

DOI 10.5862/JEST/2
УДК 621.311.22(075.8)

В.Г. Киселёв

ВЛИЯНИЕ УДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ГРУНТА НА ВЫБОР ВИДА КАТОДНОЙ ЗАЩИТЫ ПОДЗЕМНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

V.G. Kiselev

INFLUENCE OF THE SPECIFIC ELECTRIC SOIL RESISTANCE ON THE SELECTION OF THE FORM OF CATHODE PROTECTION OF UNDERGROUND CONDUITS

Проведен сравнительный анализ стоимости катодной защиты наложенным током и катодной гальванической защиты подземных металлических сооружений на примере трубопроводов. Выявлены экономические преимущества протекторной защиты, как минимум при использовании её для трубопроводов с современной качественной антикоррозионной изоляцией, обладающей высокими диэлектрическими характеристиками. Повышенное внимание уделено сравнительной оценке стоимости катодной защиты единицы длины подземного трубопровода, которая определяется при изменении удельного сопротивления грунта в интервале от нуля до 100 Ом·м.

КОРРОЗИЯ; ЗАЩИТА ОТ КОРРОЗИИ; ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ КОРРОЗИЯ; ЗАЩИТА ОТ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ КОРРОЗИИ; ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ЗАЩИТА; КАТОДНАЯ ЗАЩИТА; ПРОТЕКТОРНАЯ ЗАЩИТА; ГАЛЬВАНИЧЕСКАЯ ЗАЩИТА.

In the article is carried out the comparative analysis of the cost of cathode protection by the superimposed current and the cathodic galvanic protection of underground metallic construction based on the example of conduits. Are revealed the economic advantages of protector protection, as the minimum with its use for the conduits with the contemporary qualitative anticorrosive isolation, which possesses high dielectric characteristics. The increased attention is given to the comparative estimate of the cost of the cathode protection of the unit of the length of underground conduit, which is determined with a change of the specific resistance of soil in the range from zero to hundred Ом·m

CORROSION, CORROSION PROTECTION, ELECTROCHEMICAL CORROSION; PROTECTION FROM THE ELECTROCHEMICAL CORROSION; ELECTROCHEMICAL PROTECTION; CATHODE PROTECTION; PROTECTOR PROTECTION; GALVANIC PROTECTION.

Постановка проблемы

При разработке и внедрении в производство новых изделий, оборудования, конструкций и сооружений различного типа существенную роль играет их коррозионная стойкость. Коррозия относится в основном к экономическим проблемам, так как связана с возможными потерями основных и оборотных фондов, а также предпринимательской прибыли. Для защиты от

коррозии подземных металлических сооружений все чаще используются методы электрохимической защиты, в частности протекторная защита. Однако существующие нормативные документы, например ГОСТ 9.602 – 2005 [1] и ГОСТ Р 51164 – 98 [2], далеко не всегда способствуют наиболее эффективному с экономической точки зрения разрешению проблемы защиты от коррозии подземных металлических

сооружений (ПМС). Решению этой задачи и посвящена данная статья.

Катодная защита от коррозии наложенным током подземных металлических сооружений

Катодная защита от коррозии наложенным током (в дальнейшем — катодная защита, или электрохимическая защита) в случае подземных металлических сооружений используется в основном для защиты от почвенной коррозии, а также и от коррозии, вызываемой постоянными и переменными блуждающими токами. Современные устройства катодной защиты представляют собой, как правило, выпрямители переменного тока, снабженные специальными блоками, которые обеспечивают автоматическое регулирование электрических характеристик электрохимической защиты (рис. 1). В качестве основного параметра, подлежащего регулировке, обычно принимают электрохимический потенциал защищаемого сооружения по отношению к грунту. При отсутствии особых условий агрессивности его поддерживают в границах от $-0,85$ до $-1,15$ В. Измерения в этом случае проводят с

использованием медно-сульфатных электродов сравнения.

В соответствии с DIN 30676 [3] необходимыми условиями для осуществления качественной электрохимической защиты от коррозии являются:

обеспечение высокой продольной проводимости трубопроводов (отсутствие изолирующих фланцев, устранение соединений в трубопроводе с высоким электрическим сопротивлением и т. д.);

отсутствие контактов с заземленными сооружениями (заземляющие устройства, арматура железобетонных фундаментов, другие подземные металлические сооружения, не подлежащие катодной защите и т. д.);

наличие качественной диэлектрической изоляции.

Будем считать, что все эти требования выполнены, и приступим к собственно расчету катодной защиты и оценке ее технико-экономической эффективности как функции удельного сопротивления грунта при наличии у ПМС современной диэлектрической изоляции. В качестве объекта защиты выберем отдельно распо-

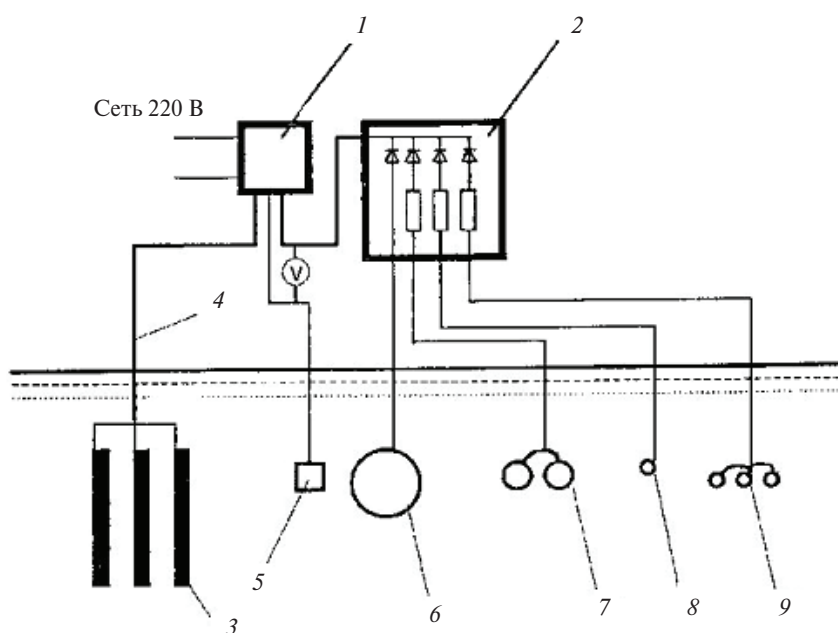


Рис. 1. Схема катодной защиты:

- 1 — катодная станция (преобразователь); 2 — БДР (блок диодно-резисторный); 3 — аноды (контур анодного заземления); 4 — контурный кабель; 5 — электрод сравнения; 6 — водопровод; 7 — теплоноситель; 8 — телефонные кабели; 9 — силовые кабели высокого напряжения

ложенный трубопровод, находящийся в грунте и имеющий качественное, например полиэтиленовое, антикоррозионное покрытие.

Основные принципы катодной защиты хорошо известны, а ее особенности, связанные с различными свойствами диэлектрической изоляции трубопровода, изложены, например, в публикации «Основные принципы проектирования катодной защиты подземных металлических сооружений» [4]. Воспользуемся некоторыми данными, полученными в этой работе, для оценки экономической эффективности катодной защиты как функции удельного сопротивления грунта при наличии у ПМС высококачественной полимерной изоляции. Пусть, например, трубопровод характеризуется следующими параметрами: удельное сопротивление материала (сталь) p_s равно 1,8 Ом·м; наружный диаметр трубопровода $d = 321$ мм; s – толщина стенки трубопровода ($s = 6$ мм). В соответствии со справочными данными [5] удельный защитный ток j_s в этом случае для трубопроводов, проложенных в грунте, изменяется в пределах от 10^{-5} до 10^{-6} А/м².

Технические параметры катодной защиты, определяемые при различных плотностях защитного тока, представлены в таблице 2 статьи [4]. Нас интересуют часть двух нижних строк данной таблицы, соответствующих выбранным плотностям защитного тока j_s , А/м², которые, в свою очередь, определяют протяженность $2L$, км, зоны катодной защиты трубопровода и защитный ток I_0 , А, трубопровода. Воспроизведем их в табл. 1 с целью использования в дальнейших вычислениях.

Таблица 1

Основные параметры, характеризующие зону защиты трубопровода

j_s , А/м ²	$2L$, км	I_0 А
10^{-5}	89,443	0,902
10^{-6}	282,800	0,285

На основании этих данных в зависимости от выбранных нами значений плотности защитного тока j_s можно рассчитать основные технические и экономические характеристики катодной защиты. Проведем эти расчеты, основываясь на схеме действий, приведенной в работе [4]. Для этого определим технические параметры и эконо-

номическую эффективность катодной защиты трубопровода для выбранных нами значений защитной плотности тока как функцию удельного сопротивления грунта в пределах его изменения от нуля до 100 Ом·м.

В соответствии с приведенными данными для выбранного значения плотности защитного тока реальные изменения коснутся прежде всего таких величин, как оптимальное количество n_w анодов в анодном заземлении, сопротивление R_G растекания анодного заземления, мощность преобразователя W и необходимый расход электроэнергии W_s в единицу времени.

Рассчитаем значения этих величин в соответствии с формулами, использованными нами ранее в работе [4]. Полученные результаты представим в табличной форме.

Определение оптимального количества электродов в анодном заземлении

Оптимальное количество электродов в анодном заземлении может быть определено по следующей формуле, взятой из монографии [6]:

$$n_w = I_0 \sqrt{\frac{FR_0 p k t T}{K_0 \rho_0 w}}, \quad (1)$$

где F – фактор взаимовлияния анодов, определяющий увеличение сопротивления анодного устройства в результате взаимного экранирования отдельных анодов. Это величина обычно колеблется в пределах от 1 до 2,5. В наших расчетах для большей наглядности мы примем $F = 1$; t – количество часов в году ($t = 8760$ час.); T – расчетный срок эксплуатации анодного заземления (годы). Мы принимаем $T = 10$ лет; ρ – удельное сопротивление грунта в районе расположения анодного заземления (оно может колебаться в очень широких пределах; мы будем считать, что ρ изменяется от нуля до 100 Ом·м с шагом 10 Ом·м); k – стоимость электроэнергии (в текущем году она составляет 3,39 рубля за 1 кВт/ч.); K_0 – стоимость отдельного анода, включая его установку; примем ее равной 10 000 рублей; w – коэффициент полезного действия преобразователя (примем его равным 0,5); ρ_0 – удельное сопротивление грунта, равное 10 Ом·м; R_0 – сопротивление растекания отдельного анода при удельном сопротивлении грунта ρ_0 . Для случая вертикальных анодов длиной l , диаметром d и глубиной заложения $t = 0$ оно

может быть вычислено по следующей формуле [5]:

$$R_0 = \frac{\rho_0}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d}. \quad (2)$$

Пусть $l = 1,2$ м, $d = 0,06$ м; тогда $R_0 \approx 5,83$ Ом.

Результаты расчета оптимального количества анодов в анодном заземлении представлены в табл. 2.

Определение величины сопротивления растекания для анодного заземления. При осуществлении дальнейших вычислений потребуются знание величины сопротивления растекания анодного заземления, которое определяется следующей формулой [6]:

$$R_G = F \frac{R_0}{n} \frac{\rho}{\rho_0}. \quad (3)$$

В нашем случае ρ – удельное сопротивление грунта в районе расположения анодного заземления. Оно может колебаться в очень широких пределах. Мы будем считать, что ρ изменяется от нуля до 100 Ом · м с шагом 10 Ом · м; Вычисления произведены с помощью формулы (3) и полученные данные помещены в табл. 2.

Определение входного сопротивления трубопровода. В соответствии с широко распространенным в немецкоязычном пространстве справочником [5] и работой [7] расчет входного сопротивления трубопровода будем производить по следующей формуле:

$$R_T = \frac{0,9}{I_0}, \quad (4)$$

где I_0 – при заданных значениях плотности защитного тока (см. табл. 1) и геометрических параметров трубопровода является константой (в нашем случае $I_0 = 0,902$ А). Размерный коэффициент 0,9 В обусловлен критерием NASE [5], в соответствии с которым, во-первых, «кажущееся удельное сопротивление изоляции трубопровода приблизительно равно удельному поляризованному сопротивлению в дефектах изоляции» и, во-вторых, считается, что «стационарный потенциал положительнее защитного потенциала на 0,3 В». В то же время падение потенциала в трубопроводе от его минимального значения $-0,85$ В до его максимальной величины $-1,15$ В составляет 0,3 В. Следовательно, общий потенциал в точке дренирования трубопровода относительно грунта составит 0,9 В. Данные расчета представлены в табл. 2.

Выбор оптимального сечения дренажного кабеля. Выбор оптимального сечения кабеля постоянного тока обычно производят при помощи специального графика (см., например, справочник [5]) исходя из величины защитного тока и срока службы установки электрохимической защиты или по величине максимально допустимого падения напряжения на нем. Кроме того, оптимальное сечение кабеля n_0 , мм², может быть определено и по следующей, разработанной нами ранее формуле [4]:

$$n_0 = I_0 \sqrt{\frac{R_1 k t T}{K_1 w}}, \quad (5)$$

где K_1 – стоимость одного погонного метра кабеля сечением 1 мм² совместно с ценой его монтажа (пусть она составляет 1000 рублей за погонный метр кабеля сечением 1 мм²; в дальнейшем мы будем приближенно считать, что стоимость пропорционально возрастает с ростом сечения кабеля и его длиной); R_1 – сопротивление одного погонного метра кабеля сечением 1 мм², которое, в свою очередь, определяется формулой

$$R_1 = \rho_K \frac{l_K}{n_0}, \quad (6)$$

где ρ_K – удельное сопротивление меди ($\rho_K = 1,75 \cdot 10^{-8}$ Ом · м); l_K – длина кабеля (в нашем случае $l_K = 1$ м); S_K – сечение кабеля (в нашем случае равное 10^{-6} м²); k – стоимость электроэнергии (примем ее равной 3,39 рубля за 1 кВт·час); w – коэффициент полезного действия преобразователя (принимая $w = 0,5$); T – срок службы установки электрохимической защиты (принимая $T = 10$ лет).

Подстановка всех указанных величин в расчетную формулу (5) и проведение вычислений дают следующее оптимальное значение сечения кабеля: $n_0 = 2,91 \cdot 10^{-6}$ м².

Определение общего сопротивления дренажного кабеля. Общее сопротивление дренажного кабеля может быть рассчитано с использованием широко известной из курса физики формулы [7]

$$R_k = \rho_K \frac{l_K}{n_0}, \quad (7)$$

где ρ_K – удельное сопротивление меди ($\rho_K = 1,75 \cdot 10^{-8}$ Ом · м); l_K – длина кабеля. В нашем случае принимаем для большей наглядности вычислений во всех рассматриваемых вариантах

электрохимической защиты $I_K = 100$ м; n_0 – оптимальное сечение кабеля, м², (в соответствии с расчетом для данной плотности тока оно составляет $2,91 \cdot 10^{-6}$ м²).

Определим общее сопротивление кабеля протяженностью 100 метров для выбранной плотности тока по формуле (7) и поместим полученные результаты вычислений в табл. 2.

Расчет общего сопротивления низковольтной цепи установки защиты, затрат на электроэнергию и мощности преобразователя. Вычисления будем производить с использованием следующих формул:

$$R = R_A + R_K + R_T; \quad (8)$$

$$W_3 = k_1 I_0^2 R; \quad (9)$$

$$W = k_1 k_2 I_0^2 R; \quad (10)$$

Здесь k_1 – коэффициент, учитывающий потери мощности при преобразовании электрического тока из переменного в постоянный; примем его равным 2 (коэффициент полезного действия 0,5); k_2 – коэффициент, учитывающий запас мощности преобразователя, принятый при проектировании катодной защиты, и возможное снижение сопротивления изоляции трубопровода со временем; примем его равным 1,5; R – общее сопротивление в цепи постоянного тока, которое вычисляется по формуле

$$R = R_A + R_K + R_T, \quad (11)$$

где R_A – сопротивление растекания для анодного заземления, включающее омическое и поля-

ризационное сопротивления; R_K – омическое сопротивление кабеля постоянного тока; R_T – входное сопротивление трубопровода, включающее омическое и поляризационное сопротивления.

Полученные данные внесем в табл. 2.

Расчет экономических параметров установки катодной защиты. Рассчитаем удельные годовые расходы на обеспечение катодной защиты участка трубопровода единичной длины (1 км) по следующей формуле [4]:

$$\Pi_L = \Pi_1 / 2L, \quad (12)$$

где Π_1 определяется известным соотношением

$$\Pi_1 = K / T + C. \quad (13)$$

В свою очередь, K и C рассчитываются по следующим формулам:

$$K = K_A + K_K + K_{\Pi}, \quad (14)$$

$$C = C_p + C_3, \quad (15)$$

где K – капитальные затраты на сооружение установки катодной защиты. Этот вид затрат зависит в первую очередь от мощности установки катодной защиты, и его удобно разбить на три составные части:

$$K = K_A + K_K + K_{\Pi}. \quad (16)$$

Здесь K_A – капитальные затраты, израсходованные на сооружение анодного заземления (10000 рублей на один анод); K_K – капитальные затраты на покупку и монтаж дренажного кабеля (1000 рублей на покупку и прокладку 1 м кабеля сече-

Таблица 2

Основные параметры, характеризующие катодную защиту трубопровода при плотности защитного тока $j_s = 10^{-5}$ А/м²

P , Ом·м	n_w , шт	R_G , Ом	R_T , Ом	R_K , Ом	R , Ом	W_3 , Вт	W , Вт	K_A , тыс. руб.	K_K , тыс. руб.	K_{Π} , тыс. руб.	K , тыс. руб.	C_p , тыс. руб.	C_3 , тыс. руб.	C , тыс. руб.	Π_1 , тыс. руб.	Π_L , тыс. руб.
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	16,79	0,347	0,998	0,602	1,947	3,168	4,752	167,9	291	100	558,9	100	0,094	100,1	156,0	1,744
20	23,74	0,491	0,998	0,602	2,091	3,402	5,103	237,4	291	100	628,4	100	0,101	100,1	162,9	1,821
30	29,08	0,601	0,998	0,602	2,201	3,581	5,372	290,8	291	100	681,8	100	0,107	100,1	169,3	1,893
40	33,58	0,694	0,998	0,602	2,294	3,732	5,598	335,8	291	100	726,8	100	0,111	100,1	172,8	1,932
50	37,54	0,777	0,998	0,602	2,377	3,867	5,800	375,4	291	100	766,4	100	0,115	100,1	176,7	1,976
60	41,13	0,850	0,998	0,602	2,450	3,986	5,979	411,3	291	100	802,3	100	0,119	100,1	181,3	2,027
70	44,42	0,919	0,998	0,602	2,519	4,098	6,147	444,2	291	100	835,2	100	0,122	100,1	183,6	2,053
80	47,50	0,982	0,998	0,602	2,598	4,227	6,341	475,0	291	100	866	100	0,126	100,1	186,6	2,086
90	50,19	1,045	0,998	0,602	2,645	4,303	6,455	501,9	291	100	892,9	100	0,128	100,1	190,4	2,129
100	53,09	1,098	0,998	0,602	2,698	4,390	6,585	530,9	291	100	921,9	100	0,131	100,1	192,4	2,151

нием 1 мм^2); $K_{\text{п}}$ – капитальные затраты на покупку и установку преобразователя (в силу относительно небольшого вклада этой величины в общие капитальные затраты примем $K_{\text{п}}$ равным 100 000 рублей для плотностей тока от 10^{-5} до 10^{-6} А/м^2); C – годовые эксплуатационные затраты, рассчитанные на одну установку катодной защиты; их удобно разбить на следующие составные части:

$$C = C_p + C_э, \quad (17)$$

где C_p – затраты на профилактику установки катодной защиты, проведение различных измерений, капитального и текущего ремонтов и т. д. (для конкретной установки их можно принять постоянными в течение всего периода эксплуатации катодной защиты). Они мало изменяются при изменении мощности установки электрохимической защиты. Мы примем их условно равными 100 000 руб./год; $C_э$ – годовые затраты на электроэнергию, для конкретной установки их можно принять постоянными в течение всего периода эксплуатации катодной защиты, но они очень сильно зависят от величины защитного тока и определяются формулой

$$C_э = k t W_э, \quad (18)$$

где k – стоимость электроэнергии (принимаяем её равной 3,39 рубль/кВт · час; t – количество

часов в году (8760 час); $W_э$ – мощность, потребляемая на входе преобразователя электрохимической защиты.

Полученные данные поместим в табл. 2.

Гальваническая антикоррозионная защита подземных металлических трубопроводов

Протекторная защита основана на использовании принципа работы гальванических элементов. Так, например, если к стальному подземному сооружению присоединить электрод из более электроотрицательного металла, чем сталь, то будет образована коррозионная пара, в которой защищаемое сооружение будет катодом, а электрод – анодом. В силу этого протекторную защиту часто называют катодной защитой гальваническими анодами. Принцип ее работы очевиден из рис. 2. Он основывается на том, что вследствие разности потенциалов протектора и металлического сооружения в цепи защитной установки возникает электрический ток, который смещает потенциал защищаемого сооружения в отрицательном направлении, что и создает эффект катодной защиты.

Основные закономерности работы гальванической защиты хорошо известны, а ее особен-

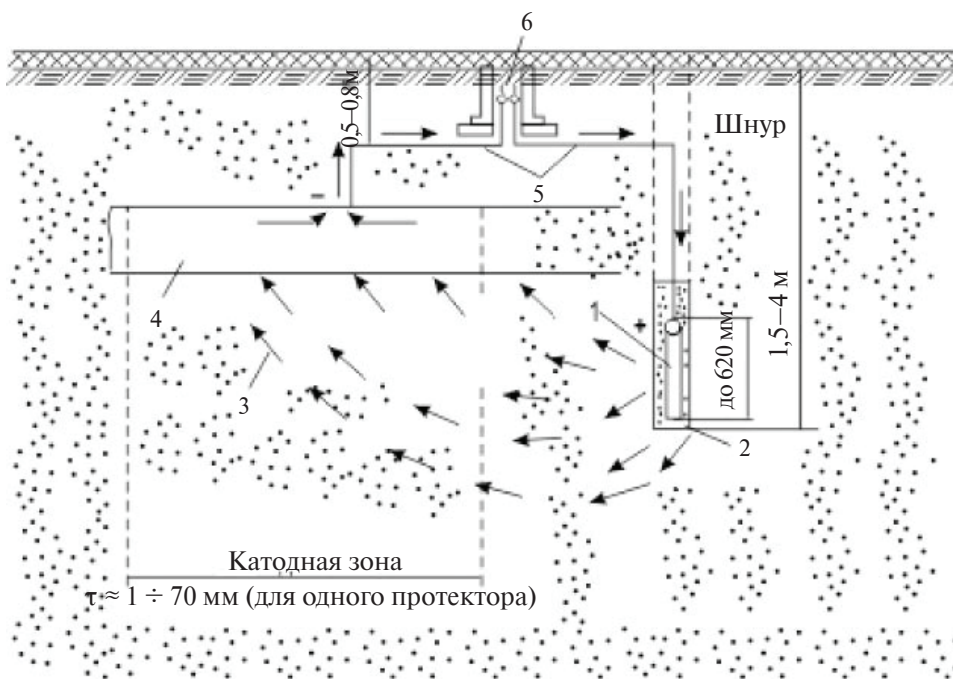


Рис. 2. Схема протекторной защиты: 1 – протектор; 2 – активатор; 3 – пути движения защитного тока в грунте; 4 – трубопровод; 5 – соединительный кабель; 6 – контрольный пункт

ности, связанные с различным качеством диэлектрической изоляции трубопровода, изложены, например, в публикации «Основные принципы проектирования протекторной защиты подземных металлических сооружений» [7].

Воспользуемся данными, полученными в этой работе, для оценки экономической эффективности протекторной защиты как функции удельного сопротивления грунта при наличии высококачественной полимерной изоляции. В соответствии со справочными данными [5] удельный защитный ток j_s в этом случае – для трубопроводов, проложенных в грунте, – изменяется от 10^{-5} до 10^{-6} А/м². Ряд технических параметров катодной защиты, определяемых при различных плотностях защитного тока, представлен в табл. 1. Очевидно, что они в равной степени применимы и для протекторной защиты. Рассчитаем, основываясь на этих данных, основные технические и экономические характеристики установок протекторной защиты.

Расчет основных технических и экономических параметров установки протекторной защиты. На практике оценка величины защитного тока J_A одного протектора для магниевых протекторов обычно происходит с использованием следующей хорошо известной эмпирической формулы из справочника [5]:

$$J_A = 0,6/R_n, \quad (19)$$

где величина 0,6 характеризует движущее напряжение, т. е. напряжение между защищаемым сооружением с поляризационным потенциалом

–0,85 В и поляризационным потенциалом гальванического анода, которые измерены относительно медно-сульфатного электрода сравнения. Для цинкового анода эта величина обычно составляет 0,2 В, а для алюминиевого – 0,3 В [5]. Под обозначением R_n понимают омическое сопротивление в цепи установки протекторной защиты, которое, в свою очередь, определяется следующей формулой:

$$R_n = R_s + R_G + R_K, \quad (20)$$

где R_s – омическое сопротивление растекания защищаемого сооружения; R_G – омическое сопротивление растекания одиночного гальванического анода; R_K – омическое сопротивление кабеля.

Проведем вычисление необходимой величины защитного тока с использованием этих формул. Воспользуемся упрощенным вариантом расчета сопротивления растекания пятикилограммовых магниевых анодов, изготовленных в форме блоков и помещенных в мешки с активатором. В этом случае в силу малой протяженности кабельных прокладок (что влечет за собой их относительно низкую стоимость), а также возможности выбора практически любого необходимого сечения кабеля можно принять, что $R_K \ll R_G$. В то же время для расчета омического сопротивления растекания трубопровода можно принять, что $R_s = 0,3$ Ом [5]. Следовательно, мы можем переписать формулу (19) в следующем виде:

$$J_A \approx \frac{0,6}{R_G + 0,3}. \quad (21)$$

Таблица 3

Основные параметры, характеризующие протекторную защиту трубопровода при плотности защитного тока $j_s = 10^{-5}$ А/м²

ρ , Ом·м	R_G , Ом	J_A , А	$n_{пр}$, шт	$K_{пр}$, тыс. руб.	$C_{пр}$, тыс. руб.	$\Pi_{1пр}$, тыс. руб.	$\Pi_{Lпр}$, тыс. руб.
0	0	0	0	0	0	0	0
10	6	0,100	9,020	90,20	8	17,02	0,190
20	12	0,049	18,41	164,0	8	24,40	0,273
30	18	0,033	27,33	237,4	8	31,74	0,355
40	24	0,025	36,08	311,0	8	39,10	0,437
50	30	0,020	45,10	392,2	8	47,22	0,528
60	36	0,017	53,06	474,7	8	55,47	0,620
70	42	0,014	64,43	530,6	8	61,06	0,683
80	48	0,012	75,17	601,3	8	68,13	0,762
90	54	0,011	82,00	693,8	8	77,38	0,865
100	60	0,010	90,20	751,7	8	73,17	0,818

Установлено [5], что сопротивление растекания для протектора выбранной нами формы в основном определяется следующей эмпирической формулой:

$$R_G = 0,6 \rho \text{ [Ом}\cdot\text{м/м]}, \quad (22)$$

где ρ – удельное сопротивление грунта, Ом·м.

Проведем соответствующие вычисления R_G и J_A , результаты поместим в табл. 3.

Расчет количества протекторов. В случае, если все указанные мероприятия не позволяют обеспечить требуемый защитный ток I_0 , (в нашем случае согласно табл. 1 его величина составляет 0,902 А), необходимо использовать несколько протекторов. Очевидно, что при использовании n одиночных протекторов защитный ток, получаемый от них, увеличивается в n раз. Однако на практике с целью сокращения объема земляных работ используют групповое размещение протекторов, при котором наблюдается некоторый рост омического сопротивления растекания по сравнению с одиночным заложением протекторов, что учитывается коэффициентом экранирования η . При обычных методах закладки гальванических анодов его величина мало отличается от 0,85. Количество $n_{гр}$ протекторов, установленных групповым способом в таком случае можно определить по формуле

$$n_{гр} = \frac{I_0}{\eta J_A}. \quad (23)$$

Вместе с тем в наших расчетах с целью более адекватного сравнения экономических параметров двух методов защиты (катодного и протекторного) будем считать, что $\eta = 1$, т. е. будем использовать следующую упрощенную формулу:

$$n_{гр} = \frac{I_0}{J_A}. \quad (24)$$

Проведем соответствующие вычисления $n_{гр}$, результаты поместим в табл. 3.

Проектирование протекторной защиты предполагает и определение срока её службы по следующей формуле:

$$T = \frac{mg\eta_n\eta_{II}}{8760J_{cp}}, \quad (25)$$

где T – срок службы протектора (годы); m – масса протектора; g – токоотдача материала протектора (теоретическая); η_n – коэффициент, учитывающий собственную коррозию анода; η_{II} – коэффициент, учитывающий неравномер-

ность коррозии анода; J_{cp} – среднее значение силы тока в цепи «протектор – ПМС» за весь период T эксплуатации протектора.

Будем считать, что данное требование выполняется. В противном случае оно легко исправимо простым увеличением массы протекторов. Остальные параметры протекторной защиты при этом изменяются мало, и можно принять, что они остаются практически неизменными и не влияющими на экономические и технические параметры гальванической защиты ПМС от коррозии.

Расчет основных экономических параметров установки протекторной защиты. Рассчитаем удельные годовые расходы на обеспечение протекторной защиты участка трубопровода единичной длины (1 км) по следующей формуле [4]:

$$\Pi_{Lпр} = \frac{\Pi_{1пр}}{2L}, \quad (23)$$

где $\Pi_{1пр}$, определяется соотношением

$$\Pi_{1пр} = \frac{K_{пр}}{T} + C_{пр}; \quad (24)$$

$K_{пр}$ – капитальные затраты на сооружение установки протекторной защиты (10000 рублей на один гальванический анод); $C_{пр}$ – годовые эксплуатационные затраты, рассчитанные на одну установку протекторной защиты и расходуемые на её профилактику, проведение различных измерений, ремонтов и т. д. В соответствии с п. 4.7.7 «Инструкции по защите городских подземных трубопроводов от коррозии» [8] профилактические осмотры установок протекторной защиты производятся два раза в год. Осмотры уже установок катодной защиты осуществляют два раза в месяц. Соответственно можно принять (особенно учитывая то обстоятельство, что технически протекторная защита значительно проще катодной), что стоимость ее будет не более 8 % от соответствующей стоимости обслуживания установок катодной защиты. Стоимость годового обслуживания установки катодной защиты нами была оценена ранее в 100000 рублей. Следовательно, стоимость годового обслуживания установки протекторной защиты можно принять равной 8000 рублей.

Полученные данные поместим в табл. 3.

Обсуждение результатов и выводы

Оценка экономической эффективности антикоррозионных мероприятий сопряжена с целым рядом методологических трудностей. Действительно, наиболее часто используемый метод годовых приведенных затрат предполагает, что степень защищённости ПМС при любом виде применяемых антикоррозионных мероприятий остается практически постоянной. В действительности это не так. Следовательно, учет изменения скорости коррозионного процесса на ПМС при использовании различных методов антикоррозионной защиты требует развития соответствующих модельных представлений и прогнозов коррозионного состояния ПМС, что резко снижает точность расчётов экономической эффективности антикоррозионной защиты.

Счастливым исключением из этого общего правила является сравнительная оценка технико-экономической эффективности протекторной защиты и катодной защиты наложенным током [9, 10]. В этом случае эффективность антикоррозионных мероприятий определяется одним и тем же параметром, а именно достижением защитного потенциала $-0,85$ В по медно-сульфатному электроду сравнения, и, следовательно, может не учитываться при экономическом сравнении обоих методов защиты. В этом случае можно ограничиться рассмотрением приведенных затрат по вариантам электро-

химической защиты, осуществленной для одного и того же подземного металлического сооружения. Практически это означает сравнение величин Π_L и $\Pi_{Lпр}$, т. е. годовых приведенных затрат на защиту одного километра трубопровода установками соответственно катодной и протекторной защит при одинаковых условиях. Сопоставление последних строк табл. 2 и 3, где определены эти параметры, позволяет сделать однозначный выбор в пользу протекторной защиты для трубопроводов с современной, например полиэтиленовой, изоляцией, обладающей хорошими диэлектрическими свойствами в рассмотренном интервале изменения сопротивления грунта.

Выводы

Предложена методика расчета сравнительной экономической эффективности протекторной и катодной защит подземных металлических сооружений, использующая практически формулы, выработанные в процессе развития методов электрохимической защиты. Она позволяет:

оценить влияние удельного сопротивления грунта на экономическую эффективность протекторной и катодной защит;

выбрать вариант электрохимической защиты с минимальной стоимостью путем сравнения годовых приведенных затрат на один километр защищаемого трубопровода в вариантах протекторной и катодной защиты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 9.602 – 2005. Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии. М.: Стандартинформ, 2006. 55 с.
2. ГОСТ Р 51164 – 98. Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии. М.: Госстандарт России. 1998. 41 с.
3. DIN 30 676. Planung und Anwendung des kathodischen Korrosionsschutzes für den Außenschutz.
4. 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.
5. Baeckmann W. Taschenbuch für den kathodischen Korrosionsschutz. Essen.: Vulkan-Verlag, 1996. 339 S.
6. Baeckmann W., Schwenk W. Handbuch des kathodischen Korrosionsschutzes. Weinheim.: Verlag Chemie. 1980. 465 S.
7. Киселев В.Г. Основные принципы проектирования протекторной защиты подземных металлических сооружений // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического института. 2011. № 3(130). С. 75–80.
8. РД 153-39.4-091-01 Инструкция по защите городских подземных трубопроводов от коррозии. Санкт-Петербург: Изд-во ДЕАН, 2002. 240 с.
9. Киселев В.Г., Медяный С.А. Методы оценки экономической эффективности антикоррозионных мероприятий // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического института. 2008. № 2 (54). С. 215–218.
10. Киселев В.Г. Совершенствование методики оценки экономической эффективности антикоррозионных мероприятий // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического института. 2009. № 4 (89). Т. 2. С. 107–112.

REFERENCES

1. **GOST 9.602 – 2005.** Yedinaya sistema zashchity ot korrozii i stareniya. Sooruzheniya podzemnyye. Obshchiye trebovaniya k zashchite ot korrozii [United system for corrosion protection and aging. Construction are underground. General requirements for the corrosion protection] M.: Standartinform, 2006. 55 s. (rus.)
2. **GOST R 51164 – 98.** Truboprovody stalnyye magistralnyye. Obshchiye trebovaniya k zashchite ot korrozii [Conduits are steel main. General requirements for the corrosion protection]. M.: Gosstandart Rossii, 1998. 41 s. (rus.)
3. **DIN 30 676.** Planung und Anwendung des kathodischen Korrosionsschutzes für den Außenschutz [Planning and application of the cathodic corrosion protection for the external contactor].
4. **Kiselev V.G.** Osnovnyye printsiipy proyektirovaniya katodnoy zashchity podzemnykh metallicheskih sooruzheniy [Basic principles of the design of the cathode protection of the underground metallic construction]. *Nauchno-tehnicheskiye vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo instituta.* 2011. № 4 (135). S. 111–116. (rus.)
5. **Baekmann W.** Taschenbuch für den kathodischen Korrosionsschutz [Paperback for the cathodic corrosion protection]. Essen.: Vulkan-Verlag, 1996. 339 s.
6. **Baekmann W., Schwenk W.** Handbuch des kathodischen Korrosionsschutzes [Manual of the cathodic corrosion protection]. Weinheim.: Verlag Chemie. 1980. 465 s.
7. **Kiselev V.G.** Osnovnyye printsiipy proyektirovaniya protektornoy zashchity podzemnykh metallicheskih sooruzheniy [Basic principles of the design of the protector protection of the underground metallic construction]. *Nauchno-tehnicheskiye vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo instituta.* 2011. № 3 (130). S. 75–80. (rus.)
8. **RD 153-39.4-091-01.** Instruksiya po zashchite gorodskikh podzemnykh truboprovodov ot korrozii [Instruction on the protection of urban underground conduits from the corrosion]. Sankt-Peterburg.: Izd-vo DEAN, 2002. 240 s. (rus.)
9. **Kiselev V.G.** Sovershenstvovaniye metodiki otsenki ekonomicheskoy effektivnosti antikorrozionnykh meropriyatiy [Methods of the estimation of economic effectiveness in the anticorrosive measures]. *Nauchno-tehnicheskiye vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo instituta.* 2009. № 4-2 (89). T. 2. S. 107 – 112. (rus.)
10. **Kiselev V.G., Medyanyy S.A.** Metody otsenki ekonomicheskoy effektivnosti antikorrozionnykh meropriyatiy [Improvement of the procedure of the estimation of economic effectiveness in the anticorrosive measures]. *Nauchno-tehnicheskiye vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo instituta.* 2008. № 2 (54). S. 215 – 218. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ/AUTHORS

КИСЕЛЕВ Владимир Геннадьевич – доктор технических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.
195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.
E-mail: kis_vg@mail.ru

KISELEV Vladimir G. – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.
E-mail: kis_vg@mail.ru