

УДК 628.147.22+620.193.197+620.178.311.868

В.А. Блохин¹, e-mail: blokhin.va@gmail.com; А.К. Манжосов¹, e-mail: akm.sonar@gmail.com; А.Н. Маркин², e-mail: andrey.n.markine@gmail.com.

¹ ООО «НПП «СОНАР» (Пенза, Россия).

² Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский индустриальный университет», Нижневартовское отделение (Нижневартовск, Россия).

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ УГЛЕКИСЛОТНОЙ КОРРОЗИИ В ГАЗОВЫХ СРЕДАХ

Рассмотрены особенности основных методов контроля потери металла в ракурсе построения полевых систем мониторинга углекислотной коррозии в газовых средах. Проанализированы математические модели процессов получения результатов измерения скорости коррозии весовым методом и методом электрического сопротивления. Показан случайный характер возникновения локальной коррозии. Сформулированы условия сходимости результатов измерений скорости коррозии весовым методом и методом электрического сопротивления. Даны практические рекомендации по организации узлов контроля коррозии и обработке измерительной информации для получения наилучшей сходимости результатов. Предложен новый подход к созданию измерительных инструментов, пригодных к использованию в современных системах коррозионного мониторинга реального времени, вписывающихся в концепцию построения цифровых месторождений.

Ключевые слова: углекислотная коррозия стали, локальная коррозия, мониторинг коррозии, весовой метод, ER-метод, метод электрического сопротивления, гравиметрия, скорость коррозии, цифровое месторождение, среднеповерхностная коррозия, системы коррозионного мониторинга, методы контроля потери металла, статистически корректный мониторинг коррозии.

Высокая агрессивность сред, вызывающая коррозию внутренних поверхностей технологического оборудования нефтяной и газовой промышленности, ежегодно приводит к значительному экономическому и экологическому ущербу. В газовой промышленности большую опасность представляет углекислотная коррозия стали, ставшая особенно актуальной в последнее время при освоении новых нефтегазовых бассейнов [1]. Известно, что отличительной чертой углекислотной коррозии стали является возможность ее локализации, т. е. развитие локальной коррозии в виде язв и питтингов. При этом локальная коррозия протекает в десятки раз быстрее по сравне-

нию со среднеповерхностной потерей массы металла [2]. В статье делается попытка сфокусировать внимание аудитории на особенностях применения серийно выпускаемых средств контроля коррозии при организации систем коррозионного мониторинга в газовых средах, где протекает углекислотная коррозия, сформулировать практические рекомендации.

В табл. 1 приведены особенности различных методов контроля потери металла в ракурсе представленного на сегодняшний день на рынке оборудования, пригодного для построения систем коррозионного мониторинга для работы в полевых условиях. На основе анализа данных табл. 1 можно сделать

вывод, что для построения системы коррозионного мониторинга, работающей в квазиреальном масштабе времени в газовых средах, могут быть использованы весовой метод и метод электрического сопротивления (ER). Существующая практика применения такого подхода показывает хорошие возможности ER-коррозиметров по отслеживанию в реальном времени динамики коррозионных процессов. Наблюдается устойчивая корреляция с режимами подачи ингибиторов коррозии. Однако численные значения скоростей коррозии, полученные вышеуказанными методами, часто не совпадают. Ниже приведен анализ возможных причин такой ситуации.

Особенности основных методов контроля потери металла

№ п/п	Метод контроля	Измеряемые величины	Контролируемые процессы	Применимость	Ограничения
1	Весовой	Изменение массы образца контроля коррозии весовым (гравиметрическим) методом за время экспозиции	Среднеповерхностная и локальная коррозия, эрозия. Примечание: для измерения локальной коррозии требуются дополнительные измерения с помощью оптических или игольчатых микрометров, профилометров и др.	Любые среды	1. Инерционность (недели-месяцы) 2. Интегральная информация за время экспозиции 3. Невозможность автоматизации
2	Электрического сопротивления (ER)	Электрическое сопротивление зонда	Среднеповерхностная коррозия, эрозия	Любые среды	Не предназначен для измерения скорости локальной коррозии
3	Линейной поляризации (LPR)	Поляризационное сопротивление среды	Среднеповерхностная коррозия, индикатор локальной коррозии	Проводящая среда	Обводненность среды более 40–50 %
4	Гальванический	Ток	Коррозионность среды	Проводящая среда	Обводненность среды более 40–50 %
5	Дефектоскопия (включая внутритрубную диагностику)	Различные	Среднеповерхностная и локальная коррозия, эрозия	Любые среды	1. Часто – остановка транспортировки среды 2. Высокая стоимость

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ГЕТЕРОГЕННОСТИ НА ЛОКАЛИЗАЦИЮ КОРРОЗИИ

Получаемая с помощью образцов контроля коррозии весовым методом (ОСК) среднеповерхностная скорость потери массы металла (часто ее некорректно называют скоростью «общей» или «равномерной» коррозии) не означает, что все участки металла в каждый момент времени корродируют именно с такой скоростью. Напротив, вероятность превышения среднеповерхностной скорости потери массы металла на каком-либо участке образца весьма высока [2]. Это происходит из-за того, что поверхность металла обладает электрохимической гетерогенностью (неоднородностью), выражающейся в неравномерном распределении потенциала по поверхности металла и образованием микрогальванопар. Микрогальванопары могут «мигрировать» по поверхности металла, тогда на макроуровне коррозия выражается в виде относительно равномерной среднеповерхностной потери массы металла. При «закреплении» одной или нескольких микрогальванопар на определенном участке поверхности металла

на этом участке на макроуровне развивается локальная коррозия. Закрепление микрогальванопар носит случайный характер в том смысле, что пока нет возможности предсказать, на каком именно участке металла это произойдет. Поэтому при углекислотной коррозии стали при неизменных внешних условиях (температура, парциальное давление углекислого газа, минерализация воды, скорость потока и др.), но в различных независимых экспериментах, нельзя получить одинаковые значения скорости коррозии, можно говорить лишь о наиболее вероятном ее значении при заданных внешних условиях. Таким образом, электрохимическая гетерогенность поверхности металла приводит к локализации коррозии. Места наибольшей электрохимической гетерогенности внутренней поверхности металла трубопроводов хорошо известны из практики – это зоны сварных швов и зоны термического влияния сварных швов. Здесь электрохимическая гетерогенность возникает из-за частично измененной по сравнению с «телом» трубы структуры металла. Изменения вызваны нагревом и неравномерным охлаж-

дением. Локальная коррозия начинает проявляться именно в зонах сварных швов и лишь позже – по «телу» трубы.

РАСЧЕТ СКОРОСТИ КОРРОЗИИ С ПОМОЩЬЮ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВЕСОВОГО И ER-МЕТОДОВ

Опишем с помощью математических моделей процессы получения результатов измерения скорости коррозии весовым и ER-методами для случаев равномерной и неравномерной коррозии. Для определенности будем рассматривать ОСК пластинчатого типа с геометрическими параметрами: a – ширина, b – толщина, l – длина, и только одной стороной, доступной для коррозии, – al (рис. 1). К такой конфигурации можно также привести и ОСК цилиндрической формы (ОСКЦ), которые объединяются в кассету, и торцевые поверхности их не доступны коррозии. Рассмотрим случай равномерной коррозии, когда все точки поверхности ОСК, контактирующие с агрессивной средой, корродируют с одной и той же скоростью V_k . За время экспозиции ОСК убыль массы ΔM составит:

$$\Delta M = M_1 - M_2 = \\ = dalb - dal(b - \Delta b) = adS_n \Delta b, \quad (1)$$

а изменение толщины Δb :

$$\Delta b = \frac{\Delta M}{dS_n}, \quad (2)$$

где M_1 – масса ОСК в начале экспозиции; M_2 – масса ОСК в конце экспозиции; d – плотность материала ОСК; S_n – площадь поверхности ОСК.

Скорость коррозии за время экспозиции T_3 :

$$V_k = \frac{\Delta b}{T_3} = \frac{\Delta M}{T_3 d_1 S_n}, \quad (3)$$

Как видно из (2) и (3), скорость коррозии V_k прямо пропорционально связана с изменением толщины ОСК и обратно пропорционально – с площадью ОСК.

Случай неравномерной коррозии ($V_k \neq \text{const}$). Пусть W_1 – начальный объем; W_2 – конечный объем, за время экспозиции. Объем ОСК в начальный момент экспозиции:

$$W_1 = alb. \quad (4)$$

Объем в конце интервала экспозиции:

$$W_2 = \int_0^l S(y) dy, \quad (5)$$

$S(y)$ – площадь сечения, перпендикулярного оси y . Для него можно записать:

$$S(y) = \int_0^a b(x,y) dx = a\bar{b}(y), \quad (6)$$

где $b(x,y)$ – толщина ОСК (ОСКЦ), м, как функция от координат (x,y) места положения рассматриваемой точки;

$$\bar{b}(y) = \frac{1}{a} \int_0^a b(x,y) dx -$$

среднее значение толщины ОСК, м, в сечении $S(y)$ в конце интервала экспозиции. В принятых обозначениях для W_2 будет верно:

$$W_2 = \int_0^l S(y) dy = \int_0^l a\bar{b}(y) dy. \quad (7)$$

За время экспозиции объем ОСК уменьшится на величину:

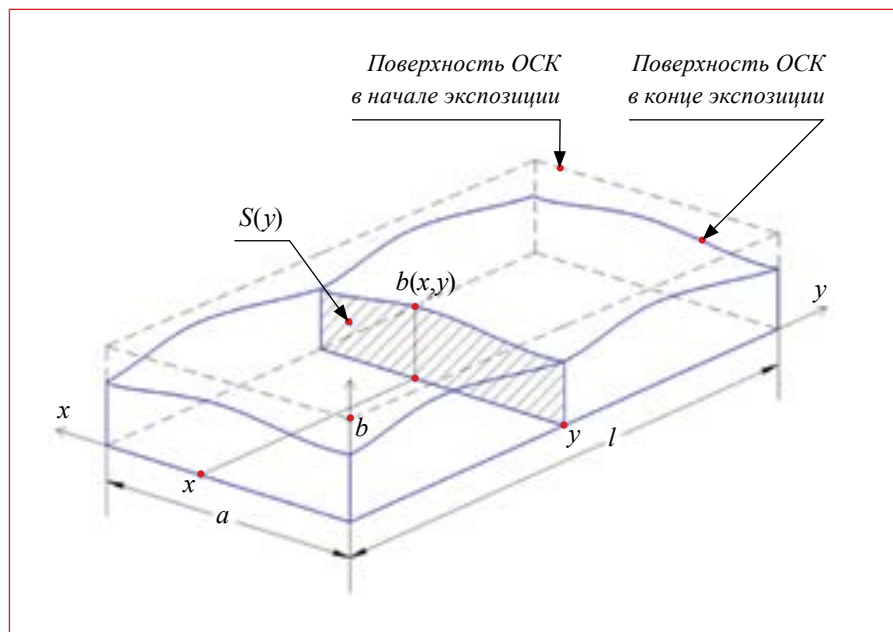


Рис. 1. ОСК пластинчатого типа

$$\Delta W = W_1 - W_2 = \\ = alb - \int_0^l a\bar{b}(y) dy = \\ = \int_0^l ab dy - \int_0^l a\bar{b}(y) dy = \\ = a \int_0^l [b - \bar{b}(y)] dy = \int_0^l \Delta b(y) dy, \quad (8)$$

где $\Delta b(y)$ – глубина проникновения коррозии, усредненная в плоскости сечения $S(y)$.

При оценке на аналитических весах потери массы ОСК за время экспозиции ее величина будет:

$$\Delta M = d\Delta W, \quad (9)$$

где d – плотность металла ОСК.

Средняя скорость коррозии с учетом (3) будет:

$$\bar{V}_k = \frac{\Delta M}{T_3 d S_n} = \frac{d\Delta W}{T_3 d S_n} = \\ = \frac{a \int_0^l \Delta b(y) dy}{T_3 al} = \\ = \frac{\frac{1}{l} \int_0^l \Delta b(y) dy}{T_3} = \frac{\Delta \bar{b}}{T_3}, \quad (10)$$

где $\Delta \bar{b}$ следует трактовать как среднюю по поверхности глубину проникновения локальной коррозии.

Функция преобразования ER-измерителей (безотносительно к производителям данных приборов),

используемых в практике коррозионного мониторинга, имеет вид:

$$D_x = b \left(1 - \frac{R_{\text{он}}}{R_x} \right), \quad (11)$$

где D_x – фиксируемая (регистрируемая) измерителем глубина проникновения коррозии; b – толщина чувствительного элемента (ЧЭ) ER-зонда (плоская или сводящаяся к ней геометрия ЧЭ); $R_{\text{он}}$ – сопротивление опорной части (т. е. защищенной от коррозионных воздействий среды) ЧЭ-зонда; R_x – сопротивление части ЧЭ, доступной для коррозии, которое измерено в момент времени t_x .

Для вычисления скорости коррозии V_k по двум точкам можно использовать следующее соотношение:

$$V_k = \frac{D_2 - D_1}{T_3} = \frac{\Delta D}{T_3}, \quad (12)$$

где D_1 – глубина коррозии, фиксируемая ER-измерителем в момент времени t_1 , соответствующий началу интервала экспозиции ЧЭ-зонда ER; D_2 – глубина коррозии, фиксируемая ER-измерителем в момент времени t_2 , соответствующий концу интервала экспозиции ЧЭ; $T_3 = t_2 - t_1$ – длительность интервала экспозиции.



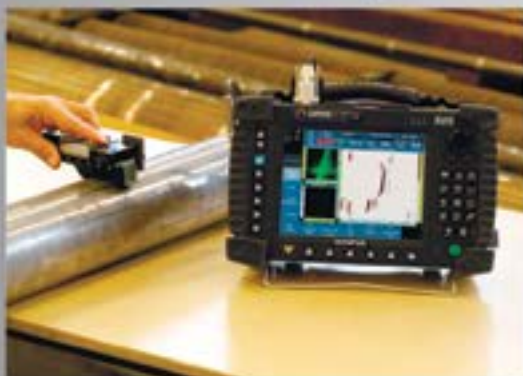
ДИАГНОСТ

25 лет на рынке

8 (495) 783-39-64

**ОФИЦИАЛЬНЫЙ ПОСТАВЩИК ОБОРУДОВАНИЯ OLYMPUS
ДЛЯ ПРЕДПРИЯТИЙ НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ**

Вихретоковые матрицы на базе OmniScan MX - ECA для обнаружения стресс коррозии



- Контроль углеродистых и аустенитных сталей
- Возможность оценки глубины стресс коррозии
- Работа через лакокрасочное и полимерное защитное покрытие
- Документирование результатов контроля
- Время контроля гораздо меньше по сравнению с магнитопорошковым и капиллярным методами
- Диаметр труб от 20 мм до плоскостей

Система UltraWave LRT для поиска коррозионных повреждений на трубопроводах

- Контроль в эксплуатации без доступа ко всей поверхности трубы
- Контроль трубопроводов в изоляции и под землей
- Определение точного положения коррозионного повреждения по длине трубопровода и по окружности
- Контроль до 192 метров трубопровода за одно измерение
- Диаметры труб от 50 до 1420 мм



Дефектоскоп OmniScan SX со сканером RollerFORM-5L64-МД-2Н для сплошной ультразвуковой толщинометрии трубопроводов



- Составление карт толщин всего тела трубы с разрешением 1x1 мм на диаметрах от 100 мм и выше
- Поиск утонений, коррозионных повреждений, расслоений, включений
- Контроль толщин от 4 до 30 мм
- Погрешность измерения не более 0,1 мм
- Магнитный прижим сканера дает высокую скорость и качество контроля
- Возможность работы через лакокрасочное и полимерное защитное покрытие

105187, г. Москва, Окружной проезд д. 15, кор 2

E-mail: diagnost@diagnost.ru

Web: www.diagnost.ru

www.ndt-instrument.ru

Изменение (приращение) глубины проникновения коррозии соотносится со значениями сопротивления активной части ЧЭ, соответствующими моментам t_1 и t_2 , следующим образом:

$$D_1 = b\left(1 - \frac{R_{\text{он}}}{R_1}\right); D_2 = b\left(1 - \frac{R_{\text{он}}}{R_2}\right),$$

$$\Delta D = D_2 - D_1 = b\left(\frac{R_{\text{он}}}{R_1} - \frac{R_{\text{он}}}{R_2}\right) =$$

$$= bR_{\text{он}} \frac{R_2 - R_1}{R_1 R_2} = b \frac{R_{\text{он}}}{R_1 R_2} \Delta R. \quad (13)$$

Рассмотрим случай равномерной коррозии, когда $V_k = \text{const}$ на всей активной части поверхности ЧЭ. Здесь имеет место следующая последовательность:

$$R_1 = \rho \frac{l}{ab_1}, R_2 = \rho \frac{l}{a(b_1 - V_k T_2)}, \quad (14)$$

где ρ – удельное сопротивление ЧЭ; l – длина ЧЭ, м; a – ширина ЧЭ; b_1 – толщина ЧЭ в момент времени t_1 . Приращение ΔR , выраженное через геометрические размеры ЧЭ, за время экспозиции T_3 будет равно:

$$\Delta R = \rho \frac{l}{a(b_1 - V_k T_3)} - \rho \frac{l}{ab_1} =$$

$$= \frac{\rho l}{a} \frac{b_1 - b_1 + V_k T_3}{(b_1 - V_k T_3) b_1}. \quad (15)$$

Для приращения глубины коррозии ΔD за T_3 , учитывая (13) и (15), рассчитаем:

$$\Delta D = b \frac{\left(\rho \frac{l}{ab}\right)}{\left[\rho \frac{l}{ab_1}\right] \cdot \left[\rho \frac{l}{a(b_1 - V_k T_3)}\right]} \times$$

$$\times \frac{\rho l}{a} \frac{V_k T_3}{(b_1 - V_k T_3) b_1} = V_k T_3, \quad (16)$$

Как видно, зависимость ΔD от V_k, T_3 крайне простая – линейная и инвариантная к геометрическим параметрам зонда. Сравнивая полученную зависимость с аналогичным выражением для ОСК, можно сказать, что это идеальный случай для совпадения результатов.

Рассмотрим случай неравномерной коррозии, когда V_k не равно const на всей активной поверхности ЧЭ. При неравномерной коррозии по всей площади активной части ЧЭ его сечение уже не будет, строго говоря, представлять собой прямоугольник (рис. 2) и, следовательно, площадь сечения будет выражаться следующим образом:

$$S(y) = \int_0^a b(x,y) dx.$$

Площадь сечения можно представить и через среднее значение толщины, аналогично выражению (6):

$$S(y) = a \bar{b}(y).$$

Учитывая изложенное, зависимость сопротивлений R_1, R_2 от гео-

метрических размеров ЧЭ усложняется. Для R_1 запишем:

$$R_1 = \int_0^l \rho \frac{dy}{S(y)} = \int_0^l \rho \frac{dy}{a \bar{b}(y)}. \quad (17)$$

Сопротивление R_2 , соответствующее концу интервала экспозиции, представим соотношением:

$$R_2 = \int_0^l \rho \frac{dy}{a[\bar{b}(y) - \Delta b(y)]} \quad (18)$$

где $\Delta b(y)$ – величина усредненного уменьшения толщины активной части ЧЭ в зависимости от положения сечения на оси y .

Приращение сопротивления активной части ЧЭ за время экспозиции составит:

$$\Delta R = R_2 - R_1 = \int_0^l \rho \frac{dy}{a[\bar{b}(y) - \Delta b(y)]} -$$

$$- \int_0^l \rho \frac{dy}{a \bar{b}(y)} = \int_0^l \rho \frac{dy}{a \bar{b}(y) \left[1 - \frac{\Delta \bar{b}(y)}{\bar{b}(y)}\right]} -$$

$$- \int_0^l \rho \frac{dy}{a \bar{b}(y)}. \quad (19)$$

Введем переменную u и преобразуем первый интеграл:

$$\int_0^l \rho \frac{dy}{a \bar{b}(y) \left[1 - \frac{\Delta \bar{b}(y)}{\bar{b}(y)}\right]} =$$

$$= \int_0^l \frac{\rho}{a \bar{b}(y)} \cdot \frac{1}{1-u} dy. \quad (20)$$

Для удобства анализа представим функцию $\frac{1}{1-u}$ рядом Маклорена:

$$\frac{1}{1-u} = 1 + u + u^2 + u^3 + \dots \quad (21)$$

тогда выражение (20) примет вид:

$$\int_0^l \frac{\rho}{a \bar{b}(y)} \cdot \frac{1}{1-u} dy =$$

$$\int_0^l \frac{\rho}{a \bar{b}(y)} (1 + u + u^2 + u^3 + \dots) dy, \quad (22)$$

а для ΔR получим:

$$\Delta R = \int_0^l \frac{\rho}{a \bar{b}(y)} (1 + u + u^2 + u^3 + \dots) dy -$$

$$- \int_0^l \frac{\rho}{a \bar{b}(y)} dy =$$

$$= \int_0^l \frac{\rho}{a \bar{b}(y)} (u + u^2 + u^3 + \dots) dy. \quad (23)$$

За все время «жизни» зонда толщина активной части ЧЭ варьирует

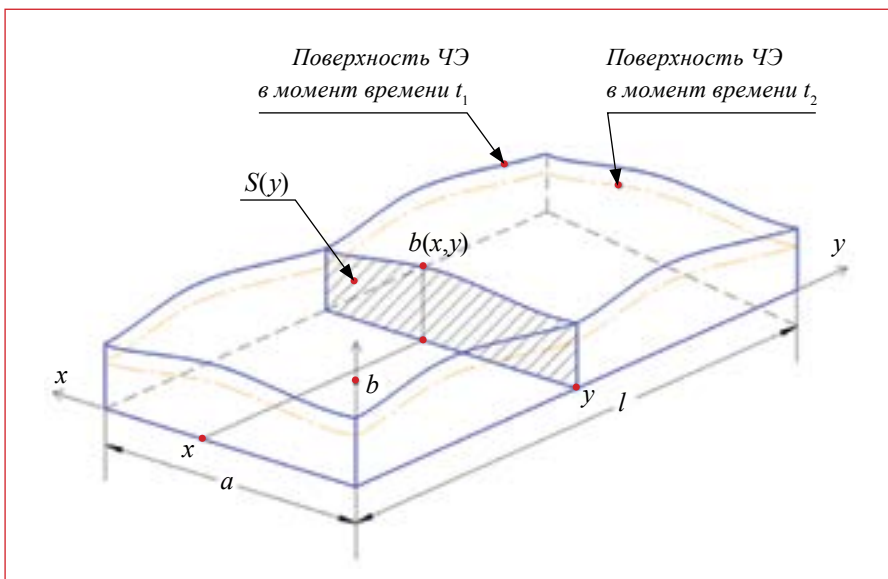


Рис. 2. Активная поверхность ЧЭ зонда ER

В РАМКАХ ПЕТЕРБУРГСКОГО МЕЖДУНАРОДНОГО ГАЗОВОГО ФОРУМА

XXII МЕЖДУНАРОДНАЯ
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ВЫСТАВКА
ГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ
ДЛЯ ГАЗОВОГО ХОЗЯЙСТВА

2-5
октября
2018



ОРГАНИЗАТОР ВЫСТАВКИ: **FareXPO** | **IFE**
PROFESSIONAL, EDUCATION & CONSUMER ORGANIZATION

Тел/факс: +7(812) 777-04-07; 718-35-37
st@farexpo.ru
<http://rosgasexpo.ru>

МЕСТО ПРОВЕДЕНИЯ:

Санкт-Петербург, конгрессно-выставочный центр «ЭКСПОФОРУМ», павильон G, Петербургское шоссе, 64/1

ОФИЦИАЛЬНАЯ ПОДДЕРЖКА:



ОРГАНИЗАТОР ФОРУМА: **EXPOFORUM**

ГЕНЕРАЛЬНЫЙ ИНФОРМАЦИОННЫЙ ПАРТНЕР:



в пределах интервала $(\frac{b}{2}..b)$, а величина $\Delta b(y)$, учитывая рекомендации по выбору интервала экспозиции, должна находиться в пределах 0,4–1,0 % от половины толщины ЧЭ зонда – $\frac{b}{2}$. Оценим вес слагаемых в подынтегральном выражении [23], анализируя отношение

$$\frac{u^{k+1}}{u^k} = u = \frac{\Delta b(y)}{b(y)}$$

Самое большое значение, которое может принимать $\Delta b(y)$ за рекомендуемое время экспозиции $\frac{0,01b}{2}$, а минимальное значение $b(y)$ на протяжении всей «жизни» зонда – $\frac{b}{2}$. Следовательно, каждое последующее слагаемое при данных допущениях составляет не более 1 % от предыдущего. Таким образом, в [23] можно ограничиться первым слагаемым для дальнейшего рассмотрения (анализа), т. е. получаем:

$$\Delta R = \frac{\rho}{a} \int_0^l \frac{1}{b(y)} \cdot \frac{\Delta b(y)}{b(y)} dy. \quad (24)$$

В пределах интервала экспозиции вариации $b(y)$ малы, поэтому в [24] эту величину можно заменить на постоянную:

$$R_1 \approx R_2 \approx \rho \frac{1}{ab},$$

при этом выражение [24] упрощается:

$$\Delta R = \frac{\rho}{ab} \int_0^l \frac{\Delta b(y)}{b} dy, \quad (25)$$

а для ΔD можем записать:

$$\begin{aligned} \Delta D &= b \frac{R_{\text{он}}}{R_1 R_2} \Delta R = \\ &= b \frac{(\rho \frac{1}{ab})}{(\rho \frac{1}{ab}) \cdot (\rho \frac{1}{ab})} \times \\ &\times \frac{\rho}{ab} \int_0^l \frac{\Delta b(y)}{b} dy = \frac{1}{l} \int_0^l \Delta b(y) dy. \end{aligned} \quad (26)$$

Вычисляемая скорость коррозии V_k при этом составит:

$$V_k = \frac{\Delta D}{T_3}$$

Сравним последние соотношения с (10). Как видно, в пределах ограничений, наложенных на время экспозиции ЧЭ, измеритель ER подобен

гравиметрическому датчику – средняя глубина проникновения коррозии оценивается как средняя по поверхности, доступной для коррозии. При равных геометрических параметрах (то есть a, l), характере коррозионных воздействий, временах экспозиции датчиков, равными будут и полученные на базе их измерений значения средней скорости коррозии. Однако следует заметить: требуемое время экспозиции весового и ER-зондов сильно разнятся. Нельзя устанавливать время экспозиции зонда ER T_3 таким же большим, как и зонда гравиметрического, – резко нарушатся ограничения, рассмотренные выше, что обусловит несовпадение результатов при неравномерной коррозии. Как быть? Представляется целесообразным следующий подход. За время пребывания зонда ER в контролируемой среде, которое должно соответствовать интервалу пребывания весового зонда, накапливаются значения V_{ki} , полученные на всех интервалах экспозиции (корректных по длительности), входящих в интервал пребывания. По завершении экспозиции весового зонда производят вычисление среднего арифметического этих значений:

$$\bar{V}_{\text{кор.}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_{ki}, \quad (27)$$

причем T_n должно быть равно nT_3 , где T_n – временной интервал пребывания в контролируемой среде весового зонда; T_3 – интервал экспозиции зонда ER, за который оценивают скорость V_{ki} ; n – количество интервалов T_3 . Убедимся в корректности предлагаемого подхода. Помножим левую и правую части равенства (27) на nT_3 . Получим:

$$nT_3 \bar{V}_{\text{кор.}} = nT_3 \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_{ki} = \sum_{i=1}^n T_3 V_{ki}. \quad (28)$$

Выражение правой части равенства [28] – это глубина проникновения коррозии, за время пребывания в среде как сумма ее

частных значений, привязанных к соответствующим интервалам экспозиций ER-зонда. Выражение в левой части – произведение скорости коррозии (средней) на время пребывания весового зонда в контролируемой среде. При использовании в измерителе ER регрессионного метода обработки данных (метод наименьших квадратов) аналогом времени экспозиции ER-зонда является интервал регрессии, а аналогом V_{ki} – скорость, вычисленная на данном интервале согласно формуле:

$$\bar{V}_{ki} = \frac{\sum_{i=1}^m D_j (t_j - \bar{t})}{\sum_{j=1}^m (t_j - \bar{t})^2}, \quad (29)$$

где

$$\bar{t} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m t_j;$$

где t_j – j -й момент времени измерения; D_j – глубина коррозии, фиксируемая измерителем ER в момент времени t_j ; m – число измерений на интервале регрессии.

Учитывая, что регрессионный метод базируется на определенной избыточности измерений, требуемое время экспозиции ER-зонда в этом случае существенно меньше (из нашей практики – в 7–10 раз) при сопоставимой погрешности (из-за шумов) оценки D_j . Данное обстоятельство позволяет утверждать: точность выражения (25) в данном случае значительно выше и, как следствие, лучше совпадение результатов весового и ER-методов.

На практике для контроля коррозии трубопроводов весовым методом в них устанавливают плоские или цилиндрические образцы, изготовленные из той же стали, что и трубопровод. Цилиндрические образцы площадью ~5 см² каждый устанавливают в кассетах по 10 шт. (рис. 3). Между всеми образцами в кассете имеется надежный электрический контакт, а кассету приводят в контакт с внутренней поверхностью трубопровода. Когда в трубопроводе вода выделяется в отдельную фазу, а кассета пол-

ностью находится в водном слое, все образцы в кассете имеют один и тот же стационарный электродный потенциал. Такую кассету в сборе, с электрохимической точки зрения, можно считать одним «куском» металла. После экспозиции в трубопроводе (7–120 сут) скорость коррозии определяют по потере массы отдельно для каждого образца ($V_{об}$) и находят среднюю скорость коррозии по кассете ($V_{ср}$) как средний показатель по всем образцам. Приняв, что кассета в сборе моделирует «кусок» металла, и зная $V_{об}$ для каждого образца, можно построить гистограмму распределения скоростей коррозии. При этом следует ввести в рассмотрение параметр, названный «характерный размер локализации коррозии» ($S_{л}$), под которым имеется в виду характерная, наиболее часто наблюдаемая площадь поперечного сечения язвы, питтинга свища, возникающих в результате неравномерной и локальной коррозии в данных условиях [2]. Если $S_{л}$ на-



Рис. 3. Кассета из 10 образцов контроля коррозии весовым методом, экспонировавшаяся в водной фазе трубопровода 60 сут

много меньше 5 см^2 (площади одного образца), значительных различий между скоростями $V_{об}$ от образца к образцу не будет. Преобладающим видом коррозионных отказов трубопроводов являются свищи и язвы диаметром 30–50 мм. То есть $S_{л}$ составляет 7–20 см^2 , что больше площади одного образца. В то же время площадь всей кассеты в 2,5–7,0 раз больше $S_{л}$. Следовательно, разные степени неравномерности и локализации коррозии могут «проявить себя» в одной кассете, и возможны значительные отклонения $V_{об}$ от образца к образцу. На рис. 3 показана кассета, экспонировавшаяся в водном слое трубопровода (вся кассета полностью находилась в воде).

Как видно из рис. 3, одни образцы корродировали значительно интенсивнее других, на семи образцах видны проявления локальной коррозии, в то время как три образца не затронуты локальной коррозией. Скорость углекислотной коррозии стали варьирует в широких пределах при постоянных внешних условиях и неизменном общем механизме развития коррозии. Следовательно, экспонируя несколько кассет одновременно или последовательно, в одной и той же точке трубопровода, режим работы которого, а также парциальное давление углекислого газа, температура и химический состав водной фазы не изменяются, можно получить наборы значений $V_{об}$, значительно

ЧЕРНОМОРСКИЕ НЕФТЕГАЗОВЫЕ КОНФЕРЕНЦИИ
OIL & GAS BLACK SEA CONFERENCES



ОФИЦИАЛЬНАЯ ПОДДЕРЖКА



ОРГАНИЗАТОР



21-26 мая
2018 / Анапа

Международная научно-практическая конференция
Современные технологии капитального ремонта скважин и
повышения нефтеотдачи пластов. Перспективы развития.

24-29 сентября
2018 / Сочи

Международная научно-практическая конференция
Строительство и ремонт скважин.



22-27 октября
2018 / Сочи

Международная научно-практическая конференция
Интеллектуальное месторождение:
инновационные технологии от скважины
до магистральной трубы.



(в 2–10 раз) отличающиеся от кассеты к кассете. Например, интервалы значений $V_{об}$ могут для одной кассеты составлять 0,2–0,6 мм/год, а для другой – 0,8–1,5 мм/год, т. е. не перекрываются даже частично. Таким образом, для получения корректных абсолютных значений как среднеповерхностной скорости потери массы металла, так и скорости локальной коррозии необходим статистический подход.

Рабочая площадь поверхности чувствительного элемента ER-датчика составляет не более 0,5 см², что на порядок меньше характерного размера локализации коррозии, поэтому зафиксировать локальную коррозию с помощью ER-датчиков практически невозможно.

ВЫВОДЫ

1. Максимальную сходимостъ результатов измерений, полученных с помощью ER- и весового методов, можно получить, только реализовав принцип «два в одном», когда ЧЭ ER-зонда является также ОСК. При этом говорить о возможности «улавливания» такой системой локальной коррозии возможно только в случае, когда площадь такого универсального ЧЭ будет составлять 5–10 см². Независимо от метода (весовой или ER) измерить локальную коррозию возможно только с помощью дополнительных измерений оптическими или игольчатыми микрометрами, профилометрами и др.

2. При построении узлов контроля коррозии (УКК) из конструктивно независимых ER- и весовых зондов для получения наилучшей сходимости результатов необходимо выполнить следующие условия:

- ЧЭ ER-зондов по площади должны быть равны площади ОСК. Наиболее часто применяемые на практике ER-зонды имеют рабочую площадь ЧЭ не более 0,5 см², что

на 1,5–2 порядка меньше площади ОСК (ОСКЦ), поэтому зафиксировать локальную коррозию с помощью ER-датчика практически невозможно даже визуально (чтобы в дальнейшем использовать методы измерения глубины проникновения локальной коррозии – оптические или игольчатые микрометры и др.);

- ЧЭ ER-зондов и ОСК должны находиться в идентичных условиях среды;

- при сравнении результатов измерений следует использовать среднеарифметическую скорость коррозии, полученную из показаний ER-датчиков.

3. С помощью системы коррозионного мониторинга, построенной на основе УКК, включающих весовые и ER-зонды, с высокой достоверностью можно отследить относительные значения эффективности применяемой ингибиторной защиты по подавлению лишь одной составляющей углекислотной коррозии – среднеповерхностной потери массы металла. ER-коррозиметр обладает хорошей динамикой, работая в реальном масштабе времени, но, как доказано в данной статье, не предназначен для измерения скорости локальной коррозии. С помощью образцов контроля коррозии весовым методом при выполнении сформулированных рекомендаций можно контролировать как среднеповерхностную потерю массы металла, так и локальную коррозию, но для этого требуются длительное время экспонирования и дополнительные измерения, отличные от «обычного» взвешивания, – использование оптических или игольчатых микрометров или профилометров. Как следствие, весовые (гравиметрические) зонды не имеют перспектив использования в системах реального времени, которые будут все более входить

в практику в процессе цифровизации месторождений. Основная опасность такой ситуации заключается в том, что на фоне «благоприятной» картины по эффективности подавления среднеповерхностной потери массы металла ингибиторами коррозии может начаться стремительное развитие не фиксируемого наблюдателем процесса локальной коррозии.

4. Процессы углекислотной коррозии – наглядный пример многомерных нестационарных случайных процессов, поэтому подход к построению систем коррозионного мониторинга должен это учитывать и использовать максимально возможное число измеряемых параметров. Мониторинг коррозии следует вести статистически корректно. Нельзя оперировать одиночными мгновенными значениями скорости коррозии, измеренными одним «одномерным» инструментом, вырванными из контекста общего процесса. Методы обработки и интерпретации результатов измерений должны использовать математический аппарат, применяемый при анализе параметров нестационарных случайных процессов.

5. Поскольку в настоящее время, как показано в статье, имеется лишь ограниченный инструментарий контроля коррозии в газовых средах, для построения эффективных систем борьбы с углекислотной коррозией в первую очередь необходимо направить усилия на создание измерительного инструмента, который, анализируя происходящие процессы по нескольким параметрам и верифицируя промежуточные результаты, мог бы давать достоверные, статистически корректные оценки не только по среднеповерхностной потере массы металла, но и по локальной коррозии.

Литература:

1. Кашковский Р.В., Ибатулин К.А. Некоторые аспекты углекислотной коррозии стального оборудования и трубопроводов нефтегазовых промыслов // Наука и техника в газовой промышленности. 2016. № 3 (67). С. 71–91.
2. Маркин А.Н., Низамов Р.Э. CO₂-коррозия нефтепромыслового оборудования. М.: ОАО «ВНИИОЭНГ», 2003. 188 с.