

УДК 628.147.22

**В.А. Блохин<sup>1</sup>**, e-mail: [akkord@sonar.penza.com.ru](mailto:akkord@sonar.penza.com.ru); **А.Ю. Доросинский<sup>1</sup>**; **А.К. Манжосов<sup>1</sup>**; **А.Н. Маркин<sup>2</sup>**,  
e-mail: [andrey.n.markine@gmail.com](mailto:andrey.n.markine@gmail.com)

<sup>1</sup> ООО «Научно-производственное предприятие «Сонар» (Пенза, Россия).

<sup>2</sup> Филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тюменский индустриальный университет» (Нижневартовск, Россия).

## Система обнаружения локальных коррозионных процессов на ранних стадиях

В статье рассмотрены вопросы контроля параметров углекислотной коррозии промышленного оборудования и трубопроводов. Описаны особенности основных методов контроля, традиционно применяемых при построении систем мониторинга коррозии как в газовых, так и в нефтяных средах. Продемонстрирован случайный характер возникновения локальной коррозии. Предложен новый подход к созданию систем, способных фиксировать проявления локальной коррозии в реальном времени и отвечающих концепции «цифровых» месторождений. В частности, предложено использовать систему детектирования ручейковой коррозии, представляющую собой прибор, одновременно производящий измерения электрического сопротивления зонда в двух точках и поляризационное сопротивление среды. Рассмотрены результаты испытаний прототипа системы на тестовых жидкостях, имитирующих в лабораторных условиях реальные процессы, возникающие в трубопроводах. Подтверждено, что использование различных методов измерения скорости коррозии в сочетании с зонированием трубного пространства позволяет верифицировать получаемые результаты по среднеповерхностной потере металла, одновременно контролируя параметры локальной коррозии на основе алгоритмов с использованием математического аппарата взаимной корреляционной обработки результатов. Сделан вывод о целесообразности практического применения системы в целях повышения уровня качества выявления очагов зарождения локальной коррозии и контроля ее параметров, а также продвижения в понимании малоизученных процессов протекания углекислотной коррозии.

**Ключевые слова:** углекислотная коррозия, ручейковая коррозия, локальная коррозия, среднеповерхностная потеря металла, электрическое сопротивление, поляризационное сопротивление, гравиметрия, образец-свидетель коррозии, датчик.

.....

**V.A. Blokhin<sup>1</sup>**, e-mail: [akkord@sonar.penza.com.ru](mailto:akkord@sonar.penza.com.ru); **A.Yu. Dorosinskiy<sup>1</sup>**; **A.K. Manzhosov<sup>1</sup>**; **A.N. Markin<sup>2</sup>**,  
e-mail: [andrey.n.markine@gmail.com](mailto:andrey.n.markine@gmail.com)

<sup>1</sup> Research and Development enterprise "Sonar" LLC (Penza, Russia).

<sup>2</sup> Branch of the Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "Industrial University of Tyumen" (Tyumen, Russia).

## The Detection System of Local Corrosion Processes in Their Early Stages

The article considers the problems connected with monitoring of carbon-dioxide corrosion in field equipment and pipelines. The distinguishing features of key inspection techniques traditionally applied in developing of corrosion monitoring systems both in gaseous and oil media are described. A random initiation character of local corrosion is shown. A new approach to the development of systems able to fix any local corrosion shows on-line and meet the concept of "numerical" fields is proposed. In particular, it is proposed to use a detection system of trenching corrosion which is a device simultaneously measuring probe electrical resistance in two points and polarized environmental resistance. Observations of the testing liquids laboratory tests of a system prototype simulating real processes generating in pipelines are analyzed. It has been proved that application of various corrosion rate techniques in combination with pipe space zoning allows to verify the results obtained for middle-surface metal loss, simultaneously monitoring local corrosion parameters on the basis of algorithms using mathematical apparatus of mutual data correlated processing. The article concludes with advisability of practical system application to improve the detection quality of local corrosion initiation centres and monitoring quality of its parameters, as well as to ensure progress in gaining knowledge of poorly known CO<sub>2</sub>-corrosion processes.

**Keywords:** carbon-dioxide (CO<sub>2</sub>) corrosion, trenching corrosion, local corrosion, middle-surface metal loss, electrical resistance, polarized resistance, gravimetry, sample-corrosion witness, sensor.

Характеристики основных методов контроля коррозии  
Characteristics of main corrosion monitoring techniques

Метод контроля Monitoring technique	Измеряемые величины Measurands	Контролируемые процессы Monitorable processes	Применимость Applicability	Ограничения Restrictions
Весовой (гравиметрический) Weight (gravimetric)	Изменение массы образцов – свидетелей коррозии весовым методом за время экспозиции Mass variation of samples – corrosion witnesses by the gravimetric technique during exposition	Среднеповерхностная и локальная коррозия, эрозия Middle-surface and local corrosion, erosion	Любые среды Any media	1. Инерционность; 2. Интегральная информация; 3. Невозможность автоматизации 1. Inertia; 2. Integral information; 3. Impossible automation
Электрического сопротивления (ER) Electrical resistance (ER)	Электрическое сопротивление зонда Probe electrical resistance	Среднеповерхностная коррозия, эрозия Middle-surface corrosion, erosion	Любые среды Any media	Не предназначен для измерения скорости локальной коррозии Not designed for local corrosion rate
Линейной поляризации (LPR) Linear polarization (LPR)	Поляризационное сопротивление среды Polarized environmental resistance	Среднеповерхностная коррозия, индикатор локальной коррозии Middle-surface corrosion, local corrosion indicator	Проводящая среда Conducting medium	Обводненность среды более 40–50 % Watering of medium over 40–50 %

Коррозия внутренних поверхностей технологического оборудования на объектах добычи в нефтегазовой отрасли ежегодно наносит значительный экономический и экологический ущерб. В газовой промышленности большую опасность представляет углекислотная коррозия стали, проблема борьбы с которой стала особенно актуальной в последнее время, при освоении новых нефтегазовых бассейнов [1]. Отличительной чертой углекислотной коррозии стали является возможность локализации в виде язв, питтингов или протяженных канавок на нижней образующей трубопроводов (так называемая ручейковая коррозия) [2, 3]. Коррозия является сложным многофакторным процессом, для правильной оценки которого необходимо учитывать целый комплекс различных параметров. Анализ механизмов углекислотной коррозии стали показывает, что ее проявления можно условно разделить на среднеповерхностный коррозионно-эрозионный износ стенок трубопровода и оборудования и локальный коррозионный износ (питтинг, язвы, мейза-коррозия и т. д.). При этом развитие

локальной коррозии может протекать в десятки раз быстрее по сравнению со среднеповерхностной потерей массы металла [2].

#### МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ КОРРОЗИИ

Основные особенности применения различных методов контроля коррозии при построении систем коррозионного мониторинга для работы в полевых условиях отражены в таблице. К числу наиболее распространенных относится весовой (гравиметрический) метод, при котором скорость коррозии измеряют по потере массы металла образцов – свидетелей коррозии, а затем фиксируют среднеповерхностный коррозионно-эрозионный износ, что, однако, не означает, что все участки металла в каждый момент времени корродируют с одинаковой скоростью. Измеряя неравномерность потери массы металла по поверхности образца-свидетеля (например профилометром), можно не только зафиксировать факт наличия локальной коррозии, но и измерить ее скорость. В то же время низкая чувствительность гравиметрического метода, необходимость длительных

наблюдений, а также трудоемкость методик оценки локальной коррозии с помощью профилометров практически исключают возможность применения гравиметрического метода для анализа быстропротекающих процессов. Что же касается метода электрического сопротивления (ER), то в силу методических ограничений ER-датчики также регистрируют только среднеповерхностные коррозионно-эрозионные процессы путем измерения уменьшения толщины чувствительного элемента через изменение электрического сопротивления [3], что не дает верного представления о скорости коррозии.

#### АНАЛИЗ СХОДИМОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ

Несмотря на то что с помощью указанных методов оценивают один и тот же параметр – скорость среднеповерхностных потерь массы металла, абсолютные значения величины скорости коррозии, полученные с помощью каждого из методов, зачастую разнятся между собой. Анализ причин таких расхождений представлен в [3], там же перечислены условия сходимости пока-

Ссылка для цитирования (for citation):

Блохин В.А., Доросинский А.Ю., Манжосов А.К., Маркин А.Н. Система обнаружения локальных коррозионных процессов на ранних стадиях // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2019. № 4. С. 44–48.  
Blokhin V.A., Dorosinskiy A.Yu., Manzhosov A.K., Markin A.N. The Detection System of Local Corrosion Processes on Their Early Stages. Territorija "NEFTEGAS" = Oil and Gas Territory. 2019;(4):44–48. (In Russ.)

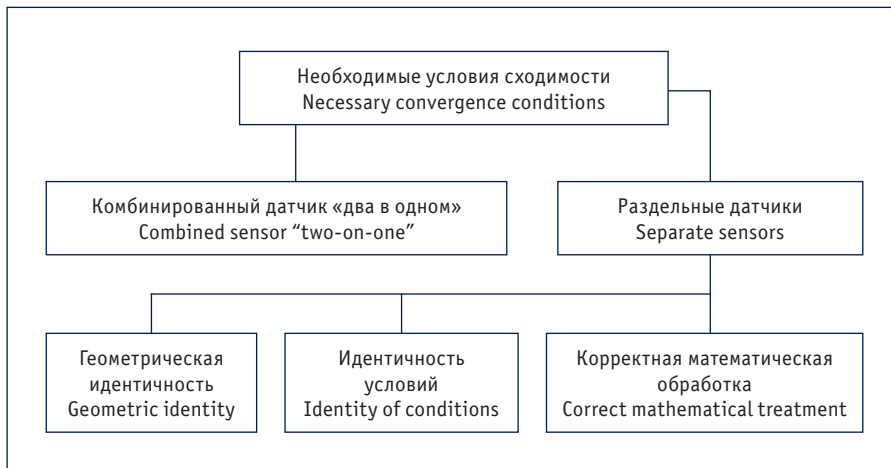


Рис. 1. Условия сходимости результатов весового и ER-методов  
Fig. 1. Convergence conditions of gravimetric and ER-techniques

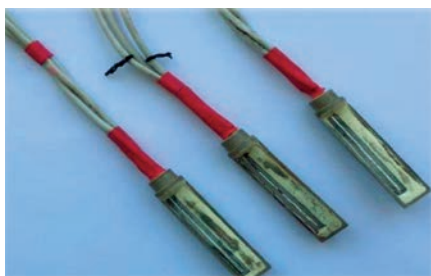


Рис. 2. Фотографии универсальных чувствительных элементов  
Fig. 2. Photos of universal sensors

заний гравиметрических и ER-датчиков (рис. 1).

Наибольшая сходимость обеспечивается в случае, когда чувствительный элемент зонда ER является одновременно и образцом – свидетелем коррозии «два в одном». Такие датчики были специально изготовлены в ООО «НПП «Сонар» для проведения лабораторных испытаний, результаты которых представлены в данной статье. Образцы датчиков после проведения испытаний показаны на рис. 2.

В ходе испытаний три образца подвергались воздействию коррозии, после чего фиксировалось отклонение между результатами, полученными с помощью весового и ER-метода.

Испытания состояли из трех этапов. На первом образцы подвергались воздействию коррозии в течение трех циклов. На втором и третьем коррозионное воздействие имитировалось в течение двух циклов. Длительность каждого цикла составляла 96 ч.

Результаты исследований подтвердили хорошую сходимость результатов при использовании в рамках изученного подхода гравиметрического и ER-методов (рис. 3). Причем хорошая сходимость наблюдалась даже в случаях, когда на поверхности чувствительных элементов зондов отчетливо фиксировались проявления локальной коррозии.

Развитие локальной коррозии даже при одинаковых испытательных воздействиях вызвано тем, что поверхность металла обладает электрохимической гетерогенностью, выражающейся в неравномерном распределении по-

тенциала по поверхности металла и образовании микрогальванопар, которые могут мигрировать по поверхности металла.

На макроуровне коррозия выражается в виде относительно равномерной среднеповерхностной потери массы металла. При закреплении одной или нескольких микрогальванопар на определенном участке поверхности металла в этой зоне развивается локальная коррозия. На рис. 4 представлены фотографии поверхностей чувствительных элементов зондов, подвергшихся одинаковым коррозионным воздействиям. Поскольку электрохимическая гетерогенность поверхности металла влияет на закрепление микрогальванопар и носит случайный характер, нет возможности предсказать, на каком именно участке это произойдет.

Из изложенного следует, что процесс развития локальной коррозии, не регистрируемый традиционными техническими средствами, может привести к быстрому развитию ее очага и повреждению оборудования. Предупредить развитие локальной коррозии можно с помощью инструмента, который, помимо измерения параметров среднеповерхностной потери металла, обнаруживает зарождение процесса локальной коррозии и в реальном времени оценивает его характеристики.

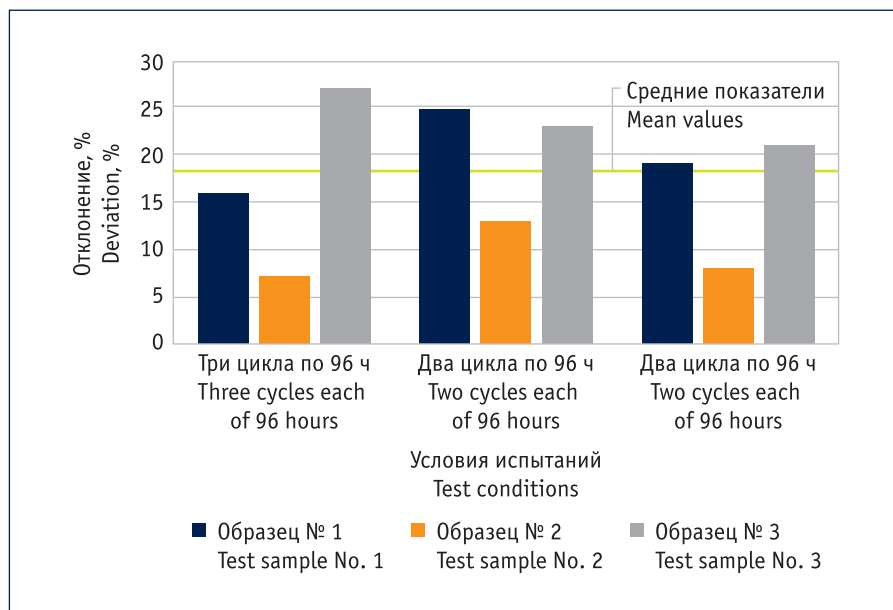


Рис. 3. Результаты испытаний универсальных чувствительных элементов

Fig. 3. Test results of universal sensors





### ВЫЯВЛЕНИЕ ЛОКАЛЬНОЙ КОРРОЗИИ НА РАННИХ СТАДИЯХ

Многофакторная природа процесса развития локальной коррозии обуславливает необходимость увеличения количества контролируемых параметров при построении систем мониторинга, описывающих текущее состояние объекта. Решить эту задачу можно за счет пространственного разнесения датчиков коррозии, а также организации синхронных измерений приборами, работающими на основе разных физических принципов.

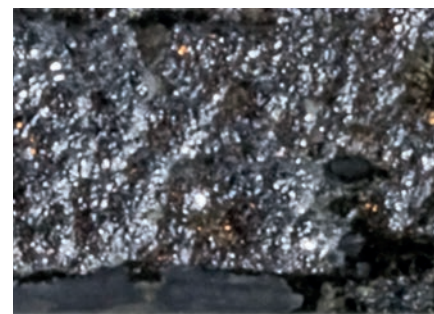
Предлагаемая система, названная нами «СиДеРКО» (система детектирования ручейковой коррозии), представляет собой прибор, одновременно производящий ER- и LPR-измерения (измерения параметров поляризационного сопротивления). Результатом работы такой системы является выявление углекислотной коррозии на начальной фазе развития с выдачей информации о ее параметрах.

Идея подхода заключается в следующем. В одной точке трубопровода в непосредственной близости друг от друга устанавливают:

- образец – свидетель коррозии – в нижней образующей трубопровода вровень с поверхностью;
- LPR-датчик, рассчитанный на работу в средах с низкой проводимостью, – в нижней образующей трубопровода вровень с поверхностью;



а) а)



б) б)

Рис. 4. Проявление локальной коррозии на поверхности чувствительных элементов (увеличение x100): а) незначительное; б) существенное

Fig. 4. Development of local corrosion on the surface of sensors (enlargement x100): a) minor; b) essential

- ER-датчики: один – в нижней образующей трубопровода вровень с поверхностью, второй – в центральной части трубопровода (для контроля скорости коррозионно-эрозионного износа).

В данном случае образец – свидетель коррозии необходим для начальной «калибровки» системы по величине среднесредностных потерь массы металла и по скорости локальной коррозии. Для выявления локальной коррозии с помощью образца – свидетеля коррозии требуется проведение дополнительных измерений с помощью оптических или игольчатых микрометров, профилометров и др., что оправданно на начальном этапе «калибровки» системы для верификации показаний ER- и LPR-датчиков, настройки и т. д.

В отсутствие водной фазы в нижней образующей трубопровода показания обоих ER-датчиков близки, а показания LPR-прибора регистрируют нулевую скорость коррозии, поскольку именно наличие водной фазы запускает механизм локальной коррозии. Показания LPR-датчика, отличные от нуля, будут свидетельствовать о появлении проводящей среды в нижней образующей трубопровода.

Появление проводящей фазы является следствием интенсивной конденсации слабominерализованной воды, которая будет способствовать образованию и развитию «ручейка». С ростом уровня его минерализации LPR-датчик будет регистрировать увеличение скорости коррозии. Превышение сформулированного порогового значения в совокупно-

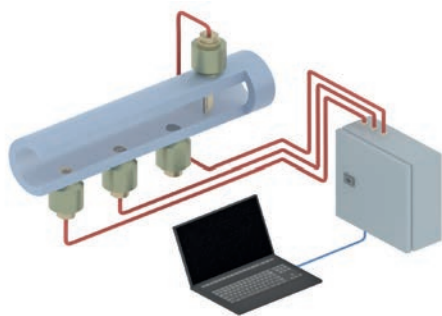


Рис. 5. Структурная схема системы детектирования ручейковой коррозии  
Fig. 5. Flow chart of the trenching corrosion detection system

сти с другими параметрами позволит зафиксировать факт начала ручейковой коррозии.

В то же время ER-датчик, установленный в нижней образующей трубы, зарегистрирует значительное увеличение скорости коррозии по сравнению с предыдущими значениями и с показаниями ER-датчика, установленного в центре трубы. Если же условия в трубопроводе изменятся и слабоминерализованная вода перестанет образовывать «ручеек» на нижней образующей трубопровода, это также будет видно по показаниям LPR-датчика и при сравнении показаний двух ER-датчиков.

Использование различных методов измерения скорости коррозии в сочетании с зонированием трубного пространства позволяет не только верифицировать получаемые результаты по среднеповерхностной потере металла, но и контролировать параметры локальной коррозии на основе алгоритмов с использованием математического

аппарата взаимной корреляционной обработки результатов.

В данном случае применение взаимного корреляционного анализа временных рядов скоростей коррозии, полученных различными методами, позволяет выявлять скрытые закономерности на основе выражения:

$$(V \cdot W)_i \stackrel{\text{def}}{=} \sum_j (V_j^* \cdot W_{i-j}),$$

где  $V$  и  $W$  – два исследуемых временных ряда скоростей коррозии;  $i$  – сдвиг между последовательностями относительно друг друга;  $*$  – комплексное сопряжение.

Верификация результатов измерений параметров локальной коррозии возможна путем детального анализа образца – свидетеля коррозии с применением методов профилометрии.

Структурная схема предложенной системы представлена на рис. 5.

Прототип системы был построен на основе серийно выпускаемого оборудования ООО «НПП «Сонар» и опробован на тестовых жидкостях, имитирующих в лабораторных условиях реальные процессы, возникающие в трубопроводах. Наличие такого измерительного инструмента позволяет расширить число «видимых» процессов, происходящих во внутритрубном пространстве, контролировать их и разработать эффективную технологию ингибирования.

В рамках работ по созданию системы было получено положительное решение о выдаче патента [4].

## ВЫВОДЫ

1. Применение традиционных подходов к мониторингу коррозии в нефтегазовых средах в случае действия механизма углекислотной коррозии может привести к тому, что процесс интенсивного развития локальной коррозии не будет замечен.

2. В целях повышения уровня качества выявления очагов зарождения локальной коррозии и контроля ее параметров предложен новый подход построения многопараметрической системы реального времени, практическое применение которой позволит:

- повысить эффективность отбора ингибиторов коррозии с учетом качества подавления потерь не только среднеповерхностной массы металла, но и локальной составляющей;
- осуществлять комплексный многопараметрический контроль за процессами углекислотной коррозии, основываясь на статистически корректных, верифицированных данных;
- создать унифицированный узел контроля коррозии, пригодный для широкого применения при проектировании «цифровых» месторождений, работающих в реальном времени.

3. Формирование базы статистических данных благодаря работе системы в реальных условиях позволит продвигаться в понимании малоизученных процессов протекания углекислотной коррозии и будет способствовать созданию новых эффективных ингибиторов и технологий их применения.

## Литература:

1. Кашковский Р.В., Ибатуллин 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. CO<sub>2</sub>-коррозия нефтепромыслового оборудования. М.: ОАО «ВНИИОЭНГ», 2003. 188 с.
3. Блохин В.А., Манжосов А.К., Маркин А.Н. Особенности измерения параметров углекислотной коррозии в газовых средах // Коррозия «Территории «НЕФТЕГАЗ». 2018. № 1 (39). С. 54–62.
4. Способ мониторинга углекислотной коррозии на промышленных газопроводах и устройство для его осуществления: пат. RU 2018123875 C1, МПК F16L58/00E, G01N17/00 / В.А. Гончаров; патентообладатель ЗАО «КОРМАКО»; № 2009117712/06; заявл. 12.05.2009; опубл. 20.11.2010; Бюл. № 23.

## References:

1. Kashkovsky R.V., Ibatullin K.A. Certain Aspects of Carbon-Dioxide Corrosion in Steel Equipment and Pipelines of Oil-and-Gas Fields. Nauka i tekhnika v gazovoi promyshlennosti = Science and Technology in the Gas Industry. 2016;3(67):71–91. (In Russ.)
2. Markin A.N., Nizamov R.E. CO<sub>2</sub>-corrosion of Oil Field Equipment. Moscow: VNIIOENG OJSC, 2003, 188 p. (In Russ.)
3. Blokhin V.A., Manzhosov A.K., Markin A.N. Main Features of CO<sub>2</sub>-corrosion Measurement in Gaseous Media. Korroziya "Territorii "NEFTEGAS" = Corrosion of the Oil and Gas Territory. 2018;1(39):54–62.
4. Goncharov V.A. CO<sub>2</sub>-corrosion Monitoring Technique in Field Gas Lines and Its Arrangement to Put It into Effect: patent RU 2018123875 C1; patent holder CORMACO CJSC; No. 2009117712/06; appl. 12th May 2009; publ. 20th November 2010; Bul. No. 23. (In Russ.)