



КОМПЬЮТЕРНЫЕ ПРОГРАММЫ РАСЧЕТА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАЩИТЫ ТРУБОПРОВОДОВ МЕТОДОМ НЕЛИНЕЙНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ

С. Г. ПОЛЯКОВ, д-р техн. наук, **А. А. РЫБАКОВ**, канд. техн. наук, **Л. И. НЫРКОВА**, канд. хим. наук
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Разработана компьютерная программа расчета электрохимических параметров и проверена ее работоспособность в лабораторных условиях и условиях трассы при обследовании газопровода с помощью электрохимической микропроцессорной системы (ЭХМС). Полученные данные о скорости почвенной коррозии металла трубопровода удовлетворительно совпадают с данными массометрических измерений. Возможность оценки скорости остаточной коррозии металла трубопровода в дефекте покрытия с помощью ЭХМС и разработанной программы позволяет объективно судить о степени защищенности трубопровода и принимать обоснованное решение об очередности ремонта участков трубопровода с поврежденной изоляцией.

Ключевые слова: трубопроводы, изоляционное покрытие, коррозия, скорость коррозии, потенциал, эффективность защиты, потенциометрия, массометрия, компьютерные расчеты

Изучение механизма и кинетики коррозии стальных трубопроводов необходимо для практической оценки опасности разрушения подземных металлических сооружений и определения их эффективной электрохимической защиты.

Эффективность защиты трубопроводов от коррозии характеризуется скоростью коррозии металла трубопровода в дефекте изоляционного покрытия. Для расчета значений этой величины используют следующие параметры, определяемые по поляризационным кривым: поляризационный потенциал E_p , тафелевский наклон анодной поляризационной кривой b_a и скорость почвенной коррозии i_k . Таким образом, расчет эффективности защиты трубопровода от коррозии сводится к определению скорости почвенной коррозии и поляризационного потенциала трубопровода.

Скорость остаточной коррозии металла трубопровода в дефекте изоляционного покрытия $i_{к.о}$ рассчитывается по формуле

$$i_{к.о} = \bar{i}_k 10^{\bar{E}_p/b_a}, \quad (1)$$

где \bar{E}_p — среднее значение поляризационного потенциала.

Определение скорости коррозии металла в какой-либо среде является основной проблемой электрохимической кинетики. В настоящее время как у нас в стране, так и за ее пределами вопрос о способе определения скорости коррозии остается открытым. Ученые разных стран, работая над созданием компьютерных программ для расчета электрохимических параметров коррозионного процесса — скорости почвенной коррозии и тафелевских наклонов [1–11], пришли к выводу, что достоверность обрабатываемых данных зависит от вы-

бора способа снятия поляризационных кривых, а не от метода математической обработки результатов испытаний.

Для большинства систем металл–электролит потенциал коррозии E_k расположен довольно далеко от равновесных потенциалов анодной и катодной реакции. Зависимость плотности тока i от потенциала E описывается уравнением

$$i = i_k [10^{2,303(\eta/b_a)} - 10^{(-2,303\eta/b_k)}], \quad (2)$$

где $\eta = E - E_k$ — перенапряжение; b — постоянная Тафеля; индексы «а», «к» относятся соответственно к анодной и катодной реакциям.

Это уравнение чаще всего используют для нахождения коррозионных характеристик металла по данным поляризационных измерений.

Численный метод расчета скорости коррозии металлов и сплавов в точке перегиба можно рассматривать как альтернативный по отношению к методу поляризационного сопротивления Штерна и Гири [12]. Его применение не требует введения каких-либо ограничений относительно формы поляризационных кривых. Однако в большинстве случаев априорная оценка положения точки перегиба необходима, поскольку фактические значения наклонов анодного и катодного участков тафелевских прямых для исследуемой системы не известны. Кроме того, интервал значений электродного потенциала, полученных с помощью измерений, шире традиционного ($E_k = -10 \dots +10$) мВ. Метод точки перегиба может использоваться как в анодной, так и в катодной области потенциала. Это имеет большое практическое значение, поскольку для надежной оценки скорости коррозии необходимо знать эффективные значения тафелевских наклонов.

При определении скорости коррозии следует выбрать процедуру снятия поляризационных кривых в постоянном временном интервале. Это необходимо для того, чтобы проверить, является ли значение мгновенной скорости коррозии постоянным на протяжении всего данного исследования и установить аномальные условия, в значительной



степени влияющие на сопротивление процессу коррозии. Как показала практика, неудовлетворительные результаты могут быть получены, когда поляризационные кривые измеряли в течение более длительного (по сравнению с другими кривыми) времени. Кроме того, очень важно уменьшить или устранить влияние на электродную кинетику любого фактора, который существенно изменяет форму поляризационных кривых, например, сопротивление раствора между рабочим электродом и электродом, используемым для сравнения.

Из результатов опубликованных исследований становится очевидным, что успешное определение скорости коррозии зависит также от надежности численного метода обработки экспериментальных данных в реальном промежутке времени. Доказано, что метод NOLI в случае, если протекает более двух определяющих процессов из тех, что вносят существенный вклад в результирующую реакцию в интервале потенциалов ($E_k = -90 \dots +90$) мВ, не пригоден.

Математические выкладки. Значения наиболее важных электрохимических параметров можно определить, вычислив корень соответствующей функции и рассчитав элементарные соотношения, установленные между ними.

В оригинальной версии метода точки перегиба кинетический закон описывается следующим уравнением:

$$i(\Delta E) = i_k(e^{\alpha_a \Delta E} - e^{-\alpha_k \Delta E}), \quad (3)$$

где $\Delta E = E - E_m$; E_m — смешанный потенциал; α_a и α_k — величины, связанные соответственно с анодным и катодным тафелевскими наклонами соотношениями: $b_a = \alpha_a^{-1} \ln 10$ и $b_k = \alpha_k^{-1} \ln 10$. Кроме того, всегда справедливы соотношения $0 < \alpha_a < 1$ и $0 < \alpha_k < 1$.

Важность закона (3) обусловлена тем фактом, что с помощью кривых ток–потенциал описывается поведение большого класса коррозионных процессов одного типа. Как показал опыт, кривые ток–потенциал для металлов и сплавов, находящихся в разных агрессивных средах, подчиняются уравнению Тафеля, когда используется метод последовательного приближения.

Исходя из аналитического выражения для первой производной

$$i'(\Delta E) = i_k(\alpha_a e^{\alpha_a \Delta E} + \alpha_k e^{-\alpha_k \Delta E}), \quad (4)$$

становится очевидным, что $i'(\Delta E) > 0$ и функция (3) имеет минимум в середине интервала $(-\infty \dots \infty)$, поскольку $i'(\Delta E) \rightarrow \infty$ при $\Delta E \rightarrow -\infty$ и $i'(\Delta E) \rightarrow \infty$ при $\Delta E \rightarrow \infty$. Это означает, что вторая производная

$$i''(\Delta E) = i_k(\alpha_a^2 e^{\alpha_a \Delta E} - \alpha_k^2 e^{-\alpha_k \Delta E}) \quad (5)$$

имеет единственный корень в точке

$$\Delta E_i = 2 \frac{\ln(\alpha_k / \alpha_a)}{\alpha_a + \alpha_k}, \quad (6)$$

которая является точкой перегиба функции (3). Согласно математическому анализу точка перегиба

непрерывной функции $f(x)$ определяется условием $f^{(2n)}(x) = 0$, где n — целое положительное число.

Анализ уравнения (3) показал, что $\Delta E_i > 0$ при $\alpha_a < \alpha_k$ и $\Delta E_i < 0$ при $\alpha_a > \alpha_k$. Таким образом, положение точки перегиба зависит только от значений тафелевских наклонов.

Определить значения электрохимических параметров α_a , α_k , i_k можно, рассчитав корни следующих уравнений:

$$i'(0) = i_k(\alpha_a + \alpha_k); \quad (7)$$

$$i''(0) = i_k(\alpha_a^2 - \alpha_k^2); \quad (8)$$

$$\alpha_a^2 e^{\alpha_a \Delta E_i} - \alpha_k^2 e^{-\alpha_k \Delta E_i} = 0. \quad (9)$$

Объединив (7) и (8) и полагая $w = i''(0)/i'(0)$, получим соотношение

$$w = \alpha_a - \alpha_k. \quad (10)$$

С учетом (10) уравнение (9) приобретает вид

$$\alpha_a^2 e^{\alpha_a \Delta E_i} - (\alpha_a - w)^2 \alpha_k^2 e^{-\alpha_k \Delta E_i} e^{w \Delta E_i} = 0, \quad (11)$$

что дает возможность при известном значении ΔE_i рассчитать α_a .

Главным моментом представленной теории есть определение формы функции $F(\alpha_a)$ по уравнению

$$F(\alpha_a) = e^{\alpha_a \Delta E_i} [\alpha_a^2 - (\alpha_a - w)^2] e^{-2\alpha_k \Delta E_i} e^{w \Delta E_i} \quad (12)$$

в интервале (0,1) для того, чтобы установить, есть ли корень внутри этого интервала и выбрать численный метод его расчета.

С целью упрощения примем $\alpha_k > \alpha_a$, т. е. $\Delta E_i > 0$ и $w < 0$. Тогда получим $F(0) = -w^2 e^{w \Delta E_i}$ при $\alpha_a = 0$ и $F(\alpha) \rightarrow \infty$ при $\alpha_a \rightarrow \infty$. Это указывает на то, что $F(\alpha)$ имеет как минимум один корень. На следующем этапе необходимо доказать, что этот корень единственный.

Доказательство того, что $F(\alpha)$ имеет только один корень осуществляется путем введения функции $G(\alpha_a)$, которая описывается формулой

$$G(\alpha_a) = \alpha_a^2 - (\alpha_a - w)^2 e^{-2\alpha_k \Delta E_i} e^{w \Delta E_i}, \quad (13)$$

и его первой производной

$$G'(\alpha_a) = 2[\alpha_a + (\alpha_a - w) e^{-2\alpha_k \Delta E_i} e^{w \Delta E_i}][(\alpha_a - w)\Delta E_i - 1]. \quad (14)$$

При анализе выражения (14) можно рассмотреть три случая: $-w\Delta E_i > 1$; $-w\Delta E_i = 1$ и $-w\Delta E_i < 1$. В первых двух случаях всегда $G'(\alpha_a) > 0$ при $\alpha_a \neq 0$. При таких условиях функция $F(\alpha)$ монотонно возрастает, поскольку имеет только один корень. Третий случай является более сложным, поскольку нелегко установить аналитическую процедуру, если всегда $G'(\alpha_a) > 0$ при $\alpha_a \neq 0$.

Чтобы доказать, что $G'(\alpha_a) > 0$, нужно использовать неравенство

$$\alpha_a + (\alpha_a - w) e^{-2\alpha_k \Delta E_i} e^{w \Delta E_i} [(\alpha_a - w)\Delta E_i - 1] > 0. \quad (15)$$

Таким образом, необходимо найти приемлемый численный метод определения нижней границы α_{a1} , поскольку $G'(\alpha_a) > 0$, а $F(\alpha)$ — монотонно возрастающая функция при $\alpha_a > \alpha_{a1}$. Кроме того, положительное значение α_{a1} , которое отвечает минимуму $G(\alpha_a)$, меньше, чем корень $F(\alpha_a)$. Это обусловлено тем, что внутри интервала (0, α_{a1})



функция $G(\alpha_a)$ является монотонно убывающей и принимает отрицательные значения.

Остается показать, что для всех трех случаев $F(1) > 0$. Это легко доказать, проверив, выполняется ли неравенство

$$e^{\Delta E_i} (1 - (1 - w)^2 e^{-(2-w)\Delta E_i}) > 0. \quad (16)$$

Анализируя произвольно выбранные численные примеры и помня, что $|w| < 1$, справедливость неравенства (16) становится очевидной для случая $\Delta E_i \geq 1$. Более того, неравенство (12) дает прямое подтверждение того, что $\alpha_a < 1$.

Из изложенного ранее следует, что корень $F(\alpha_a)$ обеспечивает значимое решение при выполнении условия $0 < \alpha_{a1} < 1$. Если $\alpha_a > \alpha_k$, то $\Delta E_i < 0$ и $w > 0$, то приходим снова к случаю, когда обсуждается кривая ток-потенциал $h(\Delta E_r) = -i(-\Delta E)$, где $\Delta E_r = -\Delta E$ — новая переменная.

Теперь остается только проанализировать условие $\alpha_a = \alpha_k$, которое отвечает условию $\Delta E_i = 0$ и $w = 0$. В соответствии с этой гипотезой рассчитаем по идентичному уравнению (9) третью производную $i(\Delta E)$ при $\Delta E = 0$ и получим соотношение

$$\alpha_a = \sqrt{\frac{i'''(0)}{i'(0)}}. \quad (17)$$

Следует заметить, что, если ΔE_i принимает значения, близкие к нулю, то правильность неравенства (16) подвергается сомнению. Поэтому лучше принять $\Delta E_i = 0$ и рассчитать первое приближение по уравнению α_a (17).

Оценка плотности тока коррозии. Корень функции $F(\alpha_a)$ при $\alpha_a \neq \alpha_k$ можно рассчитывать с помощью метода Ньютона. Приведем выражение для его первой производной, которое с учетом (13) и (14) принимает вид

$$F'(\alpha_a) = \Delta E_i e^{\alpha_a \Delta E_i} G(\alpha_a) + e^{\alpha_a \Delta E_i} G'(\alpha_a). \quad (18)$$

Корень $F(\alpha_a)$ представлен предельным значением числовой последовательности

$$\alpha_{an} = \alpha_{a(n-1)} - \frac{F(\alpha_{a(n-1)})}{F'(\alpha_{a(n-1)})}. \quad (19)$$

Начальное значение может быть выбрано произвольно внутри данного интервала сходимости.

Если значения корня $F(\alpha_a)$ известны, то значения α_k можно вычислять из (10), а значения i_k находят, используя приближения разного характера. Таким образом, i_k можно рассчитать с помощью (7). При этом получим

$$i_k = \frac{i'(0)}{\alpha_a + \alpha_k}.$$

При использовании оригинальной версии метода точки перегиба выражение для расчета i_k принимает вид

$$i_k = \frac{i'(\Delta E_i)}{\alpha_a e^{\alpha_a \Delta E_i} + \alpha_k e^{-\alpha_k \Delta E_i}},$$

где $i'(\Delta E_i)$ — значение первой производной i по ΔE , полученное при использовании метода точки перегиба; ΔE_i — приращение потенциала, вычисленное по экспериментальным данным.

Значение i_k можно рассчитать и другим способом. Приняв $S(\Delta E) = e^{\alpha_a \Delta E} - e^{-\alpha_k \Delta E}$ и рассматривая пары $(\Delta E_k, i_k)$ при $k = 1, 2, \dots, N$, получим

$$i_k = \frac{\sum_{k=1}^N i_k S(\Delta E_k)}{\sum_{k=1}^N i_k S(\Delta E_k)^2}.$$

Главное преимущество указанных соотношений заключается в том, что правильность расчета значений скорости коррозии на основании экспериментальных данных подтверждается сопоставлением с данными, полученными при снятии поляризационных кривых.

Правильность предыдущих математических соображений оценена путем анализа некоторых примеров, благодаря которым можно также проверить сходимость числовой последовательности (19) и влияние выбора значения α_0 на эффективность метода Ньютона.

Что касается последнего заключения, то после предыдущей обработки решено принять $\alpha_{a0} = 0,1 \text{ мВ}^{-1}$, поскольку именно при таком значении α_{a0} получены наиболее удовлетворительные результаты во всех исследованных случаях. Кроме того, следует обратить внимание на то, что всегда $\alpha_a < 0,1 \text{ мВ}^{-1}$. Таким образом, нет необходимости в том, чтобы принимать значения α_{a0} , которые удовлетворяют неравенству $0,1 < \alpha_a < 1 \text{ мВ}^{-1}$.

Метод Ньютона является мощным инструментом для расчета корня уравнения (11), а начальное значение $\alpha_a = 0,1 \text{ мВ}^{-1}$ — правильным для достижения сходимости числовой последовательности после нескольких итераций (19) как при теоретических, так и при экспериментальных данных. На основании анализа расчетных кривых можно заключить, что корень уравнения (8) не зависит от относительных значений b_a и b_k .

Построенные кривые свидетельствуют о том, что числовая последовательность (19) есть конвергентной даже, если $-w\Delta E_i = 1,25 \cdot 10^{-4}$, что имеет место в случае $b_a = 89$ и $b_k = 90 \text{ мВ}$. Если экспериментальные поляризационные кривые наиболее точно описываются полиномом 4-й степени, то расчет скорости коррозии дает наиболее удовлетворительные результаты. Таким образом, эффективность численных методов обработки зависит от точности и воспроизводимости экспериментальных данных. Поляризационные измерения следует выполнять с использованием наиболее современных электрохимических методов, учитывая при этом влияние омического сопротивления на потенциал электрода.

Экспериментальные результаты и их обсуждение. Существует способ расчета тафелевских наклонов и мгновенной скорости коррозии, исходя из поляризационных кривых на основании использования короткой и простой компьютерной программы BetaCrunch, написанной на языке BASIC, которая базируется на последовательной подстановке известных значений b_k , b_a и i_k в (2) и



Таблица 1. Значения коэффициентов b_a , b_k и i_k , полученные с помощью программы BetaCrunch

Среда, кислотность	b_a , В	b_k , В	i_k , А/м ²
3%-й раствор NaCl, pH 4	0,043	0,093	0,146
3%-й раствор NaCl, pH 7	0,072	0,200	0,097
3%-й раствор NaCl, pH 9	0,051	0,176	0,026
Песок + 3%-й раствор NaCl, pH 4	0,065	0,249	0,240
Песок 3%-й раствор NaCl, pH 7	0,069	0,690	0,226

определении величин, которые дают наименьшее отклонение между экспериментальным и расчетным значениями плотности тока.

В настоящей работе исследована возможность применения данной программы для обработки полученных экспериментальных данных. Сделана попытка рассчитать с ее помощью константы b_k , b_a и i_k для стального электрода в 3%-м растворе NaCl с разными значениями pH и для датчика почвенной коррозии в среде, имитирующей грунт (песок + 3 % NaCl). Значения b_k , b_a и i_k , полученные с помощью программы BetaCrunch для указанного раствора, не поддаются интерпретации и, очевидно, лишены физического смысла. Рассчитать значение указанных параметров для почвы не удалось, поскольку программа при этом давала сбой и появлялось сообщение о необходимости проверки данных.

После неудачных попыток рассчитать значения b_k , b_a и i_k на основании поляризационных кривых, полученных экспериментально, работу программы проверили на следующем примере. Известно, что при коррозии железа в кинетической области с

образованием ионов двухвалентного железа $b_k = 0,12$ В, $b_a = 0,006$ В и $i_k = 0,4$ А/м². Согласно (2) рассчитаны значения пар точек $i-E$, которые описывают поляризационную кривую вблизи потенциала коррозии в интервале $(-0,55 \pm 0,05)$ В. Сделана попытка рассчитать b_k , b_a и i_k с помощью программы BetaCrunch. Однако, работа была прервана, поскольку на экране компьютера появилось сообщение об отклонении данных от полученных из (2).

В поисках других путей расчета необходимых параметров разработана новая программа. Ее алгоритм основан на комбинации методов нелинейной минимизации. Целевая функция для данного алгоритма записывается в виде суммы квадратов отклонений экспериментальных и расчетных значений. Метод допускает задание интервала возможных значений по каждому параметру. Для расчета первых производных целевой функции по каждому из неизвестных используются аналитические выражения, матрица вторых производных (матрица Гессе) находится численно. Основной модуль программы написан на языке Фортран, модуль графического вывода — на языке С⁺.

Первый этап проверки работоспособности программы включал расчет b_k , b_a и i_k для тестового примера. Значения коэффициентов рассчитаны с точностью до третьего знака после запятой. Затем рассчитывали значения этих параметров на основании экспериментально полученных поляризационных кривых (табл. 1).

На рис. 1 и 2 показаны поляризационные кривые, полученные для раствора и почвы. Точками обозначены экспериментальные данные, а сплошной линией — рассчитанные по программе. Хорошее совпадение экспериментальных и расчетных данных для раствора свидетельствует о корректной работе указанной программы, а также о том, что данные эксперимента подчиняются уравнению (2). В случае почвы расчетная поляризационная кривая отклоняется от экспериментальной. Вероятнее всего, это обусловлено протеканием процессов, которые не учитываются уравнением (2).

В качестве примера применения данной программы в комплексе с электрохимической микропроцессорной системой (ЭХМС) [13–15] в зоне с положительной аномалией поляризационного потенциала проведены измерения скорости почвенной коррозии металла трубы и рассчитана скорость остаточной коррозии (табл. 2).

Из результатов расчета $i_{k,0}$ по (1) следует, что наиболее интенсивно разрушается стенка трубы на участке, расположенном на расстоянии 130 м от отметки 262 км. После этого в обследуемых местах были вырыты шурфы и обследовано состояние изоляции трубопровода. Во всех трех шурфах вследствие потери адгезионной прочности обнаружено растрескивание изоляции и ее отслаивание на поверхности трубы площадью 1...3 м². Очевидно, что ухудшение физико-механических свойств изоляционного покрытия обусловило снижение абсолютных значений поляризационных потенциалов в контрольных точках. Наиболее глубокие коррозионные повреждения трубы язвенно-

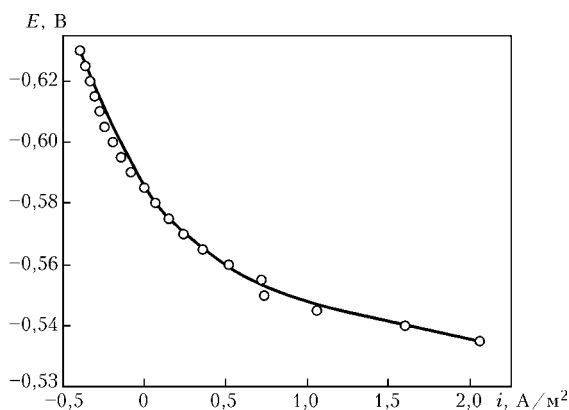


Рис. 1. Поляризационные кривые стали в 3%-м растворе NaCl (pH 4)

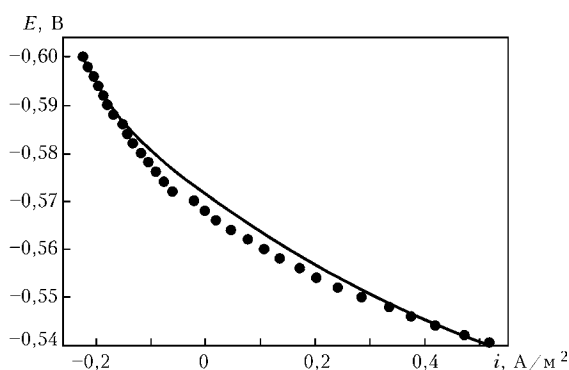


Рис. 2. Поляризационные кривые, полученные на датчике почвенной коррозии в среде, имитирующей почву



Таблица 2. Результаты обследования газопровода Ефремовка–Диканька–Киев станции катодной защиты ПСК-М-06

H, м	$E_p = -0,720$ В, $E_k = -0,580$ В (40 м)		$E_p = -0,750$ В, $E_k = -0,560$ В (115 м)		$E_p = -0,620$ В, $E_k = -0,375$ В (130 м)	
	i_k , мм	$i_{k,ор}$, мм/год	i_k , мм	$i_{k,ор}$, мм/год	i_k , мм	$i_{k,ор}$, мм/год
0,75	0,18	0,009	0,20	0,0065	0,24	0,08
1,15	0,21	0,011	0,23	0,0071	0,27	0,11
1,50	0,24	0,015	0,25	0,0090	0,31	0,13

Примечания. 1. Расстояние от отметки — 262 км. 2. Режим работы станции: $U = 268$ В; $I = 6$ А. 3. H — глубина погружения датчика.

Таблица 3. Результаты определения скорости почвенной коррозии металла трубы 17ГС массометрическим методом в различных точках газопровода в зонах с положительной аномалией E_p

Параметр, мм/год (способ измерения)	Расстояние от отметки 262 км, м		
	40	115	130
i_k (в природных условиях на уровне нижней образующей трубопровода)	0,27	0,28	0,30
v_k (по методу массометрии)	0,52	0,50	0,57

го характера выявлены на участке, расположенном на расстоянии 130 м от отметки 262 км. Этот участок подлежит первоочередному ремонту.

На уровне нижней образующей трубопровода были установлены контрольные образцы из трубной стали марки 17ГС для определения скорости почвенной коррозии массометрическим методом. Спустя 1 мес образцы были извлечены из шурфов и определены значения скорости v_k почвенной коррозии. Кроме того, из шурфов извлекли пробы грунтов для определения коррозионной активности согласно ГОСТ 9.602–89 (табл. 3).

Сопоставляя данные табл. 3 с результатами скорости почвенной коррозии, полученными с помощью ЭХМС, можно отметить хорошее совпадение значений i_k и v_k .

Выводы

1. На основании проведенного анализа литературных данных о методах расчета электрохимических параметров коррозионного процесса можно заключить, что способы расчета скорости коррозии, направленные на обеспечение надежности получения и простоты обработки экспериментальных данных, с помощью которых описывают поведение большого количества электрохимических систем, нуждаются в усовершенствовании.

2. Использование разработанной программы расчета электрохимических параметров совместно

A computer program has been developed for calculation of electrochemical parameters and its performance has been verified in the laboratory and in the route, when testing a gas pipeline using an electrochemical microprocessor system (EChMS). It is shown that the obtained data on the rate of soil corrosion of pipeline metal correlate in a satisfactory manner with that of mass measurements. Possibility of evaluation of the rate of residual corrosion of pipeline metal in a coating defect using EChMS and developed program, allows an objective assessment of the degree of pipeline protection and taking a well-grounded decision on the sequence of repair of pipeline sections with damaged insulation.

с ЭХМС дает возможность получить объективные данные о скорости почвенной коррозии металла трубопровода и коррозионной активности грунта. Благодаря ЭХМС можно оценить скорость остаточной коррозии металла трубопровода в дефекте покрытия, что является важным критерием при определении коррозионного состояния трубопровода, позволяет объективно судить о степени его защищенности и принять обоснованное решение относительно необходимости ремонта участков трубопровода с поврежденной изоляцией.

- Rossini G. An improved to the Mansfields method for computing electrochemical parameters from polarization data // Corros. Sci. — 1994. — 36, № 4. — P. 567–578.
- Рейнгерц М. Д., Хайт Ю. Г. О расчете скорости коррозии металлов по данным поляризационным измерений // Защита металлов. — 1992. — 28, № 5. — С. 852–855.
- Определение кинетических параметров общей коррозии по данным поляризационным измерений / М. Д. Рейнгерц, Н. Г. Семенова, Н. А. Сергеева, Л. И. Солодкова // Тез. докл. Защита-92, г. Москва, 6–11 сент., 1992 г. — М., 1992. — С. 4–6.
- Rossini G. The determination of Tafel slopes by an integral method // Ibid. — 1994. — 36, № 1. — P. 113–125.
- Yeum K. S., Devereux O. F. An iterative method for fitting complex electrode polarization curves // Corrosion. — 1989. — 45, № 6. — P. 478–487.
- Jensen M., Britz D. A linearized least-squares method of corrosion parameters calculation // Ibid. — 1990. — 46, № 2. — P. 111–114.
- Qamar J., Husain S. W. Application of a new computational method to determine corrosion current in a cathodically protected system // Brit. Corros. J. — 1992. — 27, № 2. — P. 125–127.
- Qamar I., Husain S. W. New computational method to determine corrosion Tafel slopes and corrosion rates from electrode kinetic measurements // Ibid. — 1990. — 25, № 30. — P. 202–204.
- Rossini G. The generalization of the three point method and its application to the corrosion rate measurement // Ibid. — 1990. — 30, № 1. — P. 9–21.
- Rossini G. The use of the three point method for evaluating corrosion rates // Ibid. — 1996. — 38, № 7. — P. 1019–1031.
- Рубашов А. А., Кузмяк А. Э. Определение плотности тока коррозии и меченых тафелевских постоянных из поляризационных кривых // Противокоррозионная защита в химической промышленности. — М., 1989. — С. 100–102.
- Rossini G. The evaluation of corrosion rates with the generalised inflection point method // Corros. Sci. — 1999. — 41, № 11. — P. 2129–2142.
- Пат. 242121 А Украина, МКИ G 01 N 17/00, G 01 N 17/04. Способ определения коррозионного состояния подземных металлических сооружений / С. Г. Поляков, Б. Е. Патон, А. О. Рыбаков и др. — Оpubл. 07.07.98.
- Поляков С. Г., Рыбаков А. А., Ныркова Л. И. Электрохимические методы контроля коррозионного состояния трубопроводов // Физ.-хим. механика материалов. — 2001. — № 2. — С. 16–21.
- Поляков С. Г., Рыбаков А. А., Ныркова Л. И. Научные основы и технические средства электрохимического мониторинга коррозионного состояния магистральных газопроводов // Науч.-техн. совещание специалистов НАК «Нефтегаз Украины», ДК «Укртрансгаз», ОАО «Газпром» по вопросам повышения надежности и эффективности работы газотранспортной системы. — Киев: Укртрансгаз, 2001. — С. 86–88.

Поступила в редакцию 02.02.2005