

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.311.22(075.8)

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОКРЫТИЯ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ЗАЩИТУ ОТ КОРРОЗИИ НАРУЖНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПОДЗЕМНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

В.Г. Киселев, Е.Н. Рузич

¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»,
г. Санкт-Петербург, Россия
kis_vg@mail.ru, rouzith@mail.ru

Резюме: В работе проведён сравнительный анализ влияния ряда основных факторов, определяющих характеристики диэлектрических покрытий, как на коррозию подземных металлических трубопроводов, так и на их катодную защиту. При этом установлено, что в качестве приоритетного направления при разработке покрытий для пассивной защиты от коррозии трубопроводов в грунте (без использования катодной защиты) необходимо выбрать работу по снижению электропроводности покрытий в результате их насыщения почвенным электролитом. В свою очередь, в качестве приоритетного направления при разработке покрытий для комбинированной защиты трубопроводов в грунте необходимо выбрать работы по увеличению механической прочности покрытий и осуществление комплекса мероприятий как по предотвращению образования дефектов изоляции, так и по их устранению.

Ключевые слова: электрохимическая коррозия, защита от коррозии, пассивная защита от коррозии, активная защита от коррозии, комбинированная защита от коррозии, защита от коррозии с использованием покрытий, катодная защита.

DOI: 10.30724/1998-9903-2018-20- 1-2 -80-89

DIELECTRIC COATINGS AND THEIR EFFECT ON CORROSION PROTECTION OF THE OUTER SURFACE OF UNDERGROUND PIPELINES

V.G. Kiselev¹, E.N. Ruzich¹

¹Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia
kis_vg@mail.ru, rouzith@mail.ru

Abstract: *This paper presents comparative analysis of influence of main factors, determining characteristics of dielectric coatings, both on the corrosion of underground metal pipelines and on their cathodic protection. At the same time, it was identified that, as a priority approach in the development of coatings to protect pipelines in the ground (without the use of cathodic protection), it is necessary to choose to reduce the electrical conductivity of the coatings as a result of their saturation with soil electrolyte. This measure significantly reduces the efficiency of corrosion elements that are likely to occur when dielectric coating is damaged. As for priority in the development of coatings for combined protection of pipelines in the ground, it is necessary to increase the mechanical strength of coatings and to implement a set of measures to prevent the formation of insulation defects and to eliminate them. Actions taken in this direction significantly reduce the amount of protective current necessary for active corrosion protection of underground metal structures.*

Keywords: *electrochemical corrosion, corrosion protection, passive corrosion protection, active corrosion protection, combined corrosion protection, corrosion protection with coatings, cathodic protection.*

Введение

При эксплуатации энергетического оборудования существенную роль играет его коррозионная стойкость. Срок службы, надежность, затраты на обслуживание инженерных систем в значительной степени определяются их защитой от коррозии, предусмотренной при проектировании этих объектов и реализуемой в процессе их строительства и эксплуатации [1]. Очевидно, что в этом случае особую актуальность приобретают мероприятия по антикоррозионной защите наружной поверхности трубопроводов, проложенных в грунте, где в настоящее время имеется множество проблем, связанных с преждевременным выходом подземных металлических коммуникаций (ПМК) из эксплуатации или авариях на них. Потребность в решении данного вопроса становится всё более заметной как для отдельных предприятий, так и для страны в целом, так как она напрямую увязана с обеспечением населения теплом, горячим водоснабжением, водой, электричеством и другими услугами. Основным направлением работ в этом случае являются различные технологии антикоррозионной защиты от почвенной коррозии или сопутствующих ей факторов агрессивности [2], среди которых в последнее время всё большую популярность завоевывают методы, связанные с использованием комбинированной защиты. В связи с этим в представленной работе на примере подземных металлических трубопроводов (ПМТ) рассмотрены основные причины, оказывающие влияние на процесс коррозии металла в грунте при наличии активной и/или пассивной защиты. Кроме того, проведён краткий анализ взаимодействия между собой отдельных элементов комбинированной защиты.

Диэлектрические покрытия и их влияние на скорость коррозии подземных металлических трубопроводов

Для пассивной защиты от коррозии наружных поверхностей трубопроводов используются различные материалы и их комбинации. В этом случае в первую очередь можно выделить металлические покрытия на основе различных металлов, и прежде всего цинка, которые обычно сочетаются с диэлектрическими покрытиями. Однако, как при комбинированной защите от коррозии, так и как самостоятельное антикоррозионное мероприятие часто используют однослойные или многослойные покрытия, изготовленные из различных искусственных материалов, среди которых принято выделять терморезистивные и термопластичные полимеры или их комбинации как между собой, так и с другими покрытиями. В настоящий момент все покрытия, используемые в нашей стране в промышленных масштабах для защиты подземных трубопроводов, должны соответствовать

действующим нормативным документам, среди которых необходимо выделить: ГОСТ Р 51164–98 (ГОСТ Р 51164–98. Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии. М.: Госстандарт России. 1998) и ГОСТ 9.602–2005 (ГОСТ 9.602–2005. Единая система защиты от коррозии и старения; Сооружения подземные; Общие требования к защите от коррозии. М.: «Стандартинформ», 2006). Разработка, проектирование, нанесение и эксплуатация антикоррозионных покрытий тепловых сетей регламентировано в частности РД 153–34.0–20.518–2003 (РД 153–34.0–20.518–2003. Типовая инструкция по защите трубопроводов тепловых сетей от наружной коррозии. М.: Издательство «Новости Теплоснабжения», 2002). Однако, как показывает практика, наличие нормативных документов не гарантирует эффективную пассивную защиту от коррозии подземных металлических трубопроводов. Абстрагируясь от организационных и экономических аспектов, сопровождающих проектирование, строительство и эксплуатацию подземных трубопроводов, остановимся на рассмотрении физико-химических причин, обуславливающих низкую защищённость отечественных ПМК от коррозии.

Как известно, коррозионный процесс, протекающий в грунте – это процесс электрохимической коррозии, при котором интегральную реакцию, протекающую преимущественно с участием кислорода в качестве деполяризатора, принято записывать в следующем виде:



Реакцию (1), в свою очередь, можно разбить на две составные части:

1) анодную



2) катодную



При этом очевидно, что последующее взаимодействие продуктов анодной и катодной реакции и обуславливает получение $\text{Fe}(\text{OH})_2$.

Простейший анализ реакций (2) и (3) показывает, что при значительной проницаемости покрытия по кислороду и воде коррозионный процесс возможен и под покрытием. Как показывает практика, скорость его в этом случае может достигать весьма значительных величин, а вид его принимать весьма причудливые формы [3; 4]. В то же самое время, при использовании покрытий из полиэтилена (низкого и высокого давления) или полипропилена уже при толщине покрытия 3,2 миллиметра, согласно теоретическим расчётам, скорость коррозии под покрытием становится равной 1 мкм/год. Практические испытания показали, что фактически данная скорость коррозии (пренебрежимо малая с технической точки зрения) достигается уже при толщине полиэтиленового покрытия в 1 миллиметр [5, с. 24–25].

Вторым важным фактором, определяющим скорость коррозионных процессов металлических трубопроводов, является электрическое сопротивление изоляционного покрытия. Действительно, в силу того, что при электрохимической коррозии возможна локализация анодных и катодных процессов в различных частях корродирующего металла, приводящая к формированию коррозионных элементов и связанной с ними локальной формы коррозии, существование дополнительного электрического сопротивления, обусловленного наличием диэлектрического покрытия, резко замедляет скорость данного вида разрушения металла. Следует отметить, что в этом случае и увеличение количества дефектов в системе пассивной защиты (до определённых пределов) будет работать в этом же направлении, т.е. способствовать снижению аварий по причине локальной коррозии ПМТ. Однако полностью решить данную проблему в реальных условиях эксплуатации трубопроводных систем, особенно в агрессивных грунтах, как показывает практика, таким способом невозможно. Вероятно, это обстоятельство и вызвало появление в качестве

дополнительного антикоррозионного мероприятия развитие системы катодной защиты трубопроводов, длительный опыт эксплуатации которой показал, что её работоспособность в значительной степени зависит от характеристик диэлектрического покрытия ПМТ. Остановимся на рассмотрении данного явления несколько подробнее в следующих разделах данной работы.

Диэлектрические покрытия и их влияние на функционирование системы катодной защиты подземных трубопроводов

Значение защитных покрытий для системы комбинированной защиты ПМТ трудно переоценить хотя бы в силу того, что их свойства напрямую оказывают влияние на такие важные параметры катодной защиты, как плотность защитного тока и общий защитный ток, а, следовательно, и на зону электрохимической защиты подземных трубопроводов. В свою очередь, зона защиты $2L$ при условии омического падения потенциала в ней равно 0,3 Вольта определяется следующей формулой [6, с. 94]:

$$2L = \sqrt{\frac{2,4l}{\rho_M j_s}}, \quad (4)$$

где j_s – плотность защитного тока; ρ_M – удельное сопротивление металла; l – толщина стенки трубопровода.

Простейший анализ соотношения (4) показывает, что протяжённость зоны защиты $2L$ зависит от двух параметров: ρ_M и l , определяемых электрическими свойствами металла трубопровода и толщиной его стенки, а все многообразие свойств покрытий, оказывающих влияние на зону катодной защиты трубопроводов, сводится к величине «плотность защитного тока». Последнее обстоятельство требует более детального рассмотрения вида данной зависимости. Этому способствует и то, как показывает практика [6, с. 82], что изменение плотности защитного тока при их катодной защите в грунте может меняться от 10^{-1} А/м² (трубопровод без покрытия) до 10^{-6} А/м² (трубопровод с современным полимерным, например полиэтиленовым покрытием), то есть в весьма широких пределах. Всё это вместе взятое требует рассмотрения свойств пассивной защиты, оказывающих влияние на плотность защитного тока. Для удобства анализа примем, что удельное сопротивление металла трубопровода ρ_M равно $0,18 \cdot 10^{-6}$ Ом·м, толщина его стенки l составляет 6 мм, а диаметр трубопровода d равен 321 мм. Известно, что в соответствии с критериями NACE [6, стр. 91] удельную плотность тока j_s в этом случае можно представить в следующем виде:

$$j_s = \frac{0,3[B]}{r_p}, \quad (5)$$

где r_p — удельное сопротивление покрытия. На более подробном анализе данного понятия мы остановимся несколько ниже.

В этом случае уравнение (4) можно переписать следующим образом:

$$2L = \sqrt{\frac{2,4lr_p}{0,3\rho_M}}. \quad (6)$$

После подстановки в соотношение (6) численных значений входящих в него величин, получаем следующую формулу:

$$2L = 5,164 \cdot 10^2 \sqrt{r_p}. \quad (7)$$

Рассмотрение проблемы влияния свойств диэлектрических покрытий на систему катодной защиты начнём с анализа их электрических свойств на примере однослойной изоляции из полиэтилена. Как известно, удельное сопротивление полиэтилена ρ_i в стандартных условиях определяется величиной порядка 10^{16} Ом·м [7, с. 130]. Однако в практике работы с изоляционными покрытиями вместо удельного электрического

сопротивления материала покрытия часто используют величину r_p , получившую название удельного сопротивления покрытия, которая имеет размерность Ом·м² и определяется следующей формулой:

$$r_p = AR, \quad (8)$$

где A – представляет собой площадь изолированной поверхности трубопровода, а R – общее сопротивление диэлектрического покрытия трубопровода.

Запишем хрестоматийное соотношение для определения сопротивления проводника через удельное сопротивление материала, из которого он изготовлен, применённое к изолирующему покрытию и его геометрические характеристики:

$$R = \rho_i \frac{s}{A}, \quad (9)$$

где s – толщина слоя диэлектрического покрытия.

Сравнение уравнений (8) и (9) позволяет использовать следующую формулу:

$$r_p = \rho_i s. \quad (10)$$

Уравнение (7) с учётом последнего соотношения даёт возможность рассчитать протяжённость зоны защиты трубопровода как функцию толщины покрытия. Проведём данные вычисления при условии $\rho_i = 10^{16}$ Ом·м для различных толщин покрытия, а результаты вычислений поместим в табл. 1. Кроме того рассчитаем плотность защитного тока и общий защитный ток системы. Для этой цели воспользуемся формулой (5) и следующим, хорошо известным в технике катодной защиты соотношением [6, стр. 93] для вычисления величины защитного тока:

$$I_0 = 2\pi dLj_s. \quad (11)$$

Результаты вычислений поместим в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчёта основных параметров катодной защиты при изменении толщины полиэтиленового покрытия в идеальных условиях

s , мм	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ρ_i , Ом·м	10^{16}	10^{16}	10^{16}	10^{16}	10^{16}	10^{16}	10^{16}	10^{16}	10^{16}	10^{16}
$r_p = r_i$, Ом·м ²	10^{13}	$2 \cdot 10^{13}$	$3 \cdot 10^{13}$	$4 \cdot 10^{13}$	$5 \cdot 10^{13}$	$6 \cdot 10^{13}$	$7 \cdot 10^{13}$	$8 \cdot 10^{13}$	$9 \cdot 10^{13}$	10^{14}
$2L, \times 10^9$ м	1,63	2,31	2,83	3,27	3,65	4,00	4,32	4,62	4,90	5,16
$j_s \times 10^{-14}$, А/м ²	3,00	1,50	1,00	0,70	0,60	0,50	0,43	0,38	0,33	0,30
$I_0, \times 10^{-5}$ А	4,94	3,49	2,85	2,47	2,21	2,02	1,87	1,75	1,65	1,56

Следует отметить, что величина удельного сопротивления покрытия r_p может определяться различными способами.

– В лаборатории при условиях, близких к стандартным условиям определения удельного сопротивления материала (комнатная температура, низкая влажность воздуха и сухой материал покрытия). Измерения производят с использованием качественного материала, на котором отсутствуют дефекты (целостность изоляции полностью сохранена).

В этом случае значение величины $r_p = r_i$ максимально.

– В лаборатории при условиях, близких к условиям эксплуатации диэлектрических покрытий. Перед измерением материал покрытия выдерживают длительное время в почвенном электролите при сохранении целостности покрытия. В этом случае $r_p = r_s$ принимает некоторое промежуточное значение между величинами r_i и r_m .

– В реальных условиях эксплуатации, когда может быть нарушена целостность покрытия, его адгезия к металлу и другие его характеристики, оказывающие влияние на удельное сопротивление покрытия. В этом случае значение величины $r_p = r_m$ минимально.

В монографии [7, с. 130] приведены экспериментальные данные по определению удельного сопротивления полиэтиленового покрытия в грунте r_s при различных методах его нанесения и различных толщинах покрытий. Эксперимент продолжался десять лет. В результате было установлено, что значение r_s несколько изменяется от способа нанесения полиэтиленового покрытия, но в среднем его величину можно принять равной 10^{11} Ом·м² для покрытия толщиной 7 миллиметров. Это обстоятельство в совокупности с формулой (10) даёт возможность оценить удельное сопротивление полиэтилена, насыщенного почвенным электролитом, величиной $\rho_s = 14,29 \cdot 10^{12}$ Ом·м.

Полученные данные позволяют рассчитать зону защиты $2L$ трубопровода при использовании диэлектрического покрытия, подвергнутого выдержке в почвенном электролите в течение 10 лет. Проведём эти расчеты по аналогии с предыдущими вычислениями удельного сопротивления покрытия, зоны защиты трубопровода, защитного тока и плотности защитного тока, а их результаты поместим в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчёта основных параметров катодной защиты при изменении толщины полиэтиленового покрытия после длительной выдержки его в почвенном электролите

$s, \text{ мм}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\rho_s \times 10^{12}$ Ом·м	14,29	14,29	14,29	14,29	14,29	14,29	14,29	14,29	14,29	14,29
$r_p = r_s \times 10^{10}$ Ом·м ²	1,43	2,86	4,29	5,72	7,15	8,57	10,00	11,43	12,86	14,29
$2L, \times 10^7 \text{ м}$	6,17	8,73	10,69	12,35	13,80	15,12	16,33	17,46	18,52	19,52
$j_s, \times 10^{-12} \text{ А/м}^2$	20,99	10,50	7,00	5,25	4,20	3,59	3,00	2,62	2,33	2,10
$I_0, \times 10^{-4} \text{ А}$	13,06	9,24	7,54	6,53	5,84	5,33	4,94	4,62	4,35	4,13

Сравнение табл. 1 и 2 показывает существенное снижение значений удельного сопротивления покрытия и связанной с ним величины зоны защиты ПМТ в результате помещения его в почвенный электролит. Данное явление сопряжено как с ростом величины защитного тока, так и его плотности. В то же время в источнике [6, с. 82], характеризующем изменение плотности защитного тока от вида пассивной защиты в грунте, указано, что даже в случае высококачественных диэлектрических покрытий из современных полимерных материалов минимальная защитная плотность тока не снижается менее значений в 10^{-6} А/м². Данное обстоятельство в совокупности с формулой (4) позволяет рассчитать зону защиты трубопровода $2L$ в рассматриваемых условиях, которая в этом случае составляет $2,83 \cdot 10^5$ метров.

Сопоставление этой величины с зоной защиты трубопровода из табл. 2, соответствующей минимальной толщине защитного покрытия, равной одному миллиметру (зона защиты в этом случае равна $6,17 \cdot 10^7$ метров), позволяет предположить, что в реальных условиях прокладки трубопровода должно наблюдаться резкое снижение зоны защиты по сравнению с зоной защиты, рассчитанной теоретически (табл. 2). Данное явление принято связывать с появлением дефектов покрытия, что, в частности, подтверждается практическими измерениями их целостности при укладке трубопроводов в грунт [5, с. 28]. В связи с чрезвычайной важностью этой проблемы для системы комбинированной защиты трубопроводов от коррозии данное явление будет рассмотрено более подробно в следующем разделе статьи.

Дефекты диэлектрических покрытий и их влияние на функционирование системы катодной защиты подземных трубопроводов

Современная высококачественная изоляция, изготовленная на основе полимерных материалов, позволила резко снизить количество дефектов покрытий, возникающих в результате их нанесения на металлические трубопроводы, транспортировки трубопроводов, хранения заготовок для изолированных трубопроводов и укладки трубопроводов в грунт. Так, например, в монографии [5, с. 28] авторы пишут: «Распространённые ранее покрытия на основе битумов проигрывают в отношении механической прочности по сравнению с покрытиями из полиэтилена. Это приводит к многочисленным повреждениям битумного покрытия трубопроводов, изготовленного в заводских условиях, при их транспортировке, складировании и прокладке трубопроводов. Пятьдесят повреждений заводской изоляции на один километр трубопровода в этом случае не являлось редкостью. Благодаря своей высокой механической прочности, трубопроводы с трёхслойной изоляцией, состоящей из эпоксидной смолы, клея и полиэтилена имеют в среднем до трёх повреждений на километр». Приведённая цитата со всей очевидностью показывает, что использование современной высококачественной полимерной изоляции позволяет существенно сократить количество дефектов подземных трубопроводных систем прежде всего за счёт повышения её механической прочности, то есть способности выдерживать механические нагрузки, возникающие при транспортировке изолированных заводским способом заготовок для трубопроводов, их складировании, укладке в грунт и последующей эксплуатации.

В качестве примера, иллюстрирующего заявленный тезис, рассмотрим влияние дефектов изоляции на величину тока катодной защиты, его плотность и зону защиты трубопровода. Для этого примем, в соответствии с табл. 2, что на трубопроводе имеется однослойное полиэтиленовое покрытие толщиной $s = 5$ мм. Этому случаю (табл. 2) соответствует: $\rho_s = 14,29 \cdot 10^{12}$ Ом·м; $r_p = r_s = 7,15 \cdot 10^{10}$ Ом·м²; $2L = 13,80 \cdot 10^7$ м; $j_s = 4,20 \cdot 10^{-12}$ А/м²; $I_0 = 5,84 \cdot 10^{-4}$ А. Кроме того, будем считать, что по концам защитной зоны протяжённостью $2L$ имеются изолирующие фланцы, а количество дефектов равняется трем в расчёте на один километр трубопровода, и они равномерно распределены по всей его длине. Удельное сопротивление грунта ρ_r примем равным 50 Ом·м на всём протяжении трубопровода. Кроме того, будем считать, что дефекты имеют круглую форму диаметром $a = 10$ мм. Всё это взятое вместе позволяет рассчитать изменение катодной зоны защиты трубопровода как функции количества дефектов, их расположения, размеров и удельного сопротивления грунта.

В качестве примера рассмотрим изменение зоны защиты трубопровода при появлении дефектов по сравнению с бездефектной структурой покрытия. Следует отметить, что наличие повреждений изоляции в непосредственной близости от точки дренирования никак не сказывается на зоне защиты трубопровода, однако оказывает непосредственное воздействие на такие параметры, как удельное сопротивление покрытия, плотность защитного тока и защитный ток. Действительно, в соответствии с работами [8; 9; 10] общее сопротивление дефекта R_D при отсутствии покрывного слоя определяется следующей формулой:

$$R_D = R_p + R_D + R_F + R_S, \quad (12)$$

где:

1) поляризационное сопротивление ($A = \pi a^2/4$ – площадь дефекта покрытия)

$$R_p = \frac{r_p}{A}; \quad (13)$$

2) сопротивление покрывного слоя (в рассматриваемом случае с целью упрощения вычислений будем считать, что $R_D = 0$)

$$R_D = \frac{r_D}{A}; \quad (13)$$

3) сопротивление грунта в дефекте изоляции

$$R_F = \frac{\rho S}{A}; \quad (14)$$

4) сопротивление растекания в грунте, равное для выбранной формы дефекта следующей величине:

$$R_G = \frac{\rho}{2a}. \quad (15)$$

Тогда омическое сопротивление дефекта R_d определяется следующей формулой:

$$R_d = R_D + R_F + R_G. \quad (16)$$

Последнее соотношение, с учётом п. 2, приводит его к следующему виду:

$$R_d = R_F + R_G. \quad (16^*)$$

Рассчитаем величину R_d , с учетом принятых нами ранее параметров дефекта и окружающего его грунта. Тогда получаем, в соответствии с формулами (14), (15) и (16*), что $R_d = 5685$ Ом. Для оценки величины падения потенциала на омическом сопротивлении дефекта нам потребуется критерий *NACE*, который имеется, в частности, в справочнике [6, с. 91] и формулируется следующим образом:

«1. Следует исходить из того, что кажущееся удельное сопротивление покрытия r_u приблизительно соответствует поляризационному сопротивлению дефектов покрытия.

2. Следует принять, что стационарный потенциал на 0,3 В положительнее защитного потенциала.

Отсюда следует:

$$j_s = \frac{0,3V}{r_p}. \quad (3.2)»$$

Из приведённой цитаты непосредственно следует, что падение потенциала на омическом сопротивлении дефекта равно 0,3 Вольта, что с учетом величины омического сопротивления дефекта $R_d = 5685$ Ом, полученной нами ранее, позволяет рассчитать величину тока, текущего через дефект I_{d1} следующим образом:

$$I_{d1} = \frac{0,3[V]}{R_d}. \quad (17)$$

Подстановка численного значения R_d в формулу (17) позволяет установить, что $I_{d1} = 5,28 \cdot 10^{-5}$ А. Как мы установили ранее, количество дефектов на один километр трубопровода составляет три штуки. Следовательно общий ток, протекающий через три дефекта, составит: $I_{d3} = 15,84 \cdot 10^{-5}$ А. В свою очередь, средняя плотность защитного тока, обусловленная наличием дефектов, будет определяться формулой

$$j_d = \frac{I_{d3}}{A_1}, \quad (18)$$

где A_1 – площадь изолированной поверхности трубопровода, которая, при принятых нами ранее его параметрах, составляет приблизительно 1000 квадратных метров на один километр протяжённости трубопровода.

Следовательно, $j_d = 0,1584 \cdot 10^{-6}$ А/м². Учитывая, что общая плотность защитного тока j_0 представляет собой сумму тока, текущего через собственно покрытие j_s , и тока, текущего через его дефекты j_d , то очевидно, что он будет определяться следующим соотношением:

$$j_0 = j_d + j_s. \quad (19)$$

В то же время, как мы установили ранее (табл. 2), плотность защитного тока на бездефектном полиэтиленовом покрытии составляет $j_s = 0,420 \cdot 10^{-11}$ А/м². Сравнение численных значений j_d и j_s позволяет, в пределах погрешности, записать

$$j_0 \approx j_d. \quad (20)$$

Последнее соотношение с учётом формулы (4) даёт возможность определить зону защиты трубопровода для рассматриваемого случая по следующей формуле:

$$2L = \sqrt{\frac{2,4l}{\rho_s j_d}} . \quad (21)$$

После подстановки в последнюю формулу численных значений входящих в неё величин, для величины защитной зоны $2L$ получаем значение $2L = 7,107 \cdot 10^5$ метров.

Обсуждение результатов и выводы

В работе проведён сравнительный анализ влияния ряда основных факторов, определяющих характеристики диэлектрических покрытий, как на коррозию подземных металлических трубопроводов, так и на их катодную защиту. При этом для описания поведения покрытий использованы, прежде всего, такие параметры, как изменение степени электропроводности трубопроводной изоляции (после длительной выдержки её в почвенном электролите и до неё) и наличие дефектов покрытия. В свою очередь, для анализа состояния катодной защиты использованы такие понятия, как защитный ток, плотность защитного тока и зона катодной защиты подземного трубопровода. Проведённые исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. В результате выдержки современного высококачественного полимерного покрытия, нанесённого на трубопровод, в почвенном электролите должно наблюдаться существенное увеличение его электропроводности, что способствует резкому увеличению тока коррозионной пары (металл трубопровода в дефекте покрытия – металл трубопровода под покрытием) особенно при малом количестве дефектов покрытия. Выявленная закономерность позволяет в качестве приоритетного направления при разработке покрытий для защиты трубопроводов в грунте (без использования катодной защиты) выбрать работы по снижению электропроводности покрытий в результате их насыщения почвенным электролитом.

2. Изменение характеристик катодной защиты трубопровода в грунте практически не зависит от изменения электрических характеристик покрытия в результате насыщения его почвенным электролитом. В то же время появление дефектов покрытия резко ухудшает основные параметры, характеризующие систему катодной защиты трубопровода. Выявленная закономерность позволяет в качестве приоритетного направления при разработке покрытий для комбинированной защиты трубопроводов в грунте выбрать работы по увеличению механической прочности покрытий и разработке комплекса мероприятий как по предотвращению, так и по устранению дефектов изоляции.

Литература

1. Stefan Sanft, Markus Thewes. Wirtschaftlichkeits bewertung von Instandhaltungs strategien bei Gasverteilnetzen. 3R International, 2016, No. 10–11, p. 45–52.
2. Ulrich Bette. Ergebnisse des Feldversuchens an einer durch Bahnwechselstrom beeinflussten Rohrleitung. 3R International, 2016, No. 6, P. 40–45.
3. Мурадов А.В., Исмаилова Г.Г., Хасанов А.А. Некоторые особенности реализации совместной электрической защиты // Нефть, газ и бизнес. 2014. № 4. С. 61–63.
4. Мурадов А.В., Исмаилова Г.Г., Хасанов А.А. Совместная защита двух подземных сооружений // Нефть, газ и бизнес. 2012. № 4. С. 44–46.
5. W. v. Baeckmann, R. Jakob. Korrosionsschutz von Gas-und Wasserrohrleitungen // Vulkan-Verlag Essen. 1995. P. 82.
6. Ulrich Bette, Wolfgang Vesper. Taschenbuch für den kathodischen Korrosionsschutz // Vulkan-Verlag Essen. 2005. P. 367.
7. W. von Baeckmann und W. Schwenk. Handbuch des kathodischen Korrosionsschutzes // VerlagChemie. 1980. P. 465.
8. Киселёв В.Г. Влияние электрического удельного сопротивления грунта на выбор вида катодной защиты подземных трубопроводов // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического института. 2015. № 3 (226). С. 17–26.

9. Киселев В.Г., Калютик А.А. Влияние покрывного слоя подземных металлических сооружений на коэффициент полезного действия катодной защиты // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2016. № 5–6. С. 27–36.

10. Киселев В.Г., Калютик А.А. Влияние удельного сопротивления грунта в зоне расположения подземного трубопровода на коэффициент полезного действия катодной защиты // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2015. № 11–12. С. 48–55.

Авторы публикации

Киселев Владимир Геннадьевич — д-р техн. наук, профессор кафедры «Атомная и тепловая энергетика» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. E-mail: kis_vg@mail.ru.

Рузич Евгений Николаевич — аспирант кафедры «Атомная и тепловая энергетика» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. E-mail: rouzith@mail.ru.

References

1. Stefan Sanft, Markus Thewes. Wirtschaftlichkeits bewertung von Instandhaltungs strategien bei Gasverteilnetzen. 3R International, 2016, No. 10–11, P. 45–52.

2. Ulrich Bette. Ergebnisse des Feldversuchens an einer durch Bahnwechselstrom beeinflussten Rohrleitung. 3R International, 2016, No. 6, P. 40–45.

3. Muradov A.V. Some features of realization of joint electric protection / A.V. Muradov, G.G. Ismajlova, A.A. Hasanov // Neft', gaz i biznes. 2014. No. 4. P. 61–63.

4. Muradov, A.V. Joint protection of two underground structures / A.V. Muradov, G.G. Ismajlova, A.A. Hasanov // Neft', gaz i biznes. 2012. No. 4. P. 44–46.

5. W. v. Baeckmann, R. Jakob. Korrosionsschutz von Gas- und Wasserrohrleitungen / Baeckmann W. v., Jakob R. // Vulkan-Verlag Essen. 1995. P. 82.

6. Ulrich Bette. Taschenbuch für den kathodischen Korrosionsschutz / Ulrich Bette, Wolfgang Vesper // Vulkan-Verlag Essen. 2005. P. 367.

7. Baeckmann W. Handbuch des kathodischen Korrosionsschutzes / W. von Baeckmann und W. Schwenk // Verlag Chemie. 1980. P. 465.

8. Kiselev V.G. Influence of the specific electric soil resistance on the selection of the form of cathode protection of underground conduits // Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU. 2015. No. 3 (226). P. 17–26.

9. Kiselev V. G. Influence of the cover layer of underground metallic construction on the efficiency of cathode protection / V.G. Kiselev, A.A. Kaljutik // Izvestiya vuzov. Problemy energetiki. 2016. No. 5–6. P. 27–36.

10. Kiselev V.G. The influence of soil resistivity in the area of underground pipeline on the efficiency of cathodic protection / V.G. Kiselev, A.A. Kaljutik // Izvestiya vuzov. Problemy energetiki. 2015. No. 11–12. P. 48–55.

Authors of the publication

Vladimir G. Kiselev — Dr. Sci. (Tech.), prof. of the department “Nuclear and Heat Power Engineering”, Peter the Great. St. Petersburg Polytechnic University.

Evgenij N. Ruzich — PhD student of the department “Nuclear and Heat Engineering”, Peter the Great. St. Petersburg Polytechnic University.

Поступила в редакцию

10 ноября 2017 г.