Оптический журнал

Оптическое приборостроение

УДК 535.8

Исследование возможности оценки глубины проникновения коррозии в металл по изображению корродированной поверхности

© 2021 г. С. П. Пронин, доктор техн. наук; С. В. Умбетов, аспирант

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Барнаул

E-mail: eva_09@inbox.ru

Поступила в редакцию 21.07.2022

DOI:10.17586/1023-5086-2022-89-01-63-73

Представлены экспериментальные исследования проникновения коррозии в металлическую поверхность лабораторных образцов стали марки Ст3. Приведены результаты лабораторных исследований возможности оценки глубины проникновения коррозии в металл по соотношению цветовых компонент в цифровом изображении корродированной поверхности и установлена зависимость изменения глубины проникновения коррозии в металл от контраста медиан в цифровом изображении корродированной поверхности. Выполнен теоретический анализ факторов, влияющих на изменение яркости RGB-составляющих в изображении корродированной поверхности.

Ключевые слова: *коррозия стали, корродированная поверхность, изображение, гистограмма, контраст, глубина коррозии.*

Коды OCIS: *100.0100, 120.0120*

Металлические трубопроводы используют в водо- и канализационных системах [1–4], нефтегазовой отрасли [5–7], на атомных электростанциях [8], при прокладке телекоммуникаций [9]. Главным недостатком любых конструкций из металла является подверженность коррозии. Избежать коррозии в процессе эксплуатации металлических труб невозможно. Однако предотвратить значительные разрушения и аварии вполне реально. Для этой цели разрабатывают различные методы и средства диагностики металлических труб, которые способны помочь спрогнозировать коррозийный процесс по различным параметрам [10–14].

При внутреннем контроле трубопроводов используют технические эндоскопы и приборы телевизионной диагностики совместно с робототехническими системами [2, 3, 7]. Однако метод визуального осмотра даже с применением программного обеспечения не позволяет определить, например, остаточную толщину корродированной поверхности трубы и оценить остаточный ресурс трубопровода. Для измерения толщины металла рекомендуют применять ультразвуковые толщиномеры с точностью измерения 0,1 мм [2]. Они основаны на свойствах отражения ультразвуковых волн на границах раздела сред. Однако известные методы не могут обеспечить достоверного выявления коррозионных поражений, так как эти средства требуют зачистки поверхности от коррозии, поэтому в глубине трубы проблематично измерить ее остаточную толщину.

Время проникновения коррозии на допустимую (заданную) глубину является одним из показателей коррозии. В соответствии с ГОСТ 9.908-85 показатель коррозионной

стойкости определяется из временно́й зависимости соответствующего интегрального показателя коррозии y или графическим способом, или аналитически из его эмпирической временной зависимости $y = f(t)$, находя для допустимого (заданного) значения $y_{\max}$ соответствующее значение $t_{\max}$. Этот ГОСТ позволяет использовать отражательную способность исследуемой поверхности как одного из показателей коррозии.

Коррозия металла начинается с шероховатого налета желто-коричневого цвета. С течением времени у корродированной поверхности меняется и структура, и цвет. Цвет у стальной поверхности изменяется от серого до красно-коричневого и даже черно-коричневого, а покрывающий металл налет начинает растрескиваться и может отслаиваться. Очевидно, что при этом меняется остаточная толщина металла.

В обзорной статье [15] приведена классификация методов исследования коррозионных процессов по аппаратному оформлению и оценкам коррозионных эффектов. В частности, при химическом методе показателем коррозии может служить изменение цвета. В методе световых эффектов показателем коррозии является показатель изменения отражательной способности, измеряемый в единицах %%/год.

Современные видеокамеры способны зафиксировать изменения в изображении корродированной поверхности RGB-составляющих. Поскольку цвет определяется их соотношением, то изменение соотношения RGB-составляющих должно отражать глубину проникновения коррозии в металл.

Цель работы — исследовать возможность оценки глубины проникновения коррозии в металл по соотношению RGB-составляющих в цифровом изображении корродированной поверхности.

Корродированную поверхность будем проецировать в плоскость многоэлементного фотоприемника ПЗС с помощью объектива видеокамеры. Тогда каждому фоточувствительному элементу (ФЧЭ) будет соответствовать микрогрань в пространстве корродированной поверхности. Представим, что на исследуемую поверхность падает монохроматический поток излучения под углом ψ, тогда сигнал с ФЧЭ можно записать в виде [17, С. 45]

$$i_{\theta,\lambda} = S_\lambda \tau_\lambda L_{\theta,\lambda} \Delta\omega q_0 \cos\theta / \cos\psi, \qquad (1)$$

где θ — угол наблюдения, S_λ — спектральная чувствительность ФЧЭ, τ_λ — спектральный коэффициент пропускания объектива, $L_{\lambda,\theta}$ — яркость микрограни площадью q_0 на длине волны λ падающего светового потока в направлении наблюдения, определяемом углом θ, $\Delta\omega$ — телесный угол света, рассеянного микрогранью, ψ — угол падения светового потока на микрогрань.

Как видно из формулы (1), сигнал $i_{\theta,\lambda}$ с ФЧЭ определен яркостью $L_{\lambda,\theta}$, которая, в свою очередь, зависит от изменяющихся оптических свойств поверхности.

Если предположить, что микрограни являются диффузно отражающими поверхностями, которые подчиняются закону Ламберта, то энергетическая яркость L_λ будет связана с энергетической освещенностью E_λ (источником света) математической зависимостью [18, С. 270]

$$L_\lambda = E_\lambda \rho_\lambda / \pi, \qquad (2)$$

где ρ_λ — спектральный коэффициент диффузного отражения микрограни.

Следовательно, при неизменных углах падения и наблюдения потока излучения, но с изменением спектрального коэффициента ρ_λ, меняется уровень сигнала $i_{\theta,\lambda}$, снимаемого с ФЧЭ. Такой упрощенный вывод справедлив, когда все микрограни корродированной поверхности лежат в горизонтальной плоскости. Очевидно, что в действительности микрограни занимают различные пространственные положения с различными углами, поэтому уровень сигнала $i_{\theta,\lambda}$ согласно формуле (1) будет меняться. Таким образом, получим статистическое распределение уровней сигнала на каждой длине волны.

Каждую гистограмму можно охарактеризовать количественно через медиану. Значения медиан определяют средние яркости в гистограммах. С увеличением времени коррозии поверхности металла меняется соотношение яркостей *rgb*-компонент. Их соотношение можно выразить через понятие контраста [16].

Яркостной контраст K любой излучающей поверхности, на которой имеется информация или различимость объекта от окружающего фона, определяют по формуле [16]

$$K = (L_s - L_n) / L_s, \qquad (3)$$

где L_s — яркость изучаемого объекта, L_n — яркость фона.

При расчете контраста в исследуемом изображении часто используют формулу Майкельсона [16, 17]

$$K = (L_{\max} - L_{\min}) / (L_{\max} + L_{\min}), \qquad (4)$$

где $L_{\max}$ и $L_{\min}$ — максимальное и минимальное значения яркостей в оптическом изображении исследуемого объекта.

В данной работе контраст в цветном изображении корродированной поверхности будем рассматривать с точки зрения формулы (4) с той лишь разницей, что в числителе и знаменателе будут три слагаемых, а не два.

Обозначим L_r — значение медианы в гистограмме распределения яркости красной компоненты, L_g — значение медианы в гистограмме распределения яркости зеленой компоненты и L_b — значение медианы в гистограмме распределения яркости синей компоненты. Тогда можно составить следующие соотношения контраста медиан:

$$K_1 = (L_r - L_g - L_b) / (L_r + L_g + L_b), \qquad (5)$$

$$K_2 = (-L_r + L_g - L_b) / (L_r + L_g + L_b), \qquad (6)$$

$$K_3 = (-L_r - L_g + L_b) / (L_r + L_g + L_b), \qquad (7)$$

$$K_4 = (L_r + L_g - L_b) / (L_r + L_g + L_b), \qquad (8)$$

$$K_5 = (L_r - L_g + L_b) / (L_r + L_g + L_b), \qquad (9)$$

$$K_6 = (-L_r + L_g + L_b) / (L_r + L_g + L_b). \qquad (10)$$

Количество этих соотношений можно уменьшить в два раза, потому что приведенные выше пары пары зеркально повторяют друг друга. Зеркальными являются следующие пары: (5) и (10), (6) и (9), (7) и (8). Для исследований выбраны соотношения (5), (8) и (9).

Для лабораторных исследований были подготовлены металлические образцы стали Ст3 размером 50×50 мм и толщиной 5 мм в количестве 9 штук.

Два образца служили эталоном — образцы № 1 и № 6. Их поверхности не подвергались коррозии.

Поверхность каждого образца протравливалась в отдельной ванночке. Для приготовления водных растворов перемешивались 1 часть раствора хлорного железа и 2 части воды. Образцы помещались в раствор хлорного железа одной стороной. Три металлических образца – № 7–9, помещались в раствор хлорного железа и выдерживались в нем 5, 10, 15 дней соответственно, имитируя, таким образом, коррозионные изменения поверхности металла, вызываемые агрессивной средой. Четыре образца — № 2–5, выдерживались в растворе 5, 10, 15, 20 дней соответственно, т.е. более продолжительный временной интервал, чем образцы № 7–9.

Коррозия счищалась с края образца [13] и измерялась остаточная толщина с помощью цифрового штангенциркуля. Точность измерения штангенциркуля составляет 0,02 мм.

С каждой корродированной поверхности осуществлялась запись изображения с помощью видеокамеры HDDavidSIS2 ver 3.0. В качестве источника света применялись светодиоды MX3SWT-A1. Исходя из спектральной характеристики светодиоды обеспечивали получение синей, зеленой и красной компонент. Оптическая ось объектива видеокамеры устанавливалась ортогонально корродированной поверхности, а освещение осуществлялось четырьмя лентами светодиодов по 10 штук в каждой. Ленты светодиодов располагались по квадрату вокруг объектива.

Запись изображений с поверхностей образцов № 1–5 выполнялась однократно при произвольной их установке относительно видеокамеры. С поверхности образцов № 6–9 она осуществлялась по 4 раза: первый раз при произвольной установке образца относительно видеокамеры, которая принималась за нулевой угол, а далее при повороте образца на 90, 180 и 270°. Такая процедура позволяет изменять угол наблюдения θ для каждой микрограни и исследовать влияние фактора пространственной установки поверхности на изменения гистограмм, медиан и контраста.

В первом эксперименте с использованием эталонного образца № 1 без коррозии медианы в гистограммах приняли следующие значения:

медиана *r*-компоненты — $L_r = 80$ ед. АЦП,

медиана *g*-компоненты — $L_g = 76$ ед. АЦП,

медиана *b*-компоненты — $L_b = 75$ ед. АЦП.

Поскольку поверхность образца не подвергалась коррозии, то толщина образца осталась неизменной — 5 мм.

Во втором эксперименте с использованием образца № 2 с корродированной поверхностью,

находившегося в растворе хлорного железа 5 дней, медианы в гистограммах имеют следующие значения:

медиана $L_r = 130$ ед. АЦП,

медиана $L_g = 110$ ед. АЦП,

медиана $L_b = 95$ ед. АЦП.

Гистограммы цветовых компонент смещаются относительно исходных. Толщина образца уменьшилась до 4,72 мм.

В третьем эксперименте с использованием образца № 3, находившегося в растворе хлорного железа 10 дней, происходит еще большее смещение значений относительно эталона. Медианы в гистограммах приняли следующие значения:

медиана $L_r = 154$ ед. АЦП,

медиана $L_g = 130$ ед. АЦП,

медиана $L_b = 85$ ед. АЦП.

Толщина образца уменьшилась до 4,61 мм.

В четвертом эксперименте с использованием образца № 4, находившегося в растворе хлорного железа 15 дней, медианы *rgb*-компонент приняли значения

медиана $L_r = 130$ ед. АЦП,

медиана $L_g = 80$ ед. АЦП,

медиана $L_b = 45$ ед. АЦП.

Толщина образца составила 4,41 мм.

И в эксперименте с образцом № 5, находившимся в растворе хлорного железа 20 дней, медианы *rgb*-компонент приняли значения 71, 48 и 21 ед. АЦП соответственно. Толщина составила 4,3 мм.

При отсутствии коррозии гистограммы практически совпадают между собой. Глазом поверхность металла воспринимается как серая. С увеличением времени коррозии металла гистограммы цветовых компонент смещаются в область меньших значений яркости.

В табл. 1 представлены сводные данные эксперимента. В последней колонке приведены значения контраста медиан, вычисленные по формуле (8).

На основе экспериментальных данных табл. 1 несложно построить уравнение парной регрессии, отражающей зависимость глубины h проникновения коррозии в металл от количества дней x. Уравнение имеет линейный характер

$$h = 0{,}034x + 0{,}05 \qquad (11)$$

с коэффициентом корреляции 0,987.

Подстановкой значений медиан из табл. 1 в формулы (5), (8) и (9) вычислены контрасты медиан и на их основе построены графики зависимости изменения контраста от глубины проникновения коррозии в металл (рис. 1).

Каждый из графиков на рис. 1 соответствует линейному уравнению регрессии и коэффициенту детерминации, представляющему собой квадрат коэффициентов корреляции. График на рис. 1б практически параллелен оси абсцисс. Контраст остается неизменным независимо от глубины проникновения коррозии в металл, поэтому формула (9) исключена из дальнейших исследований.

Таблица 1. Экспериментальные данные лабораторных исследований образцов № 1–5

Количество дней	Глубина проникновения коррозии, мм	Контраст медиан
0	0	0,351
5	0,28	0,433
10	0,39	0,539
15	0,59	0,647
20	0,70	0,700

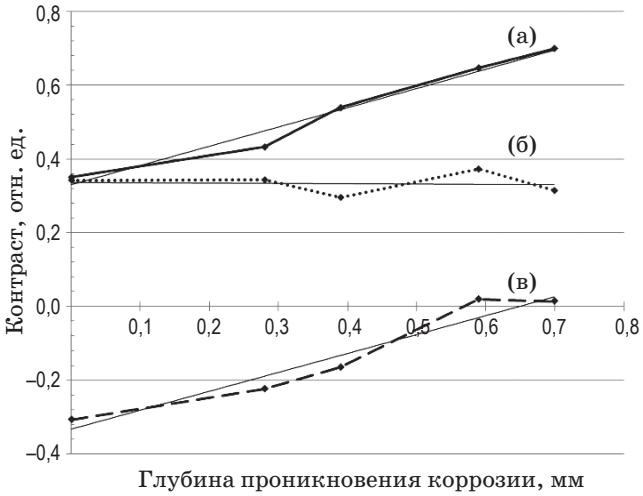


Рис. 1. Зависимости изменения контраста медиан в гистограммах цветовых компонент от глубины проникновения коррозии. (а) — график, вычисленный по формуле (8) ($y = 0{,}5219x + 0{,}3294$, $R^2 = 0{,}9711$), (б) — график, вычисленный по формуле (9) ($y = -0{,}0084x + 0{,}3368$, $R^2 = 0{,}0061$), (в) — график, вычисленный по формуле (5) ($y = 0{,}5134x - 0{,}3338$, $R^2 = 0{,}9347$).

Из двух оставшихся графиков рис. 1 целесообразно рассматривать график на рис. 1а по причине, во-первых, большего коэффициента детерминации, который отражает более сильную линейную зависимость исследуемых физических величин. Во-вторых, контраст принимает положительные значения, что удобнее для анализа экспериментальных результатов. Таким образом, для дальнейших исследований принята формула (8).

Из графика, представленного на рис. 1а, следует вывод, что с увеличением глубины проникновения коррозии в металл контраст K, вычисленный по формуле (8), возрастает. Модель регрессии по полученным экспериментальным данным может быть представлена линейным уравнением

$$K = 0{,}522h + 0{,}329. \qquad (12)$$

Коэффициент линейной корреляции в этом случае составляет $R = 0{,}985$.

В табл. 2 приведены значения медиан, вычисленные для каждой гистограммы цветовых компонент образца № 6 без коррозии, контрасты медиан, рассчитанные по формуле (8), при видеосъемке под углами 0, 90, 180 и 270°. По вычисленному контрасту для каждого угла поворота рассчитаны среднее значение, среднее квадратическое отклонение (СКО) и доверительный интервал при уровне значимости 0,05.

В табл. 3 приведены экспериментальные данные и статистические расчеты по образцу № 7 при коррозии поверхности металла в течение 5 дней (глубина проникновения коррозии 0,2 мм) и видеосъемке под углами 0, 90, 180 и 270°.

В табл. 4 приведены экспериментальные данные и статистические расчеты по образцу № 8 при коррозии поверхности металла в течение 10 дней и видеосъемке под углами поворота 0, 90, 180 и 270° (глубина проникновения коррозии 0,31 мм).

В табл. 5 приведены экспериментальные данные и статистические расчеты по образцу № 9 при коррозии поверхности металла в течение 15 дней и видеосъемке под углами 0,

Таблица 2. Экспериментальные данные лабораторных исследований образца № 6

Угол поворота, градусы	Значение медианы, ед. АЦП			Контраст медиан
	L_r	L_g	L_b	
0	90	95	100	0,298
90	96	104	110	0,290
180	96	100	105	0,302
270	98	90	94	0,333
			Среднее значение	0,306
			Среднее квадратическое отклонение	0,019
			Доверительный интервал при уровне значимости 0,05	±0,021

Таблица 3. Экспериментальные данные лабораторных исследований образца № 7

Угол поворота, градусы	Значение медианы, ед. АЦП			Контраст медиан
	L_r	L_g	L_b	
0	133	95	82	0,471
90	125	105	85	0,460
180	135	100	77	0,506
270	120	90	75	0,474
			Среднее значение	0,478
			Среднее квадратическое отклонение	0,020
			Доверительный интервал при уровне значимости 0,05	±0,022

Таблица 4. Экспериментальные данные лабораторных исследований образца № 8

Угол поворота, градусы	Значение медианы, ед. АЦП			Контраст медиан
	L_r	L_g	L_b	
0	140	80	50	0,629
90	70	50	35	0,548
180	72	48	35	0,548
270	81	44	29	0,623
			Среднее значение	0,587
			Среднее квадратическое отклонение	0,045
			Доверительный интервал при уровне значимости 0,05	±0,051

Таблица 5. Экспериментальные данные лабораторных исследований образца № 9

Угол поворота, градусы	Значение медианы, ед. АЦП			Контраст медиан
	L_r	L_g	L_b	
0	75	48	35	0,556
90	29	18	10	0,649
180	28	18	13	0,559
270	31	7	6	0,727
			Среднее значение	0,623
			Среднее квадратическое отклонение	0,082
			Доверительный интервал при уровне значимости 0,05	0,092

Таблица 6. Зависимость контраста медиан от угла поворота и глубины коррозии (образцы № 6–9)

Глубина коррозии, мм	Угол поворота, град	Контраст медиан
0	0	0,298
	90	0,29
	180	0,302
	270	0,333
0,2	0	0,471
	90	0,46
	180	0,506
	270	0,474
0,31	0	0,629
	90	0,548
	180	0,548
	270	0,623
0,49	0	0,556
	90	0,649
	180	0,559
	270	0,727

90, 180 и 270° (глубина проникновения коррозии 0,49 мм).

В первом эксперименте глубина проникновения оказалась больше (табл. 1), чем во втором эксперименте (табл. 6). На рис. 2 представлены графики зависимости изменения глубины коррозии от количества дней, проведенных образцами в растворе хлорного железа. Глубина проникновения коррозии в металл зависит также от концентрации раствора хлорного железа.

На основе экспериментальных данных построены линейные регрессии (рис. 2). Коэффициент корреляции в первом эксперименте (образцы № 1–5) составляет $R = 0{,}987$, а во втором (образцы № 6–9) — 0,994. Следовательно, в использованном растворе хлорного железа глубина проникновения коррозии в металл в пределах 20 дней линейно зависит от количества дней, проведенных металлическим образцом в этом растворе.

В первом эксперименте определена зависимость изменения контраста медиан от одного фактора — глубины проникновения коррозии в металл. Во втором эксперименте определя-

Таблица 7. Итоги двухфакторного дисперсионного анализа

Итоги	Счет	Сумма	Среднее	Дисперсия
Глубина 0 мм	4	1,223	0,30575	0,00035492
Глубина 0,2 мм	4	1,911	0,47775	0,00039092
Глубина 0,31 мм	4	2,348	0,587	0,002034
Глубина 0,49 мм	4	2,491	0,62275	0,00669225
Угол 0°	4	1,954	0,4885	0,02029767
Угол 90°	4	1,947	0,48675	0,02316758
Угол 180°	4	1,915	0,47875	0,01440625
Угол 270°	4	2,157	0,53925	0,02968692

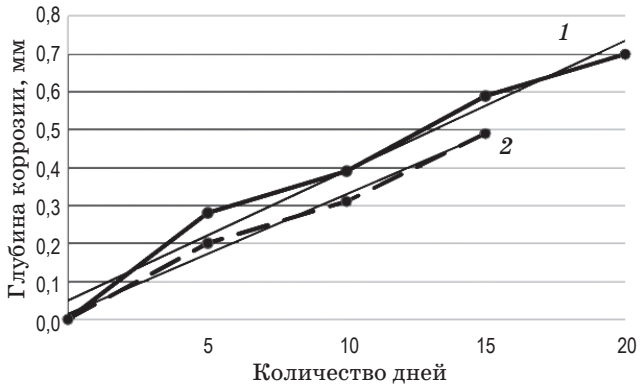


Рис. 2. Графики зависимости глубины проникновения коррозии в металл от количества дней. *1* — первый эксперимент ($y = 0{,}0342x + 0{,}05$, $R^2 = 0{,}9738$), *2* — второй эксперимент ($y = 0{,}0316x + 0{,}013$, $R^2 = 0{,}9891$).

лась зависимость изменения контраста медиан от двух факторов — угла поворота образца относительно объектива видеокамеры и глубины проникновения коррозии в металл.

Для оценки влияния этих факторов на изменение контраста применялся двухфакторный дисперсионный анализ [21]. По данным табл. 2, 3, 4 и 5 сгруппированы значения контраста по углу поворота образца при съёмке и глубине проникновения коррозии в металл и сведены в табл. 6. На уровне значимости 0,05 проверялись две нуль-гипотезы о равенстве средних значений контраста. Первая — глубина проникновения коррозии в металл не влияет на контраст медиан и вторая — угол поворота металлического образца не влияет на контраст медиан.

В табл. 7 приведены итоги двухфакторного дисперсионного анализа, а в табл. 8 — результаты дисперсионного анализа.

Таблица 8. Результаты дисперсионного анализа

Источник вариации	F	P-значение	F критическое
Строки	37,91	$1{,}96\times10^{-5}$	3,86
Столбцы	1,42	0,298	3,86

Из табл. 8 следует вывод, что средние значения контраста меридиан по строкам не равны друг другу, поэтому глубина коррозии влияет на контраст медиан: расчетное значение статистики $F = 37{,}91$ на порядок превышает критическое значение $F_{\max} = 3{,}86$ при расчетном уровне значимости $P = 1{,}96\times10^{-5}$.

Из этой же таблицы следует и второй вывод. Средние значения контраста медиан по столбцам равны друг другу, поэтому угол поворота образца не влияет на контраст медиан: расчетное значение статистики $F = 1{,}42$ меньше критического значения $F_{\max} = 3{,}86$ при расчетном уровне значимости $P = 0{,}298$.

Нет необходимости строить график зависимости изменения контраста медиан от угла поворота образца. Как видно из данных табл. 7 и вывода дисперсионного анализа, график представляет прямую линию, параллельную оси абсцисс. Получен важный результат с точки зрения технического устройства, осуществляющего анализ корродированной металлической поверхности. Например, при движении роботизированной платформы с видеокамерой отпадает необходимость поворотов видеокамеры, что в целом уменьшает габариты устройства и упрощает его конструкцию.

По экспериментальным данным построены линейные регрессии зависимости изменения

контраста от глубины коррозии. Обе регрессии отражены на графиках рис. 3: линия *1* — график зависимости изменения контраста медиан от глубины коррозии по результатам первого эксперимента, линия *2* — аналогичная зависимость по результатам второго эксперимента. Коэффициенты линейной корреляции очень высокие: в первом эксперименте $R = 0{,}988$, а во втором $R = 0{,}962$. Несмотря на высокие коэффициенты корреляции, графики отличаются по контрасту в начальной точке при $h = 0$ и по тангенсу угла наклона. Возникает вопрос: можно ли их объединить в единый график?

Для ответа на этот вопрос был применен критерий Граббса [22, 23]. Традиционно критерий Граббса используют для определения грубых погрешностей, или промахов, в результате измерений. В нашем случае наличие промаха означает существенное отличие результатов измерений контраста в первом и втором экспериментах. Проверка отличия контраста осуществлялась на каждой глубине коррозии металла по следующему алгоритму. Объединялись данные контраста из обоих экспериментов на заданной глубине. Вычислялся средний контраст K_Δ, СКО и далее определялся критерий Граббса G по формуле

$$G = \left|K_1 - \overline{K}\right| / S, \qquad (13)$$

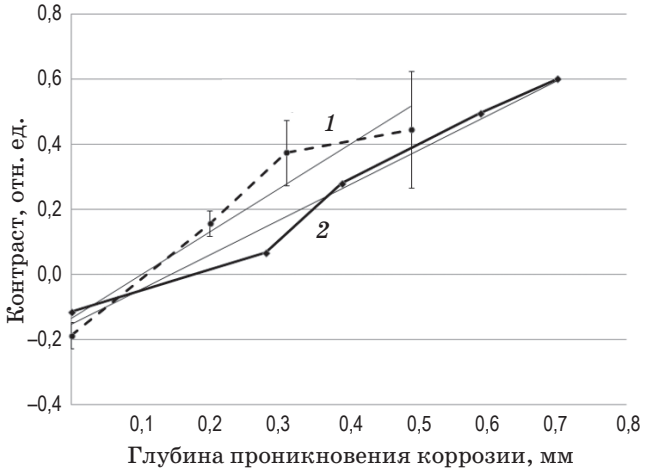


Рис. 3. Графики зависимости контраста медиан от глубины проникновения коррозии. *1* — первый эксперимент ($y = 0{,}6664x + 0{,}3316$, $R^2 = 0{,}9254$), *2* — второй эксперимент ($y = 0{,}5219x + 0{,}3294$, $R^2 = 0{,}9711$).

где K_1 — проверяемый на промах контраст из первого эксперимента. Для пяти значений контраста и уровне значимости 0,05 критическое значение критерия Граббса равно $G_K = 0{,}672$ [22].

Если $G > G_K$, то контраст K_1 имеет существенное отличие от результата второго эксперимента. Если $G \le G_K$, то нет оснований считать, что контраст K_1 является промахом, поэтому можно объединить данные первого и второго экспериментов.

Все результаты вычислений приведены в табл. 9. В строках 1–4 табл. 9 приведены значения контраста медиан, взятые из второго эксперимента (табл. 6). В строку 5 можно внести только первое значение контраста, равное 0,351, взятое из табл. 1. Остальные три значения нельзя переносить по причине разной глубины проникновения коррозии в металл по сравнению со вторым экспериментом. Чтобы привести контраст первого эксперимента в соответствие с глубиной проникновения коррозии во втором эксперименте, использовалась линейная регрессия: $y = 0{,}5219x + 0{,}3294$. Величина y — это контраст в первом эксперименте при глубинах коррозии $x = 0{,}2$, 0,31, 0,49 мм.

В строках 6 и 7 табл. 9 представлены средние значения и СКО контраста медиан по результатам двух экспериментов. Критерии Граббса, вычисленные по формуле (13), отражены в строке 8. Поскольку теоретическое значение критерия Граббса ($G_K = 0{,}672$) больше каждого критерия из строки 8 табл. 9, то можно объединить оба графика в один по средним значениям. График представлен на рис. 4.

В диапазоне изменения глубины проникновения от 0 до 0,3 мм график имеет линейную зависимость с очень высоким коэффициентом линейной корреляции, а именно $R = 0{,}999$. В диапазоне от 0,3 до 0,5 мм экспериментальные данные тоже можно аппроксимировать линейной зависимостью, но уже с несколько меньшей линейной корреляцией — $R = 0{,}974$. Это, во-первых и во-вторых, связано с уменьшением тангенса угла наклона, которое происходит за счет уменьшения контраста медиан при глубине проникновения коррозии 0,5 мм. Уменьшение контраста на этой глубине может иметь следующее объяснение. При увеличении времени нахождения в растворе хлорного железа поверхность чернеет, различия между

Таблица 9. Результаты вычисления контраста по критерию Граббса

№ п/п	Эксперименты	Глубина коррозии, мм			
		0	0,2	0,31	0,49
	Результаты второго эксперимента				
1	0°	0,298	0,471	0,629	0,556
2	90°	0,290	0,460	0,548	0,649
3	180°	0,302	0,506	0,548	0,559
4	270°	0,333	0,474	0,623	0,727
	Результаты первого эксперимента				
5	0°	0,351	0,434	0,491	0,585
6	Среднее значение контраста	0,315	0,469	0,568	0,615
7	СКО	0,0260	0,0261	0,0580	0,0728
8	Критерий Граббса	0,393	1,349	1,322	0,413
9	Теоретическое значение Граббса, $G_K = 0{,}672$				
10	Доверительный интервал	0,025	0,026	0,057	0,071

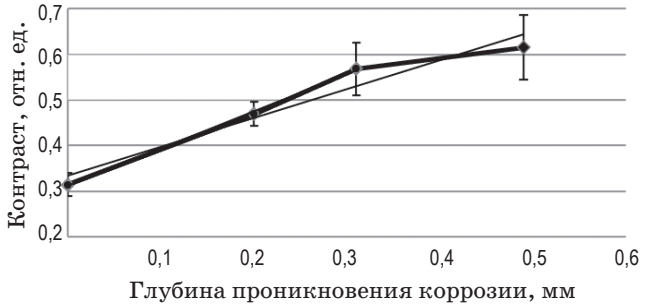


Рис. 4. Обобщенная зависимость изменения контраста медиан от глубины проникновения коррозии в металл по двум экспериментам. Первый эксперимент — $y = 0{,}8107x + 0{,}3127$, $R^2 = 0{,}9984$, второй эксперимент — $y = 0{,}6306x + 0{,}3341$, $R^2 = 0{,}9491$.

медианами уменьшаются. Теоретически при черном цвете, как и при сером, медианы должны быть равны: $L_r = L_g = L_b = L$. Подставляя значение L в формулу (7) и в числитель, и в знаменатель, получим значение контраста 0,333. Следовательно, в области глубины коррозии 0,5–0,6 мм должно наблюдаться максимальное значение контраста с дальнейшим его уменьшением до 0,333. Для сравнения: экспериментальный контраст медиан в изображении поверхности без коррозии (серый цвет) составляет 0,315.

При коррозии металлического образца стали марки Ст.3 глубина коррозии во временном диапазоне 20 дней увеличивается по линейному закону от времени травления образца в растворе хлорного железа.

С увеличением глубины проникновения коррозии в металл изменяется цвет корродированной поверхности, а значит соотношение яркостей *rgb*-компонент. В фиксируемом изображении поверхности выделялись три цветовые гистограммы, в которых и определялись медианы. В качестве меры соотношения яркостей использовалась формула Майкельсона для расчета медианного контраста.

Двухфакторный дисперсионный анализ показал, что углы поворота корродированной поверхности относительно объектива видеокамеры не влияют на контраст медиан. Зато глубина коррозии достоверно обуславливает изменение контраста. В диапазоне от 0 до 0,5 мм зависимость контраста медиан от глубины коррозии имеет линейный характер.

На основе данных табл. 9 можно решать и обратную задачу — по среднему контрасту (строка 6) определять глубину проникновения коррозии в металл. Уравнение имеет следующий вид:

$$h = 1{,}505\overline{K} - 0{,}49. \qquad (14)$$

Коэффициент линейной корреляции составляет 0,97. Полученная эмпирическая формула

справедлива для диапазона изменения глубины коррозии до 0,5 мм.

С увеличением глубины коррозии свыше 0,5 мм вероятнее всего линейная зависимость будет нарушена. Теоретический анализ показывает, что при глубине коррозии 0,5–0,6 мм должен наблюдаться максимум контраста медиан с дальнейшим его уменьшением до значения 0,333.

В работе представлены лабораторные исследования глубины проникновения коррозии в металл при воздействии на него раствора хлорного железа по соотношению цветовых компонентов в цифровом изображении корродированной поверхности.

С увеличением глубины проникновения коррозии изменяется цвет корродированной поверхности, а значит и соотношение яркостей *rgb*-компонент. В фиксируемом изображении поверхности металла выделялись три цветовые гистограммы яркостей, в которых определяли медианы.

Для определения меры соотношения яркостей цветовых компонент введено новое понятие — контраст медиан. В основе контраста медиан лежит известная формула Майкельсона. Отличие состоит в том, что числитель содержит три слагаемых, из них значение медианы синей компоненты берется с отрицательным знаком, а знаменатель содержит сумму значений медиан всех трех компонент.

В результате экспериментальных исследований установлена зависимость изменения контраста медиан от глубины коррозии металла. На ее основе получено линейное уравнение зависимости глубины проникновения коррозии в металл от контраста медиан. Коэффициент линейной корреляции составляет 0,97. Предложенная эмпирическая формула справедлива для диапазона изменения глубины коррозии до 0,5 мм.

Таким образом, экспериментальные исследования показали, что глубину проникновения коррозии в металл можно оценить по соотношению RGB-составляющих в цифровом изображении корродированной поверхности.

Полученный результат может быть непосредственно использован в химическом производстве, где применяется хлорное железо, а методика измерения глубины проникновения коррозии в металл по соотношению яркостей *rgb*-компонент — при контроле различных трубопроводов и металлических конструкций.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Косыгин А.Б., Ханин В.Н., Государев К.И., Фомина И.В.* Обнаружение скрытых утечек с использованием системы мониторинга водопроводной сети // Водоснабжение и санитарная техника. 2010. № 4. С. 22–26.
2. *Косыгин А.Б., Фомина И.В., Горицкий В.М., Хромов Д.П.* Методика оценки технического состояния и остаточного ресурса трубопроводов водопроводной и канализационной сетей г. Москвы // Водоснабжение и санитарная техника. 2010. № 3. С. 31–36.
3. *Баранов С.В., Косыгин А.Б., Ханин В.Н., Корабельников Т.В., Фомина И.В.* Инструментальный контроль за строительством водопроводных и канализационных сетей Москвы // Водоснабжение и санитарная техника. 2011. № 10. С. 42–48.
4. *Ganiyu S.A., Olurin O.T., Ajibodu K.A., Badmus B.S., Ajayi A.O.* Assessment of the degree of external corrosion of buried water pipelines and source identification of heavy metals due to surrounding soil conditions in humid environment // Environmental Earth Sciences. 2018. V. 77. № 12. P. 443.
5. *Матвиенко А.Ф., Корзунин Г.С., Лоскутов В.Е.Л., Бабкин С.А.* Опыт контроля состояния труб магистральных газопроводов электромагнитно-акустическим методом // Дефектоскопия. 2015. № 9. С. 28–37.
6. *Jianwen Z., Aiguo J., Yanan X., Jianyun H.* Numerical investigation on multiphase erosion-corrosion problem of steel of apparatus at a well outlet in natural gas production // J. Fluids Eng. Trans. of the ASME. 2018. V. 140. P. 12.
7. *Егоров И.Н., Кадхим Д.А.* Применение мобильных роботов при внутритрубной диагностике трубопроводов с переменным поперечным сечением // Электронный журнал «Нефтегазовое дело». 2011. № 3. С. 73–83.
8. *Utanohara Y., Murase M.* Influence of flow velocity and temperature on flow accelerated corrosion rate at an elbow pipe // Nuclear Eng. and Design. 2019. V. 342. P. 20.

9. *Si X., Zhang R., Xu Q., Zhou K.* Corrigendum: Effects of local velocity components on flow-accelerated corrosion at 90° elbow // Materials Research Exp. 2019. V. 6. № 3. [039503, P. 34].
10. *Яхяев Н.Ш., Камолов А.К.* Лабораторные методы измерения и приборы контроля коррозии // Молодой ученый. 2016. № 12. С. 455–458.
11. *Кондратенко В.С., Кобыш А.Н., Рогов А.Ю., Бурляй Д.А., Сакуненко Ю.И.* Способ повышения точности определения местоположения протечки воды с помощью сорбционного гидросенсорного кабеля // Контроль. Диагностика. 2018. № 6. С. 51–55.
12. *Коваленко А.Н.* Системы определения местоположения дефектов на трубопроводе // Контроль. Диагностика. 2016. № 2. С. 27–35.
13. *Трутаев С.Ю., Иншаков Д.В.* Внутритрубный контроль трубопроводов промышленных предприятий // Контроль. Диагностика. 2017. № 12. С. 18–23.
14. *Топорец А.С.* Оптика шероховатой поверхности. Л.: «Машиностроение» Л.О., 1988. 191 с.
15. Методы исследований процессов коррозии [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://protectcor.narod.ru/index0713.htm
16. ГОСТ Р 52870-2007. Национальный стандарт Российской Федерации. Средства отображения информации коллективного пользования. М.: Стандартинформ, 2008. 37 с.
17. *Мирошников М.М.* Теоретические основы оптико-электронных приборов: уч. пособ. для вузов. СПб.: изд. Лань, 2020. 704 с.
18. *Ишанин Г.Г., Челибанов В.П.* Приемники оптического излучения. СПб.: изд. Лань, 2014. 304 с.
19. *Умбетов С.В., Пронин С.П.* Исследование зависимости толщины коррозии металла от спектральных составляющих отраженного света // Ползуновский альманах. Барнаул: изд. АлтГТУ, 2016. № 2. С. 77–79.
20. *Порфирьева Р.Т., Юсупова А.А., Ахметов Т.Г., Маслий А.Н., Хацринов А.И.* Исследование влияния добавки хлорида железа на свойства полисульфидных композиций // Вестник Казанского технологического университета. 2008. № 2. С. 56–60.
21. *Вадзинский Р.* Статистические вычисления в среде Excel. Библиотека пользователя. СПб.: Питер, 2008. 608 с.
22. *Grubbs F.E., Beck G.* Extension of sample sizes and percentage points for significance tests of outlying observations // Technometrics. 1972. V. 14. № 4. P. 847–854.
23. ГОСТ Р 8.736-2011. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. М.: Стандартинформ, 2019. Электронный текст документа подготовлен АО “Кодекс” и сверен по: официальное издание М.: Стандартинформ, 2019. https://beta.docs.cntd.ru/document/1200089016