

ВЛИЯНИЕ ПОКРЫВНОГО СЛОЯ ПОДЗЕМНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ НА КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ КАТОДНОЙ ЗАЩИТЫ

В. Г. КИСЕЛЁВ, А. А. КАЛЮТИК

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

В работе рассмотрен наиболее вероятный механизм формирования на поверхности металлических коммуникаций, находящихся в грунте или морской воде, под воздействием катодной защиты покрывного слоя и его основные свойства. Основываясь на этом анализе и данных, полученных в процессе практической эксплуатации систем катодной защиты, как по изменению электропроводности покрывных слоёв, так и по снижению величины защитного тока, произведена оценка изменения коэффициента полезного действия (КПД) катодной защиты в цепи постоянного тока. При этом установлено, что данный КПД растёт с увеличением удельного сопротивления покрывного слоя на поверхности защищаемых металлических сооружений и связанным с этим снижением удельной плотности защитного тока.

Ключевые слова: электрохимическая защита, катодная защита, коррозия, электрохимическая коррозия, комбинированная защита от коррозии, протекторная защита.

1. Постановка проблемы

Развитие топливно-энергетического комплекса Российской Федерации, наряду с совершенствованием системы коммунального хозяйства, вызывает интенсивный рост протяжённости подземных и подводных металлических сооружений (ПМС). Обеспечение их эффективной антикоррозионной защитой связано со значительными капитальными и эксплуатационными затратами. Так, например, на территории Санкт-Петербурга по оценкам специалистов [1] в настоящий момент находится приблизительно три тысячи установок катодной защиты со средней мощностью ориентировочно равной 0,7 киловаттам. Следовательно, снижение расхода электроэнергии установками электрохимической защиты существенно уменьшает вложения как на их сооружение, так и на их эксплуатацию, поэтому может считаться приоритетным направлением в процессе развития систем катодной защиты ПМС вообще и трубопроводов в частности. Кроме того, данное мероприятие значительно снижает коррозионную опасность грунта, обусловленную наличием блуждающих токов [2]. Затраты на электрохимическую защиту, в свою очередь, удобно разбить на две части. Первая связана с совершенствованием собственно установки катодной защиты. В этом случае можно говорить о повышении коэффициента полезного действия преобразователя, использовании высокоэффективных заземляющих устройств, автоматизации систем антикоррозионной защиты, рациональном проектировании и так далее. Вторая связана с мероприятиями собственно на защищаемом сооружении, среди которых можно выделить: повышение качества диэлектрического покрытия, устранение электрических контактов с другими металлическими сооружениями, контактирующими с грунтом, повышение продольной проводимости ПМС (для трубопроводов). Предлагаемая статья направлена на решение вопросов второй части, основываясь, прежде всего, на рассмотрении проблемы влияния покрывного слоя,

возникающего на ПМС при длительной работе установки катодной защиты [3], на её коэффициент полезного действия.

2. Формирование покрывных слоёв на поверхности металла и их влияние на коэффициент полезного действия катодной защиты ПМС

2.1. О терминологии

В силу того, что техника защиты подземных коммуникаций от коррозии находится на стыке различных областей знаний, а практически этой работой очень часто занимаются электротехники, как показывает опыт, для этой категории специалистов требуется дать некоторые терминологические пояснения. При традиционном подходе под КПД электроустановки обычно понимается отношение полезной мощности к мощности потребляемой. Таким образом, разница этих мощностей и составляет потери в элементах установки. Работа по совершенствованию источников питания для катодной защиты, в силу значительного их количества и существенной средней мощности, производится постоянно и имеет свои успехи [1]. Однако собственно к технике катодной защиты это направление деятельности имеет косвенное отношение. В последнем случае анализу подлежат, прежде всего, такие категории, как защитный ток и его плотность, сопротивление растекания ПМС и анодного заземления, величина и полярность блуждающих токов, генерируемых установкой катодной защиты и так далее. Кроме того, в соответствии с пунктом 7.1.1 ГОСТ 9.602–2005 «Катодную поляризацию сооружений (кроме трубопроводов, транспортирующих среды нагретые выше 20°C) осуществляют таким образом, чтобы поляризационные потенциалы металла относительно насыщенного медно-сульфатного электрода сравнения находились между минимальным и максимальным (по абсолютному значению) значениями в соответствии с таблицей 9» [4]. Таким образом, в соответствии с таблицей 9 критерием защищённости ПМС принимается смещение поляризационного потенциала от его стационарной величины в область значений от -0,85 до -1,15 вольт по медно-сульфатному электроду сравнения. И именно эта электрическая работа считается полезной с точки зрения реализации катодной защиты.

Вероятно это обстоятельство способствовало тому, что среди специалистов по катодной защите под КПД понимается отношение затрат энергии на достижение величины поляризационного потенциала на ПМС к общим затратам энергии в цепи постоянного тока установки катодной защиты. Основываясь именно на этих предпосылках, с учётом экономических факторов принято рассчитывать оптимальное количество анодов в анодном заземлении [3] или оптимальное сечение кабеля в цепи постоянного тока [3]. Более того, мероприятия по снижению величины защитного тока (полезной нагрузки с точки зрения классической электротехники) также принято относить к действиям, направленным на повышение КПД электрохимической защиты. В данной работе анализируется, преимущественно при постоянстве всех прочих параметров установки катодной защиты, влияние на эффективность её работы мероприятий, связанных исключительно с характеристиками защищаемого подземного трубопровода и, прежде всего, с образованием покрывных слоёв в месте дефектов изоляции ПМС.

2.2. Основные закономерности формирования покрывных слоёв на поверхности металла и их свойства

Практика показала, что в процессе эксплуатации установок катодной защиты наблюдается активное формирование покрывных слоёв на металлической поверхности ПМС при их катодной защите. Данный факт достаточно хорошо известен и освещён как в монографиях, так и в справочной литературе [3, 6]. Более того, покрывной слой обладает уникальными свойствами, а именно: после отключения установки катодной защиты потенциал подземного (подводного) металлического сооружения остаётся ещё

продолжительное время защитным, то есть он расположен в интервале от -1,15 до -0,85 вольт по медно-сульфатному электроду сравнения [6]. Кроме того, авторы монографии [7] саму защитную способность катодной установки связывают с формированием оксидного защитного слоя на поверхности металла. Такое утверждение далеко не лишено смысла хотя бы потому, что скорость диффузии ионов железа в твёрдом теле (оксидный слой) обычно меньше скорости диффузии их в жидком электролите (влажная почва, морская вода и т. д.) приблизительно на три порядка. Следовательно, в рамках данной модели само наличие покрывного слоя на металлической поверхности уже гарантирует его эффективную антикоррозионную защиту. Следует отметить, что скорость образования защитного слоя на поверхности металла ускоряется по утверждению авторов монографии [6] в присутствии ионов Ca^{2+} , Al^{3+} , HCO_3^- и ряда других соединений, например, кислорода, фосфатов и силикатов, а разрушение стимулируется рядом нейтральных солей, в частности содержащих ионы Cl^- и SO_4^{2-} .

Все эти особенности покрывного защитного слоя обусловили развитие целого направления в технике катодной защиты от коррозии, получившего название «катодная защита стальных сооружений от коррозии прерывистым током», которое представлено рядом патентов [8, 9].

Однако, в обзоре ВНИИОЭНГ [10], посвящённом рассматриваемой тематике, не сделано однозначного вывода об эффективности данного метода, более того, авторы сообщают, «что в настоящее время нет единой общепризнанной методики исследования эффективности прерывистой поляризации». Вероятно, поэтому они ограничиваются следующим нейтральным выводом «Метод прерывистой поляризации, как и метод поляризации, непрерывным постоянным током, может обеспечить достаточно высокую степень защиты стальных сооружений от коррозии». Кроме того, они указали ряд негативных моментов, связанных с использованием данного метода, среди которых необходимо выделить:

1. «Плотность тока при прерывистой поляризации должна быть всегда больше, чем при поляризации постоянным непрерывным током»;

2. «На протяжённых сооружениях в момент выключения тока возникает концентрационный элемент, действие которого направлено на снижение степени защиты в зоне повышенных потенциалов (в районе точки дренажа)».

Всё это вместе взятое, принимая во внимание также сложности, связанные с аппаратурным оформлением метода, в том числе и при оценке степени защищённости ПМС от коррозии, не позволили ему занять сколь-нибудь значительное место в области антикоррозионной защиты, что подтверждается, в частности, отсутствием упоминания о нём в ГОСТ 9.602–2005 [4] и в ГОСТ Р 51164–98 [12].

Вместе с тем само наличие покрывного слоя оказывает благоприятное воздействие и на классическую катодную защиту. Действительно, в соответствии со справочником [11] общее сопротивление электрическому току R при наличии дефекта изоляции круглой формы, расположенного, например, на трубопроводе с полиэтиленовым покрытием, можно рассчитать по следующей формуле:

$$R = R_p + R_G. \quad (1)$$

Очевидно, что общее сопротивление дефекта R в этом случае представляет собой сумму поляризационного R_p и омического R_G сопротивлений, где R_G определяет омическое падение потенциала в дефекте и может быть рассчитано с использованием следующего соотношения:

$$R_G = R_D + R_F + R_S. \quad (2)$$

В свою очередь величины, входящие в уравнения (1) и (2), можно определить с использованием следующих формул [3]:

- Формула, определяющая поляризационное сопротивление дефекта:

$$R_p = \frac{r_p}{A}, \quad (3)$$

где r_p – удельное поляризационное сопротивление металлической поверхности в зоне дефекта покрытия (в соответствии со справочными данными [3] $r_p = 1 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$, а защитный ток составляет, в этом случае, $0,3 \text{ Ам}^{-2}$); A – площадь дефекта покрытия.

- Формула, определяющая сопротивление покрывного слоя, возникающего на поверхности металла в процессе работы установки катодной защиты:

$$R_p = \frac{r_d}{A}, \quad (4)$$

где r_d – удельное сопротивление покрывного слоя, возникающего при длительной работе установки катодной защиты (в соответствии со справочными данными [3] $r_d = (1-10) \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$).

- Формула, определяющая сопротивление грунта в дефекте круглой формы:

$$R_F = \frac{\rho l}{A}, \quad (5)$$

где ρ – удельное сопротивление грунта, а l – толщина слоя диэлектрического покрытия трубопровода.

- Формула, определяющая сопротивление растекания дефекта круглой формы:

$$R_S = \frac{\rho}{2a}, \quad (6)$$

где a – диаметр дефекта круглой формы.

Покрывной слой обладает крайне низкой ионной проводимостью, что гарантирует низкий уровень коррозии [13]. Одновременно он обладает высокой электронной проводимостью. Последнее обстоятельство гарантирует возможность протекания на его поверхности катодного процесса при электрохимической защите ПМС. В справочнике [3] отмечается, что удельное сопротивление покрывного слоя r_d , входящего в формулу (4), составляет от одного до десяти $\text{Ом} \cdot \text{м}^2$. Тот же источник оценивает величину удельного поляризационного сопротивления r_p , входящего в формулу (3), в один $\text{Ом} \cdot \text{м}^2$.

В таких условиях учитывая то обстоятельство, что при прекращении подачи электрического тока, например, при измерениях поляризационного потенциала методом отключения, на ПМС ещё длительное время (обычно от нескольких минут до нескольких недель) сохраняется защитный потенциал [6]. Это можно трактовать как растворение покрывного слоя, происходящее при определённом (защитном) потенциале. Данный факт, в общем, хорошо известен и описан в целом ряде публикаций [3, 6, 13].

При принятии данной модели, хорошо согласующейся как с теорией электрохимических процессов, так и с практикой электрохимической защиты, можно утверждать, что защищённость ПМС от коррозии в этом случае обеспечивается наличием покрывного слоя, а выполнение требований ГОСТ 9.602–2005 гарантируется смещением стационарного потенциала ПМС в область защитного потенциала. Такая

трактовка событий позволяет по-новому взглянуть на расчёт коэффициента полезного действия катодной защиты ПМС. Действительно, поляризационный потенциал в данных условиях, в силу существенного падения защитного тока, должен существенно снижаться [14]. Однако обнаружить данный факт при помощи традиционных методов измерения потенциала – таких, например, как метод отключения или метод модельного электрода, рекомендованный ГОСТ 9.602–2005, не представляется возможным из-за смещения стационарного потенциала ПМС в зону защитного потенциала. Вместе с тем, это явление, как мы выяснили ранее, и обеспечивает защиту ПМС от коррозии за счёт низкой скорости диффузии ионов металла через покрывной слой. Более того, снижение защитного тока, обусловленное относительно высокой величиной удельного электрического сопротивления покрывного слоя, гарантирует повышение экономической эффективности катодной защиты. Более подробно это явление будет рассмотрено в следующем разделе данной работы.

2.3. Расчёт влияния электрического сопротивления покрывного слоя на эффективность катодной защиты ПМС

2.3.1. Исходные положения

Для определения влияния изменения удельного сопротивления покрывного слоя на эффективность катодной защиты трубопровода от коррозии воспользуемся следующими модельными представлениями.

1. Пусть ПМС (трубопровод) характеризуется, например, следующими параметрами: удельное сопротивление материала (стали) ρ_s равно $0,18 \cdot 10^{-6}$ Ом·м; наружный диаметр трубопровода d равен 321 мм; s – толщина стенки трубопровода, $s = 6$ мм. Удельный защитный ток j_s в этом случае для трубопроводов, проложенных в грунте и снабжённых полимерной, например полиэтиленовой, изоляцией, изменяется в пределах от 10^{-5} до 10^{-6} А/м² [14]. Примем, для определённости, что его величина равна 10^{-5} А/м².

2. Пусть трубопровод имеет диэлектрическое, например полиэтиленовое, покрытие толщиной 5 мм (удельное сопротивление полиэтилена ρ_D составляет порядка 10^{18} Ом·см). Лабораторные и практические измерения показывают, что при длительном нахождении в грунте удельное сопротивление полиэтилена снижается приблизительно на два–три порядка, т. е. составляет приблизительно 10^{15} Ом·см) [6]. Обозначим эту величину ρ_u .

3. Пусть, начиная с точки дренирования тока, на трубопроводе равномерно расположены дефекты круглой формы и одинаковых размеров, а количество дефектов трубопровода равно 100000.

4. Пусть площадь каждого дефекта составляет $6,25$ см², т.е. равняется площади датчика потенциала, используемого при измерениях поляризационного потенциала, проводимых в соответствии с рекомендациями ГОСТ 9.602–2005, что соответствует диаметру дефекта круглой формы $a = 2,822$ см. 5. Пусть удельное сопротивление грунта $\rho = 62,26$ Ом·м.

6. Пусть протяжённость трубопровода составляет 1000 метров, а точка дренирования защитного тока располагается в его середине, что при заданных условиях позволяет считать поляризационный защитный потенциал практически постоянным на всём протяжении трубопровода.

7. Пусть необходимая защитная плотность тока на свободной от изоляции металлической поверхности при наличии только поляризационного сопротивления в дефекте трубопровода составляет $0,3 \text{ А/м}^2$.

8. Пусть защитный ток при формировании покрывного слоя уменьшается пропорционально росту его сопротивления в пять раз [14].

Основываясь на этих исходных положениях, рассчитаем ряд параметров катодной защиты, на основании которых и проведём оценку её эффективности как функции удельного электрического сопротивления покрывного слоя и величины тока защиты.

2.3.2. Расчет мощности в цепи постоянного тока установки катодной защиты, расходуемой на поляризационном сопротивлении и сопротивлении покрывного слоя трубопровода.

1. Расчёт сопротивления изоляции трубопровода при длине защитной зоны 1000 м. Очевидно, что общее сопротивление изоляции в этом случае будет выражаться следующей формулой:

$$R_{и} = \rho_{и} \frac{l}{2\pi dL}, \quad (9)$$

Подставим в неё численные значения соответствующих величин, указанные нами ранее, и проведём вычисления. Тогда получим, что $R_{и} = 4,96 \cdot 10^{11} \text{ Ом}$. Как мы увидим в дальнейшем, эта величина значительно превосходит совокупное сопротивление дефектов покрытия, что позволяет не учитывать её в последующих расчётах.

2. Расчёт поляризационного сопротивления дефекта R_p будем производить по формуле (3). Подставим в неё численные значения соответствующих величин, указанные нами ранее, и проведём вычисления. Тогда получим, что поляризационное сопротивление для одного дефекта выбранных размеров составит: $R_p = 1600 \text{ Ом}$. Внесём данное значение в табл. 1 (столбец 2, строка 2).

Таблица 1

Технические параметры катодной защиты трубопровода, обусловленные формированием покрывного слоя

№	1	2	3	4	5	6
1	$r_d, \text{ Ом}\cdot\text{м}^2$	0	2,5	5	7,5	10
2	$R_p, \text{ Ом}$	1600	800	800	800	800
3	$R_D, \text{ Ом}$	0	4000	8000	12000	16000
4	$R_{pD}, \text{ Ом}$	1600	4800	8800	12800	16800
5	$R_{pDT}, 10^{-3} \text{ Ом}$	16	48	88	128	168
6	$I_d, 10^{-3} \text{ А}$	0,188	0,150	0,113	0,075	0,0375
7	$I_T, \text{ А}$	18,75	15,0	11,25	7,50	3,75
8	$P_{pDT}, \text{ Вт}$	5,625	10,8	11,09	7,20	2,362
9	$R_F, \text{ Ом}$	498	498	498	498	498
10	$R_S, \text{ Ом}$	1103	1103	1103	1103	1103
11	$R_{FS}, \text{ Ом}$	1601	1601	1601	1601	1601
12	$R_{FST} 10^{-3}, \text{ Ом}$	16,01	16,01	16,01	16,01	16,01
13	$P_{FST}, \text{ Вт}$	5,629	3,602	2,026	0,901	0,225
14	$U_K, \text{ В}$	2	2	2	2	2
15	$P_k, \text{ Вт}$	37,5	30,0	22,5	15,0	7,5
16	$R_A, \text{ Ом}$	1	1	1	1	1

17	P_A , Вт	351,6	225,0	126,6	56,25	14,06
18	$P_{пр}$, Вт	428,5	269,4	162,2	79,4	24,1
19	η_i , %	1,313	4,009	6,837	9,074	9,782

Известно, что в грунте поляризация ПМС обусловлена практически исключительно диффузионным перенапряжением кислорода и что её величина снижается при уменьшении защитного тока, что и наблюдается при формировании покрывных слоёв [14]. С другой стороны, при образовании покрывных слоёв, которые имеют полупроводниковые свойства, должно увеличиваться перенапряжение перехода. Будем ориентировочно считать, что общий эффект от этих воздействий составит половину исходной величины, то есть 800 Ом. Внесём данное значение в табл. 1 (столбцы 3, 4, 5 и 6 строки 2). При этом необходимо отметить, что с ростом сопротивления покрывного слоя и соответствующим падением защитного тока роль поляризационного сопротивления в вопросах оценки эффективности катодной защиты становится всё менее значительной. Иными словами, даже если автор и несколько ошибся с оценкой величины поляризационного сопротивления в дефекте при наличии в нем покрывного слоя, это может несколько численно изменить полученный результат, но не рассматриваемые тенденции.

3. Расчёт сопротивления покрывного слоя дефекта R_D проведём с использованием формулы (4). Подставим в неё численные значения соответствующих величин, указанные нами ранее, и осуществим вычисления. При этом, учитывая справочные данные [3], примем, что удельное сопротивление покрывного слоя r_d изменяется от нуля до десяти Ом·м² с шагом 2,5 Ом·м².

Расчёты показывают, что сопротивление покрывного слоя не зависит от удельного сопротивления грунта и от удельного поляризационного сопротивления, т. е. остаётся постоянным при изменении данных параметров. Иными словами, его величина определяется исключительно свойствами покрывного слоя. Полученные данные поместим в таблицу.

4. Расчёт совместного поляризационного сопротивления и сопротивления покрывного слоя R_{PD} одного дефекта произведём путём сложения соответствующих величин в строках 2 и 3 табл. 1. Результаты внесём в соответствующие ячейки строки 4 той же таблицы.

5. Расчёт совместного поляризационного сопротивления и сопротивления покрывного слоя всех дефектов трубопровода $R_{PDГ}$ произведём путём деления сопротивления одного дефекта на их количество. Результаты внесём в соответствующие ячейки строки 5 табл. 1.

6. Расчёт тока, протекающего через один дефект I_d , будем производить исходя из принятых нами условий о необходимой плотности защитного тока при наличии поверхности трубопровода, свободной от изоляции (0,3 А/м²). В этом случае, в соответствии с геометрическими параметрами дефекта, ток, проходящий через него, составит $0,188 \cdot 10^{-3}$ А. Подставим полученную величину в табл. 1 (строка 6, столбец 2).

Расчёт тока, протекающего через один дефект I_d , при наличии как поляризационного сопротивления, так и сопротивления покрывного слоя, будем производить исходя из принятого нами ранее положения о пропорциональном снижении защитного тока с ростом сопротивления покрывного слоя, при максимальной

величине снижения в 5 раз. Результаты вычислений поместим в оставшиеся ячейки строки 6 табл. 1.

7. Общий защитный ток, протекающий через трубопровод, получим умножением тока, проходящего через один дефект, на количество дефектов трубопровода (100000 штук). Результаты вычислений поместим в соответствующие ячейки строки 7 табл. 1.

8. Мощность P_{PDT} , выделяющуюся на поляризационном сопротивлении или совместном сопротивлении покрывного слоя и поляризации, будем считать по следующей хорошо известной формуле:

$$P_{PDT} = I_T^2 R_{PD}. \quad (10)$$

Результаты вычислений поместим в соответствующие ячейки строки 8 таблицы.

2.3.3. Расчет мощности в цепи постоянного тока установки катодной защиты, расходуемой на омическом сопротивлении дефектов трубопровода.

1. Расчёт омического сопротивления грунта в дефекте R_F при выбранных нами параметрах удельного сопротивления грунта и размерах дефекта будем проводить по формуле (5). Подставим в неё численные значения соответствующих величин, указанные нами ранее, и проведём вычисления. В результате получим, что $R_F = 498$ Ом. Полученные данные поместим в табл. 1 (строка 9).

2. Расчёт сопротивления растекания дефекта R_S , при выбранных нами параметрах удельного сопротивления грунта и размерах дефекта, будем проводить по формуле (6). Подставим в неё численные значения соответствующих величин, указанные нами ранее, и проведём вычисления. В результате получим, что $R_S = 1103$ Ом. Полученные данные поместим в табл. 1 (строка 10).

3. Введём понятие «омическое падение потенциала в грунте» и обозначим его R_{FS} . В соответствии с введённым новым понятием можно записать следующую формулу:

$$R_{FS} = R_F + R_S. \quad (11)$$

Проведём вычисления в соответствии с соотношением (11), тогда получим, что $R_F = 1601$ Ом. Данный результат поместим в табл. 1 (строка 11).

4. Расчёт совместного сопротивления всех омических составляющих всех дефектов трубопровода R_{FST} произведём путём деления «омического падения потенциала в грунте» одного дефекта R_{FS} на их количество. Результаты внесём в табл. 1 (строка 12).

5. Мощность R_{FST} , выделяющуюся на сопротивлении грунта в дефектах трубопровода, будем считать по следующей хорошо известной формуле:

$$P_{PDT} = I_T^2 R_{FST}. \quad (12)$$

Результаты вычислений поместим в таблицу (строка 13).

2.3.4. Расчет мощности в цепи постоянного тока установки катодной защиты, расходуемой на омическом сопротивлении кабеля.

1. Примем, в соответствии с данными справочника [14], что падение потенциала в кабеле цепи постоянного тока составляет 2 В, и внесём эти данные в табл. 1 (строка 14).

2. Мощность P_k , выделяющуюся на сопротивлении кабеля в цепи постоянного тока установки катодной защиты, будем считать по следующей известной формуле:

$$P_k = I_T U_k. \quad (13)$$

Результаты вычислений поместим в табл. 1 (строка 15).

2.3.5. Расчет мощности в цепи постоянного тока установки катодной защиты, расходуемой на сопротивлении растекания анодного заземления.

1. Примем, для удобства сравнения различных вариантов катодной защиты, что сопротивление растекания анодного заземления во всех рассматриваемых случаях составляет 1 Ом, и внесём эти данные в табл. 1 (строка 16).

2. Мощность P_A , выделяющуюся на сопротивлении растекания анодного заземления, будем считать по следующей хорошо известной формуле:

$$P_A = I_T^2 R_A. \quad (14)$$

Результаты вычислений поместим в табл. 1 (строка 17).

2.3.6. Расчет КПД отдельных вариантов катодной защиты η_i будем производить с использованием традиционного для этого случая соотношения

$$\eta_i = \frac{P_{PDT}}{P_{пр}},$$

(15)

где

$$P_{пр} = P_{PDT} + P_{FST} + P_k + P_A \quad (16)$$

определяет необходимую мощность преобразователя катодной защиты по постоянному току. Результаты вычислений поместим в табл. 1 (строки 18, 19).

Выводы

В работе рассмотрен наиболее вероятный механизм формирования покрывного слоя на поверхности металлических коммуникаций, находящихся в грунте или морской воде, под воздействием катодной защиты и его основные свойства. Основываясь на этом анализе и данных, полученных в процессе практической эксплуатации систем катодной защиты, как по изменению электропроводности покрывных слоёв, так и по снижению величины защитного тока, произведена оценка изменения КПД катодной защиты в цепи постоянного тока, в результате чего установлено:

1. При формировании покрывных слоёв на ПМС, обусловленных длительной работой установок катодной защиты, наблюдается устойчивая тенденция к росту КПД систем катодной защиты.

2. Рост КПД систем катодной защиты обусловлен как повышением удельного сопротивления покрывного слоя, так и снижением величины защитного тока.

Summary

Work examines the most probable mechanism of shaping of cover layer on the surface of the metallic communications of those finding in the soil or the sea water under the action of cathode protection and its basic properties. Being based on this analysis and data, obtained in the process of the practical operation of the systems of cathode protection both with respect to the change in the electrical conductivity of cover layers and on reduction in the strength of shielding current, a evaluation of a change in the efficiency (efficiency) of cathode protection in the direct-current circuit is made. In this case it is established that this efficiency grows with an increase in the specific resistance of cover layer on the surface of the protected metallic construction and connected with this reduction in the specific density of shielding current.

Keywords: electrochemical protection, cathode protection, corrosion, electrochemical corrosion, the combined corrosion protection, protector protection

Литература

1. Киселев В.Г. Информационное и технологическое обеспечение электрохимической защиты трубопроводов / В.Г. Киселев. СПб.: СПбГУВК, 1999. 142 с.
2. Киселев В.Г. Влияние постоянных блуждающих токов на скорость коррозионных процессов // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического института. 2011. № 2 (123). С. 113–119.
3. Baeckmann W. Taschenbuch für den kathodischen Korrosionsschutz. / W. von Baeckmann Vulkan-Verlag Essen.1992.
4. ГОСТ 9.602–2005. Единая система защиты от коррозии и старения; Сооружения подземные; Общие требования к защите от коррозии. М.: Стандартинформ, 2006. 55 с.
5. Киселев В.Г. Основные принципы проектирования катодной защиты подземных металлических сооружений // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического института. 2011. № 4 (135). С.111–116.
6. Baeckmann W. Handbuch des kathodischen Korrosionsschutzes / W. von Baeckmann und W. Schwenk. Verlag Chemie. 1980. 465 S.
7. Рахмакулов Д.Л. Современные системы защиты от коррозии подземных коммуникаций (Том II). Электрохимическая защита от коррозии в примерах и расчётах / Д.Л. Рахмакулов, М.В. Кузнецов, Н.А. Гафаров, В.Н. Зенцов, А.М. Кузнецов. Уфа:Государственное издательство научно-технической литературы «Реактив», 2003. 251 с.
8. Авторское свидетельство № 88120. Заявлено 13.08.1949.
9. Патент Франции № 1077571. Заявлено 4.02.1953.
10. Глазов Н.П. Катодная защита стальных сооружений от коррозии прерывистым током; серия: Коррозия и защита в нефтегазовой промышленности / Н.П. Глазов, В.А. Ловачев. Москва: ВНИИОЭНГ, 1976. 59 с.
11. Киселев 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.
12. ГОСТ Р 51164–98. Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии. М.: Госстандарт России, 1998. 41 с.
13. Феттер К. Электрохимическая кинетика / К. Феттер. Москва: «Химия», 1967. 856 с.
14. Bette Ulrich. Taschenbuch für den kathodischen Korrosionsschutz./ Ulrich Bette, Wolfgang Vesper Essen.: Vulkan-Verlag, 2005. 367 S.

Поступила в редакцию

25 марта 2016 г.

Киселёв Владимир Геннадьевич – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры «Атомная и тепловая энергетика» Санкт-Петербургского политехнического университета (СПбПУ) Петра Великого. Тел: 8(921)757-27-17. E-mail: kis_vg@mail.ru.

Калютник Александр Антонович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Атомная и тепловая энергетика» Санкт-Петербургского политехнического университета (СПбПУ) Петра Великого. Тел: 8-905-260-59-55. E-mail: Kalyutik@yandex.ru.