Институт нефтехимии и катализа УНЦ РАН

КОМПЛЕКСНЫЙ МЕТОД АНАЛИЗА КИНЕТИКИ КОРРОЗИОННЫХ РЕАКЦИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ ЖЕЛЕЗА, СТАЛИ И АЛЮМИНИЯ

Еникеев Марат Рустемович

02.00.04 – Физическая химия

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Научный руководитель: д.ф.-м.н., доцент

Губайдуллин Ирек Марсович

Введение

Коррозия — это самопроизвольное разрушение металлов в результате химического или физико-химического взаимодействия с окружающей средой

Методы исследования коррозии → Качественные методы

Методы исследования коррозии → Количественные методы

Количественные методы: весовой, объемный, электрохимический, магнитометрический.
Качественные методы: оптическая микроскопия, лазерная сканирующая микроскопия, сканерная рефлектометрия.

Коррозия разнообразна и невозможно выделить метод исследования, который может стать универсальным

***Лаборатория коррозии металлов в природных условиях ИФХЭ РАН им. Фрумкина** (зав. лаб. д.х.н. Андрей Игоревич Маршаков, н.с., к.х.н. Малеева М.А.)

Цели и задачи работы

Цель:

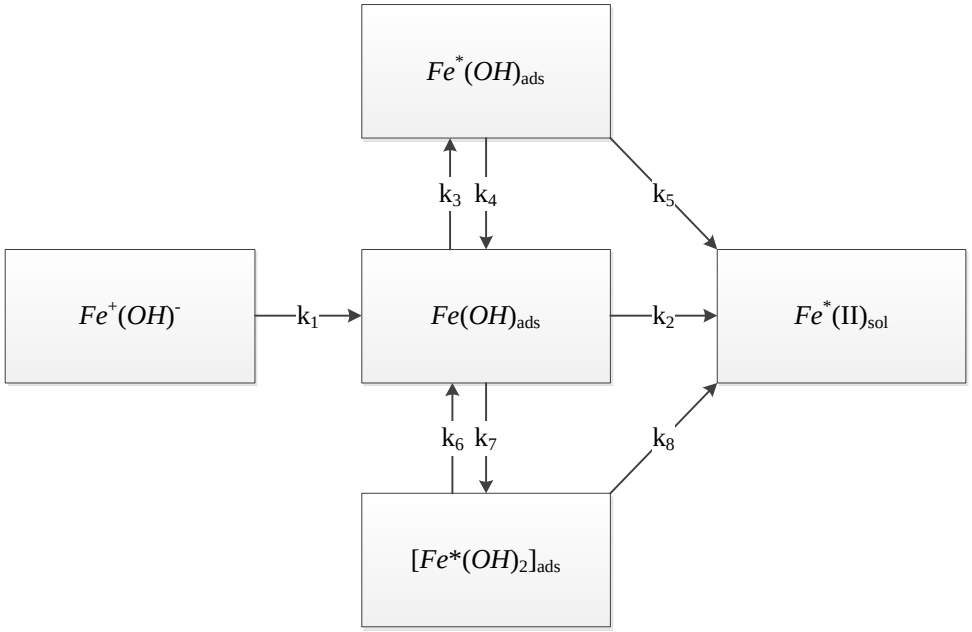
Разработка комплексного метода анализа кинетики коррозионных реакций на поверхности железа, стали и алюминия

Задачи:

1. Разработка кинетической модели растворения железа в сульфатно-цитратном буфере.
2. Проектирование алгоритма решения задачи моделирования процесса растворения железа в сульфатно-цитратном буфере.
3. Реализация методики обработки и анализа натурного эксперимента на основе визуальных данных для последующего сравнения с результатами вычислительного эксперимента и создание программного обеспечения для задачи поиска и идентификации коррозионного поражения для растрескивания железа и коррозии на поверхности алюминия.
4. Установление взаимосвязи скорости роста коррозионного поражения растрескивания трубной стали и его характеристик в результате вычислительного эксперимента с использованием разработанных программ.
5. Исследование механизма начальных стадий питтингообразования алюминия в щелочных хлоридных средах.

Анодное растворение железа в сульфатном растворе

Математическая модель растворения железа в сульфатном растворе



Математическая постановка задачи

$$\begin{cases} V_1 = k_1(1-\theta_1-\theta_2-\theta_3) \\ V_2 = k_2\theta_1 \\ V_3 = k_3\theta_1 - k_4\theta_2 \\ V_4 = k_5\theta_2 \\ V_5 = k_6\theta_1 - k_7\theta_3 \\ V_6 = k_8\theta_3 \end{cases},$$

где V_l – скорость и константа скорости, моль/(с·см^2) l-ой стадии, l = 1,2, … 6, k_i – константа скорости реакции, где $k_i = k_i^0 e^{(n_i b_i E)}$, i = 1, 2, … 8, где k_i^0 – предэкспоненциальный множитель реакции, 1/сек, E – потенциал электрода, B, n_i – число электронов, переносимых на стадии i, b_i – Тафелевские коэффициенты i-ой стадии, B^{-1}, $b_i = \frac{\beta_i F}{RT}$, F – постоянная Фарадея, (*Кл·моль*$^{-1}$), β_i – коэффициент переноса этой стадии, R – универсальная газовая постоянная, *Дж·моль*$^{-1}$·*К*$^{-1}$, T – температура, *К*.

Математическая модель

Схема реакции

$$\begin{cases} V_1 = k_1(1-\theta_1-\theta_2-\theta_3) \\ V_2 = k_2\theta_1 \\ V_3 = k_3\theta_1 - k_4\theta_2 \\ V_4 = k_5\theta_2 \\ V_5 = k_6\theta_1 - k_7\theta_3 \\ V_6 = k_8\theta_3 \end{cases},$$

Материальный баланс

$$\frac{dG_1}{dt} = V_1 - (V_2 + V_3 + V_5)$$

$$\frac{dG_2}{dt} = V_3$$

$$\frac{dG_3}{dt} = V_5$$

Линеаризация

$$\theta_j = G_j / G_{\max} \quad где \quad j = 1,2,3$$

$$w_1 = -V_{1G_1} = -V_{1G_2} = k_1 / G_{\max}$$

$$w_2 = V_{2G_1} = k_2 / G_{\max}$$

$$w_{31} = -V_{3G_1} = k_3 / G_{\max}$$

$$w_{32} = -V_{3G_2} = k_4 / G_{\max}$$

$$w_4 = -V_{4G_2} = k_5 / G_{\max}$$

$$w_{51} = -V_{5G_1} = k_6 / G_{\max}$$

$$w_{52} = -V_{5\Gamma 3} = k_7 / G_{\max}$$

$$w_6 = V_{6G_1} = k_8 / G_{\max}$$

G_1 – поверхностная концентрация частиц типа $Fe(I)_{ads}$,
G_2 – поверхностная концентрация частиц типа $Fe^*(I)_{ads}$,
G_3 – поверхностная концентрация частиц типа $Fe^*(II)_{ads}$,;
$\theta_I = G_i \backslash G_{max}$, G_{max} – поверхностная предельная концентрация, одинаковая для всех типов адсорбированных частиц.

Моделирование импеданса системы

Импеданс системы: сопротивление электрохимической системы протекающему через нее переменному току.

$$Z = R_s + (i\omega C_s)^{-1} = R_S + \frac{\Delta E}{iwq_E \Delta E + \Delta I_k} = R_s + \frac{1}{pq_E + Y_K}$$

где Z – импеданс системы, R_s – омическое сопротивление раствора, $p = i\omega$, ω – угловая частота, *рад/с*, q_e – производная заряда по потенциалу при постоянной адсорбции, что по определению является емкостью, ΔI_k – амплитуда тока заряжения, ΔE – потенциал системы, Y_K - адмиттанс кинетики.

Вывод передаточной функции

$$Y_k = i_0 + \frac{E_2 p^2 + E_4 p + E_6}{p^3 + T_2 p^2 + T_4 p + T_6}$$

$$E_2 = w_1 + w_2 + w_3 + w_5$$

$$E_4 = w_1(w_3 + w_5) + w_2(w_{32} + w_{52}) + w_{52}w_3 + w_{51}w_{32}$$

$$E_6 = w_1(w_{52}w_3 + w_{51}w_{32}) + w_2 w_{32} w_{52}$$

$$T_2 = F \cdot [(-n_1 w_1 + n_2 w_2 + n_3 w_{31} + n_5 w_{51})(V_{1E} - V_{2E}) + V_{3E}(-n_2 w_2 + n_4 w_4 - n_3 w_3 - n_5 w_{51}) + V_{5E}(-n_2 w_2 - n_3 w_{31} - n_5 w_5 + n_6 w_6)]$$

$$T_4 = F \cdot [A \cdot (V_{1E} - V_{2E}) + V_{3E} \cdot B + V_{5E} \cdot C]$$

$$T_6 = F \cdot [D \cdot (V_{1E} - V_{2E}) + (V_{3E} \cdot G + V_{5E} \cdot F)]$$

$$i_0 = F \cdot (n_1 V_{1E} + n_2 V_{2E} + n_3 V_{3E} + n_4 V_{4E} + n_5 V_{5E} + n_6 V_{6E})$$

$$i_a = F \cdot \Gamma_{1ss}[(n_1 + n_2)w_2 + n_4(w_4 K_2) + n_6 V_{4E} + n_6(w_6 K_3)]$$

$$A = [-n_1 w_1(w_3 + w_5) + n_2 w_2(w_{32} + w_{52}) + w_{31}(n_3 w_{52} + n_6 w_6)]$$

$$B = [-w_2[(n_1 + n_2)w_1 + n_2 w_{52}] - n_3[w_3(w_1 + w_{52}) + w_{32}(w_2 + w_{51})] + n_4 w_4(w_1 + w_2 + w_5) - n_5 w_1 w_{51} - n_6 w_6 w_{51}$$

$$C = [-w_2[(n_1 + n_2)w_1 + n_2 w_{32}] - n_5[w_5(w_1 + w_{32}) + w_{52}(w_2 + w_{31})] + n_6 w_6(w_1 + w_2 + w_3) - n_3 w_1 w_{31} - n_4 w_4 w_{31}$$

$$D = [-n_1 w_1(w_{32} w_5 + w_{31} w_{52}) + n_2 w_2 w_{32} w_{52} + n_4 w_4 w_{31} w_{52} + n_6 w_6 w_{51} w_{32}]$$

$$G = V_{3E}[-(n_1 + n_2)w_1 w_{52} w_2 - n_3 E_6 + n_4 w_4(w_1 w_5 + w_2 w_{52}) - n_6 w_6 w_1 w_{51}]$$

$$F = V_{5E}[-(n_1 + n_2)w_1 w_{52} w_2 - n_5 E_6 + n_6 w_6(w_1 w_3 + w_2 w_{32}) - n_4 w_4 w_1 w_{31}]$$

$$K_1 = \frac{w_2}{w_1} \qquad K_2 = \frac{w_{31}}{w_{32}} \qquad K_3 = \frac{w_{51}}{w_{52}} \qquad G_{1SS} = \frac{G_{max}}{1 + (K_1 + K_2 + K_3)}$$

$$i_0 = \frac{1}{R_t}$$

$$E_1 = \frac{1}{L_t} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3}$$

$$E_2 = \frac{R_1 + R_2}{L_t L_2} + \frac{R_1 + R_3}{L_t L_3} + \frac{R_3 + R_2}{L_3 L_2}$$

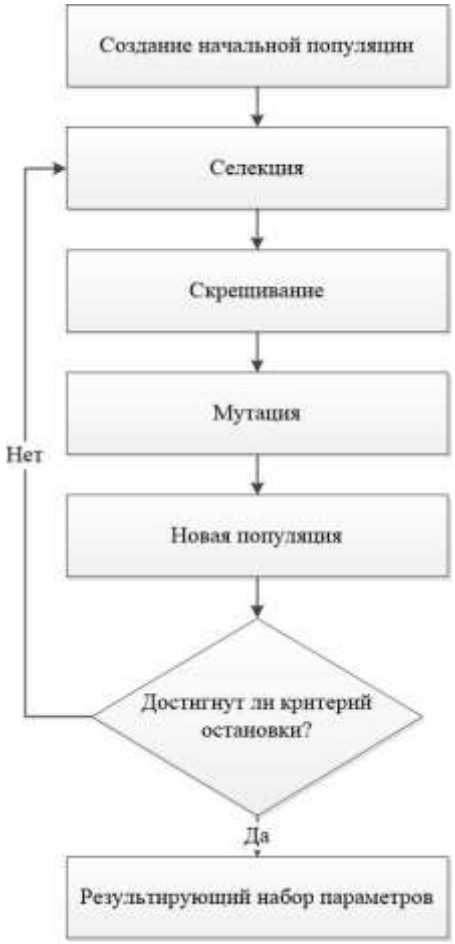
$$E_3 = \frac{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_1 R_3}{L_t L_2 L_2}$$

$$T_1 = \frac{R_1}{L_1} + \frac{R_2}{L_2} + \frac{R_3}{L_3}$$

$$T_2 = \frac{R_1 R_2}{L_1 L_2} + \frac{R_1 R_3}{L_1 L_3} + \frac{R_3 R_2}{L_3 L_2}$$

$$T_3 = \frac{R_1 R_2 R_3}{L_1 L_2 L_3}$$

Генетический алгоритм при решении обратной задачи



Генетический алгоритм минимизирует функцию приспособленности. Значением данной функции с входными параметрами k_i^0 и b_i (i = 1, 2, ... 8) является критерий отклонения значения функции экспериментального адмиттанса кинетики и опытного. В качестве данного критерия использовалось среднее относительное отклонения расчетного адмиттанса кинетики и опытного:

$$F = \frac{\sum_{j=1}^{N} \left| \frac{Y_j^{exp} - Y_j^{calc}}{Y^{exp}} \right|}{N} \rightarrow min,$$

где N – количество экспериментов с различным потенциалом электрода, Y_j^{exp} – экспериментально полученные значения адмиттанса, Y_j^{calc} – рассчитанный адмиттанс кинетики по с использованием подобранных k_i^0 и b_i (i = 1, 2, ... 8).

Результаты импедансных исследовий в сульфатном растворе (ph 5.5)

Значения тафелевских коэффициентов b_i и констант скорости элементарных стадий k_i процесса анодного растворения железа в кислом сульфатном растворе (pH 5.5)

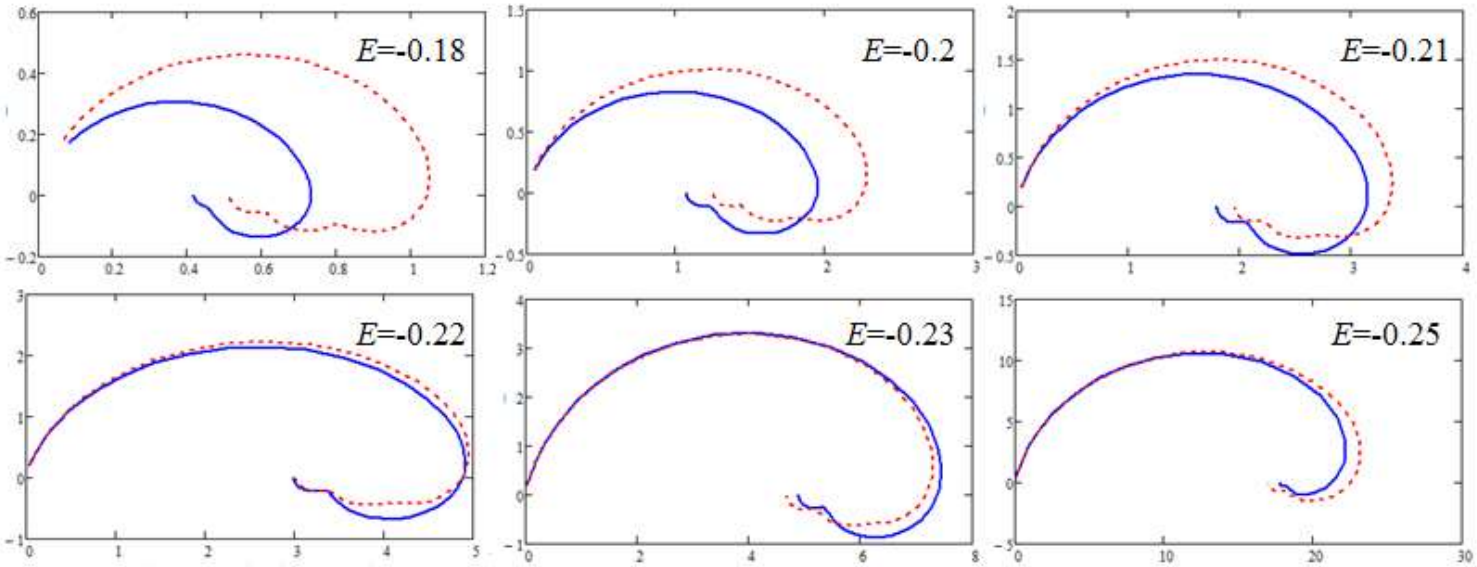
Номер стадии	b_i, В$^{-1}$	k_i^0, 1/сек
1	36.38	51582.1
2	14.25	1493.7
31	33.6	367.81
32	4.81	0.25
4	30.71	41090.1
51	19.61	46.021
52	14.68	0.893
6	22.2	100900

$$\begin{cases} w_1^{\text{хар}} = \omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \omega_6 \\ w_2^{\text{хар}} = \omega_4 \\ w_3^{\text{хар}} = \omega_7 \end{cases}$$

Рассчитанные и экспериментальные характеристические частоты, $E = -0.1926$

Частота	Эксперимент	Расчет
$w_1^{\text{хар}}$	135.01	148.24
$w_2^{\text{хар}}$	14.07	14.34
$w_3^{\text{хар}}$	0.944	0.921

Результаты импедансных исследований в сульфатном растворе (ph = 5.5)

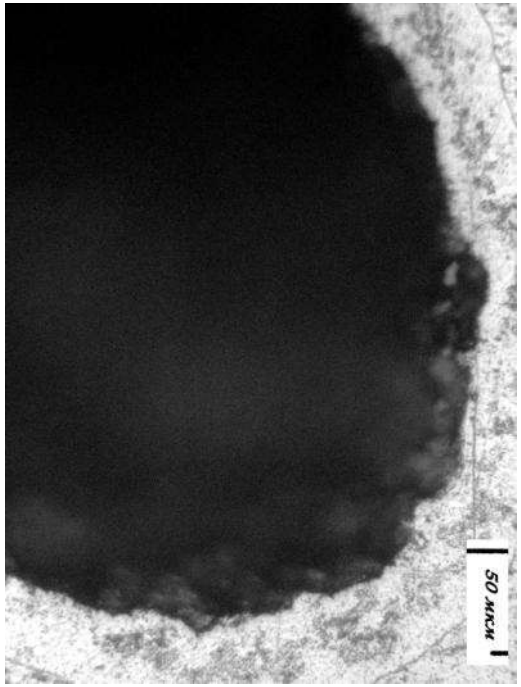


Импедансный спектр железного электрода в сульфатном растворе (*pH* 5.5). Синей сплошной линией обозначен рассчитанный импедансный спектр, красной прерывистой линией обозначен опытный импедансный спектр на основе экспериментальных данных (значений напряжение для каждого графика в правом верхнем углу)

Коррозионное растрескивание под напряжением

Разработка методов диагностики и прогнозирования коррозионного растрескивания под напряжением магистральных трубопроводов

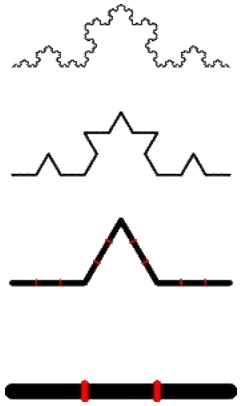
Поиск взаимосвязи между структурными изменениями трещины и с химическим и механическим воздействием на неё!



Богданов Р. И. Закономерности коррозионного растрескивания под напряжением трубной стали X70 в грунтовых электролитах с pH близким к нейтральному : диссертация ... кандидата химических наук: - Москва, 2012.- 196 с.: ил. РГБ ОД, 61 12-2/611

Анализ характеристик. Фрактальная размерность

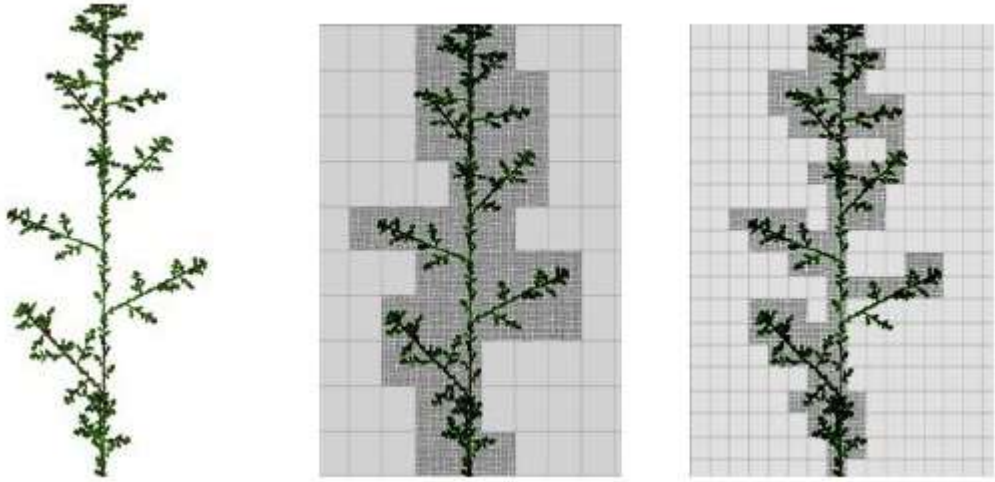
Фрактал — геометрическая фигура, обладающая свойством самоподобия.



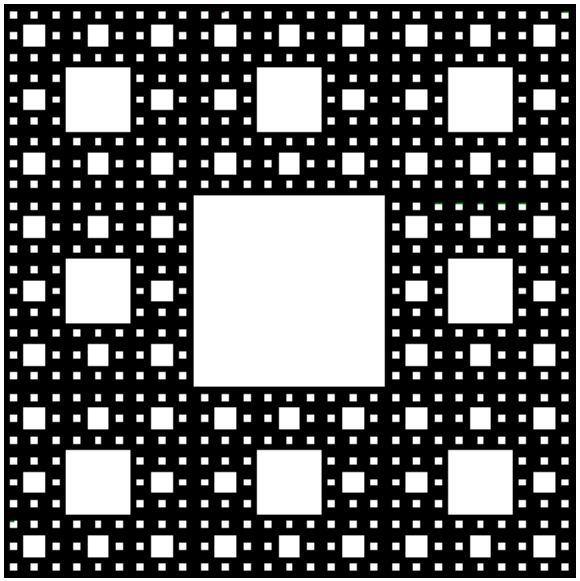
Фрактальная размерность (D): $\lim \frac{\ln(N_\varepsilon)}{\ln(\varepsilon)}$,

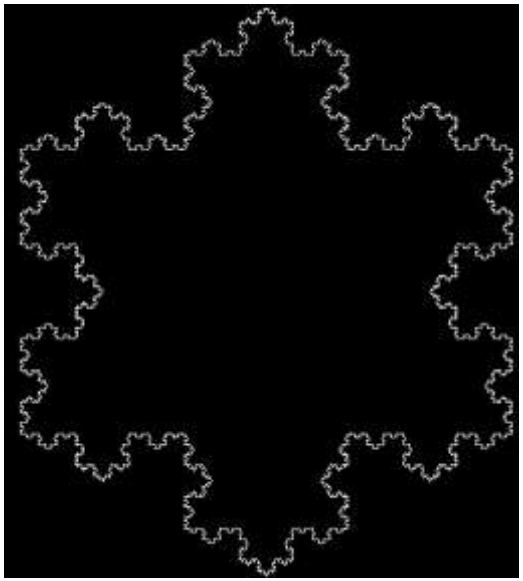
где N_ε минимальное число множеств диаметра ε, которыми можно покрыть искомое множество.

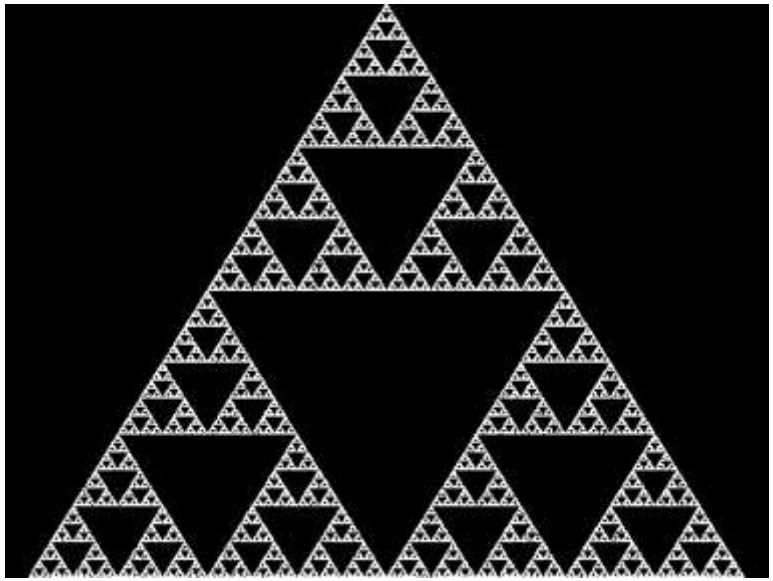
Вычисление размерности с помощью метода подсчета клеток



Анализ метода определения фрактальной размерности

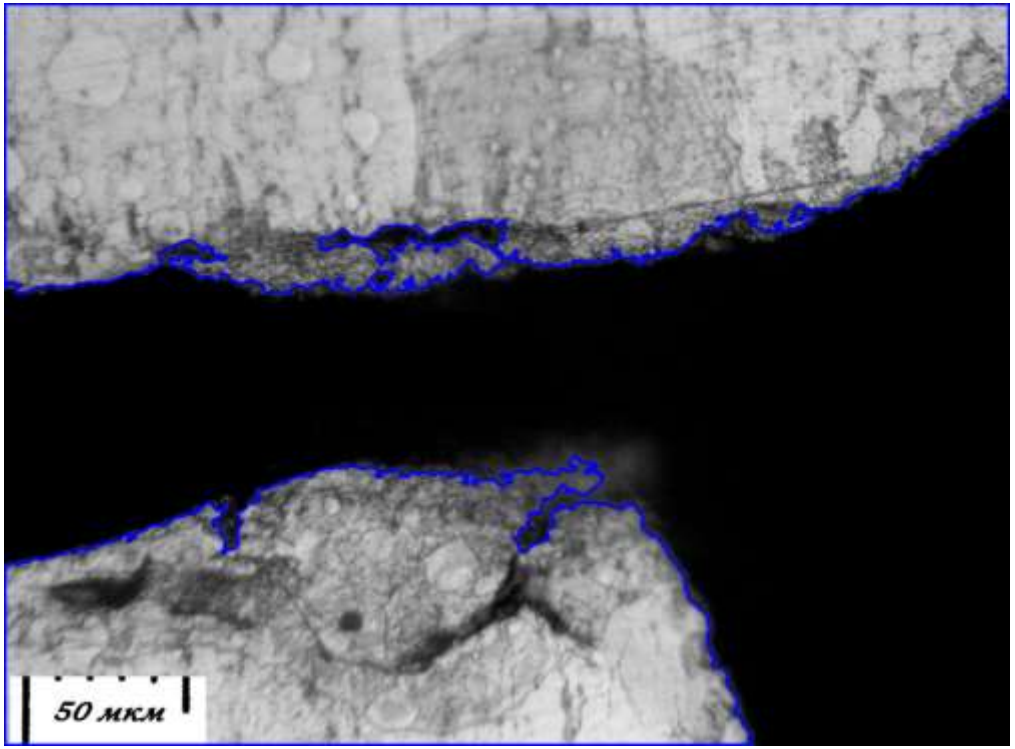


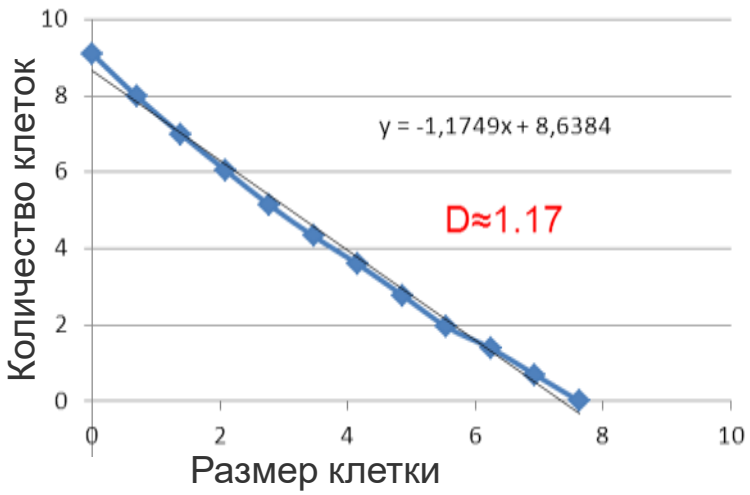




Фрактал	Размерность	Расчёт	Отклонение	Погрешность, %
Снежинка Коха	1.26	1.251	0.009	0.007
Треугольник Серпинского	1.585	1.531	0.054	0.034
Ковер Серпинского	1.893	1.893	0	0

Расчёт фрактальной размерности





$$D = \lim \frac{\ln(N_\varepsilon)}{\ln(\varepsilon)}$$

где N_ε - минимальное число множеств диаметра ε, которыми можно покрыть искомое множество.

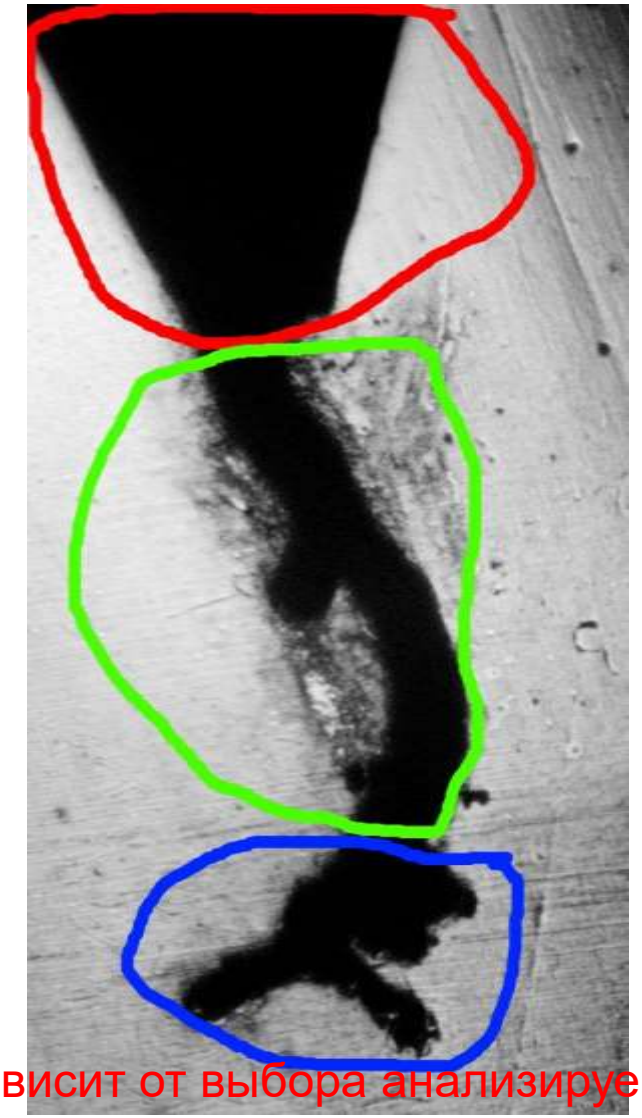
Размер клетки	1	2	4	8	16	32	64	128	256	512	1024	2048
Кол-во клеток	8792	2915	1074	422	169	75	36	16	7	4	2	1

Коррозионное растрескивание под напряжением. Объект исследования

Вырезано лобзиком

Усталостная трещина

Коррозионная трещина



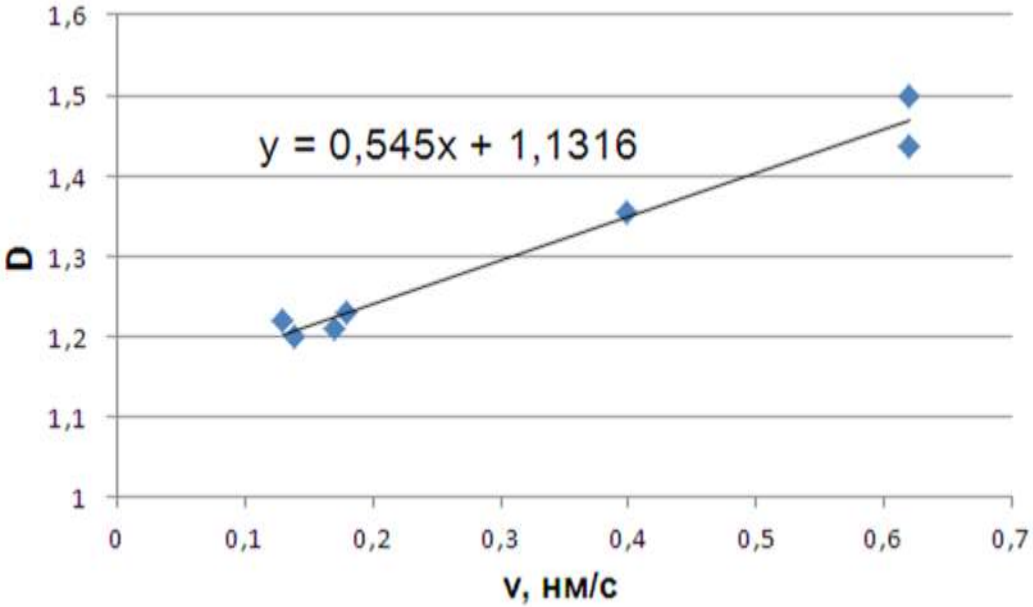
Разработка методов диагностики и прогнозирования коррозионного растрескивания под напряжением магистральных трубопроводов

Поиск взаимосвязи между структурными изменениями трещины и с химическим и механическим воздействием на неё

Значение размерности зависит от выбора анализируемого участка трещины

Взаимосвязь структурных изменений трещины с механическим воздействием на нее

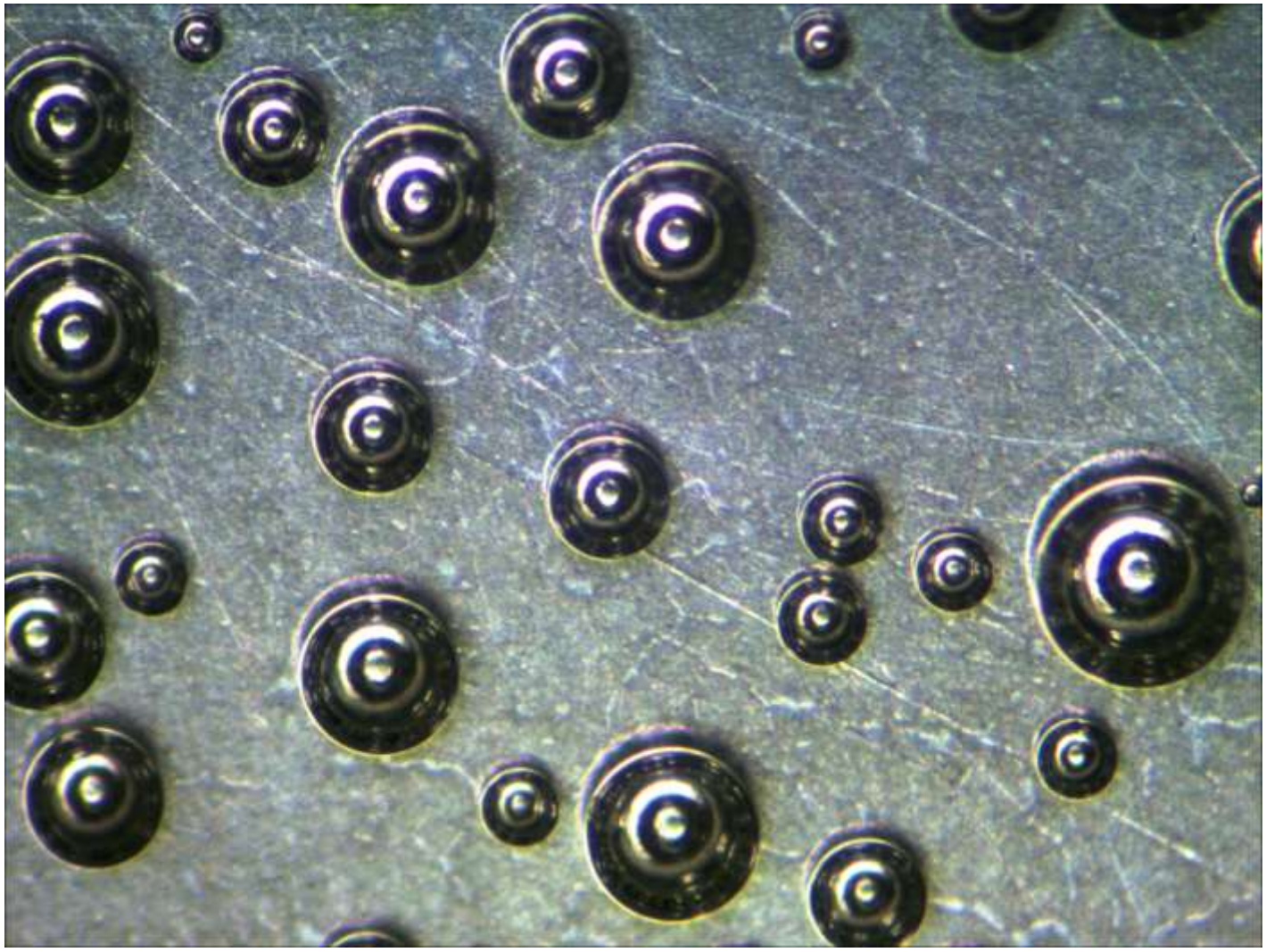
Наименование	Скорость	Значение D
Образец 5	0,18	1,229
Образец 17	0,13	1,221
Образец 20	0,62	1,438
Образец 21	0,14	1,201
Образец 22	0,4	1,354
Образец 23	0,62	1,5
Образец 26	0,17	1,21



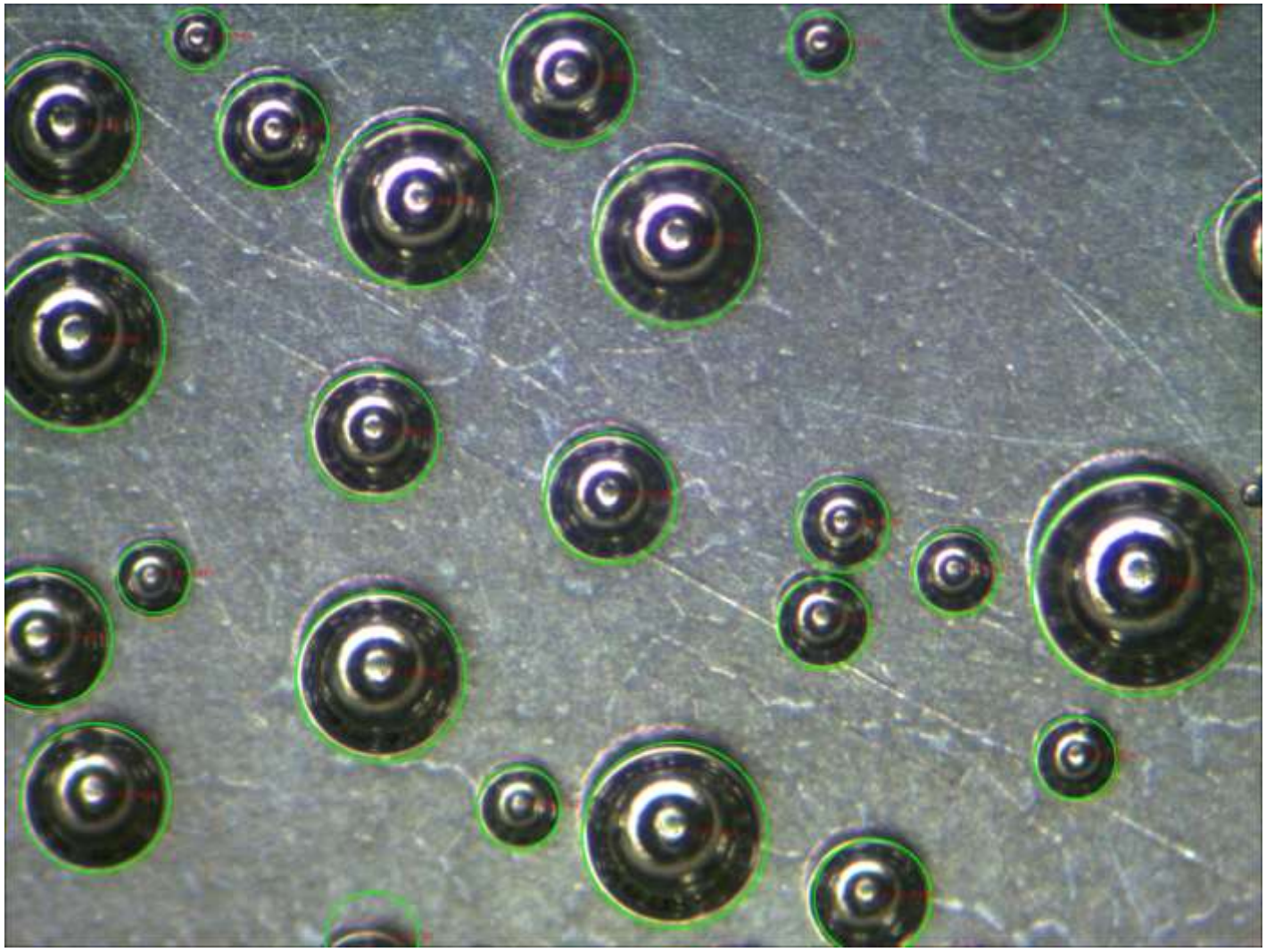
Вывод: Размерность коррозионной трещины взаимосвязана с её скоростью роста

Наблюдение за процессом коррозии путем детектирования процесса образования водорода для образца алюминия

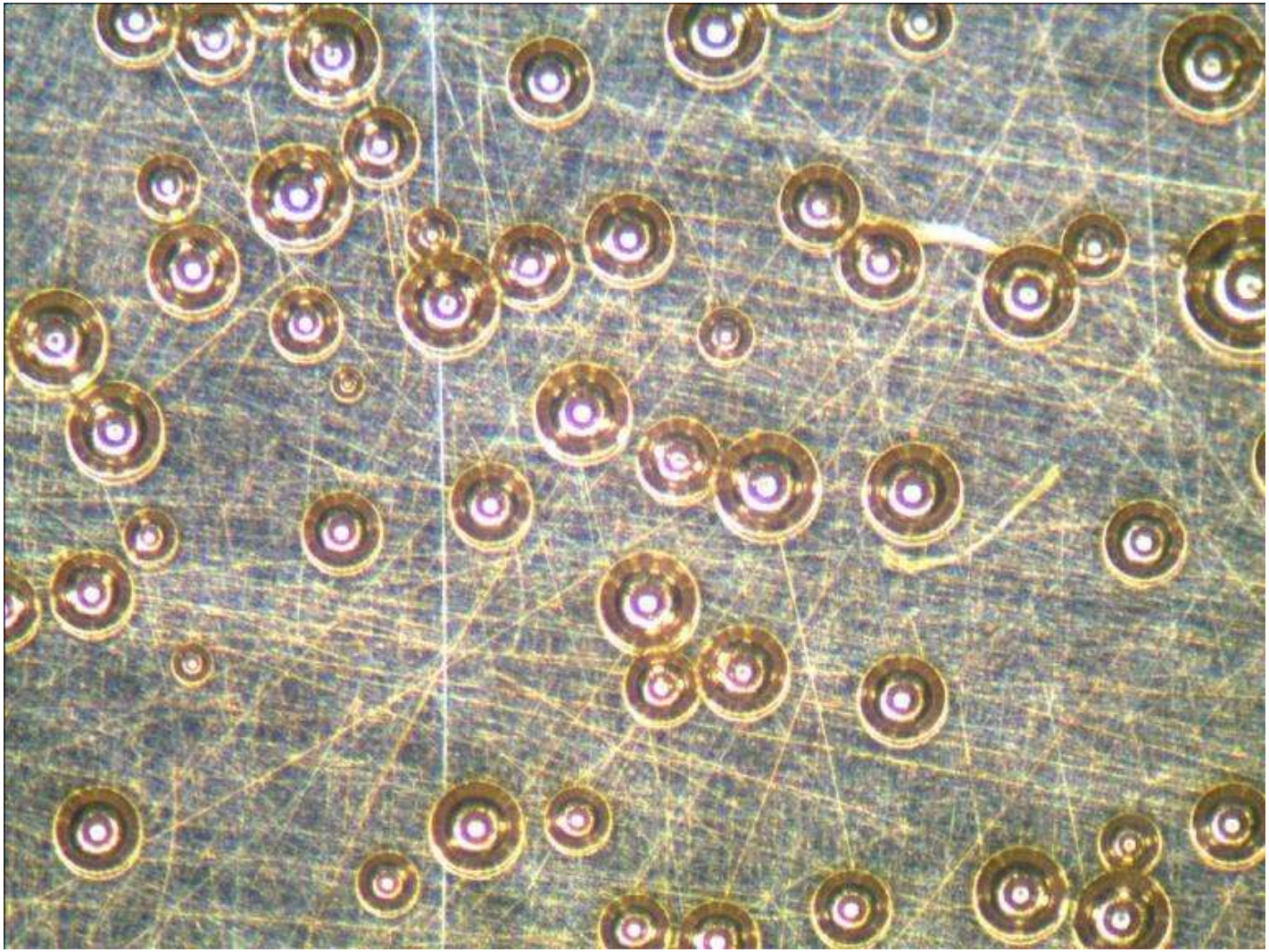
Исходное изображение



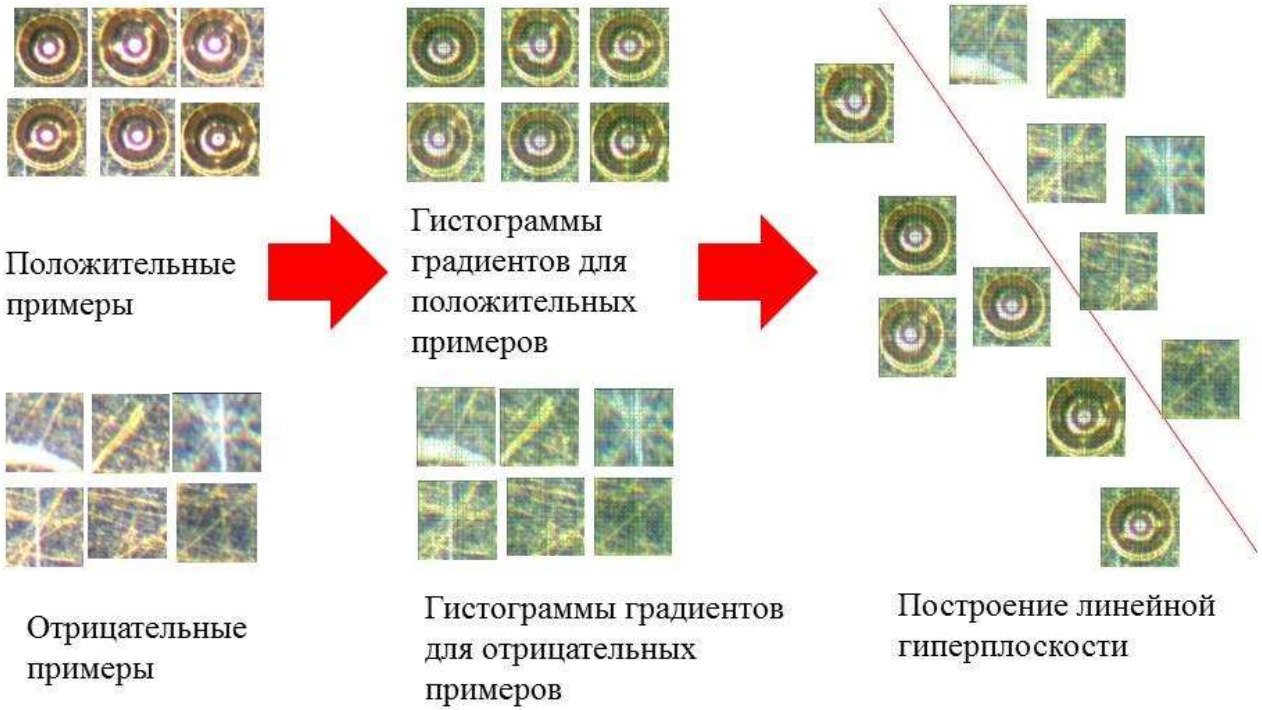
Поиск исходного объекта на изображении



Инвариантность к фону



Обучение класификатора



Последовательность действий для обучения линейного классификатора SVM:

- Соберём обучающую выборку фрагментом изображения с пузырьками и без.
- Для каждого фрагмента посчитаем вектор из 2048 признаков.
- На полученной обучающей выборке обучим линейный классификатор SVM.

Параллельные вычисления

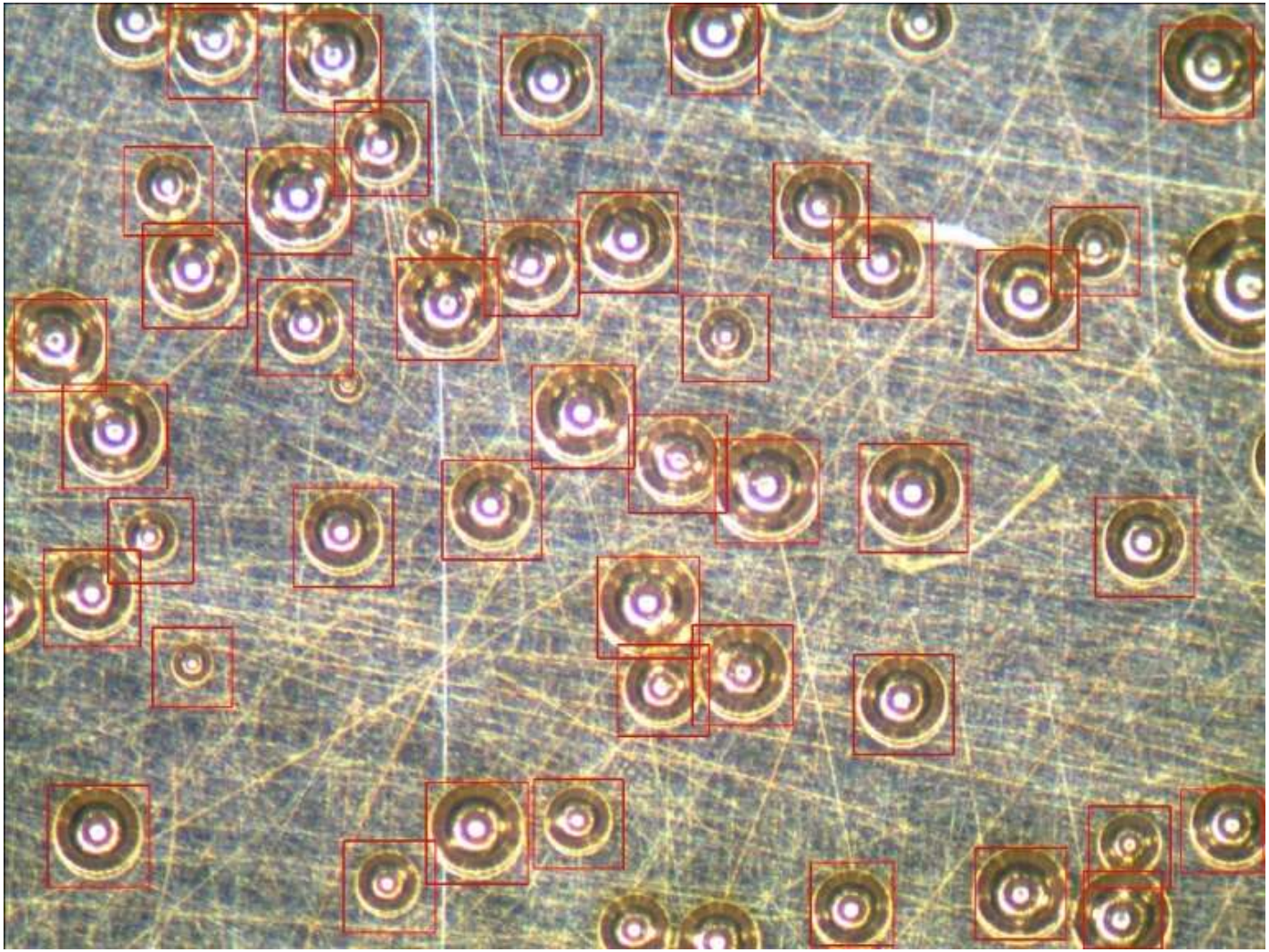
В области обработки изображений большинство задач может быть решено путем последовательного применения к обрабатываемым данным некоторого набора типовых операций обработки: *шумоподавление*, *морфологический анализ, бинаризация.*

Реализована параллельная версия программы для наблюдения за процессом коррозии путем детектирования процесса образования водорода для образца алюминия и питтинговой коррозии на поверхности стали с использованием *GPU(graphics processing unit – графический процессор*).

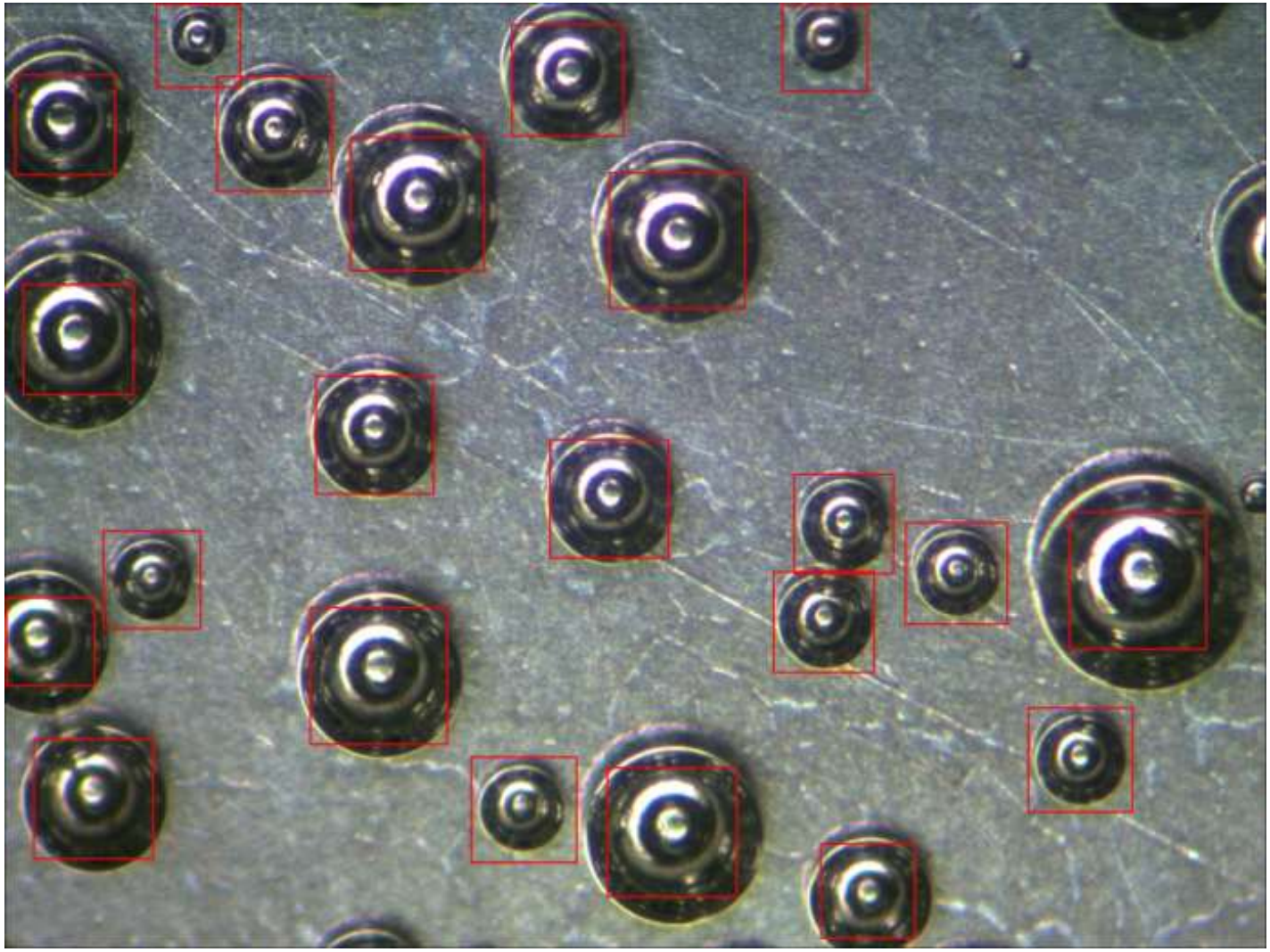
Использование параллельной реализации обучения SVM превосходно сказалось на результате времени выполнения расчета. В целом для задачи идентификации пузырьков на изображении ускорение составило более 15 раз.

*Конфигурация вычислительной машины: intel corei5-4200H (2.79 Ghz), Nvidia GEFORCE 840M.

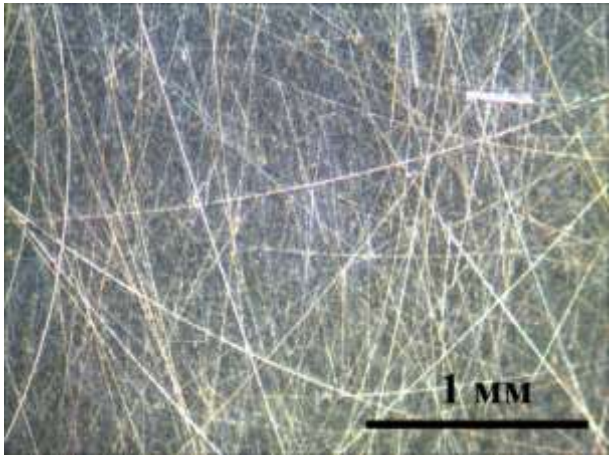
Поиск пузырьков на изображении



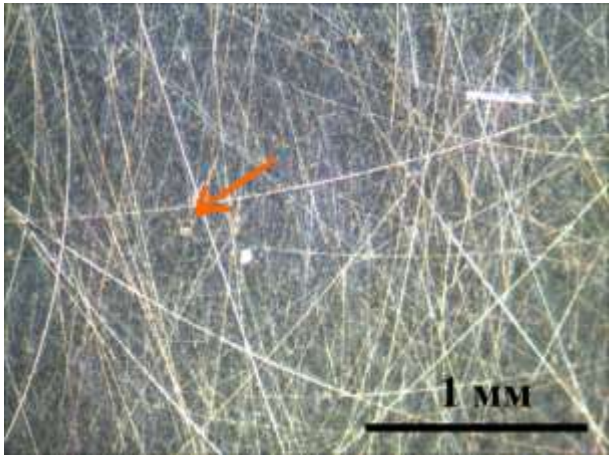
Поиск пузырьков на изображении



Изображения поверхности алюминия в 0.1 М NaCl (pH 10.8) после погружения



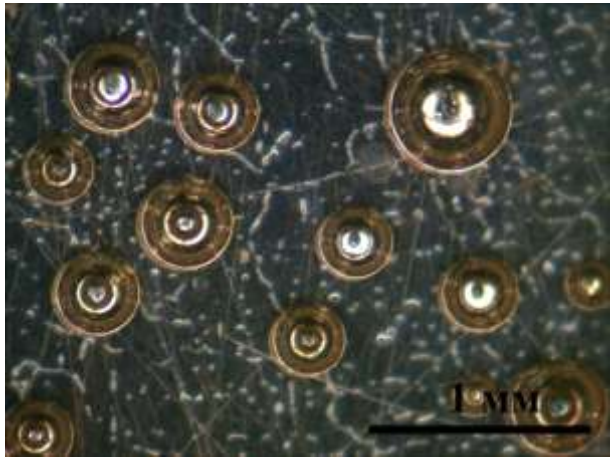
10 сек



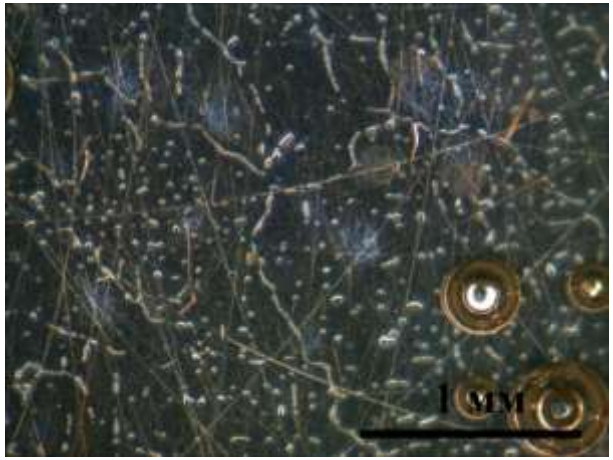
70 сек

600 сек

2300 сек

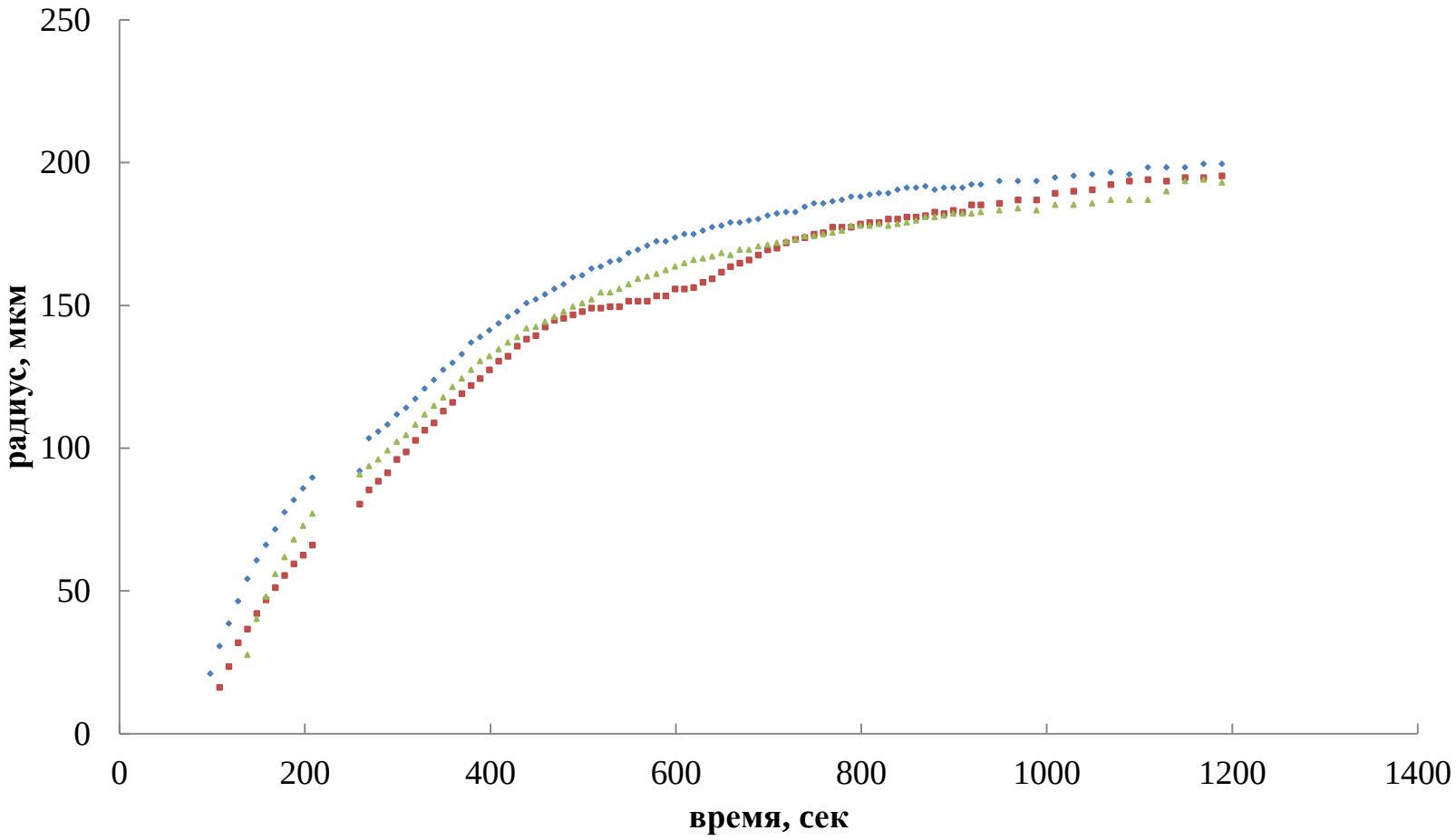


10200 сек

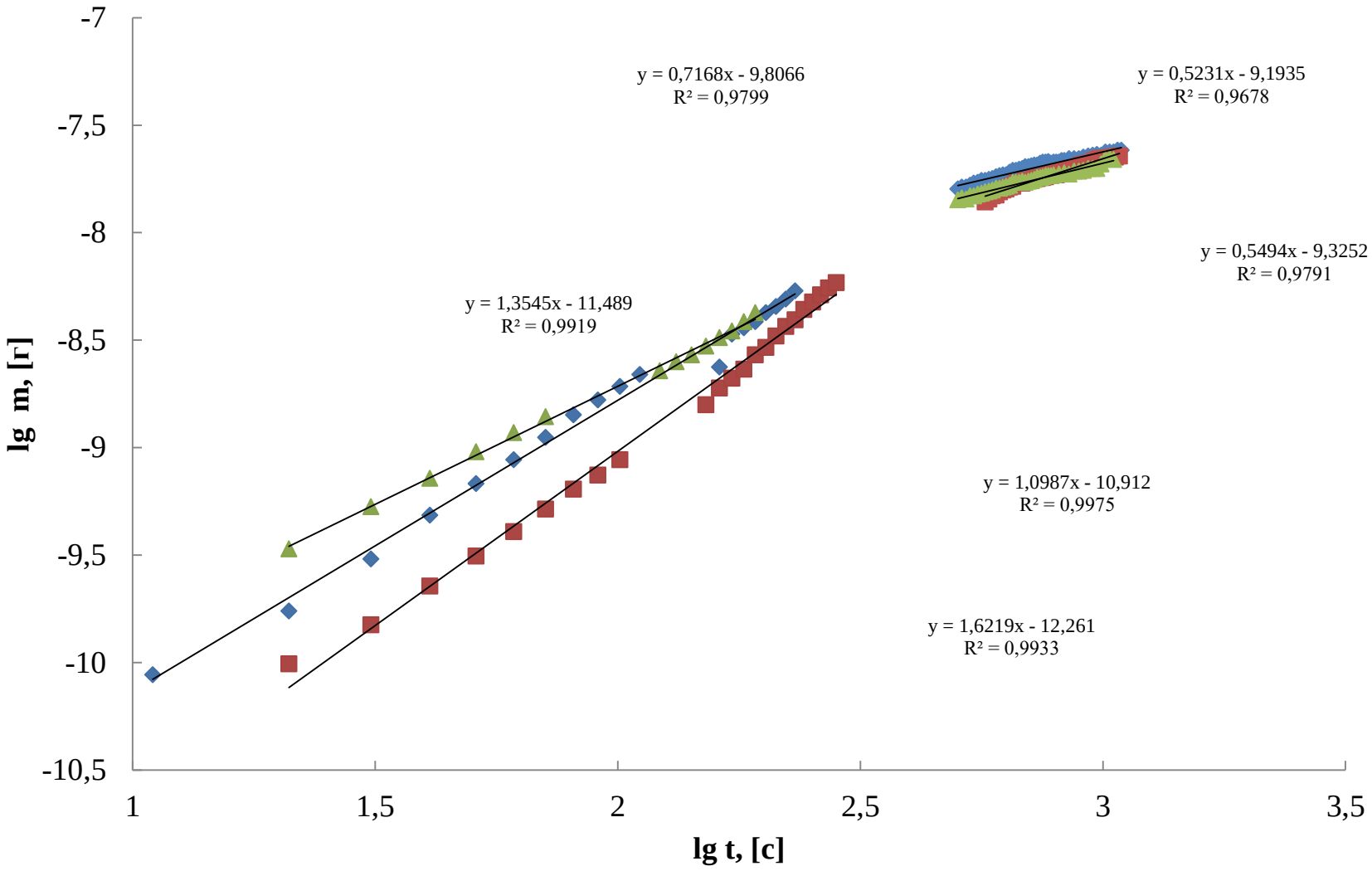


После удаления

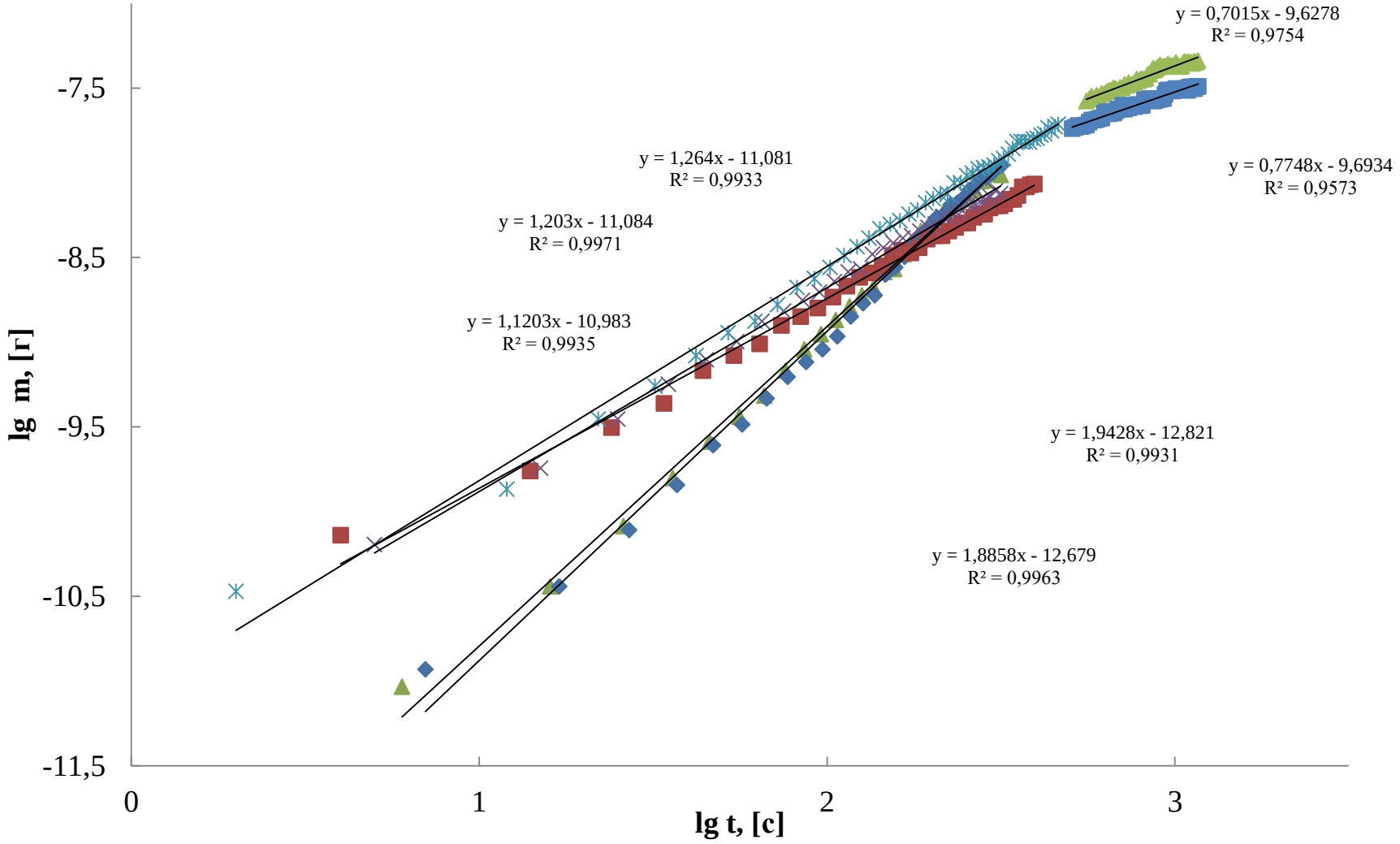
Расчет массопотери металла в процессе коррозии



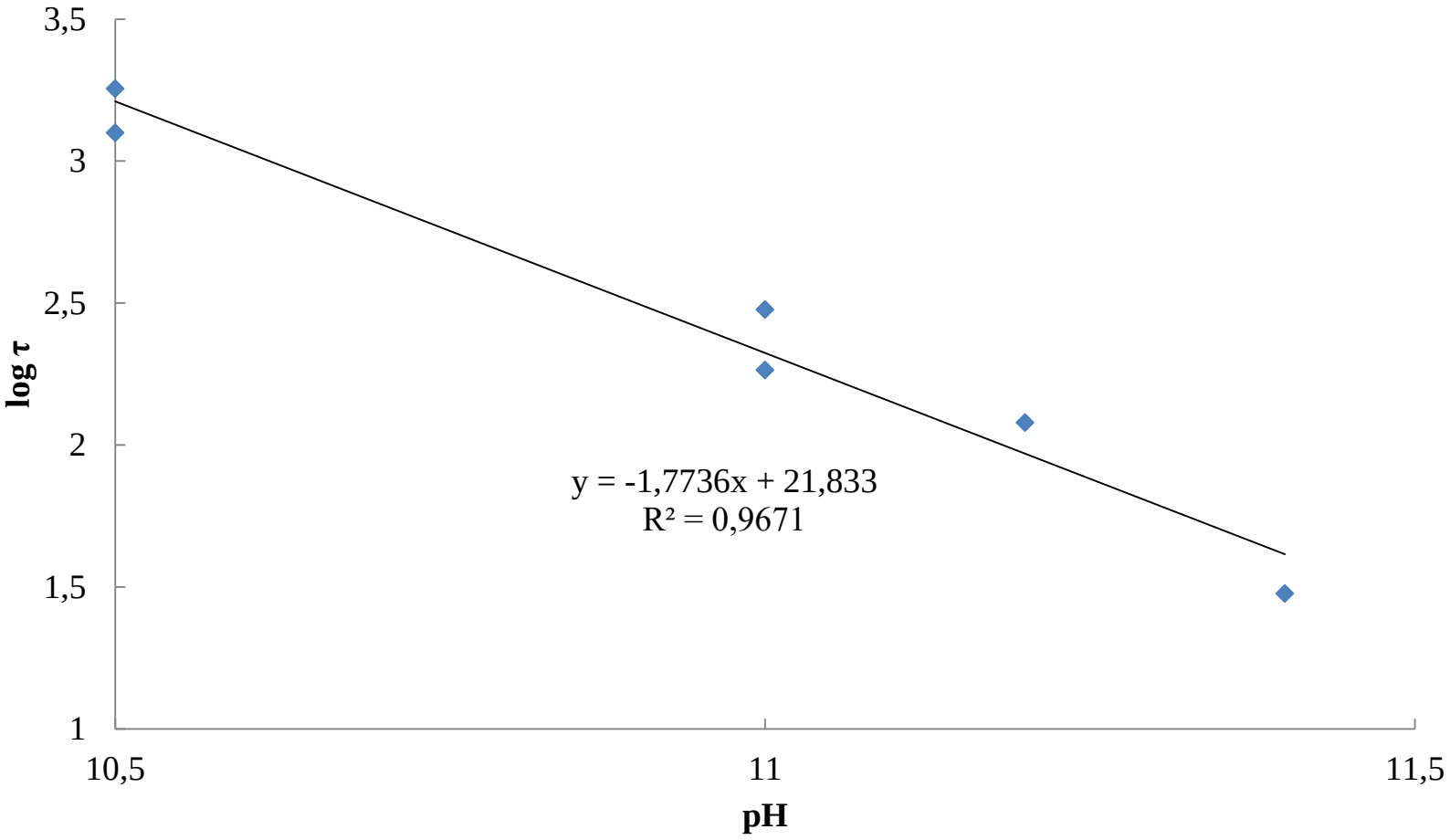
Зависимость массы локально растворившегося металла от времени в 0.1 М NaCl (pH 10.8)



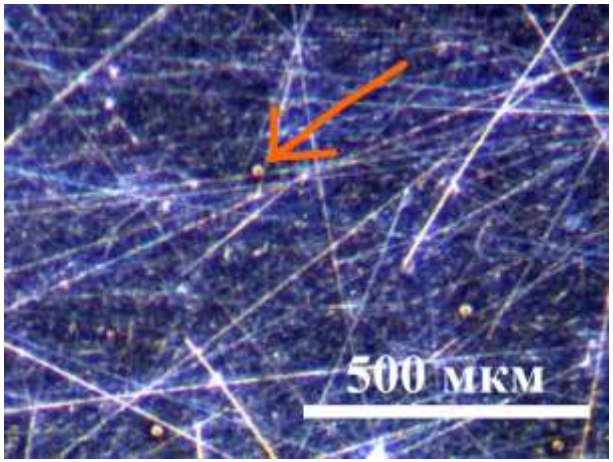
Зависимость массы локально растворившегося металла от времени в 0.1 М NaCl (pH 11)



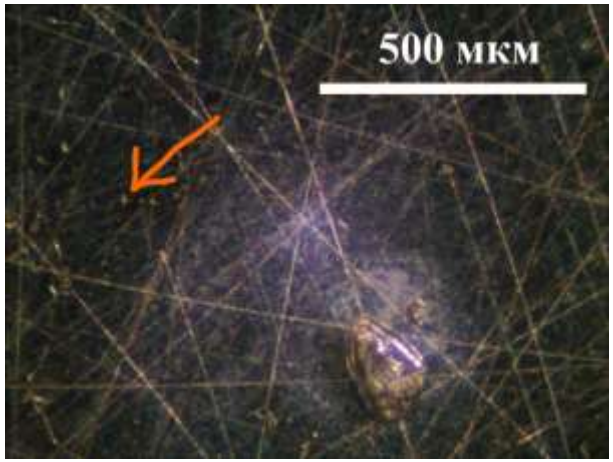
Зависимость индукционного времени появления первого пузырька от pH



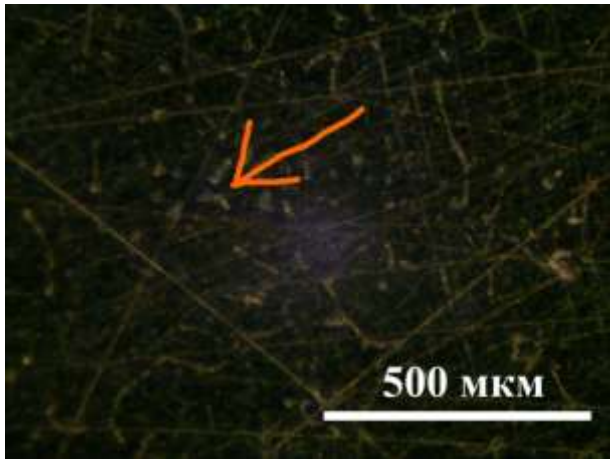
Состояние поверхности в фоновом растворе с различным pH



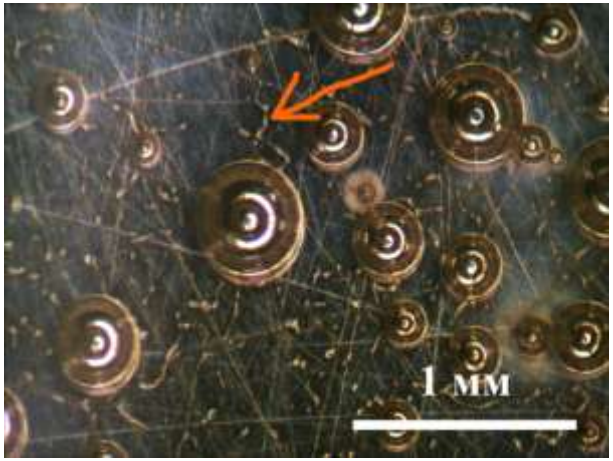
pH 10, 7200 сек



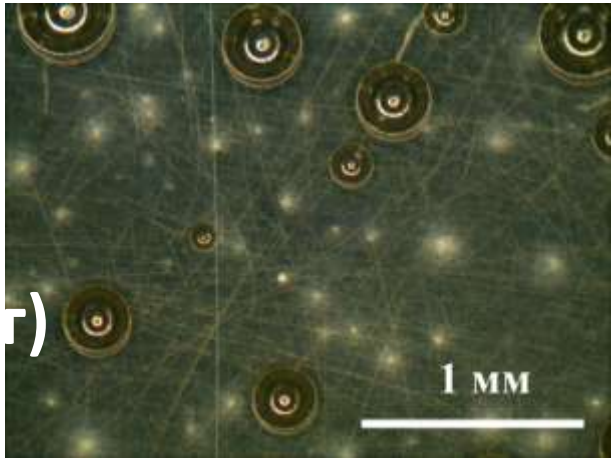
pH 10.5, 9000 сек с раствором



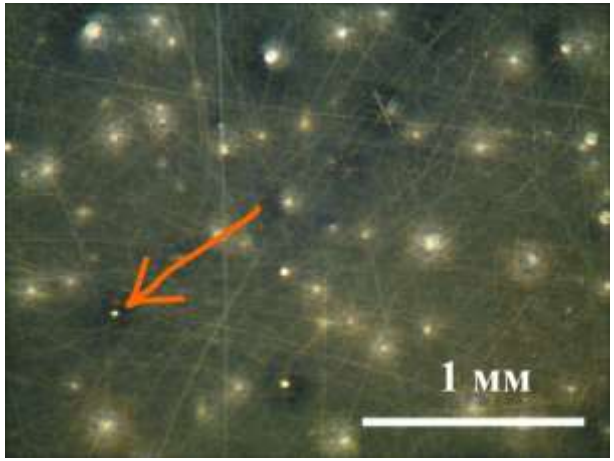
Без раствора



pH 11, 10800 сек

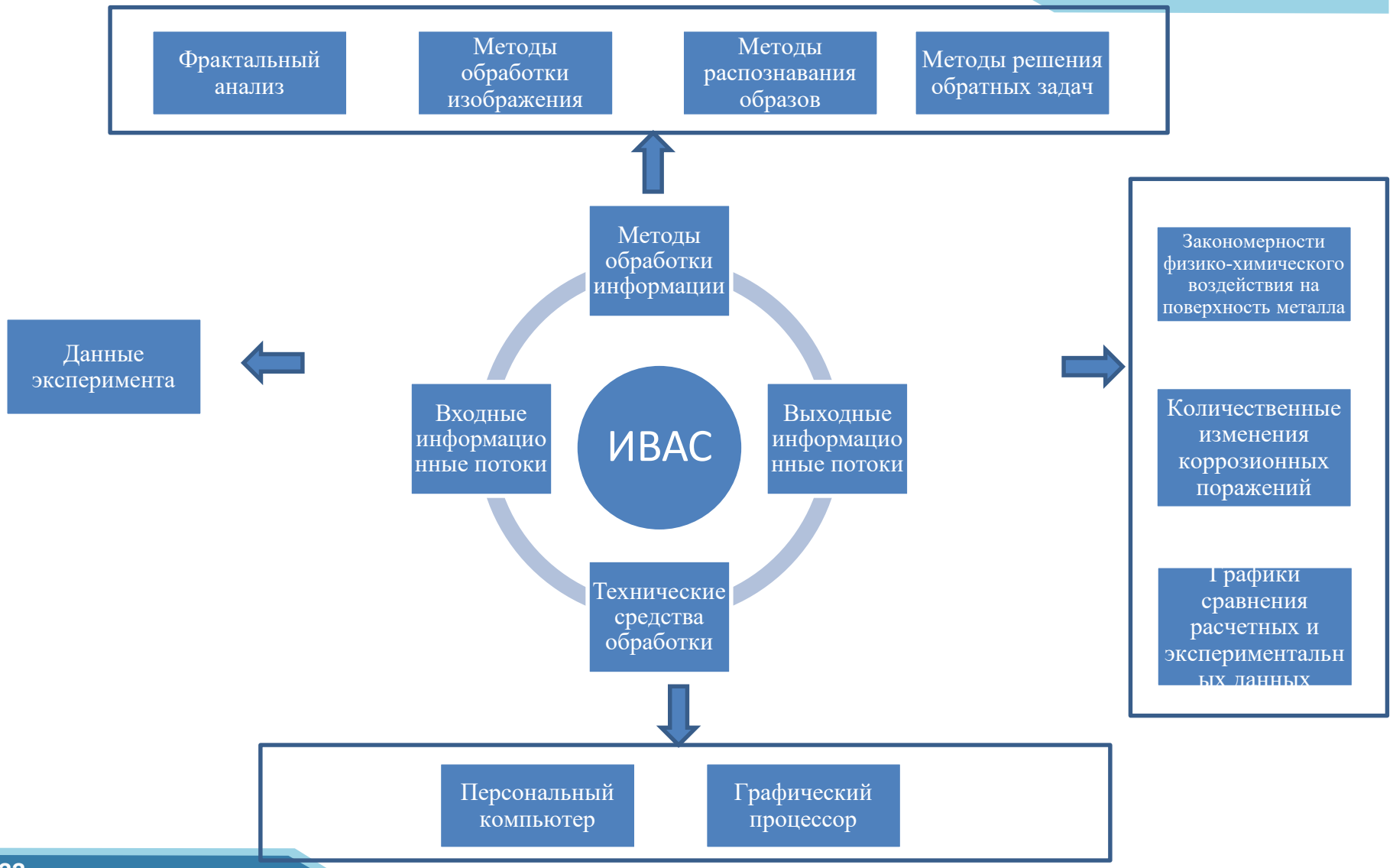


pH 11.4, 145000 сек с раствором



Без раствора

ИВАС КорОценка



Выводы

1. Предложен новый метод к решению задачи анализа коррозионного поражения на основе электрохимического и визуального метода, требующей многоэтапной обработки информации, для идентификации и анализа коррозионного поражения стали и алюминия во времени.
2. Созданы программы, позволяющие оценивать коррозионное поражения на поверхностях стали, алюминия и железа. Программы, реализованные в виде модулей, зарегистрированы в объединенном фонде электронных ресурсов «Наука и образование» (ОФЭРНиО) и в государственном реестре программ для ЭВМ. Данные модули объединены в виде информационно-вычислительной аналитической системы (ИВАС) КорОценка.
3. Разработана математическая модель растворения железа в сульфатно-цитратном буфере и получены импедансные спектры железного электрода для различных значений потенциала электрода методами математического моделирования.

Выводы

4. ИВАС КорОценка использовалась для наблюдения развития локальных дефектов на образце алюминия. Показано, что места локализации дефектов определяются в самом начале процесса и их расположение можно оценить уже в первые 10 минут эксперимента. На основе изменения диаметра пузырьков водорода в ходе катодного процесса, была рассчитана масса растворяющегося в ходе анодного процесса алюминия. Зависимость массы во времени линейна в логарифмических координатах и имеет вид $m \sim t\alpha$. Получено, что величина α изменяется в ходе процесса: при малых временах $\alpha > 1$, при больших же временах его значение становится меньше 1. Установлено, что с повышением pH хлоридсодержащего электролита, скорость процесса питтингообразования на поверхности алюминия увеличивается.

5. С использованием ИВАС КорОценка впервые найдена зависимость между количественной величиной трещины при коррозионном растрескивании трубной стали с физико-химическим воздействием на нее. Определено что корреляция между скоростью роста трещины и ее фрактальной размерностью, обусловлено участком коррозионной трещины.

Спасибо за внимание!

Список публикаций по теме работы

1. M. Enikeev, I. Gubaydullin, and M. Maleeva, Analysis of Corrosion Process Development on Metals by Means of Computer Vision, Engineering Journal, vol. 21, no. 4, pp. 183-192, 2017. doi:10.4186/ej.2017.21.4.183 (**Scopus**).
2. M.R. Enikeev, I.M. Gubaydullin Parallel computing in identification of steel corrosion processes // Proceedings of the 1st Russian Conference on Supercomputing (RuSCDays 2015), CEUR Workshop Proceedings, Vol. 1482, pp. 595-600 (**Scopus**).
3. M. Enikeev, L. Enikeeva, M. Maleeva and Gubaydullin I. Machine learning in the problem of recognition of pitting corrosion on aluminum surfaces // Proceedings of the International Conference Information Technology and Nanotechnology. Session Data Science, Samara, Russia, 24-27 April, 2018 – P. 186-192 (**Scopus**).
4. Enikeev M.R., Enikeeva L.V., Maleeva M.A. and Gubaydullin I.M. Machine learning in the problem of recognition of pitting corrosion on aluminum surfaces // Proceedings of the International Conference Information Technology and Nanotechnology. Session Data Science, Samara, Russia, 24-27 April, 2018 – P. 186-192. (**Scopus**)
5. Еникеев М.Р., Губайдуллин И.М., Еникеева Л.В., Еникеев А.Р., Малеева М.А. Комплексный подход к анализу кинетики коррозионных реакций на поверхности железа // Вестник Башкирского университета. 2018. Т. 23. № 3. С. 728-733. (**ВАК**)
6. М.Р. Еникеев, М.А. Малеева, И.М. Губайдуллин Компьютерное зрение в задаче исследования механизма развития коррозионных поражений // Системы управления и информационные технологии, №1.1(59), 2015. – С. 198-204 (**ВАК**).
7. М. Р. Еникеев, И. М. Губайдуллин, М. А. Малеева Информационно-вычислительная аналитическая система для оценки и прогнозирования коррозионных процессов на поверхности стали и алюминия // Системы и средства информатики, 2017, том 27, выпуск 3, с. 155–170 (**ВАК**).

Список публикаций по теме работы

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

- Еникеева Л.В., Каримова Э.Р., Губайдуллин И.М., Еникеев М.Р. Программа для решения обратной задачи химической кинетики с использованием островной модели генетического алгоритма // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №20186619408. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 6 августа 2018 года.
- Еникеев М.Р., Малеева М.А., Губайдуллин И.М., Коледина К.Ф. Система оценивания поверхности коррозионной трещины. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016614234 от 19.04.2016
- Еникеев М.Р., Ахматдинов Р.М., Губайдуллин И.М., Ганеев Д.А., Лукманов С.Г. Программный модуль «Калибри». Свидетельство о регистрации электронного ресурса №18825. от 02.01.2013.

Гранты

14-03-31509 мол_а Комплексное количественное описание начальных стадий локального растворения железа и стали.

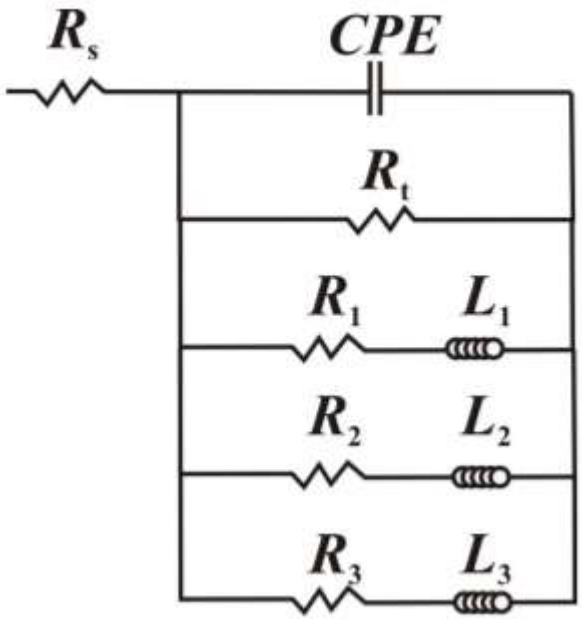
- **Шифр специальности:**
- 02.00.04 Физическая химия
- **Формула специальности:**
- Физическая химия – раздел химической науки об общих законах, определяющих строение веществ, направление и скорость химических превращений при различных внешних условиях; о количественных взаимодействиях между химическим составом, структурой вещества и его свойствами. Теоретической основой физической химии являются общие законы физической науки. Она включает учение о строении молекул вещества, химическую термодинамику и химическую кинетику.
- **Области исследований:**

1. Экспериментальное определение и расчет параметров строения молекул и пространственной структуры веществ.
2. Экспериментальное определение термодинамических свойств веществ, расчет термодинамических функций простых и сложных систем, в том числе на основе методов статистической термодинамики, изучение термодинамики фазовых превращений и фазовых переходов.
3. Определение термодинамических характеристик процессов на поверхности, установление закономерностей адсорбции на границе раздела фаз и формирования активных центров на таких поверхностях.
4. Теория растворов, межмолекулярные и межчастичные взаимодействия.
5. Изучение физико-химических свойств систем при воздействии внешних полей, а также в экстремальных условиях высоких температур и давлений.
6. Неравновесные процессы, потоки массы, энергии и энтропии пространственных и временных структур в неравновесных системах.
7. Макрокинетика, механизмы сложных химических процессов, физикохимическая гидродинамика, растворение и кристаллизация.
8. Динамика элементарного акта при химических превращениях.
9. Элементарные реакции с участием активных частиц.
10. Связь реакционной способности реагентов с их строением и условиями осуществления химической реакции.
11. Физико-химические основы процессов химической технологии.

Специальность, которой соответствует диссертация

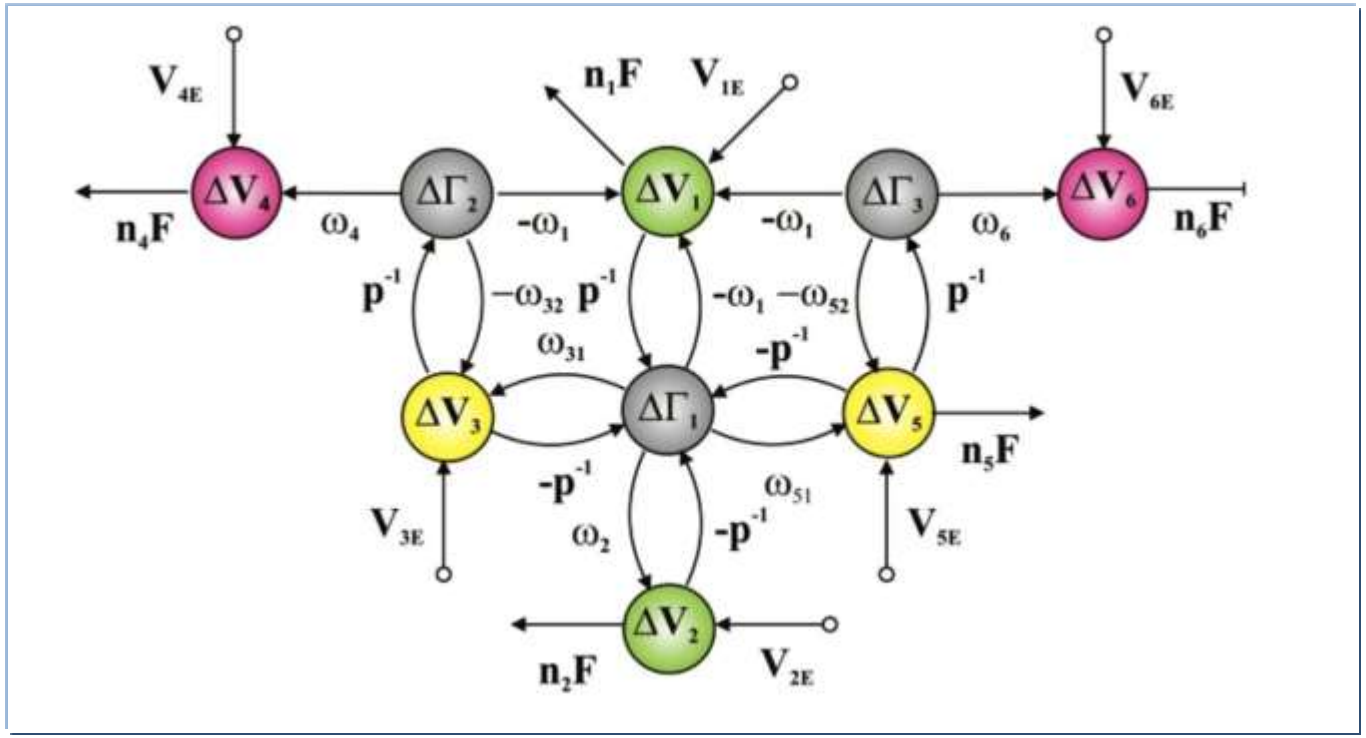
- Диссертация соответствует пункту 7 паспорта специальности 02.00.04 - «Физическая химия», а именно 5 – «Изучение физико-химических свойств систем при воздействии внешних полей, а также в экстремальных условиях высоких температур и давлений», 7 – «Макрокинетика, механизмы сложных химических процессов, физикохимическая гидродинамика, растворение и кристаллизация», 8 – «Динамика элементарного акта при химических превращениях».

Электрическая схема, моделирующая поведение железного электрода



Для количественного описания экспериментальных годографов использовали эквивалентную схему, которая содержит элементы, моделирующие сопротивление раствора (Rs), емкость электрода (элемент постоянной фазы CPE), и трехмаршрутный процесс растворения металла

Построение графа адмиттанса кинетики



Модельные значения:
n1 := 1 n2 := 1 n3 := 0 n4 := 2 n5 := 1 n6 := 2

Константа Фарадея:
F := 96480
Возможные значения искомых параметров
Предполагаемые значения Тафелевских коэффициентов. Диапазон изменения: 0 - 38,96.

При расчете предполагали, что пузырек имеет форму сферического сегмента: $V = \pi h^2 (\frac{D}{2} - \frac{h}{3})$, где $h = 0.5\left(D + \sqrt{D^2 - d^2}\right)$.

С использованием уравнения Менделеева-Клапейрона определяли количество вещества (в моль) в образовавшемся пузырьке газа:

$$\upsilon_{H_2} = \frac{pV}{RT},$$

где p –давление, Па, $p = p_{атм} + p_{р\text{-}р}$; $p_{атм}$ – атмосферное давление, $p_{р\text{-}р}$ – давление столба жидкости на образец, R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); T – температура, К; V – объем газа, м^3.

Далее по закону Фарадея определяли количество электричества, которое было расходовано в процессе роста пузырька газа:

$$Q = n_{H_2} \upsilon_{H_2} F,$$

где n_{H_2} – число электронов, принимаемых в ходе катодного процесса, F – константа Фарадея, Кл/моль.

Вследствие условия электронейтральности системы можно определить массу металла, растворившегося в ходе сопряженного анодного процесса:

$$m = \frac{M_{Fe} Q}{n_{Fe} F}, \qquad (3)$$

где M_{Fe} – молярная масса железа, г/моль; n_{Fe} – число электронов, отнимаемых в ходе анодного процесса.