



**ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ
КОРРОЗИОННОГО КОНТРОЛЯ**

Тип статьи: научная, оригинальная

**INSTRUMENTS AND METHODS
OF CORROSION CONTROL**

Articale type: original

<https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2024.112.2-2>

**Оценка локальной коррозии по данным, получаемым с датчиков
электрического сопротивления (часть 2)**

А.Н. Маркин

Филиал Тюменского индустриального университета в г. Нижневартовске,
РФ, 628616, ХМАО-Югра, г. Нижневартовск, Западный промышленный узел,
Панель 20, ул. Ленина, 2Гс9

e-mail: i@markin-pro.ru

Аннотация. Мониторинг коррозионного состояния нефтепромыслового оборудования является необходимым условием обеспечения безотказности технологических процессов добычи и транспорта нефти. Метод «электрического сопротивления» (ЭС) является одним из методов коррозионного мониторинга, применяемых в нефтегазодобывающей отрасли. Недостаток метода ЭС заключается 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, в то время как именно локальная коррозия приводит к отказам нефтепромыслового оборудования.

В статье, на основе рассмотрения и интерпретации экспериментальных данных (лабораторных и промысловых), показано, что анализ зависимостей «электрическое сопротивление чувствительного элемента (ЧЭ) датчика – время» позволяет обнаружить проявление локальной коррозии.

Лабораторные эксперименты проводили в бескислородной модели водной фазы продукции добывающих скважин Западной Сибири и в среде, обеспечивающей интенсивную локальную коррозию углеродистой стали, при парциальном давлении углекислого газа 1 атм.

Экспериментальные кривые аппроксимировали методом наименьших квадратов с использованием приложения MS Excel «поиск решения».

Дальнейшее развитие предложенного подхода позволит усовершенствовать коррозиметры, реализующие метод электрического сопротивления, для регистрации локальной коррозии.

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

Для цитирования: Маркин А.Н. Оценка локальной коррозии по данным, получаемым с датчиков электрического сопротивления (часть 2) // Практика противокоррозионной защиты. – 2024. – Т. 29, № 2. – С. 21-26. <https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2024.112.2-2>

Статья получена 01.04.2024. Принята к публикации 22.05.2024. Опубликовано 01.06.2024.

**Assessment of Local Corrosion Based on Data Obtained from Electrical
Resistance Sensors (Part 2)**

Andrey N. Markin

Nizhnevartovsk branch Industrial University of Tyumen,
2P, bld. 9, Lenina str., Nizhnevartovsk, Khanty-Mansi Autonomous territory – Yugra,
628616, Russian Federation

e-mail: i@markin-pro.ru

Abstract. Corrosion monitoring of oilfield equipment condition is a necessary requirement for ensuring the reliability of technological processes of oil production and transportation. The «electrical resistance» (ER) method is one of the corrosion monitoring methods used in the oil and gas industry. The disadvantage of the ER method is that the devices currently used do not allow to assess the local corrosion losses on the surface of the material, that is, they cannot identify the process of local corrosion development, while it is local corrosion that leads to failures of oilfield equipment. In the article, based on the consideration and interpretation of experimental data (laboratory and field), it is shown that the analysis of the dependencies «electrical resistance of the sensor sensitive element – time» makes it possible to detect the manifestation of local corrosion.

Laboratory experiments were carried out in an oxygen-free model of the aqueous phase of production from producing wells in Western Siberia and in a medium providing intense local corrosion of carbon steel at a partial pressure of



carbon dioxide of 1 atm.

The experimental curves were approximated using the least squares method using the MS Excel «Solver» application. Further development of the proposed approach will make it possible to improve corrosion meters implementing the ER method to register local corrosion.

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: Markin, A. N. (2024). Assessment of Local Corrosion Based on Data Obtained from Electrical Resistance Sensors (Part 2). *Theory and Practice of Corrosion Protection*, 29 (1), 21-26. <https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2024.112.2-2>

Received April 01, 2024. Accepted for publication May 22, 2024. Published June 01, 2024.

Введение

Способ интерпретации данных, получаемых с датчиков ЭС, который позволяет оценить локальную коррозию, физическая модель локальной коррозии и расчеты на ее основе описаны в [1].

На основе физической модели протекания локальной коррозии предложена формула зависимости ЭС чувствительного элемента датчика от времени:

$$R = \frac{\rho l}{D(h - n \frac{\pi(V \cdot t)^3}{4} - t \cdot KP)}, \quad (1)$$

где R – электрическое сопротивление, Ом;
 ρ – удельное электрическое сопротивление, Ом·м;

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

V – скорость локальной коррозии в язвах (как в глубину металла, так и по поверхности), м/с;
 KP – коррозионный расход, в условном пересчете из кг/(м²·с) в м/с;

n – количество зародившихся и развивающихся язв на единице площади поверхности, шт/м²;

t – время, с.

Показано, что «маркером» локальной коррозии, развивающейся на ЧЭ датчика ЭС, является изменение вида зависимости сопротивления ЧЭ от времени.

В настоящей работе приведены экспериментальные данные (лабораторные и промышленные), показывающие, что анализ зависимостей «электрическое сопротивление ЧЭ – время» позволяет оценить локальную коррозию.

Экспериментальные данные: анализ и обсуждение

Лабораторные эксперименты¹ проводили

при 40 °С в бескислородных водных средах состава (г/дм³):

1. NaCl – 17,00; NaHCO₃ – 0,64; CaCl₂ – 0,20; CH₃COOH – 1,00; парциальное давление CO₂ = 1 атм. («среда 1», модифицированная (добавлена CH₃COOH) модель водной фазы продукции добывающих скважин Западной Сибири, характеризуется сплошной коррозией, KP превышает V [2]);

2. NaCl – 20,00; NaHCO₃ – 1,0; CaCl₂ – 1,00; CH₃COOH – 1,0; Трилон Б² – 21,0; парциальное давление CO₂ = 1 атм. («среда 2», среда для лабораторных испытаний на локальную углекислотную коррозию, характеризуется локальной коррозией, V превышает KP в 4...20 раз [2]).

На рис. 1 и 2 приведены характерные графики зависимости относительного сопротивления ЧЭ датчика ЭС ($R/R_{нач}$), где: R_t – сопротивление ЧЭ в момент времени t ; $R_{нач}$ – начальное сопротивление ЧЭ) от времени в среде 1 и 2 соответственно.

В среде 1 зависимость $R/R_{нач}$ от t близка к линейной, в среде 2 – пропорциональна t^3 , что говорит о протекании на ЧЭ локальной коррозии в среде 2 [1].

Экспериментальные кривые рис. 1 и 2 аппроксимировали по формуле (1) методом наименьших квадратов с помощью приложения MS Excel «поиск решения» – пунктирные линии на рис. 1 и 2. Аппроксимация позволила рассчитать n, V и KP (физические параметры ЧЭ: $\rho = 1,69 \cdot 10^{-7}$ Ом·м; $l = 30,4$ см; $D = 2$ мм; $h = 0,6$ мм).

В среде 1 расчетные значения составили: $n = 6000$ шт./см², $V = 0,010$ мм/год, $KP = 0,044$ мм/год. Расчет n, V и KP с помощью приложения «поиск решения» «устойчив»: расчетные значения мало зависят от начальных значений, которые нужно зада-

¹Данные предоставлены ООО НПП «Сонар»

²При суммарной площади поверхности используемых образцов или ЧЭ < 0,006 м², при большей площади количество Трилона Б необходимо соответственно увеличить

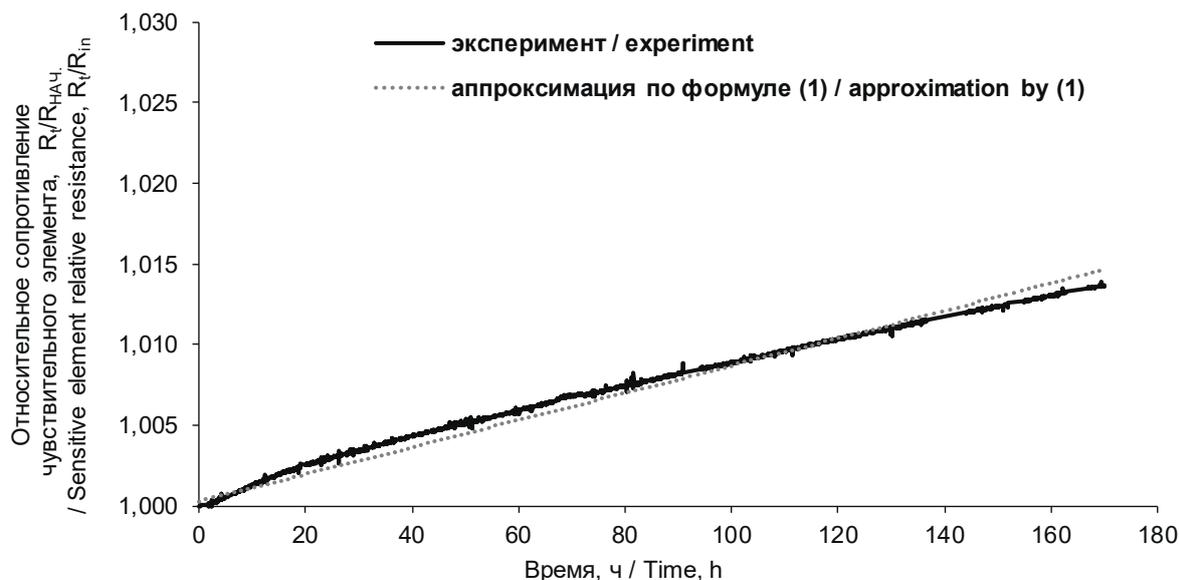


Рис. 1. Зависимость относительного сопротивления чувствительного элемента датчика электрического сопротивления от времени в среде 1

Fig. 1. The dependence of the sensitive element relative resistance of ER-sensors on time in medium 1

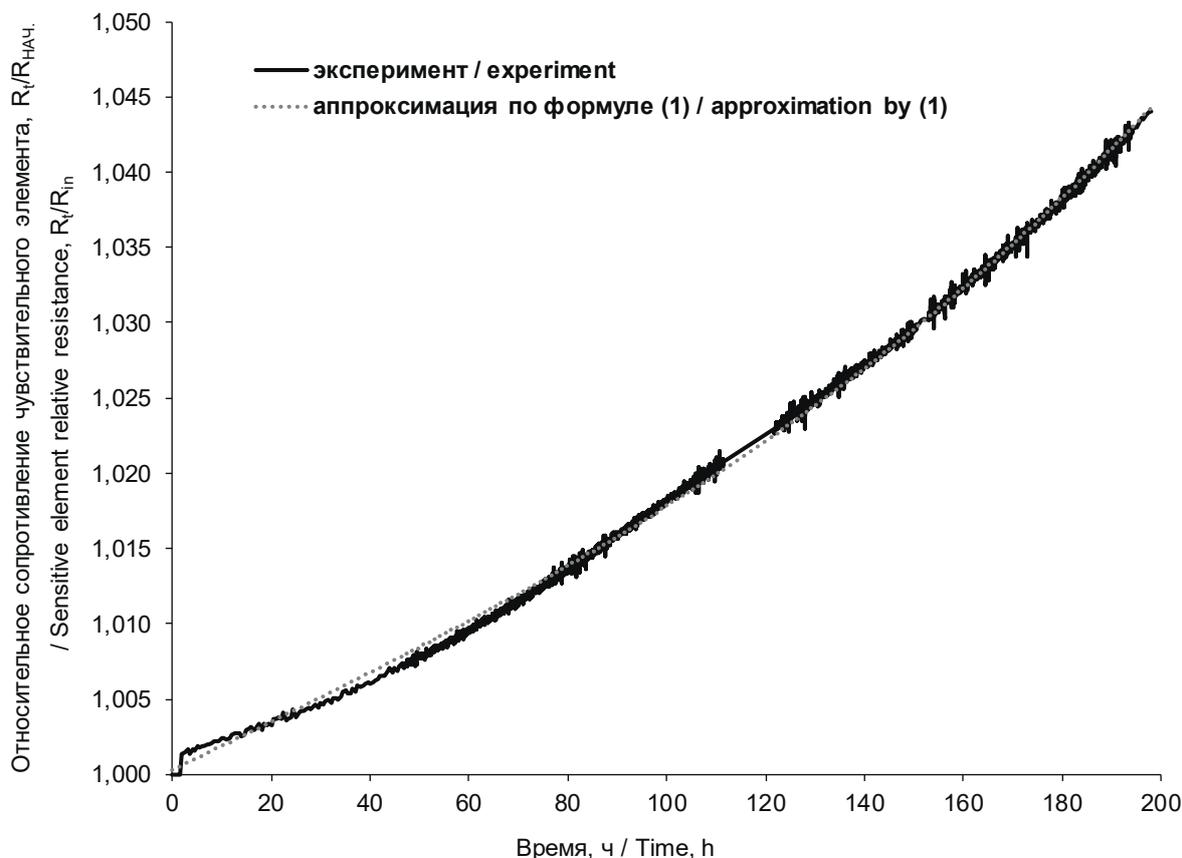


Рис. 2. Зависимость относительного сопротивления чувствительного элемента датчика электрического сопротивления от времени в среде 2

Fig. 2. The dependence of the sensitive element relative resistance of ER-sensors on time in medium 2

вать при запуске приложения.

Большое значение n при малой величине V означает, что в среде 1 на ЧЭ протекает сплошная неравномерная коррозия, но образования отдельных глубоких язв не происходит. Сделанный вывод подтвержден визуальным исследованием поверхности ЧЭ – рис. 3.

В среде 2 расчетные значения составили: $n = 9,6$ шт./см², $V = 1,232$ мм/год, $KP = 0,083$ мм/год. В среде 2 на ЧЭ протекает локальная коррозия с образованием отдельных глубоких язв и питтингов – рис. 3.

В случае локальной коррозии (рис. 2) расчет n , V и KP с помощью приложения «поиск решения» «неустойчив»: расчетные значения V зависят от начальных значений n или от ограничений для n : при $n \leq 100$ шт./см² расчет дает $n = 9,6$ шт./см²; $V = 1,232$ мм/год; при

$n \leq 0,1$ шт./см² – $n = 0,1$ шт./см²; $V = 5,639$ мм/год.

Сильная зависимость V от n в случае локальной коррозии, по нашему мнению, отражает механизм развития локальной коррозии – скорость локальной коррозии не одинакова на всей поверхности металла: на различных участках металла V различна. На рис. 4 показан характерный профиль поверхности образца из стали 20 после экспозиции 240 ч в среде 2 (профилограммы снимали с помощью лазерного профилометра на длине 7,5 мм).

Глубина локальных коррозионных повреждений изменяется от ~ 10 до 60 мкм, что соответствует скорости коррозии от 0,37 до 2,19 мм/год.

Следовательно, зависимость ЭС ЧЭ датчика от времени в общем случае будет выражаться формулой (2):

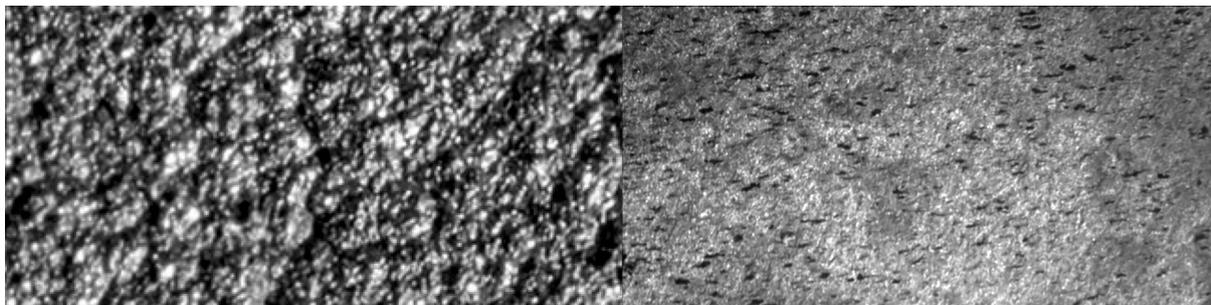


Рис. 3. Поверхность чувствительных элементов датчиков электрического сопротивления. Слева – после экспозиции в среде 1 ($\times 100$): сплошная неравномерная коррозия без образования отдельных глубоких язв и питтингов. Справа – после экспозиции в среде 2 ($\times 10$): локальная коррозия с образованием отдельных глубоких язв и питтингов

Fig. 3. The surface of sensitive element ER-sensors. On the left – after exposure in the medium 1 ($\times 100$): non-uniform corrosion without the formation of separate deep ulcers and pittings. On the right – after exposition in the medium 2 ($\times 10$): local corrosion with the formation of separate deep ulcers and pittings

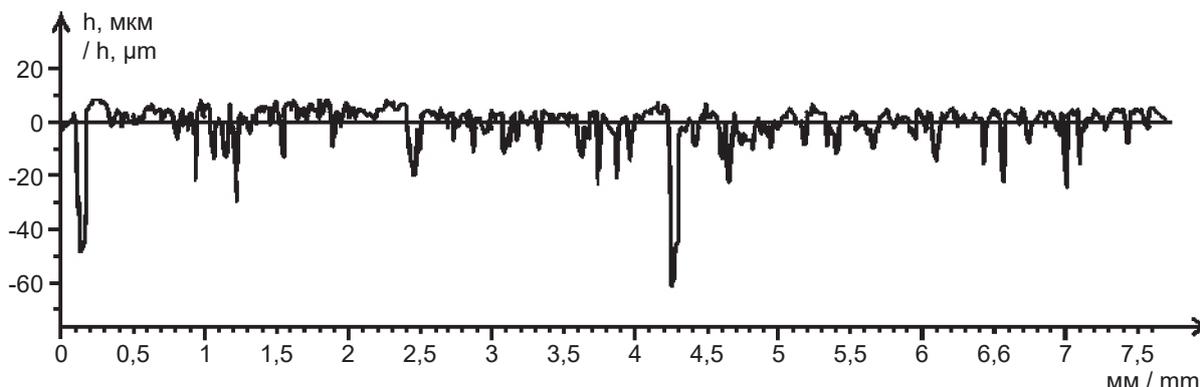


Рис. 4. Профиль поверхности образца из стали 20 после экспозиции 240 ч в среде 2
Fig. 4. The surface profile of the steel 20 sample after exposure for 240 hours in medium 2

³Здесь и далее KP приведен в условном пересчете в мм/год

$$R = (\rho l) / \left[\begin{array}{l} D(h - \frac{\pi}{4}(n_1(V_1t)^3 + n_2(V_2t)^3 + \dots \\ \dots + n_n(V_nt)^3 - \frac{\pi}{4}\Delta h n_s(V_st)^2 - t \cdot KP) \end{array} \right], (2)$$

где n_1 – количество зародившихся и развивающихся язв на единице площади поверхности, в которых скорость локальной коррозии V_1, \dots ;

n_n – количество зародившихся и развивающихся язв на единице площади поверхности, в которых скорость локальной коррозии V_n ;

n_s – количество язв глубиной Δh на единице площади поверхности, в которых локальная коррозия перестала развиваться вглубь металла, но развивается по поверхности со скоростью V_s .

Таким образом, формула (1) является приближением, в котором реальные n и V заменены их усредненными значениями и не учитывается возможное развитие локальной коррозии только по поверхности металла. Тем не менее, основной вывод, сделанный в [1], не меняется: если зависимость $R/R_{нач}$ от t отклоняется от «линей-

ности» (ср. данные рис. 1 и рис. 2), то это означает, что на ЧЭ протекает локальная коррозия. Наличие «перегибов» на графиках $R/R_{нач} = f(t)$ позволяет идентифицировать начало или прекращение проявления локальной коррозии.

На рис. 5 приведены графики зависимости $R/R_{нач} = f(t)$ для двух датчиков ЭС, установленных в водной фазе трубопроводов 1 и 2 системы сбора нефти одного из нефтяных месторождений Нефтеюганского района.

Начальный участок кривой 1 (до ~ 74 ч) практически линейный – протекала сплошная неравномерная коррозия, которая характеризуется KP ($KP = 0,02$ мм/год), а скорость локальной коррозии меньше KP . После ~ 74 ч началась локальная коррозия и зависимость $R/R_{нач}$ от t стала пропорциональна t^3 (точка «перегиба» на кривой 1 показана круглым маркером, пунктиром показаны линии трендов для двух участков кривой 1), $KP = 0,05$ мм/год, расчетное значение V (при $n = 10$) – 0,8 мм/год.

В масштабе рис. 5 зависимость $R/R_{нач} = f(t)$ датчика из трубопровода 2 выглядит как прямая,

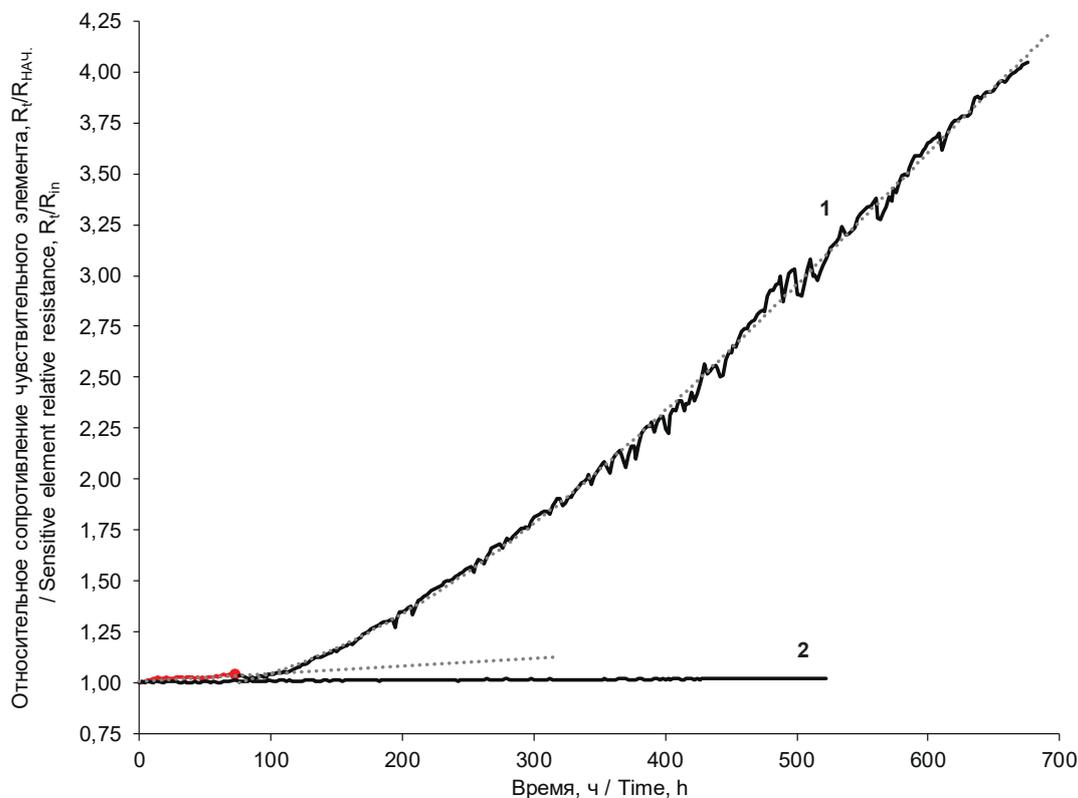


Рис. 5. Зависимость относительного сопротивления чувствительных элементов датчиков электрического сопротивления от времени. Датчики были установлены в трубопроводах 1 (кривая 1) и 2 (кривая 2) системы сбора нефти

Fig. 5. The dependence of the sensitive element relative resistance of ER-sensors on time. Sensors were installed in pipelines 1 (curve 1) and 2 (curve 2) of the oil gathering system

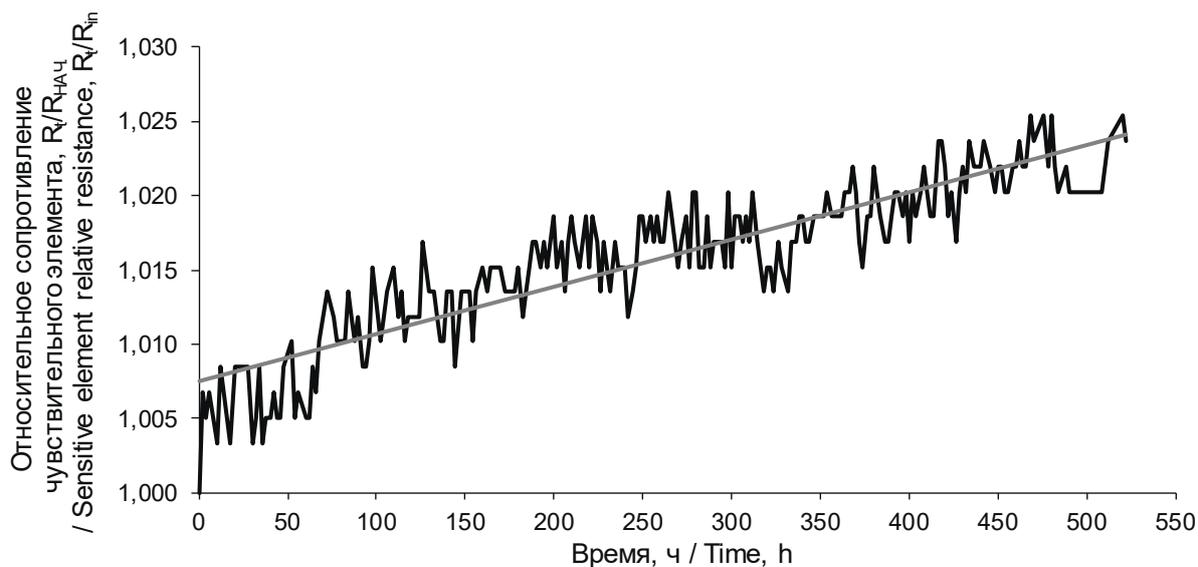


Рис. 6. Зависимость относительного сопротивления чувствительного элемента датчика электрического сопротивления от времени.

Датчик был установлен в трубопроводе 2 системы сбора нефти

Fig. 6. The dependence of the sensitive element relative resistance of ER-sensor on time. Sensor was installed in pipeline 2 of the oil gathering system

параллельная оси «Х», то есть коррозия отсутствует. Однако это не так – на рис. 6 зависимость $R_t/R_{нач} = f(t)$ датчика из трубопровода 2 показана в другом масштабе, где хорошо видна «линейность» от t , то есть протекает сплошная неравномерная коррозия ($KP = 0,005$ мм/год). Кривые 1 и 2 приведены на одном рисунке, чтобы показать различия в откликах датчиков ЭС, которые наблюдаются в реальных нефтепромысловых системах.

Заключение

На основе экспериментальных данных показано, что анализ зависимостей «электрическое сопротивление ЧЭ – время» позволяет обнаружить проявление локальной коррозии.

Индикатором развития локальной коррозии является зависимость отклика датчика ЭС от времени по закону кубической параболы.

Развитие предложенного подхода позволит усовершенствовать коррозиметры, реализующие метод электрического сопротивления, для регистрации локальной коррозии.

Информация об авторах

Маркин Андрей Николаевич, к.т.н., доцент, Филиал Тюменского индустриального университета в г. Нижневартовске, Ханты-Мансийский автономный округ – Югра, г. Нижневартовск, Российская Федерация

Литература

1. 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>
2. Ткачева В.Э., Маркин А.Н. Среда для лабораторных испытаний на локальную углекислотную коррозию // Практика противокоррозионной защиты. – 2021. – Т. 26, № 4. – С. 7-17. <https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2021.102.4-1>

References

1. Gladkih, T. D., Markin, A. N. (2024). Assessment of Local Corrosion Based on Data Obtained from Electrical Resistance Sensors. *Theory and Practice of Corrosion Protection*, 29(1), 20-26. <https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2024.111.1-2>. (in Russ.)
2. Tkacheva, V. E., Markin, A. N. (2021). Medium for local CO₂-corrosion laboratory testing. *Theory and Practice of Corrosion Protection*, 26(4), 7-17. <https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2021.102.4-1>. (in Russ.)

Information about authors

Andrey N. Markin, Ph.D. of Technical Sciences, associate professor, Industrial University of Tyumen a branch in Nizhnevartovsk, Khanty-Mansi Autonomous territory – Yugra, Nizhnevartovsk, Russian Federation