



**МАТЕРИАЛЫ И ОБОРУДОВАНИЕ
ДЛЯ ПРОТИВОКОРРОЗИОННОЙ
ЗАЩИТЫ**

Тип статьи: научная, оригинальная

**MATERIALS AND EQUIPMENT
FOR CORROSION PROTECTION**

Article type: original

<https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2024.111.1-2>

**Оценка локальной коррозии по данным,
получаемым с датчиков электрического сопротивления**

Т.Д. Гладких✉, А.Н. Маркин

Филиал Тюменского индустриального университета в г. Нижневартовске,
РФ, 628616, ХМАО-Югра, г. Нижневартовск, ул. Ленина, 2/П, стр. 9

e-mail: gladkihtd@tyuiu.ru

Аннотация. Осложнения, связанные с коррозивностью среды, по данным компании ПАО «НК «Роснефть» входят в число преобладающих на объектах нефтегазодобычи и занимают 4-е место среди других осложняющих добычу факторов – 12% осложненного механизированного фонда скважин. Поэтому диагностика и мониторинг состояния нефтепромыслового оборудования на предмет коррозионного износа является актуальным направлением повышения безотказности технологического процесса добычи и транспорта нефти. Метод «электрического сопротивления» (ЭС) является одним из методов коррозионного мониторинга, применяемых в нефтегазодобывающей отрасли. Недостаток метода ЭС состоит в том, что приборы, используемые в настоящее время, не позволяют оценить неравномерность коррозионных потерь на поверхности материала, то есть не могут идентифицировать процесс развития локальной коррозии. Тем не менее, именно локальная коррозия обуславливает отказы нефтепромыслового оборудования.

В статье предложена физическая модель развития коррозии, отражающая взаимосвязь изменения сопротивления корродирующего элемента со скоростью коррозионного расхода. Процесс коррозии описан через частные случаи равномерной и локальной коррозии, имеющие разные скорости коррозионного расхода. По результатам анализа физической модели локальной коррозии, предложены способы интерпретации данных, получаемых с датчиков электрического сопротивления, который позволяет обнаружить проявление язвенной коррозии. Маркером развивающейся локальной коррозии является изменение динамики роста сопротивления чувствительного элемента.

Ключевые слова: коррозия, локальная коррозия, метод электрического сопротивления, оценка локальной коррозии, трубопроводы систем сбора нефти

Для цитирования: Гладких Т.Д., Маркин А.Н. Оценка локальной коррозии по данным, получаемым с датчиков электрического сопротивления // Практика противокоррозионной защиты. – 2024. – Т. 29, № 1. – С. 20-26.
<https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2024.111.1-2>

Получена 05.12.2023. Принята к публикации 20.01.2024. Опубликовано 01.03.2024.

**Assessment of Local Corrosion Based
on Data Obtained From Electrical Resistance Sensors**

Tatiana D. Gladkih✉, Adrey N. Markin

Nizhnevartovsk branch Industrial University of Tyumen,
2/P, bld. 9, Lenina str., Nizhnevartovsk, 628616, Russian Federation

e-mail: gladkihtd@tyuiu.ru

Abstract. Complications related to the corrosive environment, according to Rosneft, are among the prevailing ones at oil and gas production facilities and occupy the 4th place among other factors complicating production – 12% of the complicated mechanized well stock. Therefore, diagnostics and monitoring of the condition of oilfield equipment for corrosion wear is an urgent direction for improving the reliability of the technological process of oil production and transportation. The «electrical resistance» (ES) method is one of methods of corrosion monitoring in the oil and gas industry. The disadvantage of the ES method is that the devices currently used do not allow to assess the unevenness of corrosion losses on the surface of the material, that is, they cannot identify the process of local corrosion development. Nevertheless, it is local corrosion that causes failures of oilfield equipment.

The article proposes a physical model of the development of corrosion, reflecting the relationship of changes in the resistance of a corroding element with the rate of corrosion consumption. The corrosion process is described through special cases of uniform and local corrosion having different rates of corrosion flow. Based on the results of the analysis of the physical model of local corrosion, methods for interpreting data obtained from electrical resistance sensors are proposed, which allows detecting the manifestation of ulcerative corrosion. A marker of developing local corrosion is a change in the dynamic of sensing element resistance growth.

Keywords: corrosion, localized corrosion, CO₂-corrosion, corrosion rate calculation, electrical resistance method, estimation of local corrosion, pipelines of oil gathering system, downhole equipment

For citation: Gladkih, T. D., Markin, A. N. (2024). Assessment of Local Corrosion Based on Data Obtained from Electrical Resistance. *Theory and Practice of Corrosion Protection*, 29(1), 20-26. <https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2024.111.1-2>

Received December 05, 2023. Accepted for publication January 20, 2024. Published March 01, 2024.

Введение

Внутренняя коррозия нефтепромыслового оборудования, включая трубопроводы систем сбора нефти и внутрискважинное оборудование добывающих скважин на месторождениях Западной Сибири, протекает по углекислотному механизму [1].

Основным видом коррозионных повреждений при углекислотной коррозии является локальная (язвенная) коррозия в виде язв и свищей [1-3]. Именно локальная коррозия внутренней поверхности трубопроводов систем сбора нефти приводит к нарушениям их герметичности, локальная коррозия насосно-компрессорных труб и другого внутрискважинного оборудования – к преждевременным подземным ремонтам скважин, необходимости замены оборудования, вышедшего из строя в результате коррозии, и временным потерям добычи нефти.

Одним из методов коррозионного мониторинга, применяемых в нефтегазодобывающей отрасли, является метод электрического сопротивления (ЭС). Метод основан на том, что при изменении, в результате коррозии, геометрических размеров металлического проводника изменяется его электрическое сопротивление, так как величина электрического сопротивления металлического проводника зависит от его геометрических размеров. Этот метод, а также датчики и приборы, с помощью которых его реализуют, часто называют ER (по аббревиатуре английского названия метода Electrical Resistant). Преимущество метода ЭС – универсальность: он применим как в электролитах (водная фаза продукции скважин и трубопроводов, водонефтяная эмульсия типа нефть в воде), так и в жидкостях с низкой электрической проводимостью – углеводороды, водонефтяная

эмульсия типа вода в нефти; получение информации о скорости коррозии в реальном времени (с интервалом от 6 часов). Недостаток метода ЭС – приборы, используемые в настоящее время, не позволяют оценить локальную коррозию.

Цель настоящей работы – предложить способ интерпретации данных, получаемых с датчиков ЭС, который позволит оценить локальную коррозию.

Модель и расчеты

Рассмотрим изменение электрического сопротивления (далее – «сопротивление») чувствительного элемента (ЧЭ) датчика ЭС в случаях равномерной коррозии и «локальной (язвенной) + равномерной» коррозии.

1. Равномерная коррозия

На рис. 1 схематично показан ЧЭ датчика ЭС.

Электрическое сопротивление ЧЭ зависит от удельного сопротивления металла, из которого изготовлен ЧЭ, и его геометрических размеров:

$$R = \frac{\rho l}{Dh} = \frac{\rho l^2}{Dhl} = \frac{\rho l^2}{v}, \quad (1)$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление, Ом·м;

l , D , h – длина, ширина и толщина ЧЭ соответственно, м;

v – объем ЧЭ, м³.

В результате равномерной коррозии (показателем которой является коррозионный расход – KP , массовый показатель коррозии, кг/(м²·с)) за время t толщина ЧЭ уменьшается, а сопротивление увеличивается:

$$R = \frac{\rho l^2}{D(h - KP \cdot t)l} = \frac{\rho l}{D(h - KP \cdot t)}, \quad (2)$$

где KP – коррозионный расход, выраженный в м/с (так как коррозия равномерная, то мас-

совый показатель коррозии $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ корректно пересчитывать в глубинный показатель коррозии (глубину проникновения) $\text{м}/\text{с}$.¹

По изменению сопротивления от R_1 до R_2 за время Δt рассчитывают KP ($\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$):

$$KP = \frac{\rho l}{(R_2 - R_1) D \Delta t} \cdot \rho_{Me}, \quad (3)$$

где ρ_{Me} – плотность металла, $\text{кг}/\text{м}^3$.

2. Локальная (язвенная) + равномерная коррозия

«Язвенная коррозия характеризуется тем, что, начавшись в одной точке на поверхности металла, идет далее примерно с одинаковой скоростью как вглубь металла, так и на поверхности. Глубина поражения сопоставима с диаметром язвы. Склоны язв хорошо выражены, площадь дна намного меньше площади поверхности. Глубина проникновения от 1 до 5 $\text{мм}/\text{год}$ »². В реальных нефтепромышленных системах геометрические формы локальной коррозии очень разнообразны – от «конусов» и «цилиндров» (рис. 2а, б) до «полусфер» (рис. 2с), однако, как будет видно из дальнейшего изложения, для предмета рассмотрения данной работы это не имеет существенного значения – поэтому будем считать, что локальная коррозия проявляет себя не в виде конусов (как описано в приведенной выше цитате), а в виде «цилиндров» (рис. 3).

На ЧЭ датчиков ЭС наряду с равномерной протекает локальная коррозия [3]. На рис. 3 приведена фотография ЧЭ с характерными локальными повреждениями. Однако традиционная (по формуле (3)) интерпретация сигнала датчика ЭС не позволяет диагностировать проявление локальной коррозии.

Примем следующую модель развития локальной (язвенной) коррозии (рис. 4).

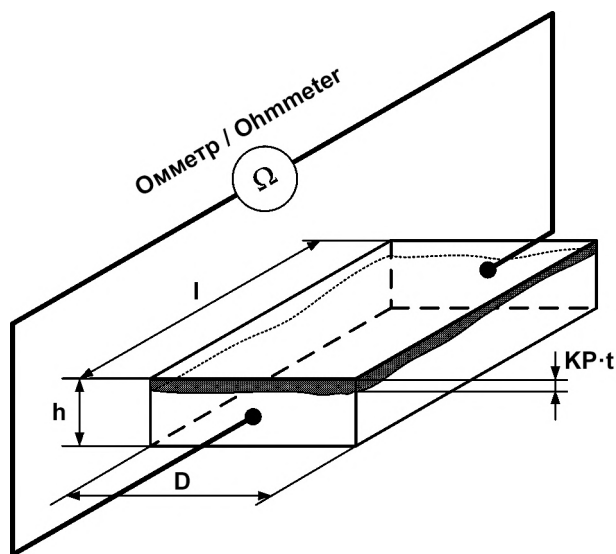


Рис. 1. Схема чувствительного элемента датчика электрического сопротивления и уменьшение его толщины в результате равномерной коррозии

Fig. 1. Diagram of the sensitive element resistance and a decrease in its thickness as a result of uniform corrosion

Язвы развиваются в виде прямых цилиндров; n – количество зародившихся и развивающихся язв на единице площади поверхности, $\text{шт}/\text{м}^2$; V – скорость локальной коррозии в язвах (как в глубину металла, так и по поверхности), $\text{м}/\text{с}$.

При развитии язв и в результате равномерной коррозии объем ЧЭ уменьшается, следовательно, изменяется площадь сечения ЧЭ, что приводит к возрастанию сопротивления ЧЭ (формула 4).

В знаменателе первой части формулы (4) первый член – начальный объем ЧЭ; второй – объем язв (nDl прямых цилиндров диаметром и глубиной); третий – объем, потерянный ЧЭ в результате равномерной коррозии.

Если язвы развиваются в виде конусов, то второй член в знаменателе первой части

$$R = \frac{\rho l^2}{Dhl - nDl \frac{\pi(V \cdot t)^2}{4} Vt - Dlt \cdot KP} = \frac{\rho l}{D(h - n \frac{\pi(V \cdot t)^3}{4} - t \cdot KP)}. \quad (4)$$

¹В случае неравномерной коррозии KP выражают в $\text{мм}/\text{год}$ только в условном пересчете, то есть для сравнения в одних и тех же единицах разных по своей сути коррозионных повреждений.

²Классификатор коррозии ПАО «НК «Роснефть», 2018 г.

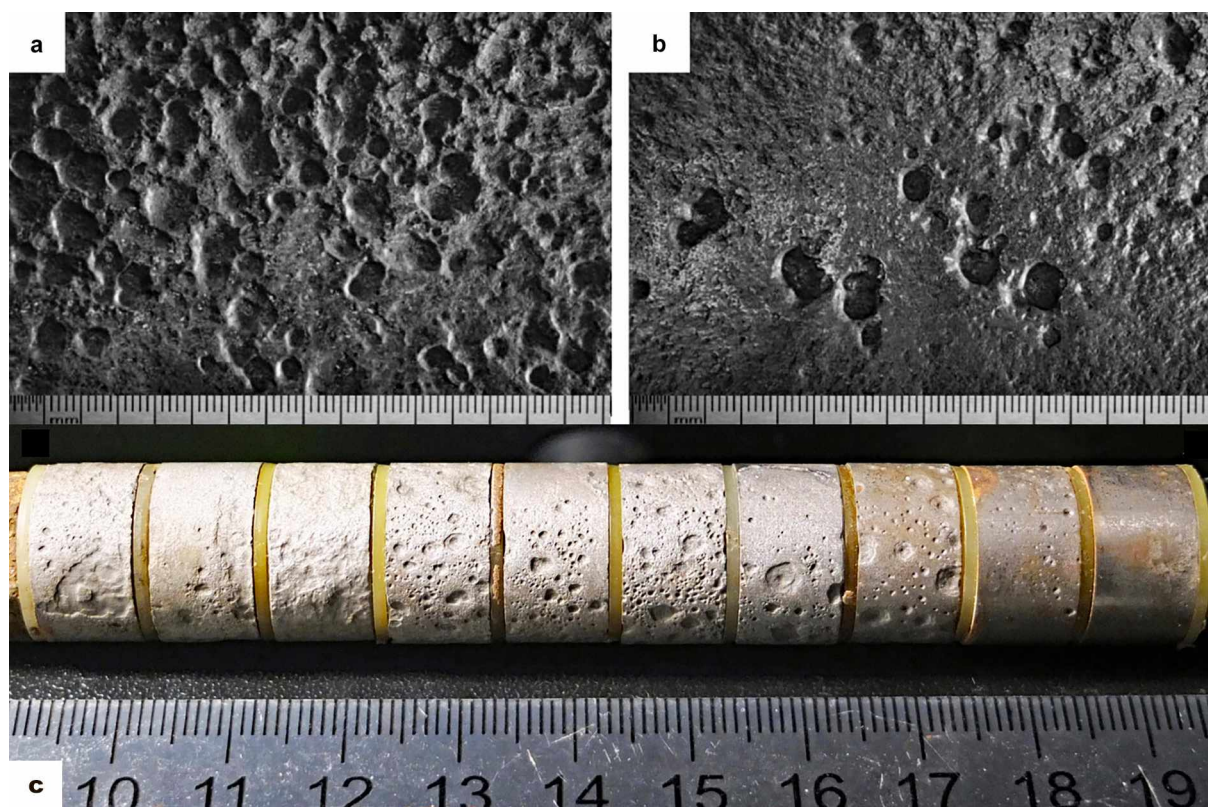


Рис. 2. Геометрические формы локальной коррозии: а, б – «конусы» и «цилиндры» (локальная коррозия внутренней поверхности трубопровода системы сбора нефти Приобского месторождения [2]); с – «цилиндры» и «полусферы» (кассета с образцами контроля коррозии, экспонировавшаяся в трубопроводе системы сбора нефти Ватинского месторождения, 2020 г.)

Fig. 2. Geometric shapes of local corrosion: a, b – «cones» and «cylinders» (local corrosion of the inner surface of the pipeline of the oil collection system of the Priobskoye field [2]); c – «cylinders» and «hemispheres» (a cassette with corrosion control samples exposed in the pipeline of the oil collection system of the Vatinisky field, 2020)

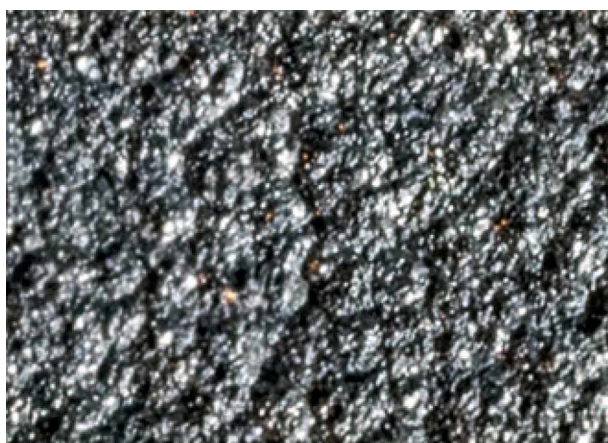


Рис. 3. Проявление локальной коррозии на поверхности чувствительных элементов датчиков электрического сопротивления, $\times 100$ [5]

Fig. 3. Manifestation of local corrosion on the surface of sensitive element ER-sensors, $\times 100$ [5]

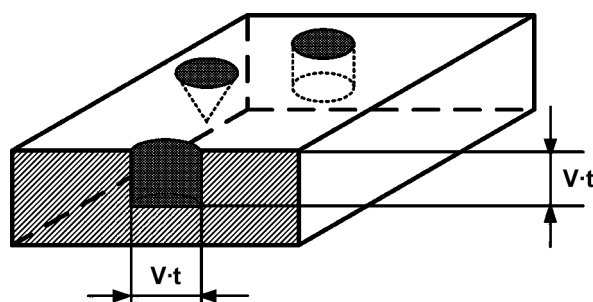


Рис. 4. Модель развития (локальной) язвенной коррозии на поверхности чувствительного элемента датчика электрического сопротивления

Fig. 4. A model of the development of (local) ulcerative corrosion on the surface of sensitive element ER-sensors

формулы (4) (объем язв), имеет вид:

$$V_i = nDl \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{\pi(V \cdot t)^2}{4} Vt = nDl \frac{\pi(V \cdot t)^3}{12}, \quad (5)$$

где nDl – количество язв в виде конусов;

$V \cdot t$ – диаметр и глубина язв в виде конусов.

В этом случае, зависимость сопротивления R от времени и скорости локальной коррозии, с точностью до коэффициента, такая же, как в формуле (4).

В [4, 5] методами оптической микроскопии и сканирующей рефлектометрии исследовали коррозию стального образца в минерализованном азириванном растворе. Показано, что через 10 мин. после погружения образца в раствор на поверхности стали возникают первые локальные коррозионные повреждения; в дальнейшем их количество значительно увеличивается – через 200 мин. поверхностная концентрация локальных коррозионных повреждений составляет ~ 600 шт./см², средний радиус повреждений ~ 100 мкм. При длительных

испытаниях коррозия развивается преимущественно через углубления образовавшихся локальных повреждений, глубина которых через несколько часов превышает 100 мкм, а через 33 сут. в отдельных повреждениях достигает 600 мкм. Усредненный радиус коррозионных повреждений через 33 сут. – 247 мкм. Скорость локальной коррозии через 33 сут. – 6,6 мм/год при KP , измеренным весовым методом, $\sim 0,04$ г/(м²×ч).

На рис. 5 показаны графики зависимости относительного сопротивления ЧЭ датчика ЭС ($R_t/R_{нач.}$, где R_t – сопротивление ЧЭ в момент времени t ; $R_{нач.}$ – начальное сопротивление ЧЭ) от времени, рассчитанные для случая равномерной коррозии (формула (2)) при различном KP .

Зависимость R от t , согласно формуле (2), нелинейная, но, как видно из данных рис. 5, нелинейность мала, ее не видно на графиках вплоть до $KP = 2,00$ мм/год (отметим, что $KP > 1$ мм/год не наблюдается в реальных нефтепромысловых системах, типичные

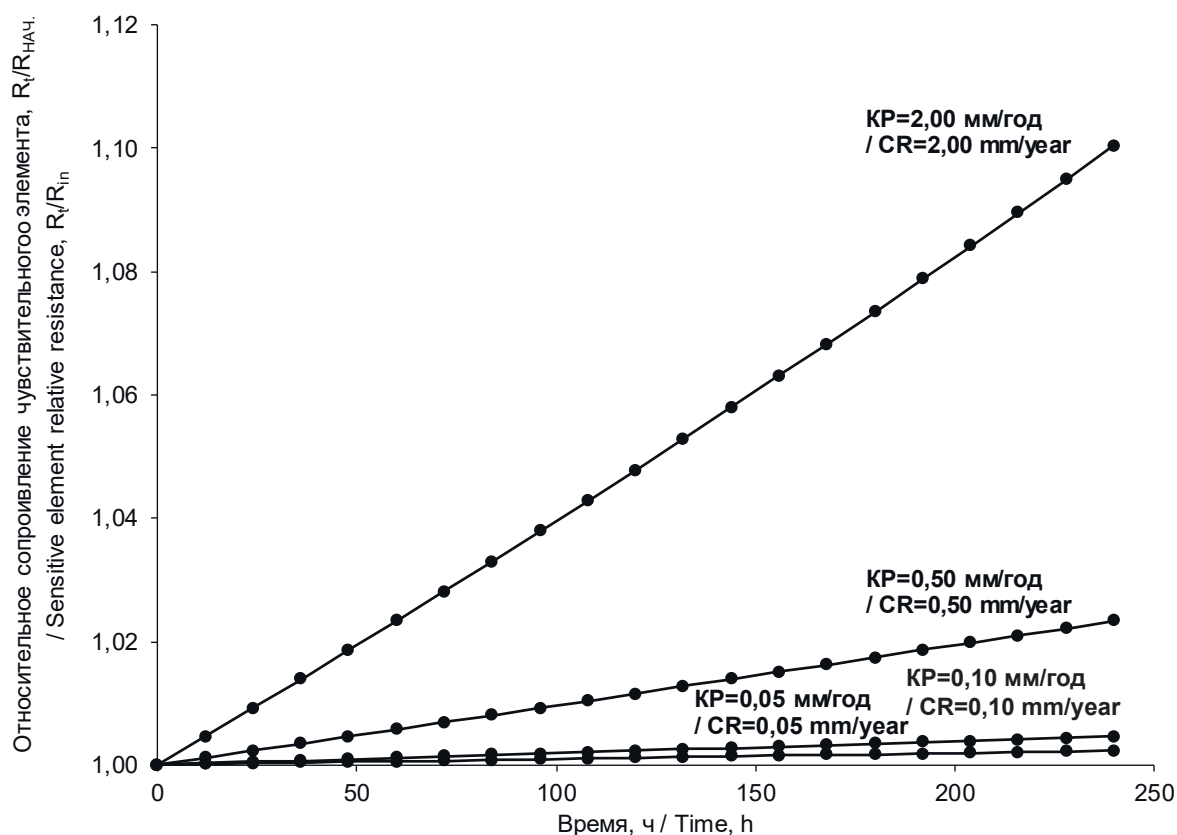


Рис. 5. Зависимость относительного сопротивления чувствительного элемента датчика электрического сопротивления от времени при различном KP ;
 $\rho = 1,69 \cdot 10^{-7}$ Ом·м; $l = 10$ см; $D = 2$ мм; $h = 0,6$ мм

Fig. 5. The dependence of the sensitive element relative resistance of ER-sensors on time at different CR : $\rho = 1,69 \cdot 10^{-7}$ Oh·m; $l = 10$ cm; $D = 2$ mm; $h = 0,6$ mm

значения КР – от 0,05 до 0,20 мм/год [1]), нелинейность существенно проявляется лишь при $t > 180 - 365$ суток для $KP = 1...2$ мм/год. Поэтому для подавляющего большинства практических случаев использования приборов ЭС можно принять, что зависимость R от t при равномерной коррозии линейна (в контексте дальнейшего изложения).

На рис. 6 показаны графики зависимости относительного сопротивления ЧЭ датчика ЭС от времени, рассчитанные для случая «локальная (язвенная) + равномерная коррозия» (формула (4)).

При локальной коррозии отклонение от линейности проявляется уже через 48...60 ч. В практическом плане это можно использо-

вать следующим образом: если зависимость R от t отклоняется от «линейности» больше, чем по формуле (2), то это означает, что на ЧЭ протекает локальная коррозия, о чем прибор должен сигнализировать.

С течением времени образовавшиеся язвы: 1) могут перестать расти – коррозия перейдет в равномерную; 2) возможно зарождение и развитие новых язв; 3) язвы могут перестать расти по поверхности, но продолжить расти вглубь металла, тогда второй член знаменателя формулы (4) будет линейно зависеть от времени и формула (4) «переходит» в формулу (2).

На рис. 7 показаны графики зависимости относительного сопротивления ЧЭ датчика ЭС от времени, когда через 48 ч равномерной коррозии начали расти язвы и когда язвы росли до 48 ч, а потом перестали – в обоих случаях на графиках появляются «перегибы».

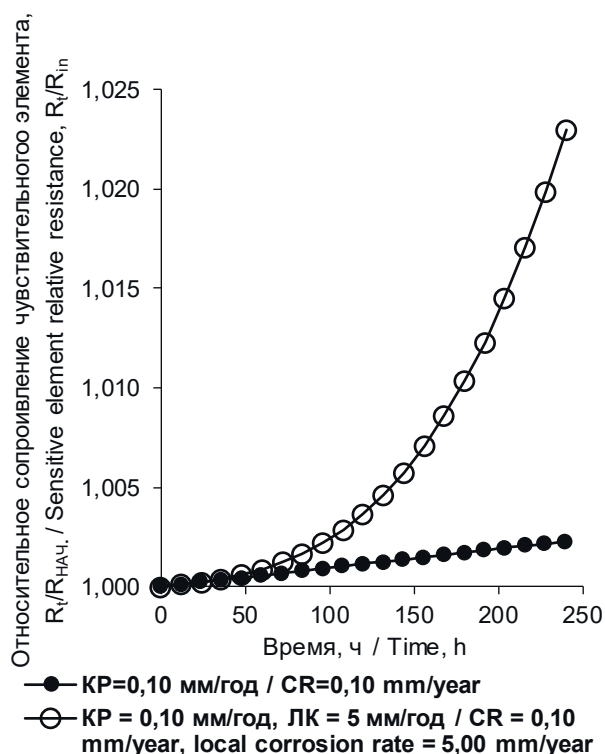


Рис. 6. Зависимость относительного сопротивления чувствительного элемента датчика электрического сопротивления от времени для случая «локальная (язвенная) + равномерная коррозия»; $\rho = 1,69 \cdot 10^{-7}$ Ом·м; $l = 10$ см; $D = 2$ мм; $h = 0,6$ мм; $n = 600$ шт./м²; $V = 5$ мм/год; $KP = 0,10$ мм/год

Fig. 6. Dependence of the sensitive element relative resistance of ER-sensors on time for the case of «local (ulcerative) + uniform corrosion»; $\rho = 1,69 \cdot 10^{-7}$ Ohm·m; $l = 10$ cm; $D = 2$ mm; $h = 0,6$ mm; $n = 600$ pc./m²; $V = 5$ mm/y; $KP = 0,10$ mm/y

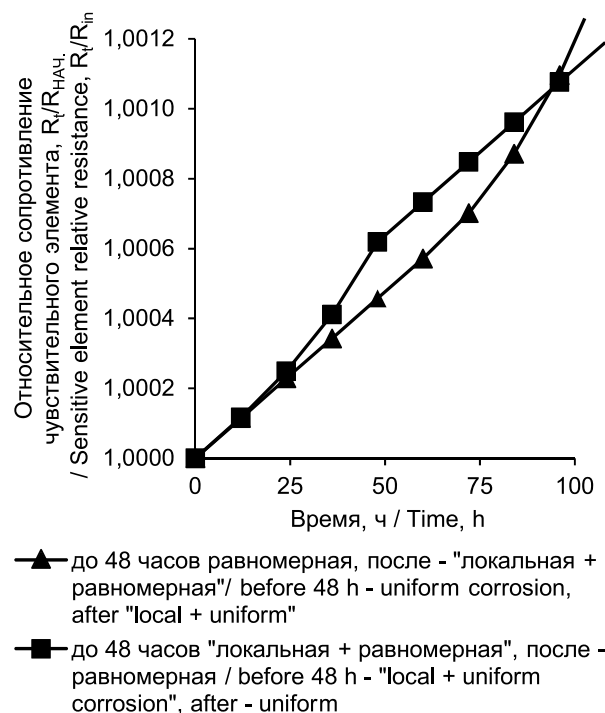


Рис. 7. Зависимость относительного сопротивления чувствительного элемента датчика электрического сопротивления от времени; $\rho = 1,69 \cdot 10^{-7}$ Ом·м; $l = 10$ см; $D = 2$ мм; $h = 0,6$ мм; $n = 600$ шт./м²; $V = 5$ мм/год; $KP = 0,05$ мм/год

Fig. 7. Dependence of the sensitive element relative resistance of ER-sensors on time; $\rho = 1,69 \cdot 10^{-7}$ Ohm·m; $l = 10$ cm; $D = 2$ mm; $h = 0,6$ mm; $n = 600$ pc./m²; $V = 5$ mm/y; $KP = 0,05$ mm/y

Наличие «перегибов» на графиках $R = f(t)$ также позволяет идентифицировать начало или прекращение проявления локальной коррозии.

Известно, что KP и скорость локальной коррозии максимальны в первые минуты/часы после начала контакта металла с коррозионной средой, далее KP и скорость локальной коррозии снижаются и через 6...48 ч стабилизируются. Поэтому анализ кривых зависимости сопротивления от времени следует проводить через 36...48 ч после погружения датчика ЭС в коррозионную среду.

Выводы

На основании физической модели развития локальной коррозии предложены способы интерпретации данных, получаемых с датчиков электрического сопротивления, которые позволяют обнаружить проявление локальной коррозии.

Предложенная методика выявления локальной коррозии позволяет разработать алгоритмы работы систем диагностики состояния трубопроводного транспорта, может применяться в системах мониторинга технического состояния оборудования.

Разработка физических моделей развития локальной коррозии является важным направлением совершенствования технических средств диагностики состояния нефтепромышленного оборудования.

Литература

1. Ткачева В.Э., Бриков А.В., Лунин Д.А., Маркин А.Н. Локальная CO_2 -коррозия нефтепромышленного оборудования. – Уфа: РН-БашНИПИнефть, 2021. – 168 с.
2. Выбойщик М.А. Дegradaция и разрушение нефтегазопроводных труб в средах с высоким содержанием углекислого газа и ионов хлора / М.А. Выбойщик, А.В. Иоффе, Т.В. Тетюева и др. // Деформация и разрушение материалов. – 2020. – № 4. – С. 29-36.
3. Муратов К. Р. Оценка влияния неоднородности коррозионного процесса по показаниям резистивных датчиков - свидетелей коррозии / К.Р. Муратов, В.А. Рышков // Датчики и системы. – 2010. – № 10. – С. 20-23.

Информация об авторах

Гладких Татьяна Дмитриевна, к.т.н., доцент, зав. кафедрой, Филиал «Тюменский индустриальный университет» в г. Нижневартовске, Ханты-Мансийский автономный округ – Югра, г. Нижневартовск, Российская Федерация
Маркин Андрей Николаевич, к.т.н., доцент, Филиал «Тюменский индустриальный университет» в г. Нижневартовске, Ханты-Мансийский автономный округ – Югра, г. Нижневартовск, Российская Федерация

родности коррозионного процесса по показаниям резистивных датчиков - свидетелей коррозии / К.Р. Муратов, В.А. Рышков // Датчики и системы. – 2010. – № 10. – С. 20-23.

4. Maleeva M.A. Local Corrosion Dissolution of Steel in Earth-Simulating Solutions / M.A. Maleeva, M.A. Petrunin, L.B. Maksayeva et al. // Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces. – 2016. – V. 52, No. 7. – P. 1137-1143.

5. Малеева М.А. Локальное коррозионное растворение стали в растворах, имитирующих грунтовой электролит / М.А. Малеева, М.А. Петрунин, Л.Б. Максаева и др. // Коррозия: материалы, защита. – 2014. – № 11. – С. 1-7.

References

1. Tkacheva, V. E., Brikov, A. V., Lunin, D. A., & Markin, A. N. (2021). *Local CO_2 corrosion of oilfield equipment*. Ufa: RN-BashNIPIneft'. (in Russ.)
2. Vyboyschik, M. A., Ioffe, A. V., Tetyueva, T. V., Revyakin, V. A., & Gruzkov, I. V. (2020). Degradation and destruction of oil and gas pipelines in environments with a high content of carbon dioxide and chlorine ions. *Deformatsiya i razrushenie materialov*, (4), 29-36. (in Russ.)
3. Muratov, K. R., Rushkov, V. A. (2010). Estimation of the influence of corrosion process heterogeneity based on corrosion witness resistive sensors data. *Sensors and systems*, (10), 20-23. (in Russ.)
4. Maleeva, M. A., Petrunin, M. A., Maksayeva, L. B., Yurasova, T. A., & Marshakov, A. I. (2016). Local Corrosion Dissolution of Steel in Earth-Simulating Solutions. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 52(7), 1137-1143.
5. Maleyeva, M. A., Petrunin, M. A., Maksayeva, L. V., Yurasov, T. A., & Marshakov, A. I. (2014). Localized corrosion dissolution of steel in solutions imitating soil electrolyte. *Corrosion: protection, materials*, (11), 1-7. (in Russ.)

Information about authors

Tatiana D. Gladkikh, Ph.D. in Technology, associate professor, head of the department, Industrial University of Tyumen a branch in Nizhnevartovsk, Khanty-Mansi Autonomous territory – Yugra, Nizhnevartovsk, Russian Federation
Andrey N. Markin, Ph.D. in Technology, associate professor, Industrial University of Tyumen a branch in Nizhnevartovsk, Khanty-Mansi Autonomous territory – Yugra, Nizhnevartovsk, Russian Federation