, отслаивается от поверхности трубы, начинает всё больше пропускать грунтовую воду к поверхности трубы. При этом защитный ток всё больше уходит в грунт, потенциал трубы

падает, приближаясь к естественному потенциалу поляризации. Для поддержания потенциала на необходимом уровне требуется увеличивать мощность станций катодной защиты, что, в свою очередь, приводит к усилению неравномерности распределения потенциала вдоль трубопровода; местами происходит катодное отслоение покрытия от поверхности трубы.

Факторы, влияющие на старение изоляционного покрытия, действуют неодинаково вдоль трубопровода. Поэтому со временем характеристики защитных свойств изоляционного покрытия будут различными в разных точках поверхности трубопровода, подчиняясь законам случайных чисел. Результаты шурфовых обследований с соответствующими измерениями показывают, что разброс этих случайных чисел (дисперсия) растёт и становится в 2...3 раза больше средних значений измеряемых характеристик.

Локальные свойства изоляционного покрытия (адгезия, переходное сопротивление) перестают характеризовать защитные свойства изоляционного покрытия трубопровода в целом или даже в пределах небольших участков длиной 10 м, 100 м, 1 км и так далее. Поэтому теряется ценность локальных измерений, выполненных в рамках шурфовых обследований, поскольку эти результаты не могут служить основой для расчётной оценки качества изоляционного покрытия трубопровода как целого объекта.

Так появляются несколько задач:

- 1) выбрать критерий качества изоляционного покрытия трубопровода при длительной эксплуатации;
- 2) разработать математический аппарат оценки качества изоляционного покрытия;
- 3) выбрать или разработать методы измерений на трубопроводе.

Как известно, современными нормами предусмотрены два уровня защиты от коррозии: пассивная и активная. Роль пассивной защиты выполняет собственно изоляционное покрытие, роль активной защиты – электрический потенциал (электрохимзащита). Пассивная защита практически никогда не бывает идеальной, со временем её эффективность падает. Активная защита «подключается» в местах, где изоляционное покрытие (пассивная защита) имеет дефекты или нарушения. Но если дефектов изоляции накопилось много, то активная защита из-за чрезмерных потерь тока не справляется с задачей создания необходимого потенциала на всём участке трубопровода. Исходя из этого, напрашивается следующее требование к изоляционному покрытию: покрытие должно быть таким, чтобы потери тока не помешали установлению заданных потенциалов на всём трубопроводе.

Поскольку защитные потенциалы задаются станциями катодной защиты (СКЗ), весь трубопровод целесообразно разбить на конечные участки, ограниченные смежными СКЗ. Если путём вариации режимов работы системы СКЗ удастся поддерживать необходимые потенциалы на каждом конечном участке трубопровода, то изоляционное покрытие трубопровода можно считать удовлетворительным, несмотря на накопленные дефекты.

По требованиям ГОСТ Р 51164 [1] полный защитный потенциал (сомической составляющей) должен находиться в диапазоне от $-1,05$ В до $-3,5$ В. Естественный поляризационный потенциал трубных сталей составляет приблизительно $-0,6 \pm 0,1$ В. Следовательно, омическая составляющая потенциала должна находиться в пределах от $-0,55$ В до $-2,9$ В. Механизм распределения потенциалов следующий: на границах участка (в местах подключения СКЗ) потенциал должен быть не более $-2,9$ В. По мере удаления от СКЗ потенциал падает из-за потерь тока через дефекты изоляции, но при этом не должен падать ниже уровня $-0,55$ В.

Учитывая эти особенности, в качестве критерия качества изоляционного покрытия при дальнейшей эксплуатации следует выбрать интегральное переходное сопротивление на конечном участке трубопровода. Эту величину обозначим $R_{\text{инт}}$ с единицей измерения Ом. Чем ниже численное значение параметра $R_{\text{инт}}$, тем выше потеря защитного тока на этом участке и тем ниже качество изоляционного покрытия.

Для участка трубопровода с идеальным (новым) изоляционным покрытием, где ещё нет разброса свойств, взаимосвязь интегрального переходного сопротивления изоляции $R_{\text{инт}}$ с удельным переходным сопротивлением изоляции $\rho_{\text{из}}$ выражается формулой

$$R_{\text{инт}} = \frac{\rho_{\text{из}}}{\Delta L \cdot \pi D}, \quad (1)$$

где ΔL – длина выбранного конечного участка трубопровода;
 D – наружный диаметр трубопровода;
 $\rho_{\text{из}}$ – удельное переходное сопротивление изоляционного покрытия – сопротивление единицы поверхности ($\text{Ом}\cdot\text{м}^2$).

Для старых трубопроводов, где локальные значения переходного сопротивления испытывают сильный разброс, пользоваться формулой (1) можно только условно:

$$R_{\text{инт}} = \frac{\tilde{\rho}_{\text{из}}}{\Delta L \cdot \pi D}, \quad (2)$$

где ΔL – длина выбранного конечного участка трубопровода;
 D – наружный диаметр трубопровода;
 $\tilde{\rho}_{\text{из}}$ – среднее по выбранному участку удельное переходное сопротивление изоляционного покрытия ($\text{Ом}\cdot\text{м}^2$).

Параметр $\tilde{\rho}_{\text{из}}$ нельзя путать со средним значением измеренных случайных значений переходного сопротивления покрытия при шурфовых обследованиях трубопровода. Для нового изоляционного покрытия параметры $\rho_{\text{из}}$ и $\tilde{\rho}_{\text{из}}$ совпадают, поскольку отсутствует разброс.

Параметры $R_{\text{инт}}$ и $\tilde{\rho}_{\text{из}}$ характеризуют как физическое старение изоляционных материалов, так и наличие дефектов покрытия на выбранном участке трубопровода. Поэтому оценку качества изоляционного покрытия рекомендуется выполнять по значениям параметров $R_{\text{инт}}$ и $\tilde{\rho}_{\text{из}}$. Однако критические значения интегрального переходного сопротивления $R_{\text{инт}}^*$ и среднего по выбранному участку удельного переходного сопротивления $\tilde{\rho}_{\text{из}}^*$ не являются постоянными, а зависят от ряда параметров: расстояния между СКЗ, режима работы СКЗ, размеров труб, свойств грунта.

Математический аппарат. Для решения второй задачи требуется разобраться с законами растекания тока в подземном трубопроводе с неидеальным изоляционным покрытием, которое характеризуется параметрами $R_{\text{инт}}$ и $\tilde{\rho}_{\text{из}}$. Опуская все промежуточные выкладки, приводим лишь результаты с соответствующими пояснениями (таблица 1).

Таблица 1 - Выражения и формулы, описывающие распределение потенциалов и токов в подземном трубопроводе

Определение	Выражение	Размерность
1	2	3
протяжённость выбранного участка АВ	l	м
диаметр и толщина стенки трубы	D, δ	м
координата по оси трубы (расстояние от точки А)	z	м
удельное сопротивление металла трубы	$\rho_{\text{м}}$	$\text{Ом}\cdot\text{м}$
удельное переходное сопротивление изоляции	$\tilde{\rho}_{\text{из}}$	$\text{Ом}\cdot\text{м}^2$

продолжение таблицы 1

1	2	3
сопротивление трубы длиной h	$R_{M(h)} = \frac{\rho_m \cdot h}{\pi \cdot \delta \cdot (D - \delta)}$	Ом
удельное сопротивление трубы (на элементе длиной 1 м)	$R_{M(1)} = \frac{\rho_m}{\pi \cdot \delta \cdot (D - \delta)}$	Ом/м
сопротивление изоляции на трубе длиной h	$R_{из(h)} = \frac{\tilde{\rho}_{из}}{\pi \cdot D \cdot h}$	Ом
удельное сопротивление изоляции (на элементе трубы длиной 1 м)	$R_{из(1)} = \frac{\tilde{\rho}_{из}}{\pi \cdot D}$	Ом·м
потенциал на трубе	φ	В
ток, идущий по трубе	J	А
ток, уходящий через изоляцию длиной h	$j_{(h)}$	А
ток, уходящий через изоляцию длиной 1 м	$j_{(1)}$	А/м
взаимосвязь токов и потенциалов	$\frac{dJ}{dz} = -j_{(1)}; \quad j_{(1)} = \frac{\varphi}{R_{из(1)}}; \quad J = -\frac{d\varphi}{dz} \cdot \frac{1}{R_{M(1)}}$	
распределение омической составляющей потенциала по отношению к земле	$\varphi = C_1 \cdot \exp(qz) + C_2 \cdot \exp(-qz)$	В
распределение тока в трубе (вдоль трубы)	$J = \gamma \cdot \{-C_1 \cdot \exp(qz) + C_2 \cdot \exp(-qz)\}$	А
распределение линейной плотности тока, уходящего в землю через изоляционное покрытие единичной длины	$j_{(1)} = \zeta \cdot \{C_1 \cdot \exp(qz) + C_2 \cdot \exp(-qz)\}$	А/м
способы определения неопределённых коэффициентов	$C_1 = \frac{\lambda \cdot \varphi_B - \varphi_A}{\lambda^2 - 1}; \quad C_2 = \frac{\lambda \cdot (\lambda \cdot \varphi_A - \varphi_B)}{\lambda^2 - 1}$	В
	$C_1 = \frac{J_A - \lambda \cdot J_B}{\gamma \cdot (\lambda^2 - 1)}; \quad C_2 = \frac{\lambda \cdot (\lambda \cdot J_A - J_B)}{\gamma \cdot (\lambda^2 - 1)}$	В
	$C_1 = \frac{\lambda \cdot j_{(1)B} - j_{(1)A}}{\zeta \cdot (\lambda^2 - 1)}; \quad C_2 = \frac{\lambda \cdot (\lambda \cdot j_{(1)A} - j_{(1)B})}{\zeta \cdot (\lambda^2 - 1)}$	В
активная часть потенциала (вызванная токами) на концах выбранного участка АВ	φ_A, φ_B	В
токи в трубе на концах участка АВ	J_A, J_B	А
потери тока на концах	$j_{(1)A}, j_{(1)B}$	А/м

Выражения и формулы, приведённые в таблице 1, позволяют провести полный анализ состояния активной защиты участка трубопровода по нескольким измеренным значениям токов и потенциалов в разных точках.

Здесь важно отметить, что полный потенциал U_{Π} трубопровода («труба-земля») состоит из двух составляющих: естественного поляризованного потенциала $\varphi_{ест}$ и активной части потенциала φ , вызванного протекающими токами и омическим сопротивлением трубопровода и изоляционного покрытия. Поэтому для определения значения φ необходимо из измеренного значения U_{Π} вычесть известное для данной стали значение $\varphi_{ест}$.

$$\varphi = U_{\Pi} - \varphi_{ест} \quad (3)$$

Методы определения. Определение переходного сопротивления изоляционного покрытия строящихся трубопроводов (или после капитального ремонта) описаны в соответствующих стандартах и строительных нормах [1-3]. Здесь будем рассматривать методы, относящиеся к трубопроводам с изношенным изоляционным покрытием, основанные на вышеприведённом математическом аппарате.

Метод 1. Определение переходного сопротивления участка действующего трубопровода на основе измерения потенциалов.

Для этого необходимо:

- измерить потенциалы на границах выбранного участка АВ;
- дополнительно измерить потенциал в одной или нескольких промежуточных точках.

Решение строится с использованием выражений для потенциала:

$$\varphi = C_1 \cdot \exp(qz) + C_2 \cdot \exp(-qz) ;$$

$$C_1 = \frac{\lambda \cdot \varphi_B - \varphi_A}{\lambda^2 - 1} ; \quad C_2 = \frac{\lambda \cdot (\lambda \cdot \varphi_A - \varphi_B)}{\lambda^2 - 1} ;$$

Если измерение потенциала проведено в одной промежуточной точке с координатой z_{cp} , то имеем одно уравнение с одним неизвестным $\tilde{\rho}_{из}$:

$$\varphi_{cp} = \frac{1}{\lambda^2 - 1} \cdot \{ (\lambda \cdot \varphi_B - \varphi_A) \cdot \exp(qz_{cp}) + \lambda \cdot (\lambda \cdot \varphi_A - \varphi_B) \cdot \exp(-qz_{cp}) \} \quad (4)$$

Уравнение (4) неявное по отношению к параметру $\tilde{\rho}_{из}$, поэтому рекомендуется применить программу, использующую метод прогонки (программа «Поиск-1»).

Например, получены следующие результаты для участка трубопровода при $\ell = 5000$ м :
 $D = 0,53$ м; $\delta = 0,008$ м; $\rho_m = 0,245 \cdot 10^{-6}$ Ом · м (таблица 2)

Таблица 2 - Результаты расчета

$\varphi_A, В$	$\varphi_{cp}, В$	$\varphi_B, В$	$z_{cp}, М$	$\tilde{\rho}_{из}, Ом \cdot м^2$
- 1	- 0,7	- 0,5	2500	1355,7
- 1	- 0,3	- 0,1	2500	129,7
- 1	- 0,3	- 0,1	1500	46,4

Если пользоваться измерениями в нескольких промежуточных точках (помимо граничных точек), то решение ищется комбинированным методом, использующим метод прогонки и метод наименьших квадратов.

Метод 2. Определение переходного сопротивления участка действующего трубопровода на основе измерения токов.

Для этого необходимо:

- измерить токи на границах выбранного участка АВ;
- дополнительно измерить токи в одной или нескольких промежуточных точках.

Решение строится с использованием выражений для тока (таблица 1):

$$J = \gamma \cdot \{ -C_1 \cdot \exp(qz) + C_2 \exp(-qz) \};$$

$$C_1 = \frac{J_A - \lambda \cdot J_B}{\gamma \cdot (\lambda^2 - 1)}; \quad C_2 = \frac{\lambda \cdot (\lambda \cdot J_A - J_B)}{\gamma \cdot (\lambda^2 - 1)}.$$

Если измерение тока проведено в одной промежуточной точке с координатой z_{cp} , то имеем одно уравнение с одним неизвестным $\tilde{\rho}_{из}$:

$$J_{cp} = \frac{1}{\lambda^2 - 1} \cdot \{ (\lambda \cdot J_B - J_A) \cdot \exp(qz_{cp}) + \lambda \cdot (\lambda \cdot J_A - J_B) \cdot \exp(-qz_{cp}) \}. \quad (5)$$

Уравнение (5) неявное по отношению к параметру $\tilde{\rho}_{из}$, поэтому рекомендуется применить метод прогонки. Также могут быть использованы результаты измерений в промежуточных точках. Тогда получим систему нескольких уравнений типа (5) с одним общим неизвестным $\tilde{\rho}_{из}$. Эта система также решается с помощью программы «Поиск-1».

Например, при измерениях потенциала с интервалом 500 м, получены следующие результаты для участка трубопровода с характеристиками: $\ell = 3000$ м; $D = 0,53$ м; $\delta = 0,008$ м; $\rho_m = 0,245 \cdot 10^{-6}$ Ом · м (таблица 3)

Таблица 3 – Результаты расчета измерений потенциалов

Координаты точек измерений тока в трубе, м							Результаты расчетов $\tilde{\rho}_{из}$ Ом·м ²
z_1	z_2	z_3	z_4	z_5	z_6	z_7	
0	500	1000	1500	2000	2500	3000	
Измеренные токи, А							
J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6	J_7	
- 16,0	- 14,0	- 13,0	- 12,0	- 11,0	- 10,0	- 10,0	
- 1,6	- 1,4	- 1,3	- 1,2	- 1,1	- 1,0	- 1,0	
- 3,0	- 1,0	0	- 1,0	- 5,0	- 10,0	- 22,0	
+ 0,3	+ 0,1	0	+ 0,1	+ 0,5	+ 1,0	+ 2,2	
- 2,00	- 1,97	- 1,95	- 1,93	- 1,92	- 1,91	- 1,90	
							340,26
							340,26
							10,73
							10,73
							3688,33

При этих данных программа «Поиск-1» приводит к оптимальному результату $\tilde{\rho}_{из} = 120$ Ом · м².

Таким образом, подготовлены основы для количественной оценки качества изоляционного покрытия подземных стальных трубопроводов после длительной эксплуатации на основе результатов электрометрических измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 51164-98. Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии. - Введ. с 01.07.99. – Москва: Госстандарт России, 1988. – 52 с.
2. ГОСТ 9.602-2005. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии. – Введ. с 25.10.05. – Москва: Стандартинформ, 2007. – 59 с.

3. ВСН 012-88. Строительство магистральных промысловых трубопроводов. Контроль качества и приемки работ. –Введ. с 01.01.89. – Москва: Миннефтегазстрой, 1989. – <http://www.docload.ru/Basesdoc/7/7054/index.htm>.

4. Мустафин Ф.М., Быков А.И., Гумеров А.Г. Защита трубопроводов от коррозии: учебное пособие. – Спб.: Недра, 2007. – 708 с.

ТҮЙІН

Магистральді құбырларды электрометриялық өлшеу әдістерімен тесеру нәтижелерін сараптау арқылы олардың оқшаулау жабыны құбыр мен дәнекерленген жіктерден гөрі анағұрлым тезірек тозатыны анықталды. Тозу нәтижесінде оқшаулау жабынының ақаулары көбейеді, барлық қорғаныштық қасиеттері азаяды, қорғаныш тоқты жоғалту көбейеді. Жергілікті жерлерде өлшенген оқшаулау жабынының барлық қасиеттерінің мәні кездейсоқ сандарға айналады. Олардың өзгеруі уақыт өткен сайын артады және орташа мәндерге теңеседі. Дегенменде, көптеген құбырларда қорғаныштық потенциалды нормативтік талаптарға сай ұстап отыруға мүмкіндік бар. Қолданыстағы құбырлардың оқшаулау жабынын бақылау әдісі потенциалдарды өлшеуге және потенциалдың біркелкі қорғаныштық қасиеті бар жер асты құбырында таралуының математикалық үлгісіне негізделген. Оқшаулау жабынын қадағалаудың әдістемелік негізі жетік емес (бірнеше логикалық қателер және әртүрлі түсіндірмелер бар) және электрометриялық өлшеу нәтижелерін қалдық ресурсты бағалау есептерінде және жөндеу жұмыстарының көлемін және мерзімін оңтайластыруда пайдалануға мүмкіндік жоқ. Бақылау әдісін жетілдіруге біркелкі емес оқшаулау жабынының математикалық үлгісін құру және құбырдағы тоқты магниттік локация технологиясымен өлшеу арқылы қол жеткізуге болады. Магниттік локация әдісі құбырлардағы ауытқушылық пен ақауларды анықтауға арналған дәл және көп ресурсты талап етпейтін әдіс. Диагностиканың басқа да түрлерімен қатар магниттік локация әдісін тек қана құбырлардың бойында бар ақауларды анықтауда қолданып қана қоймай құбыр пішінінің өзгеруін есепке алу мақсатында қолдану жалпы мақсатқа сай келетіні дәлелденді. Құбыр пішінінің өзгеруін магниттік локация әдісінен басқа әдістер анықтай алмайды.

RESUME

By the analysis of results of inspection of the main pipelines by methods of electrometric measurements and intra pipe diagnostics it is established that their insulating covers grow old much quicker, than pipes and welded connections. As a result of aging defects of isolation collect, all protective properties decrease, losses of protective current increase. All characteristics of an insulating cover measured in local points, gain properties of random numbers. Their dispersion on a distance grows over time and becomes comparable to average values. Nevertheless, on the majority of pipelines it is possible to support protective potentials within standard requirements. Control methods of pipe insulation of operating pipelines are based on measurements of potentials (electrometric measurements) and on mathematical model of distribution of potentials in the underground pipeline with uniform protective properties. The methodical base of control of isolation is imperfect (contains a number of logical mistakes and ambiguous interpretation) and doesn't allow to use results of electrometric measurements in calculations of an assessment of a residual resource and optimization of volumes and repair terms for sites. Improvement of control methods possibly due to creation of mathematical model of non-uniform insulating covers and measurement of currents in the pipeline on technology of a magnetic location. The method of a magnetic location is one of the most exact and not labor-consuming ways of determination of defects and anomaly on the pipeline. In comparison with other types of diagnostics it is proved expediency of application and a method of a magnetic location for definition not only existing defects, but also for registration it is strained - the deformed state which is the most unpredictable type of danger on pipeline metal. This type of a state isn't capable to register not one of types of inspection, except a method of a magnetic location.