НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER
УДК 696.1
DOI: 10.22227/1997-0935.2024.12.1977-1989

Особенности развития питтинговой коррозии стальных труб систем водоснабжения

Валентин Александрович Чухин, Николай Алексеевич Макиша
Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Исследована питтинговая коррозия, предшествующая появлению свищей в стальных и чугунных трубопроводах систем водоснабжения. Процесс образования свищей включает следующие фазы: формирование бугорков, концентрирование электролита внутри бугорков, зарождение и развитие стабильных питтингов на поверхности корродирующего металла под бугорками с дальнейшим образованием отверстий в стенках труб.
Материалы и методы. Предметом изучения служили образцы осадка из корродированных труб, находящиеся в сухом виде. Исследование направлено на изучении роли, которую играет один из четырех структурных элементов бугорков — плотный слой. Выявлено двойственное влияние плотного слоя на коррозию. С одной стороны, наличие плотного слоя защищает металл от дальнейшей коррозии, с другой — способствует созданию условий, при которых коррозия из равномерной превращается в питтинговую (точечную).
Результаты. Экспериментально установлено, что в процессе коррозии внутри бугорков постепенно растет концентрация раствора, содержащего как компоненты корродирующего металла (катионы), так и находящейся в трубах воды (анионы). Для объяснения коррозии, протекающей в бугорке, проведено сравнение плотного слоя бугорков с анионообменной мембраной, обладающей селективными свойствами, в результате чего в структуре бугорков повышается концентрация агрессивных хлорид-ионов. При этом за счет гидролиза образовавшегося хлорида железа и снижения pH скорость коррозии значительно возрастает. Также рассмотрены вопросы формирования кристаллических форм продуктов коррозии, которые образуются после извлечения труб из системы водоснабжения.
Выводы. Выявлена определяющая роль, которую играет один из четырех структурных элементов коррозионных бугорков — плотный слой. Предложенная методика изучения коррозионного осадка может быть использована для оценки действия различных ингибиторов коррозии.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: система водоснабжения, коррозия, осадок, питтинг, структура осадка, свищи, стальные и чугунные трубопроводы

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: *Чухин В.А., Макиша Н.А.* Особенности развития питтинговой коррозии стальных труб систем водоснабжения // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 12. С. 1977–1989. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.12.1977-1989

Автор, ответственный за переписку: Николай Алексеевич Макиша, makishana@mgsu.ru.

Development of pitting corrosion of steel pipes of water supply systems

Valentin A. Chukhin, Nikolay A. Makisha
Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. A research was conducted to study pitting corrosion, which precedes the appearance of fistulas in steel and cast-iron pipelines of water supply systems. The process of fistula formation includes the following phases: the formation of tubercles, the concentration of electrolyte inside the tubercles, the origin and development of stable pitting on the surface of corroding metal under the tubercles with further formation of holes in the walls of pipes.
Materials and methods. The study was aimed at studying the role played by the dense layer that is one of the four structural elements of the tubercles. The dual effect of the dense layer on corrosion revealed. On the one hand, the presence of a dense layer protects the metal from further corrosion, on the other hand, it helps to create conditions under which corrosion turns from uniform to pitting.
Results. It was experimentally established that during the corrosion process inside the tubercles, the concentration of the solution containing both components of the corroding metal (cations) and water in the pipes (anions) gradually increases. To explain the corrosion process occurring in the tubercle, a comparison of a dense layer of tubercles with an anion exchange membrane with selective properties was carried out, as a result of which the concentration of aggressive chloride ions increases in the structure of the tubercles. At the same time, due to the hydrolysis of the formed iron chloride and a decrease in pH, the corrosion rate increases significantly. The paper also discusses the formation of crystalline forms of corrosion products that are formed after removing pipes from the water supply system.

© В.А. Чухин, Н.А. Макиша, 2024
Распространяется на основании Creative Commons Attribution Non-Commercial (CC BY-NC)

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • **Том 19. Выпуск 12, 2024**
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • **Volume 19. Issue 12, 2024**

Conclusions. The determining role played by one of the four structural elements of corrosion tubercles — a dense layer — was revealed. The proposed method for studying the corrosive sludge can be used to evaluate the effect of various corrosion inhibitors.

KEYWORDS: water supply system, corrosion, scale, pitting, scale structure, fistulas, steel and cast-iron pipelines

FOR CITATION: Chukhin V.A., Makisha N.A. Development of pitting corrosion of steel pipes of water supply systems. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(12): 1977-1989. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.12.1977-1989 (rus.).

Corresponding author: Nikolay A. Makisha, makishana@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Коррозия стальных и чугунных трубопроводов в системах коммунального водоснабжения приводит к значительному экономическому ущербу. В Российской Федерации ежегодно заменяют сотни километров трубопроводов, которые выводят из эксплуатации из-за интенсивного развития коррозионных процессов. По данным Минстроя РФ, половина аварий и инцидентов в сфере жилищно-коммунального хозяйства приходится на водоснабжение, в частности на порывы водопроводных сетей[1]. Аварии случаются либо из-за превышения нормативного срока эксплуатации трубопроводов, либо вследствие аномально быстрой коррозии, которая развивается в большинстве случаев бессистемно и имеет множество причин[2] [1–3]. По статистическим данным АО «Мосводоканал», особенно часто встречающимися повреждениями стальных трубопроводов в земле являются свищи — 68 %[1].

Проявления коррозии в стальных и чугунных трубах в системах холодного и горячего водоснабжения хорошо изучены[3, 4, 5, 6, 7, 8] [4, 5]. Обычно в процессе эксплуатации на внутренней поверхности трубопроводов появляются бугорки, которые имеют специфическую структуру и состав. К структурным особенностям бугорков относят наличие (со стороны потока воды) четырех элементов: рыхлый поверхностный слой; тонкий плотный внутренний слой, создающий жесткий каркас бугорка; рыхлое ядро, включающее продукты коррозии; корродирующее основание[3, 4, 5, 6, 7, 8] [4, 5]. На рис. 1 представлены фрагменты труб с коррозионными бугорками, причем труба на рис. 1, *а* имеет бугорки с рыхлым ядром, а на рис. 1, *b* — полые бугорки. В некоторых работах отмечается, что внутренняя полость бугорка заполнена раствором, имеющим кислую реакцию[3].

Наиболее изученными элементами коррозионных бугорков, с точки зрения их формирования, являются внешний и плотный слои[3, 4, 6, 7, 8] [4–6]. Структура и состав ядра также известны, но при этом отсутствует информация, какие процессы протекают внутри бугорков в течение их роста. Под бугорками в большинстве случаев присутствуют язвы, однако в некоторых случаях появляются свищи. Ответа на вопрос, почему не все бугорки превращаются в свищи, до сих пор нет.

Можно выделить три направления исследования механизма коррозии. Первое направление связано с воздействием внешнего электрического тока на образцы различных металлов. Сюда также относится исследование питтинговой коррозии с использованием электрохимической импедансной спектроскопии [7, 8]. Второе направление включает натурные исследования коррозии стальных и чугунных труб в реальных условиях [8–11]. Третье направление рассматривает результаты воздействия коррозии на трубопроводы после прекращения эксплуатации объекта или его отдельных элементов. В рамках третьего направления большинство исследователей работают с образцами осадка, находящимися вне естественной среды, т.е. с момента, когда они были извлечены и доставлены в лабораторию для обследования, проходит большой промежуток времени[2, 3, 4, 5, 6, 7, 8] [12].

В работе J. Swietlik и соавт. впервые приведены данные по изучению структурного и кристаллографического состава коррозионных бугорков в условиях, максимально приближенных к естественной внутренней среде. Выявлено преимущественное наличие зеленой ржавчины: соединений железа и различных анионов, отражающих минеральный состав природных вод. Отмечается, что почти во всех образ-

[1] Больше половины аварий и инцидентов в ЖКХ в России приходятся на водоснабжение // ТАСС. URL: https://tass.ru/nedvizhimost/10179099?ysclid=lsuoiy5540934720312

[2] *Sander A., Berghult B., Broo A.E., Johansson E., Hedberg T.* Iron corrosion in drinking water distribution systems — The effect of pH, calcium and hydrogen carbonate // Corrosion Science. 1996. Vol. 38. No. 3. Pp. 443–455.

[3] *Clarke B.H., Aguilera A.M.* Microbiologically influenced corrosion in fire sprinkler systems automatic sprinkler systems : handbook. 2007.

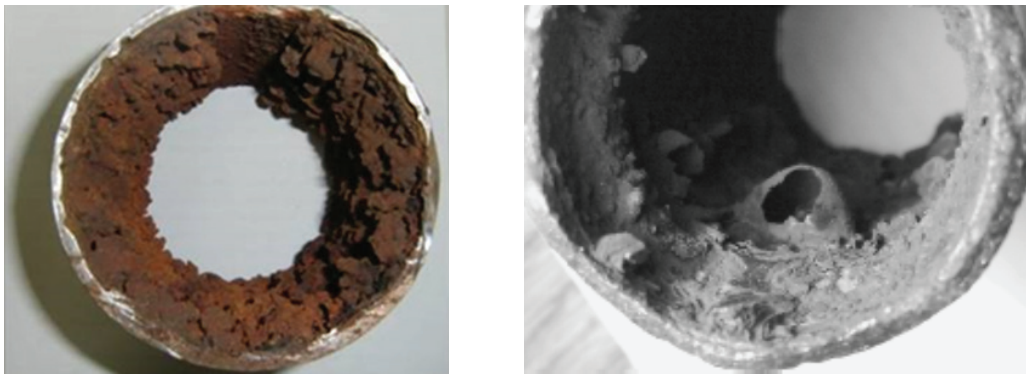
[4] *Sarin P., Snoeyink V., Lytle D., Kriven W.* Iron corrosion scales: model for scale growth, iron release, and colored water formation // Journal of Environmental Engineering. 2004. Vol. 130 (4). Pp. 364–373.

[5] *Gerke T.L., Maynard J.B, Schock M.R., Lytle D.L.* Physiochemical characterization of five iron tubercles from a single drinking water distribution system: Possible new insights on their formation and growth // Corrosion Science. 2008. Vol. 50 (7). Pp. 2030–2039.

[6] *Ray R.I., Lee J.S., Little B.J., Gerke T.* The anatomy of tubercles: A corrosion study in a fresh water estuary // Materials and Corrosion. 2010. Vol. 61 (12). Pp. 993–999.

[7] *Herro H.M.* MIC myths — Does pitting cause MIC? // Corrosion98 : in conference proc. Paper No. 278. Houston, TX : NACE, 1998.

[8] *Sarin P., Snoeyink V.L., Bebee J., Kriven W.M., Clement J.A.* Physico-chemical characteristics of corrosion scales in old iron pipes // Water Research. 2001. Vol. 35 (912). Pp. 2961–2969.



a *b*

Рис. 1. Фрагменты труб с коррозионными бугорками: *a* — стальная оцинкованная труба, Ду 100; *b* — стальная труба из системы противопожарного водопровода[3]

Fig. 1. Pipe fragments with corrosion tubercles: *a* — galvanized steel pipe (DN 100 mm); *b* — steel pipe of firefighting water supply[3]

цах коррозионного осадка обнаружены значительные количества наименее стабильной зеленой ржавчины в хлоридной форме. В ходе проведения эксперимента авторы исследовали связанную воду, т.е. воду, окружающую и частично заполняющую бугорки в трубах. Показано, что высушивание образцов перед анализом существенно изменяет кристаллографические фазы, изначально присутствующие в продуктах коррозии [13].

В табл. 1 представлен химический состав связанной воды. Были исследованы образцы осадка из чугунных водопроводных труб, изъятых из системы наружного водопровода, диаметром 80–120 мм. Содержание хлоридов в водопроводной воде, для приведенного в табл. 1 примера, составляет 130,8 мг/л, величина pH в связанной воде — 5,84 [13].

Из табл. 1 следует, что суммарное солесодержание составляет 3257,66 мг/л, а концентрация хлоридов в связанной воде в 13,8 раз превышает концентрацию хлоридов в исходной водопроводной воде. Сумма катионов равна 45,077 мг-экв/л, сумма анионов — 56,718 мг-экв/л. Неравенство сумм анионов и катионов свидетельствует, что в составе связанной воды содержатся и другие неучтенные катионы. Необходимо также обратить внимание на низкое содержание в связанной воде сульфатов. Наличие в бугорках раствора солей, имеющих высокую концентрацию, требует изучения.

Очевидно, что концентрация солей в растворе, который находится в бугорках, зависит от концентрации солей во внешней воде, протекающей по трубам. Зависимость скорости коррозии от солесодержания воды наблюдают многие исследователи [14–16]. При этом отмечается, что качественный состав воды также играет большую роль, особенно содержание хлоридов [14, 17–20]. Однако тот диапазон солесодержания в воде, который характерен для питьевой воды, поступающей в водопроводную сеть, не может быть причиной развития аномально быстрой локальной коррозии стальных и чугунных водопроводных труб с образованием свищей.

За последние годы в зарубежной литературе появилось много работ, направленных на изучение питтинговой коррозии нержавеющих сталей. В обзоре, посвященном теории питтинговой коррозии, наблюдаемой в металлических материалах, автор делает вывод, что развитие устойчивого питтинга определяется его внутренним химическим составом и высокой концентрацией солей [21]. Писториус и Бурштейн[9], проводя исследования питтинговой коррозии на образцах нержавеющей стали, устано-

[9] *Pistorius P.C., Burstein G.T.* Metastable pitting corrosion of stainless steel and the transition to stability // Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A Physical and Engineering Sciences. 1992. Vol. 341. Pp. 531–559. DOI: 10.1098/rsta.1992.0114

Табл. 1. Химический состав связанной воды [13]

Table 1. Chemical composition of the bound water [13]

Катионы, мг/л/мг-экв/л Cations, mg/l/mg-eq/l	Fe^{2+}	Mn^{2+}	K^+	Na^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}
	960/ 34,38	3,5/ 0,064	3,8/ 0,097	23/ 1,0	12,6/ 1,036	170/ 8,5
Анионы, мг/л/мг-экв/л Anions, mg/l/mg-eq/l	Cl^-	SO_4^{2-}	F^-	Br^-	NO_3^-	–
	1808,2/ 51,007	267,99/ 5,583	0,47/ 0,025	8,1/ 0,101	0,11/ 0,002	–

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 19. Выпуск 12, 2024
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 19. Issue 12, 2024

вили область значений концентрации раствора, находящегося в объеме питтинга, которая предшествует началу роста стабильного питтинга. В другой работе[10] авторы установили, что для нержавеющей стали типа 304 концентрация катионов металлов в растворе должна быть выше 75–80 % насыщения хлоридной соли для предотвращения репассивации. Если концентрация катионов металлов менее 75 % насыщения (т.е. ниже 3 М), анолит недостаточно агрессивен, чтобы поддерживать быстрое растворение сплава, и репассивация неизбежна. Агрессивный анолит, образовавшийся в растущем питтинге, является результатом низкого pH и высокой концентрации хлоридов.

На основании проведенных исследований Писториус и Бурштейн[9] предложили формулу, по которой может быть определена концентрация солей корродирующего металла в питтинге:

$$\Delta C = \left(\frac{2\pi}{3 \cdot z \cdot F \cdot D} \right) \cdot i \cdot a, \qquad (1)$$

где ΔC — разность концентраций между внутренней поверхностью питтинга и объемом раствора вдали от питтинга; z — валентность металла; F — число Фарадея; D — коэффициент диффузии катионов металлов в растворе; i — плотность тока; a — радиус питтинга.

Уравнение (1) показывает, что для поддержания роста питтингов требуется минимальное произведение плотности тока (i) и глубины или радиуса питтинга (a). При подстановке ΔC = 3 М, z = 2,19, F = = 96 485 Кл моль$^{-1}$ и $D = 10^{-9}$ м^{2}с$^{-1}$ критическое значение $i \cdot a$ составляет 0,3 А·м$^{-1}$. Диффузионный анализ определяет узкий диапазон произведения $i \cdot a$, в котором питтинги стабильны. Нижний предел устанавливается, как указано выше, с требованием, чтобы ΔC превышало 3 М; верхний предел определяется растворимостью соли металла. При концентрации насыщения соли хлорида железа, равной 4,2 М, условие стабильного роста питтинга выражается как:

$$0{,}3A \cdot m^{-1} \le i \cdot a \le 0{,}6A \cdot m^{-1}. \qquad (2)$$

В более поздней работе Писториус и Бурштейн[11] уточнили роль перфорированного покрытия над питтингом, которое «служит дополнительным барьером для диффузии и поддерживает достаточно агрессивную концентрацию анолита. Небольшие разрывы этого покрытия по мере роста метастабильного питтинга увеличивают скорость диффузии без разбавления анолита питтинга и поддерживают рост питтинга. Такие разрывы могут возникать из-за эффекта разницы осмотического давления, развивающегося через покрытие». Роль твердой солевой пленки в формировании питтинговой коррозии отмечают многие авторы. Солевая пленка может образовываться на поверхности металла из-за условий пересыщения, когда концентрация ионов в растворе питтинга растет из-за увеличения плотности тока [22]. Шайнер и Хелмих попытались смоделировать перфорированное покрытие и его влияние на диффузионные процессы[12]. Важность перфорированного покрытия подчеркивалась и в других исследованиях [23, 24], однако его роль до конца не выяснена.

Несмотря на то что приведенные примеры дают необходимую информацию о механизме питтинговой коррозии, следует отметить, что в проведенных исследованиях авторы изначально работали с растворами солей с высокой концентрацией, при этом не обсуждая вопроса, каким образом создается требуемая концентрация солей на границе металл–раствор, что особенно важно при наличии внешней воды с меньшим солесодержанием. Поэтому основная цель настоящей статьи связана с выяснением механизма, который обеспечивает реализацию подходящих условий для возникновения и развития стабильной питтинговой коррозии под бугорками.

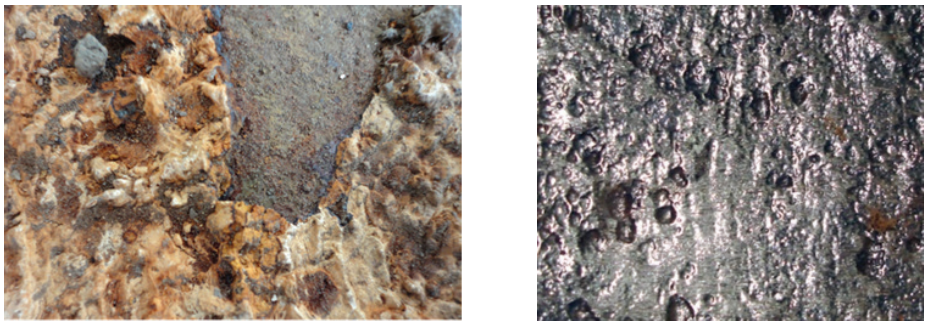
МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Предметом изучения в настоящей работе служили образцы осадка из корродированных труб, находящиеся в сухом виде. Проведение эксперимента заключалось в извлечении бугорков из дефектных труб и выполнении анализа растворимых компонентов осадка, находящихся в бугорках. Внешний вид внутренней поверхности фрагмента стальной трубы без покрытия Ду 300, извлеченной из системы наружного водопровода г. Москвы после 36 лет эксплуатации, представлен на рис. 2. Стальная поверхность под слоем коррозионных отложений имеет следы язвенной коррозии, а также точечные повреждения на фоне плоских следов, глубина точечных повреждений — от 1,0 до 3,0 мм, диаметр — от 2 до 5 мм. Кроме того, имеются следы обширной коррозии: толщину «съеденного» металла можно оценить по оставшимся участкам: 0,5–1,0 мм. Коррозионные отложения на поверхности трубы — сплошные, плотные, прочные, с овальными бугорками размером 5 × 5–10 × 10 мм. Высота бугорков 5–8 мм. Бугорки были отделены от стенки трубы и разделены на три группы по следующему признаку: к 1-й группе отнесены бугорки, имеющие полный набор структурных элементов: наружный и плотный слои, ядро и подошву. Ко 2-й группе — без подошвы, к 3-й — бугорки, наиболее деформированные при удалении из трубы.

[10] *Gaudet G.T., Mo W.T., Hatton T.A., Tester J.W., Tilly J., Isaacs H.S. et al.* Mass transfer and electrochemical kinetic interactions in localized pitting corrosion // Engineering, Chemistry, Materials Science J. 1986. Pp. 949–958.

[11] *Pistorius P.C., Burstein G.T.* Growth of corrosion pits on stainless steel in chloride solution containing dilute sulphate // Corrosion Science. 1992. Vol. 33. Pp. 1885–1897. DOI: 10.1016/0010-938x(92)90191-5

[12] *Scheiner S., Hellmich C.* Stable pitting corrosion of stainless steel as diffusion-controlled dissolution process with a sharp moving electrode boundary // Corrosion Science. 2007. Vol. 49. Pp. 319–346. DOI: 10.1016/j.corsci.2006.03.019



a *b*

Рис. 2. Фотографии внутренней поверхности трубы (Ду 300 мм): *a* — углеродистая сталь с осадком; *b* — фотография внутренней поверхности после удаления слоя коррозионных отложений (увеличение 2х)

Fig. 2. Photos of the inner surface of the pipe (DN 300 mm): *a* — carbon steel with sludge; *b* — photo of the inner surface after removing the layer of corrosion scale (magnification 2x)

Номера осадка в табл. 2, 3 — 1, 2 и 3 соответственно. На рис. 2 приведены фотографии внутренней поверхности трубы.

Для изучения состава растворов использовали стандартные методики и современное аналитическое оборудование. Содержание хлоридов, кальция и магния определяли титрованием стандартными растворами; железо, сульфаты и нитраты измеряли на спектрофотометре Lange 5000, pH — на pH-метре Hanna HI 2215. Микрофотографии осадка получены на электронном микроскопе Quanta FEI 250 в режиме вторичных электронов без напыления при ускоряющем напряжении 10–25 кВ.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведение экспериментов выполняли в следующей последовательности. Навеску извлеченных из труб бугорков с удаленными пылевидными фракциями помещали в мерный цилиндр с определенным объемом дистиллированной воды V_1 и сразу измеряли объем воды в цилиндре вместе с осадком V_2. Затем через 48 ч снова фиксировали объем воды в цилиндре V_3, который уменьшился за счет поглощения бугорками. По этим данным рассчитывали плотность материала бугорков, а также объем воды, который находился в осадке V_4 в момент извлечения из цилиндра: $V_4 = V_2 - V_3$. Кратность концентрирования K определяли как частное от деления V_1 на V_4. В табл. 2 приведены значения плотности осадка и объем сорбированной воды V_4.

При проведении исследования было сделано предположение, что объем V_4 равен объему раствора, который находился в бугорках до момента извлечения трубы из грунта. При этом дистиллированная вода, проникая в поры, растворяет хорошо растворимые соли, находящиеся в структуре бугорков, образуя смешанный раствор десорбированных солей. Таким образом, за период 48 ч происходит выравнивание концентрации солей в цилиндре и в бугорках. Относительно низкая плотность осадка (2,65–2,87 г/см^3) по сравнению с плотностью оксидов и гидроксидов железа свидетельствует о наличии пор и пустот в структуре бугорков.

В табл. 3 приведены расчетные значения концентраций ионов в растворе, находившемся внутри бугорков, определенные путем умножения концентрации солей в пробе воды после растворения и десорбции солей из бугорков на коэффициент концентрирования K. Десорбция солей из бугорков проводилась однократно.

По значению кислотности каждой пробы с учетом коэффициента концентрирования расчетным путем были установлены значения pH растворов, находящихся непосредственно в порах бугорков в момент

Табл. 2. Результаты измерений поглощения дистиллированной воды осадком

Table 2. Results of measurements of distilled water absorption by sludge

Номер Пробы Specimen number	Вес осадка, г Sediment weight, g	Объем дистиллята в мерном цилиндре, мл Volume of distillate in the measuring cylinder, ml				Коэффициент концентрирования K Concentration coefficient K	Плотность осадка, г/см^3 Sludge density, g/cm^3
		без осадка V_1 free of sludge V_1	с осадком V_2 with sludge V_2	через 48 ч V_3 after 48 h V_3	поглощенного осадком V_4 absorbed by sludge V_4		
1	50,4095	150	173	170	3	50,0	2,52
2	50,2405	150	171	167,5	3,5	42,8	2,87
3	50,2026	150	172	168,5	3,5	42,8	2,71

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • **Том 19. Выпуск 12, 2024**
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • **Volume 19. Issue 12, 2024**

Табл. 3. Расчетный состав раствора, находившегося внутри бугорков

Table 3. Calculated composition of the solution inside the tubercles

Номер пробы Specimen number	pH */** pH */**	Концентрация, мг-экв/л** / Concentration, mg-eq/l**						
		H^+	Cl^-	SO_4^{2-}	NO_3^-	Fe^{2+}	Mg^{2+}	Ca^{2+}
1	3,32/1,63	23,93	756	1,0	0,24	5,05	150	550
2	3,73/2,10	7,97	647	0	0,83	3,59	171	471
3	3,28/1,65	22,46	749	0	0,97	5,91	170	514

Примечание: * — определение в пробе воды с десорбированными солями; ** — расчетные значения.
Note: * — determination in water specimen with desorbed salts; ** — calculated values.

прекращения эксплуатации трубопровода. Данные табл. 3 подтверждают, что в структуре бугорков находился многокомпонентный раствор солей, суммарная концентрация которых значительно превосходит содержание солей в исходной воде, протекающей по трубопроводу.

В дополнение к определению количественного состава воды оценивался качественный состав десорбированных солей. Для этого 3 мл воды (V_3) выпаривали на подложке из алюминиевой фольги в сушильном шкафу при температуре 80 °С. Сухой осадок изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа Quanta FEI 250 и энергодисперсионного спектрального анализатора EDAX (рис. 3).

Сведения, полученные с помощью электронного микроскопа, показывают, что основными компонентами раствора являются хлориды, нитраты и кальций. Вклад каждого из остальных элементов оценивается в 0,3–1,5 %.

Анализ полученных данных, структурных особенностей бугорков и теоретических представлений о протекающих внутри процессах позволяет сделать вывод о последовательности развития питтинговой коррозии внутри водопроводных труб. При контакте с водой поверхность металла поляризуется и на ней появляются анодные и катодные участки. На анодных участках растет рыхлый слой гидроксидов железа с иммобилизованной водой. Процесс коррозии контролируется кислородной деполяризацией. Первая фаза — формирование бугорков, включает закрепление основания бугорка на внутренней поверхности трубы, образование плотного слоя, прочно прилегающего к металлу. В работе [25] было сделано наблюдение, что контур бугорка на поверхности металла формируется под действием протекающей по трубам воды и закрепляется через 60–70 суток. По мере снижения концентрации кислорода на поверхности металла в слое осадка происходит изменение окислительно-восстановительной среды, что влечет за собой формирование плотного слоя, подробно описанного в статье P. Sarin и соавт.[4], и собственно бугорка. Плотный слой на этой стадии — относительно проницаемый для ионов и воды. Преобразование гидроксидов железа в магнетит, формирующий плотный слой, протекает с дегидратацией гидроксидов и приводит к появлению свободной воды внутри бугорка. При отсутствии кислорода деполяризатором служат ионы водорода, которые на катодных

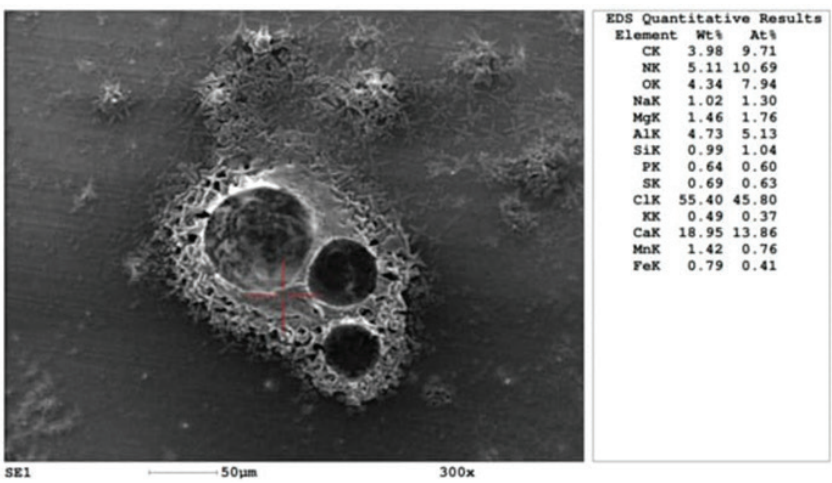


Рис. 3. Микрофотография и элементный состав (в области, отмеченной красным крестом) десорбированной воды с десорбированными солями

Fig. 3. Microphotograph and elemental composition (in the area marked with a red cross) of desorbed water with desorbed salts

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 19. Выпуск 12, 2024
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 19. Issue 12, 2024

участках металла внутри бугорка восстанавливаются до молекулярного водорода, формирующего «дымоходы» в структуре бугорка[5].

Ко второй фазе следует отнести процесс роста концентрации солей внутри бугорка. Как следует из литературного обзора, приведенного во введении, питтинг является стабильным при очень высокой концентрации раствора, превышающей 3 моль/л. Таким образом, необходимо объяснить, как плотный слой обеспечивает не только перенос ионов и воды, но и появление раствора с высокой концентрацией.

Хорошо изученным методом получения высококонцентрированных растворов под действием постоянного электрического тока является электродиализ (не имеющий непосредственного отношения к коррозии, но отражающий смысл происходящего явления) с использованием аппаратов с «замкнутыми» рассольными камерами, в которые не предусмотрена подача воды извне, а концентрирование происходит за счет осмотического и электроосмотического переноса гидратированных ионов через селективно проницаемые анионитовые и катионитовые мембраны[13, 14, 15, 16].

Так как анодом при коррозии служит металл, то для нейтрализации заряда катионов железа в растворе требуются анионы. Следовательно, в этом случае плотный слой должен выполнять роль анионитовой мембраны. На основании проведенных исследований по определению качественного состава десорбированных солей можно утверждать, что плотный слой обладает селективными свойствами, предпочтительно пропуская одновалентные хлорид-ионы (табл. 3). Таким образом, повышение концентрации катионов железа внутри бугорка за счет коррозии обеспечивается переносом эквивалентного количества гидратированных хлорид-ионов, а также сульфатов и нитратов в незначительных количествах, вызывая рост общей концентрации электролита в бугорке и усиление его агрессивных свойств.

Экспериментально установлено, что концентрация раствора солей, которая может быть достигнута в ходе мембранного концентрирования, растет с увеличением плотности тока и селективности мембран. Это положение совпадает с наблюдениями Писториуса и Бурштейна о зависимости концентрации электролита внутри питтинга от плотности тока[9, 11]. Можно предположить, что высокая концентрация раствора в бугорке связана с концентрацией фиксированных зарядов в плотном слое. Фиксированные ионы внедрены в пустоты кристаллической решетки плотного слоя, что происходит в процессе его формирования. Из теории электродиализа известно, что концентрация фиксированных ионов в структуре мембран ограничивает максимальную концентрацию рассолов на электродиализных аппаратах, а также предотвращает обратную диффузию солей из камер концентрирования в камеры обессоливания. По аналогии с электродиализом высокая концентрация фиксированных катионов в плотном слое бугорков препятствует диффузии ионов железа в протекающую вне бугорка воду, а концентрация электролита в структуре бугорка может достигать высоких значений.

Очевидно, можно утверждать, что проницаемость плотного слоя формируется на стадии его образования в процессе переноса гидратированных анионов, движущихся к растворимому аноду. При этом внутри бугорка растет давление, вызванное электроосмотическим переносом воды, которое оказывает расклинивающее давление на стенки плотного слоя, способствуя его росту, а в некоторых случаях, и его разрушению.

Селективность плотного слоя по отношению к анионам можно подтвердить, исходя из анализа качества воды с десорбированными солями и воды в системе водоснабжения в период эксплуатации трубопровода. Так, например, для Москвы показатели качества воды имеют следующие значения[17]: сухой остаток 234–300 мг/л, жесткость 2,7–4,7 мг-экв/л, pH 7,1–8,6, хлориды 11–22 мг/л, сульфаты 9–33 мг/л, щелочность 1,5–4,4 мг-экв/л, железо 0,05–0,2, нитраты 0,5–3 мг/л. Содержание хлоридов в водопроводной воде составляет не более 10 % от анионного состава, в то время как в составе десорбированных анионов содержание хлоридов превышает 99 %. Возможным доказательством наличия у плотного слоя селективных свойств является ингибирующее действие отдельных анионов на потенциал питтингообразования, отмечаемое в работе M. Ergun и соавт.[18], а также снижение скорости коррозии при использовании различных ингибиторов [26].

К третьей фазе относятся процессы, протекающие на стадии, предшествующей образованию свища. Эту стадию можно представить как совокупность воздействия на поверхность металла множества питтингов, формирующихся на ограниченной поверхности металла непосредственно под плотным слоем бугорка. Коррозия внутри бугорка становится более интенсивной, так как с металлом контактирует не исходная водопроводная вода, а концентрированный рас-

[13] *Tsunoda Y.* Elecktrodialysis for producing brine concentrates seawater // First International Simposium on Water Desalination. Washington, SWD/31, 1965.

[14] *Garza G., Kedem O.* Electroosmotic pumping in unit cells // 5th international symposiumon fresh water from the sea. 1976. Vol. 3. Pp. 79–87.

[15] *Smagin V.N., Chukhin V.A., Kharchuck V.A.* Technological account of electrodialysis apparatus for concentration // Desalination. 1983. Vol. 46. No. 1–3. Pp. 283–290.

[16] *Чухин В.А.* Разработка и исследование метода предельного концентрирования растворов солей на электродиализных аппаратах : автореф. дис. … канд. техн. наук. М., 1979.

[17] Мосводоканал. URL: https://www.mosvodokanal.ru/

[18] *Ergun M., Turan A.Y.* Pitting potential and protection potential of carbon steel for chloride ion and the effectiveness of different inhibiting anions // Corrosion Science. 1991. Vol. 32. No. 10. Pp. 1137–1142. DOI: 10.1016/0010-938X(91)90098-A

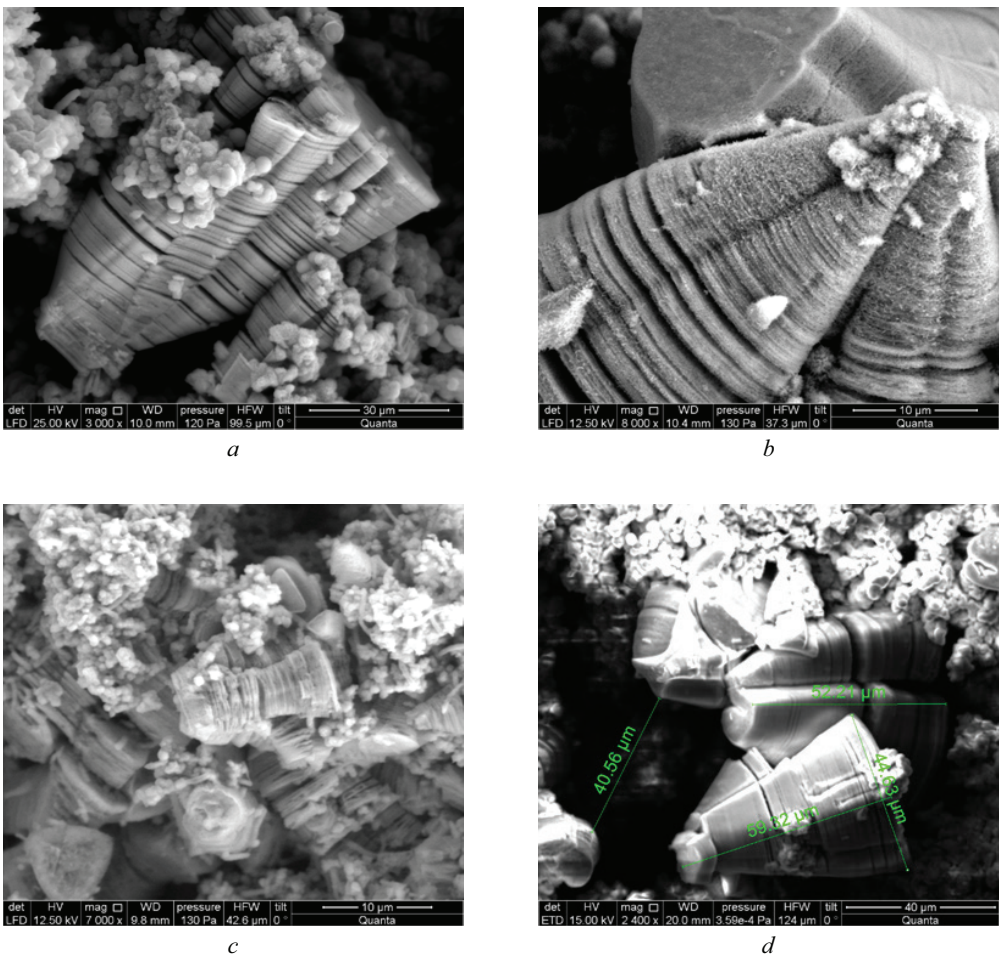
Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 19. Выпуск 12, 2024
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 19. Issue 12, 2024

твор хлорида железа $FeCl_2$. Коррозия поддерживается в основном за счет воды, которая находится в объеме бугорка. При этом следует отметить роль гидролиза хлорида железа с образованием из воды ионов H^+, приводящих к понижению pH, и OH^-, которые снижают рост концентрации железа, образуя кристаллические формы $Fe(OH)_n$. Условием появления свища является достаточное количество воды в структуре ядра бугорка, необходимой на окисление ионов железа с учетом толщины оставшегося металла. При недостатке воды отдельные питтинги и в целом бугорки становятся пассивными. Поэтому трубы, имеющие толстую стенку, более устойчивы к коррозии.

В начале статьи были показаны фотографии труб с различными по структуре бугорками. Так как процесс коррозии при сформированном бугорке протекает на площади, ограниченной контуром бугорка, то внутри бугорка с различным анионным составом происходит накопление солей железа. При этом наступают благоприятные условия для выпадения в осадок оксидов железа, имеющих низкую растворимость.

На рис. 4 представлены фотографии, которые могут служить пояснением к последней стадии развития питтинговой коррозии. Металл под бугорком разрушается с образованием кристаллических структур в виде конусов, копируя форму питтинга.

Из рис. 4 видно, что конические элементы образуются в большом количестве. Хаотичное расположение отдельных кристаллических структур свидетельствует об их взаимном перемещении внутри ядра бугорка при продолжающейся коррозии. В случае, если объем воды в структуре бугорка является достаточным, то питтинг может превратиться в свищ. В противном случае процесс коррозии может прекратиться полностью или остановиться на некоторый промежуток времени в соответствии с внешними условиями. Следует отметить, что размеры конических элементов, приведенных на рис. 4, могут быть использованы для расчетов концентрации электролита по формулам (1) и (2). Кристаллические структуры заполняют внутренний объем бугорка в течение всего срока эксплуатации трубопровода, поэтому нали-

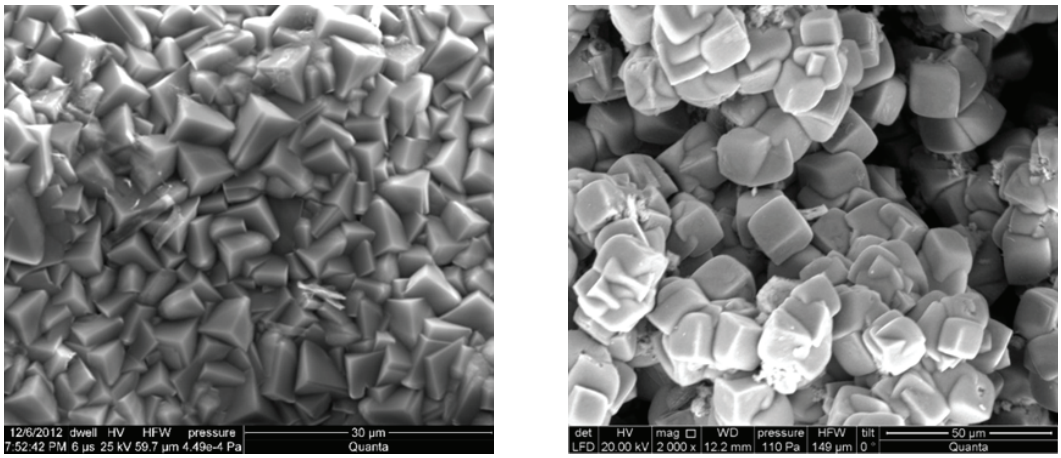


a *b* *c* *d*

Рис. 4. Структура осадка, формирующаяся в стальных трубах при образовании свищей, размер линейки под фотографией: *a* — 30 мкм; *b*, *c* — 10 мкм; *d* — 40 мкм

Fig. 4. Structure of sludge formed in steel pipes during fistula formation, ruler size under the photo: *a* — 30 µm; *b*, *c* — 10 µm; *d* — 40 µm

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 19. Выпуск 12, 2024
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 19. Issue 12, 2024



a *b*

Рис. 5. Микрофотографии осадка в трубах холодного (*a*) и горячего (*b*) водоснабжения

Fig. 5. Microphotographs of sludge inside the pipe of cold water (*a*) and hot water (*b*) supply systems

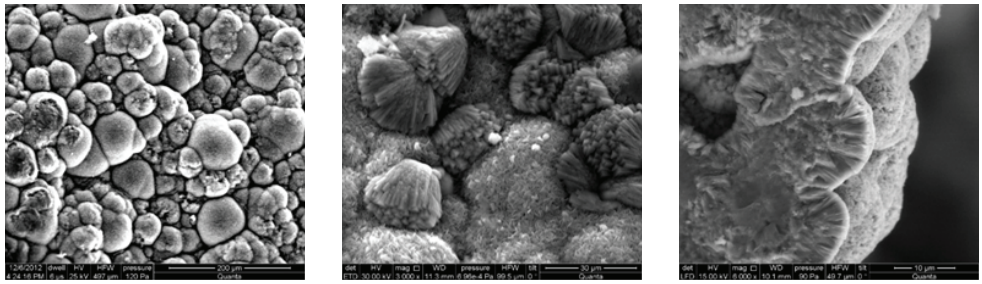


Рис. 6. Микрофотографии осадка, формирующегося при высыхании слоя (подошва) на границе с металлической основой трубы

Fig. 6. Microphotographs of sludge formed during drying of the layer (sole) at the boundary with the metal base of the pipe

чие плотных бугорков характерно для труб, бывших в эксплуатации длительное время.

Дополнительную информацию о процессе формирования осадка в трубах может дать анализ фотографий, полученных после извлечения бугорков из труб, бывших в эксплуатации. На рис. 5 представлены микрофотографии осадка, изъятого из стальной трубы без покрытия системы холодного водоснабжения Ду 900 мм (г. Москва) (рис. 5, *a*) и стальной оцинкованной трубы Ду 100 из системы горячего водоснабжения (рис. 5, *b*).

Основной химический состав представлен карбонатом железа (сидерит $FeCO_3$). Учитывая, что внутри бугорка среда сильно кислая, невозможно представить образование кристаллов сидерита. Но при медленном высыхании раствора и насыщении его атмосферным углекислым газом сидерит имеет возможность образоваться в насыщенном растворе хлорида железа.

На рис. 6 показаны фотографии, которые относятся к самому нижнему слою осадка, или по нашей классификации — подошвы [27]. Подошва бугорка образуется при кристаллизации солей железа после извлечения трубы и удаления из нее воды.

Полусферические кристаллы осадка, копирующие поверхность металла, образуются при значительном перенасыщении раствора и при отсутствии пространственных ограничений, что подтверждает наличие высокой концентрации солей железа во внутреннем объеме бугорков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Развитие коррозии в стальных трубах систем водоснабжения с образованием свищей, как правило, протекает в несколько стадий. На первой стадии развивается язвенная коррозия, сопровождаемая ростом бугорков, перекрытых плотным слоем продуктов коррозии (магнетитом), на последующих стадиях коррозия развивается по питтинговому механизму внутри бугорков. Появлению свищей предшествует рост концентрации электролита внутри бугорков, что связано с особенностями структуры плотного слоя, который в процессе своего образования приобретает свойства селективной мембраны.

Повышение концентрации электролита на поверхности металла под бугорком интенсифицирует процесс питтинговой коррозии, переводя метастабильные питтинги в стабильные. На последнем этапе рост бугорка прекращается, процесс становится авто-

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 19. Выпуск 12, 2024
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 19. Issue 12, 2024

каталитическим. Условием появления свища является наличие достаточного количества воды в структуре ядра бугорка, необходимого на окисление ионов железа с учетом толщины оставшегося металла. При недостатке воды отдельные питтинги и в целом бугорки становятся пассивными. Поэтому трубы, имеющие более толстую стенку, более устойчивы к коррозии. На взгляд авторов, плотный слой в бугорках стальных труб и перфорированное покрытие в структуре питтингов на нержавеющих сталях обладают идентичными свойствами, обеспечивая создание критических условий для интенсивной коррозии.

Результаты исследования предлагают новое направление для оценки влияния плотного слоя на коррозию стальных и чугунных труб и появление свищей и могут быть использованы для лучшего понимания механизма коррозии. При этом необходимо изучать не только структуру, но и свойства плотного слоя, что позволит определить направления воздействия на протекающие процессы коррозии.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Delaunois F., Tosar F., Vitry V.* Corrosion behaviour and biocorrosion of galvanized steel water distribution systems // Bioelectrochemistry. 2014. Vol. 97. Pp. 110–119. DOI: 10.1016/j.bioelechem.2014.01.003

2. *Zhong H., Tang Y., Yan H., Zhang Y., Dong L., Wang B.* Corrosion of pipelines in urban water systems: Current research status and future trends based on bibliometric analysis // Journal of Water Process Engineering. 2023. Vol. 56. P. 104288 DOI: 10.1016/j.jwpe.2023.104288

3. *Abdalsamed I., Amar I.A., Sharif A., Ghanem M.A., Farouj A.A., Kawan J.A.* Scale corrosion of metallic materials in water systems : a review // Journal of Chemical Reviews. 2022. Vol. 4. Issue 1. Pp. 67–80. DOI: 10.22034/JCR.2022.326770.1141

4. *Chukhin V.A., Andrianov A.P.* Formation mechanism of iron tubercles during corrosion of water supply pipes // International Journal of Corrosion and Scale Inhibition. 2022. Vol. 11. Issue 2. DOI: 10.17675/2305-6894-2022-11-2-24

5. *Saadawy M.* Kinetics of Pitting Dissolution of Austenitic Stainless Steel 304 in Sodium Chloride Solution // ISRN Corrosion. 2012. Vol. 2012. Pp. 1–5. DOI: 10.5402/2012/916367

6. *Guo H., Chen H., Zhang H., Liu X., Chen Y., Tian Y. et al.* Study on Growth of Corrosion Scale on Various Iron Based Materials (Grey cast iron/Carbon steel/Ductile Iron) in Water Distribution Systems // International Journal of Electrochemical Science. 2020. Vol. 15. Issue 9. Pp. 8479–8497. DOI: 10.20964/2020.09.80

7. *Biryukov A.I., Kozaderov O.A., Galin R.G., Zakharyevich D.A., Zhivulin V.E.* Details of the mechanism of dissolution of iron–zinc coatings based on the δ-phase in acidic media // International Journal of Corrosion and Scale Inhibition. 2020. DOI: 10.17675/2305-6894-2020-9-4-18

8. *Martins C.M. B., Moreira J.L., Martins J.I.* Corrosion in water supply pipe stainless steel 304 and a supply line of helium in stainless steel 316 // Engineering Failure Analysis. 2014. Vol. 39. Pp. 65–71. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2014.01.017

9. *Li K., Sun L., Cao W., Chen S., Chen Z., Wang Y. et al.* Pitting corrosion of 304 stainless steel in secondary water supply system // Corrosion Communications. 2022. Vol. 7. Pp. 43–50. DOI: 10.1016/j.corcom.2021.11.010

10. *Zhao L., Liu D., Zhang H., Wang J., Zhang X., Liu S. et al.* Study on electrochemical reduction mechanisms of iron oxides in pipe scale in drinking water distribution system // Water Research. 2023. Vol. 231. P. 119597. DOI: 10.1016/j.watres.2023.119597

11. *Durrani F., Wesley R., Srikandarajah V., Eftekhari M., Munn S.* Predicting Corrosion rate in Chilled HVAC Pipe Network: Coupon vs Linear Polarisation Resistance method // Engineering Failure Analysis. 2020. Vol. 109. P. 104261. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2019.104261

12. *Zhao L., Liu D., Zhang H., Wang J., Zhang X., Liu S. et al.* Study on electrochemical reduction mechanisms of iron oxides in pipe scale in drinking water distribution system // Water Research. 2023. Vol. 231. P. 119597. DOI: 10.1016/j.watres.2023.119597

13. *Swietlik J., Raczyk-Stanisławiak U., Piszora P., Nawrocki J.* Corrosion in drinking water pipes: The importance of green rusts // Water Research. 2012. Vol. 46. Pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.watres.2011.10.006

14. *Smith F., Brownlie F., Hodgkiess T., Toumpis A., Pearson A., Galloway A.M.* Effect of salinity on the corrosive wear behaviour of engineering steels in aqueous solutions // Wear. 2020. Vol. 462–463. P. 203515. DOI: 10.1016/j.wear.2020.203515

15. *Hasan B.* Effect of salt content on the corrosion rate of steel pipe in turbulently flowing solutions // Al-Nahrain Journal for Engineering Sciences. 2010. Vol. 13. Issue 1. Pp. 66–73.

16. *Hu J., Dong H., Xu Q., Ling W., Qu J., Qiang Z.* Impacts of water quality on the corrosion of cast iron pipes for water distribution and proposed source water switch strategy // Water Research. 2018. Vol. 129. Pp. 428–435. DOI: 10.1016/j.watres.2017.10.065

17. *Soltis J., Krouse D., Laycock N.* Localised dissolution of iron in buffered and non-buffered chloride containing solutions // Corrosion Science. 2011. Vol. 53. Issue 6. Pp. 2152–2160. DOI: 10.1016/j.corsci.2011.02.037

18. *Lytle D.A., Tang M., Francis A.T., O'Donnell A.J., Newton J.L.* The effect of chloride, sulfate and dissolved inorganic carbon on iron release from cast iron // Water Re-

search. 2020. Vol. 183. P. 116037. DOI: 10.1016/j.watres.2020.116037

19. *Chen X., Liu H., Sun X., Zan B., Liang M.* Chloride corrosion behavior on heating pipeline made by AISI 304 and 316 in reclaimed water // RSC Advances. 2021. Vol. 11. Issue 61. Pp. 38765–38773. DOI: 10.1039/D1RA-06695A

20. *Biryukov A.I., Zakharyevich D.A., Galin R.G., Batmanova T.V., Zhivulin V.E., Ulyanov M.N. et al.* Corrosion of diffusion zinc coatings in neutral chloride solutions // International Journal of Corrosion and Scale Inhibition. 2024. Vol. 13. Issue 1. DOI: 10.17675/2305-6894-2024-13-1-17

21. *Soltis J.* Passivity breakdown, pit initiation and propagation of pits in metallic materials : review // Corrosion Science. 2015. Vol. 90. Pp. 5–22. DOI: 10.1016/j.corsci.2014.10.006

22. *Li K., Sun L., Cao W., Chen S., Chen Z., Wang Y. et al.* Pitting corrosion of 304 stainless steel in secondary water supply system // Corrosion Communications. 2022. Vol. 7. Pp. 43–50 DOI: 10.1016/j.corcom.2021.11.010

23. *Heurtault S., Robin R., Rouillard F., Vivier V.* On the propagation of open and covered pit in 316l stainless steel // Electrochimica Acta. 2016. Vol. 203. Pp. 316–325. DOI: 10.1016/j.electacta.2016.01.084

24. *Lin H., Hu Y.* Impact of different source-water switching patterns on the stability of drinking water in an estuarine urban water distribution system // Environmental Science and Pollution Research. 2022. Vol. 29. Issue 32. Pp. 49059–49069. DOI: 10.1007/s11356-022-19117-x

25. *Чухин В.А., Андрианов А.П.* Волновая природа бугорковой коррозии в стальных и чугунных трубах систем водоснабжения // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. № 3 (114). С. 385–399. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.3.385-399

26. *Azamian I., Allahkaram S.R., Rezaee S.* Autonomous-healing and smart anti-corrosion mechanism of polyurethane embedded with a novel synthesized microcapsule containing sodium dodecyl sulfate as a corrosion inhibitor // RSC Advances. 2022. Vol. 12. Issue 22. Pp. 14299–14314. DOI: 10.1039/d2ra01131j

27. *Андрианов А.П., Чухин В.А.* Анализ морфологии, состава и условий формирования коррозионных отложений в водопроводных трубах // Вода и экология: проблемы и решения. 2016. № 3 (67). С. 18–34. EDN WMFKNH.

Поступила в редакцию 21 октября 2024 г.
Принята в доработанном виде 21 октября 2024 г.
Одобрена для публикации 30 октября 2024 г.

Об авторах: **Валентин Александрович Чухин** — кандидат технических наук, доцент, научный сотрудник научно-образовательного центра «Водоснабжение и водоотведение»; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 717961, Scopus: 57194340218, ORCID: 0000-0003-4616-2489; sigma85@yandex.ru;

Николай Алексеевич Макиша — кандидат технических наук, доцент, директор научно-образовательного центра «Водоснабжение и водоотведение»; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 644678, Scopus: 55841479500, ResearcherID: I-1562-2015, ORCID: 0000-0003-2567-4450; makishana@mgsu.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Delaunois F., Tosar F., Vitry V. Corrosion behaviour and biocorrosion of galvanized steel water distribution systems. *Bioelectrochemistry.* 2014; 97:110-119. DOI: 10.1016/j.bioelechem.2014.01.003

2. Zhong H., Tang Y., Yan H., Zhang Y., Dong L., Wang B. Corrosion of pipelines in urban water systems: Current research status and future trends based on bibliometric analysis. *Journal of Water Process Engineering.* 2023; 56:104288 DOI: 10.1016/j.jwpe.2023.104288

3. Abdalsamed I., Amar I.A., Sharif A., Ghanem M.A., Farouj A.A., Kawan J.A. Scale Corrosion of Metallic Materials in Water Systems : a review. *Journal of Chemical Reviews.* 2022; 4(1):67-80. DOI: 10.22034/JCR.2022.326770.1141

4. Chukhin V.A., Andrianov A.P. Formation mechanism of iron tubercles during corrosion of water supply pipes. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition.* 2022; 11(2). DOI: 10.17675/2305-6894-2022-11-2-24

5. Saadawy M. Kinetics of Pitting Dissolution of Austenitic Stainless Steel 304 in Sodium Chloride Solution. *ISRN Corrosion.* 2012; 2012:1-5. DOI: 10.5402/2012/916367

6. Guo H., Chen H., Zhang H., Liu X., Chen Y., Tian Y. et al. Study on growth of corrosion scale on various iron based materials (grey cast iron/carbon steel/ductile iron) in water distribution systems. *International Journal of Electrochemical Science.* 2020; 15(9):8479-8497. DOI: 10.20964/2020.09.80

7. Biryukov A.I., Kozaderov O.A., Galin R.G., Zakharyevich D.A., Zhivulin V.E. Details of the mechanism of dissolution of iron–zinc coatings based on the δ-phase in acidic media. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition.* 2020. DOI: 10.17675/2305-6894-2020-9-4-18

8. Martins C.M. B., Moreira J.L., Martins J.I. Corrosion in water supply pipe stainless steel 304 and a supply line of helium in stainless steel 316. *Engineering Failure Analysis.* 2014; 39:65-71. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2014.01.017

9. Li K., Sun L., Cao W., Chen S., Chen Z., Wang Y. et al. Pitting corrosion of 304 stainless steel in secondary water supply system. *Corrosion Communications.* 2022; 7:43-50. DOI: 10.1016/j.corcom.2021.11.010

10. Zhao L., Liu D., Zhang H., Wang J., Zhang X., Liu S. et al. Study on electrochemical reduction mechanisms of iron oxides in pipe scale in drinking water distribution system. *Water Research.* 2023; 231:119597. DOI: 10.1016/j.watres.2023.119597

11. Durrani F., Wesley R., Srikandarajah V., Eftekhari M., Munn S. Predicting corrosion rate in chilled HVAC pipe network: coupon vs linear polarisation resistance method. *Engineering Failure Analysis.* 2020; 109:104261. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2019.104261

12. Zhao L., Liu D., Zhang H., Wang J., Zhang X., Liu S. et al. Study on electrochemical reduction mechanisms of iron oxides in pipe scale in drinking water distribution system. *Water Research.* 2023; 231:119597. DOI: 10.1016/j.watres.2023.119597

13. Swietlik J., Raczyk-Stanisławiak U., Piszora P., Nawrocki J. Corrosion in drinking water pipes: The importance of green rusts. *Water Research.* 2012; 46:1-10. DOI: 10.1016/j.watres.2011.10.006

14. Smith F., Brownlie F., Hodgkiess T., Toumpis A., Pearson A., Galloway A.M. Effect of salinity on the corrosive wear behaviour of engineering steels in aqueous solutions. *Wear.* 2020; 462-463:203515. DOI: 10.1016/j.wear.2020.203515

15. Hasan B. Effect of salt content on the corrosion rate of steel pipe in turbulently flowing solutions. *Al-Nahrain Journal for Engineering Sciences.* 2010; 13(1):66-73

16. Hu J., Dong H., Xu Q., Ling W., Qu J., Qiang Z. Impacts of water quality on the corrosion of cast iron pipes for water distribution and proposed source water switch strategy. *Water Research.* 2018; 129:428-435. DOI: 10.1016/j.watres.2017.10.065

17. Soltis J., Krouse D., Laycock N. Localised dissolution of iron in buffered and non-buffered chloride containing solutions. *Corrosion Science.* 2011; 53(6):2152-2160. DOI: 10.1016/j.corsci.2011.02.037

18. Lytle D.A., Tang M., Francis A.T., O'Donnell A.J., Newton J.L. The effect of chloride, sulfate and dissolved inorganic carbon on iron release from cast iron. *Water Research.* 2020; 183:116037. DOI: 10.1016/j.watres.2020.116037

19. Chen X., Liu H., Sun X., Zan B., Liang M. Chloride corrosion behavior on heating pipeline made by AISI 304 and 316 in reclaimed water. *RSC Advances.* 2021; 11(61):38765-38773. DOI: 10.1039/D1RA06695A

20. Biryukov A.I., Zakharyevich D.A., Galin R.G., Batmanova T.V., Zhivulin V.E., Ulyanov M.N. et al. Corrosion of diffusion zinc coatings in neutral chloride solutions. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition.* 2024; 13(1). DOI: 10.17675/2305-6894-2024-13-1-17

21. Soltis J. Passivity breakdown, pit initiation and propagation of pits in metallic materials : review. *Corrosion Science.* 2015; 90:5-22. DOI: 10.1016/j.corsci.2014.10.006

22. Li K., Sun L., Cao W., Chen S., Chen Z., Wang Y. et al. Pitting corrosion of 304 stainless steel in secondary water supply system. *Corrosion Communications.* 2022; 7:43-50 DOI: 10.1016/j.corcom.2021.11.010

23. Heurtault S., Robin R., Rouillard F., Vivier V. On the propagation of open and covered pit in 316l stainless steel. *Electrochimica Acta.* 2016; 203:316-325. DOI: 10.1016/j.electacta.2016.01.084

24. Lin H., Hu Y. Impact of different source-water switching patterns on the stability of drinking water in an estuarine urban water distribution system. *Environmental Science and Pollution Research.* 2022; 29(32):49059-49069. DOI: 10.1007/s11356-022-19117-x

25. Chukhin V.A., Andrianov A.P. The wave nature of tubercle corrosion in steel and cast iron pipes of water supply systems. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2018; 13(3):(114):385-399. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.3.385-399 (rus.).

26. Azamian I., Allahkaram S.R., Rezaee S. Autonomous-healing and smart anti-corrosion mechanism of polyurethane embedded with a novel synthesized microcapsule containing sodium dodecyl sulfate as a corrosion inhibitor. *RSC Advances.* 2022; 12(22):14299-14314. DOI: 10.1039/d2ra01131j

27. Andrianov A.P., Chukhin V.A. Analysis of the morphology, composition and conditions for the formation of corrosion deposits in water pipes. *Water and Ecology: Problems and Solutions.* 2016; 3(67):18-34. EDN WMFKNH. (rus.).

Received October 21, 2024.
Adopted in revised form on October 21, 2024.
Approved for publication on October 30, 2024.

BIONOTES: **Valentin A. Chukhin** — Candidate of Technical Science, Associate Professor, research fellow of Research and Education Centre "Water supply and sewage"; **Moscow State University of Civil Engineering**

(National Research University) (MGSU); 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 717961, Scopus: 57194340218, ORCID: 0000-0003-4616-2489; sigma85@yandex.ru;

Nikolay A. Makisha — Candidate of Technical Science, Associate Professor, director of Research and Education Centre "Water supply and sewage"; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 644678, Scopus: 55841479500, ResearcherID: I-1562-2015, ORCID: 0000-0003-2567-4450; makishana@mgsu.ru.

Contribution of the authors: all authors made an equivalent contribution to the publication.
Author declare no conflict of interest.