

Оригинальная статья

УДК 669.018.25:621.793.184.762.8

DOI: 10.57070/2304-4497-2023-2(44)-51-59

ВЗАИМНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ГРУНТОВОГО ЭЛЕКТРОЛИТА И УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ В ПРОЦЕССЕ БИОЛОГИЧЕСКОЙ КОРРОЗИИ ПРИ НАЛОЖЕНИИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ

© 2023 г. Т. Ю. Истомина¹, Д. Е. Капуткин¹, Д. Д. Поляков², Д. И. Преферансов¹,
В. А. Степанова¹

¹Московский государственный технический университет гражданской авиации (Россия, 125212, Москва, Кронштадтский бульвар, 20)

²Всероссийский научно-исследовательский институт фитопатологии (Россия, 143050, Московская область, Одинцовский район, р.п. Большие Вяземы, ул. Институт, владение 5)

Аннотация. Экспериментально исследовано взаимное влияние воды, взятой из реальных стоячих водоемов, и образцов нелегированной стали на кислотность и микробиологическую заселенность воды и на общую коррозию нелегированной стали, в том числе в присутствии низкочастотных ультразвуковых колебаний. При длительных выдержках конкурентная активность микроорганизмов приводит к колебаниям кислотности среды с последующим защелачиванием, повышающим вероятность питтинговой коррозии и стресс-коррозионного растрескивания. Изменений кислотности среды при контакте со сталью и воздействии ультразвука низкой частоты не выявлено, однако такой контакт подавляет жизнедеятельность бактерий, присутствующих в воде. Показано, что воздействие ультразвуковых колебаний низкой частоты и остаточные механические напряжения способствуют развитию процессов коррозии.

Ключевые слова: коррозия, биокоррозия, микробиологическая заселенность воды, низкочастотные ультразвуковые колебания

Благодарности: автор выражает признательность коллегам за помощь.

Для цитирования: Истомина Т.Ю., Капуткин Д.Е., Поляков Д.Д., Преферансов Д.И., Степанова В.А. Взаимное воздействие грунтового электролита и углеродистой стали в процессе биологической коррозии при наложении ультразвуковых колебаний // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2023. № 2 (44). С. 51–59. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-2\(44\)-51-59](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-2(44)-51-59)

Original article

MUTUAL INFLUENCE OF EARTH ELECTROLYTE AND CARBON STEEL IN THE PROCESS OF BIOLOGICAL CORROSION UNDER THE APPLICATION OF ULTRASONIC VIBRATIONS

© 2023 T. Yu. Istomina¹, D. E. Kaputkin¹, D. D. Polyakov², D. I. Preferansov¹,
V. A. Stepanova¹

¹Moscow State Technical University of Civil Aviation (20 Kronstadt Boulevard, Moscow region, Moscow, 125212, Russian Federation)

²All-Russian Scientific Research Institute of a Phytopathology (VNIIF) (st. Institute, Property 5, Moscow region, Odintsovsky district, r.p. Bolshie Vyazemy, 143050, Russian Federation)

Abstract. The mutual influence of water taken from real stagnant reservoirs and samples of unalloyed steel has been experimentally studied on the acidity and microbiological population of water and on the general corrosion of

unalloyed steel, including in the presence of low-frequency ultrasonic vibrations. The competitive activity of microorganisms, during long exposures, leads to fluctuations in the acidity of the medium, followed by alkalization, which increases the likelihood of pitting corrosion and stress-corrosion cracking. Changes in the acidity of the medium upon contact with steel and exposure to low-frequency ultrasound have not been identified, however, such contact suppresses the vital activity of bacteria present in the water. It is shown that the impact of low-frequency ultrasonic vibrations and residual mechanical stresses contribute to the development of corrosion processes.

Keywords: corrosion, biocorrosion, microbiological population of water, low-frequency ultrasonic vibrations

Acknowledgements: the author expresses gratitude to colleagues for their help.

For citation: Istomina T.Yu., Kaputkin D.E., Polyakov D.D., Preferansov D.I., Stepanova V.A. Mutual influence of earth electrolyte and carbon steel in the process of biological corrosion under the application of ultrasonic vibrations. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2023, no. 2 (44), pp. 51–59. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-2\(44\)-51-59](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-2(44)-51-59)

Введение

Процессы коррозии – образование на поверхности материалов оксидов и гидроксидов, реже солей – являются одной из основных причин повреждения и постепенного разрушения металлических конструкций. Ежегодные потери от коррозии достигают до 2 – 3 % годового валового внутреннего продукта [1, 2]. Ускорению коррозии способствуют повышение температуры, растворение кислорода, кислот, солей и щелочей в воздействующих на металл жидкостях, положительный заряд корродирующего металла и ряд других факторов. В природных условиях к химическому и электрохимическому воздействию добавляется влияние биологических объектов. Биокоррозия возникает в результате жизнедеятельности бактерий и других микроорганизмов, вырабатывающих такие вещества, как CO₂, H₂S и другие, что повышает агрессивность среды и стимулирует процессы коррозии металлов, вызывая до 50 – 80 % повреждаемости [3 – 5].

Для предотвращения или существенного замедления процессов коррозии применяются разные методы, основными из которых следует признать легирование стали с целью формирования защитных пленок на поверхности [6, 7], нанесение защитных покрытий [8], электрохимическую защиту (подачу на защищаемую конструкцию отрицательного потенциала) [9], ингибирование коррозии за счет изменения состава коррозионного раствора [10, 11], в том числе за счет подавления размножения бактерий [12, 13]. Однако применение легированных коррозионно-стойких сталей часто бывает экономически невыгодно, защитные покрытия при работе конструкций могут повреждаться (причем не только из-за механических воздействий, но и из-за вредного воздействия окружающей среды или колебаний температуры), а электрохимическая защита не всегда возможна из-за значительной электропроводности коррозионной среды. Ингибирование коррозии для многих металлоизделий (например, в подземных строительных конструкциях) ослабляется по мере постепенного вымывания инги-

битора за счет движения грунтовых вод. Полностью предотвратить процесс коррозии невозможно.

При изучении процессов коррозии в водной среде обычно состав коррозионного раствора поддерживается постоянным, что позволяет стандартизировать измерения и часто отвечает реальным условиям эксплуатации, например, строительных конструкций в условиях большого водоема с проточной или достаточно активно перемешивающейся водой. Однако во многих других случаях указанные условия не соблюдаются, на состав и свойства коррозионной среды влияет сам корродирующий металл. В первую очередь перемешивание сильно ограничено для грунтового электролита, проникающего к металлоконструкции сквозь повреждение предварительно нанесенного защитного покрытия. Также возможно влияние корродирующего металла на состав и свойства окружающей его раствора в небольших стоячих водоемах, в частности, болотах. Корродирующий металл может оказывать воздействие не только на химический состав окружающей жидкости, но и опосредованно на ее микробиологическое заселение. Например, в работе [14] показано, что добавление в воду наночастиц (диаметром 2 – 3 нм) железа, оксидов железа Fe₂O₃ или Fe₃O₄ в концентрации от 10⁻² – 10⁻¹ г/л (в зависимости от типа бактерий в воде) оказывает подавляющее воздействие на концентрацию микробов, причем, чем выше концентрация наночастиц, тем меньше бактерий остается в воде. Кроме этого, практически все металлоконструкции подвержены механическим воздействиям и, как следствие, вызывают механические колебания в окружающей среде, что также может оказывать влияние на состав и микробиологическую заселенность этой среды.

Целью настоящей работы является изучение взаимного воздействия воды, взятой из реальных стоячих водоемов, на общую коррозию нелегированной стали и изучение влияния корродирующего образца нелегированной стали на кислотность и микробиологическую заселенность воды, в том числе в присутствии ультразвуковых низкочастотных (УЗН) колебаний.

Материалы и методики измерений

В качестве объектов исследования влияния УЗН колебаний на свойства электролита были взяты пробы воды из реальных стоячих водоемов (двух болот Волоколамского района Московской области) и проведены две серии измерений зависимостей показателя pH проб воды от времени (см. таблицу). Образцы воды (объемом 0,5 л) в ходе эксперимента находились в условиях воздействия акустических колебаний и при их отсутствии. Первая серия измерений (индекс 1) проведена с использованием воды, взятой после двухнедельного отсутствия дождей, вторая (индекс 2) – после трех дней выпадения дождей средней интенсивности (сумма осадков – около 10 мм).

Измерения кислотности среды проводили при помощи pH-метра LiZi с погрешностью измерений $\pm 0,1$. В ходе эксперимента температура воды колебалась в пределах от $+13$ до $+23$ °C, что добавляет погрешность 0,1 pH в измерения кислотности. Таким образом, общую погрешность измерений pH можно принять равной $\pm 0,2$.

Исследования по оценке возможного влияния механических колебаний на процессы взаимодействия стали и воды проводили в присутствии УЗН колебаний частотой 20 ± 5 кГц. Колебания возбуждались генератором мощностью 15 Вт. Контрольные измерения проводили в отсутствие УЗН колебаний.

Для имитации взаимодействия электролита с материалом трубы при проведении обеих серий измерений в воду погружали ленты (индекс М) – образцы размером $150 \times 10 \times 1$ мм, изготовленные из стали 20 и подвергнутые механической шлифовке на грубой наждачной бумаге. Оценку коррозионного воздействия УЗН колебаний проводили визуально. Для оценки влияния механических напряжений на коррозионные повреждения концы образцов непосредственно перед испытаниями были подвергнуты пластическому изгибу, после которого в поверхностных слоях возникают остаточные напряжения, близкие к пределу текучести (рис. 1).

Количественную оценку микробиологической (бактериальной) заселенности образцов проб воды проводили по методике согласно ГОСТ 18963 – 73 [15]. Общее количество бактерий – это количество микроорганизмов, которое содержится в 1 мл исследуемой воды, и способно в течение суток при температуре 37 °C образовывать колонии, видимые невооруженным глазом (или при увеличении с помощью лупы). Для анализа применяли три разведения исходного образца стерильной водой в соотношениях 1:10, 1:100 и 1:1000. Эксперимент трехкратно воспроизводили для каждого разведения.

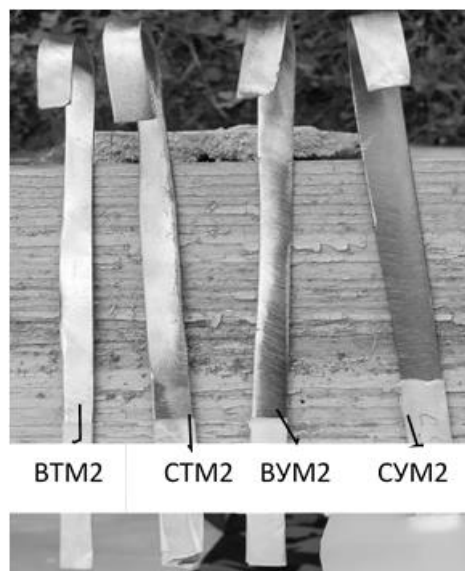


Рис. 1. Внешний вид металлических образцов перед коррозионными испытаниями

Fig. 1. Appearance of metal samples before corrosion tests

Для анализа бактериальной заселенности образцов проб воды была приготовлена питательная среда – пептонно-глюкозный агар. Состав среды: пептон 20 г/л, глюкоза 10 г/л, хлорид натрия 5 г/л, агар 20 г/л. Кислотность среды – 7,5. Наблюдения проводили в чашках Петри диаметром 90 мм. Перед началом анализа чашки стерилизовали в течение 2 ч в сушильном шкафу при температуре 180 °C. Питательную среду стерилизовали 15 – 20 мин в автоклаве при давлении 1 атм. В каждую чашку заливали 30 мл питательной среды.

Посев проводили на поверхность питательной среды автоматическим дозатором с последующим выравниванием образца по поверхности среды при помощи шпателя Дригальского. Объем исследуемой жидкости (образцов проб воды) на одну чашку составлял 500 мкл. Чашки инкубировали в термостате при температуре 37 °C в течение 24 ч с момента посева. Количественную оценку числа колоний бактерий проводили визуально. Учитывали чашки с количеством колоний от 30 до 300. Данные по трем чашкам усредняли. Впоследствии проводили пересчет количества бактерий на 1 мл образца.

Всего для исследований изготовили 10 модельных образцов проб воды объемом 0,5 л каждый, маркировка которых приведена в таблице.

Результаты и обсуждение

Результаты измерений кислотности образцов воды приведены на рис. 2, 3. При отсутствии дождя исходная вода, контактировавшая с известняком (рис. 2, а), щелочная, а не контактировавшая (рис. 2, б) – кислая. После дождя (рис. 3) вода в обоих случаях становилась нейтральной.

Маркировка образцов Sample identification

Маркировка образцов	Расшифровка маркировки образцов и условий проведения исследований
Источник В1	Вода из источника, контактирующего с известняком, после двухнедельного отсутствия дождей
Источник В2	Вода из источника, контактирующего с известняком, после трех дней выпадения дождей средней интенсивности
Источник С1	Вода из источника, не контактирующего с известняком (вода из леса), после двухнедельного отсутствия дождей
Источник С2	Вода из источника, не контактирующего с известняком (вода из леса), после трех дней выпадения дождей средней интенсивности
М	При наличии металлического образца
У	В присутствии УЗН
Т	В отсутствии УЗН (тихо)
ВУМ1	Вода из источника В1 в присутствии УЗН, при наличии М
ВУМ2	Вода из источника В2 в присутствии УЗН, при наличии М
ВТМ1	Вода из источника В1 в отсутствии УЗН, при наличии М
ВТМ2	Вода из источника В2 в отсутствии УЗН, при наличии М
СУМ1	Вода из источника С1 в присутствии УЗН, при наличии М
СУМ2	Вода из источника С2 в присутствии УЗН, при наличии М
СТМ1	Вода из источника С1 в отсутствии УЗН, при наличии М
СТМ2	Вода из источника С2 в отсутствии УЗН, при наличии М
ВТ2	Вода из источника В2 в отсутствии УЗН, без металлического образца
СТ2	Вода из источника С2 в отсутствии УЗН, без металлического образца

В течение первых 15 – 30 ч pH понижается на $1,0 \pm 0,5$ (кроме исходно кислой воды), вероятно, из-за растворения оксида углерода CO_2 из воздуха, что повышает опасность водородного растрескивания [16]. Затем во всех случаях pH возрастает, достигая значений, превышающих 8,5, то есть величины, способствующей питтинговой коррозии и стресс-коррозионному растрескиванию низкоуглеродистой стали [17]. Указанное увеличение pH вызвано, по-видимому, жизнедеятельностью микроорганизмов, населяющих исходную водную среду. Существенного влияния УЗН колебаний и наличия

металлических образцов на процессы изменения pH среды не выявлено.

Наиболее благоприятная для жизнедеятельности большинства бактерий среда с pH 7,0 – 7,3 в результате метаболизма, а также гибели части бактерий в среде, может закисляться (что повышает опасность водородного растрескивания) или защелачиваться (что способствует питтинговой коррозии и стресс-коррозионному растрескиванию). Наблюдаемые колебания pH в процессе эксперимента могут являться результатом конкурирования различных сообществ бактерий [18, 19], «включающим» или «выключающим»

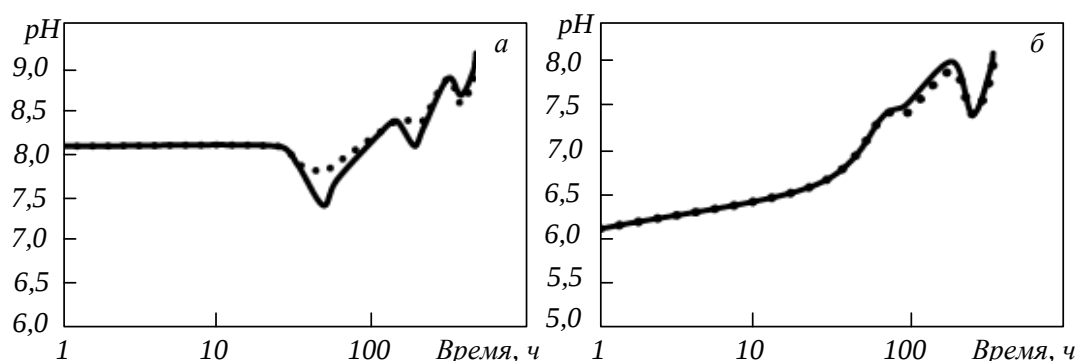


Рис. 2. Зависимость pH воды, взятой из источника, контактирующего с известняком В1 (а), и из леса после двухнедельного отсутствия дождей С1 (б)

Fig. 2. Dependence of the pH of water taken from a source in contact with limestone В1 (а) and from a forest after a two-week absence of rain С1 (б)

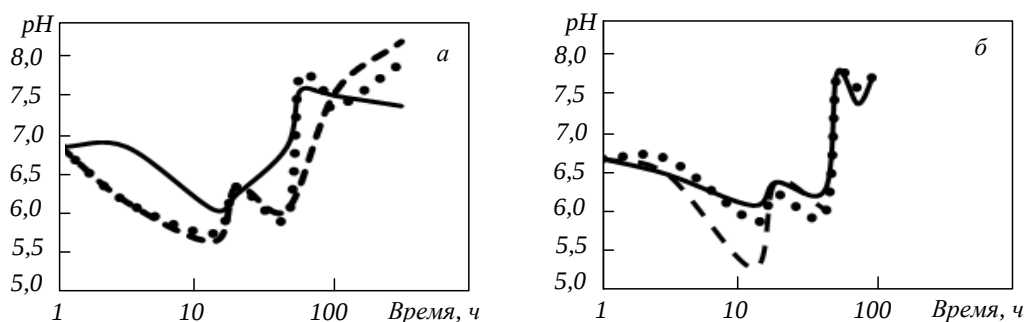


Рис. 3. Зависимость pH воды взятой из источника, контактирующего с известняком В2 (а), и из леса после трех дней выпадения дождей средней интенсивности С2 (б)

Fig. 3. Dependence of the pH of water taken from a source in contact with limestone В2 (а) and from a forest after three days of moderate rainfall С2 (б)

один из выше указанных механизм коррозии. Изменения pH среды влекут за собой изменение растворимости железа, которое является метаболитом железобактерий. Последние, являясь весьма распространенным представителем микробиоты воды и почвы [20, 21], с высокой вероятностью принимают участие в конкурентной борьбе. В настоящее время понятие железобактерии объединяет широкий класс микроорганизмов, использующих железо в своей жизнедеятельности. Основной процесс метаболизма железа у железобактерий можно описать формулой: $4\text{Fe}^{2+} + 4\text{H}^+ + \text{O}_2 \rightarrow 4\text{Fe}^{3+} + 2\text{H}_2\text{O}$. Это процесс, приводящий к защелачиванию среды, что и наблюдается при больших временах экспозиции образцов воды с металлом. Также рассматривается прямое поглощение электронов микроорганизмами как механизм коррозии нержавеющей стали в аэробных условиях [22].

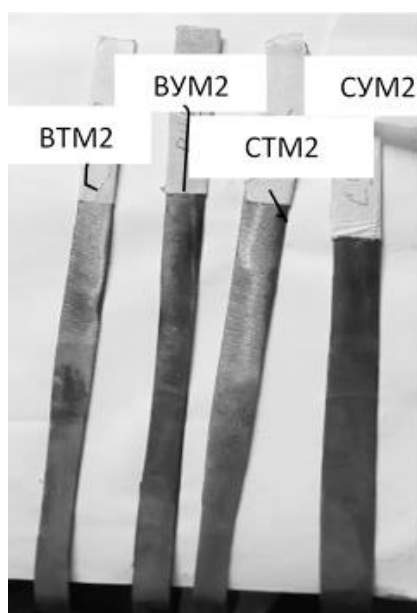
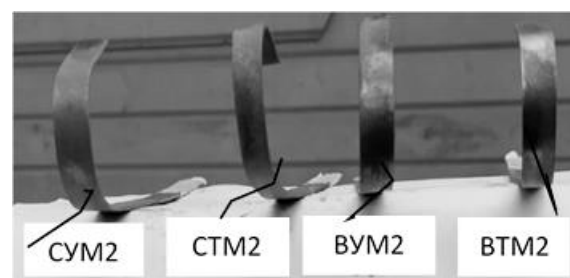
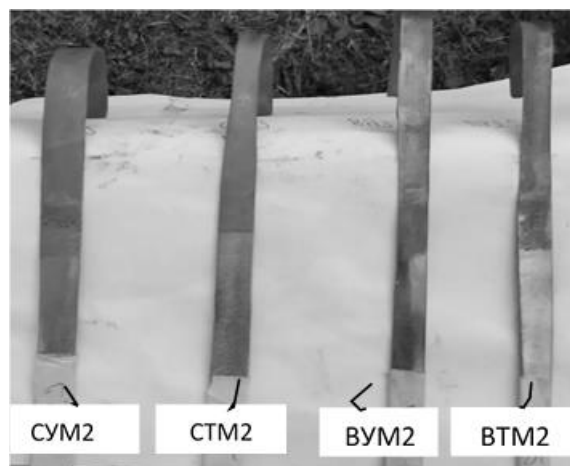


Рис. 4. Внешний вид образцов после 44 ч пребывания в активной среде (в присутствии УЗН образцы более темные)
Fig. 4. The appearance of the samples after 44 h in the active environment (in the presence of Ultrasonic, the samples are darker)



а



б

Рис. 5. Внешний вид образцов после 44 ч пребывания в активной среде и снятия бурого налета:
а и б – деформированные и недеформированные зоны
Fig. 5. The appearance of the after 44 hours of exposure to the active environment and removal of brown blanket: deformed (а) and undeformed (б) zones

После 44 ч нахождения в коррозионной среде все металлические образцы были покрыты бурым налетом, предположительно $\text{Fe}(\text{OH})_3$ (рис. 4). Этот налет и во влажном состоянии, и после высыхания легко снимается при протирке мягкой тканью, после чего остается слой серого цвета, предположительно Fe_3O_4 (рис. 5). Визуальная оценка степени потемнения протертых образцов показывает, что образцы после коррозионных испытаний при воздействии УЗН темнее, чем без них. Кроме того, деформированные зоны образцов темнее, чем зоны, не подвергнутые пластической деформации изгибом. После 99 ч

коррозионного воздействия результаты визуальной оценки аналогичны (рис. 6).

На основании полученных результатов микробиологического анализа проб воды, взятой из водоема, который контактирует с дорожной насыпью, содержащей известняк, установлено, что бактериальная заселенность образцов воды после экспозиции со сталью в течении 300 ч уменьшилась на порядок по сравнению с контрольными (рис. 7), а также снизилась удельная электропроводность воды (с 756,8 до 638,1 мСм/м). При этом наложение УЗН колебаний не только не привело к дополнительному снижению количества бактерий, а даже несколько уменьшило это снижение (аналогично данным работы [15]), равно как и снижение удельной электропроводности (до 675,0 мСм/м).

Выводы

По результатам исследований можно констатировать, что в зависимости от природных условий водородный показатель pH грунтового электролита может варьировать в пределах от 6 до 8. В случае нейтральной или щелочной среды в первые 15 – 30 ч взаимодействия с воздухом pH воды несколько снижается. При более длительных выдержках конкурентная активность микроорганизмов приводит к колебаниям кислотности воды в диапазоне от 5 до 9,5 и последующему защелачиванию среды, в том числе до величин выше 8,5, когда повышается вероятность питтинговой коррозии и стресс-коррозионного растрескивания. Влияния контакта со сталью и УЗН колебаний на pH образцов воды не выявлено, однако такой контакт подавляет жизнедеятельность присутствующих в ней бактерий. Визуальная оценка металлических образцов дает основания

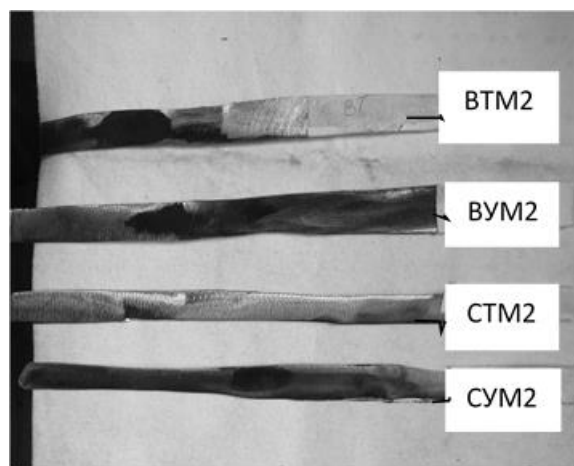


Рис. 6. Внешний вид образцов после 99 ч пребывания в активной среде и снятия бурого налета (подвергавшиеся УЗН воздействию образцы более темные)

Fig. 6. The appearance of the samples after 99 hours of exposure to the active environment and the removal of brown blanket (samples exposed to Ultrasonic are darker)

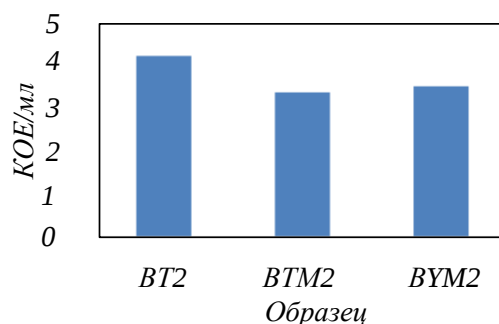


Рис. 7. Бактериальная заселенность воды из водоема, контактирующего с насыпью, содержащей известняк, после 300 ч выдержки (по оси ординат отложен десятичный логарифм от бактериальной заселенности)
Fig. 7. Bacterial population of water from a reservoir in contact with limestone after 300 hours of exposure (the y-axis shows the decimal logarithm of the bacterial population)

полагать, что УЗН колебания и остаточные механические напряжения способствуют развитию процессов коррозии в грунтовом электролите.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Koch G.H. et. al. Corrosion costs and preventive strategies in the United States. Washington D.C.: FHWA, 2001. P. 1–36.
2. Герасименко А.А. Защита от коррозии, старения и биоповреждений машин, оборудования и сооружений: справочник. Т. 1 / Под общ. ред. А.А. Герасименко. Москва: Машиностроение, 1987. 688 с.
3. Герасименко А.А. Биокоррозия и защита металлоконструкций. 2. Микробная коррозия оборудования нефтяной промышленности // Практика противокоррозионной защиты. 2001. № 2. С. 35–36.
4. Ахияров Р.Ж., Лаптев А.Б., Ибрагимов И.Г. Повышение промышленной безопасности эксплуатации объектов нефтедобычи при биозаражении и выпадении солей методом комплексной обработки пластовой воды // Нефтепромысловое дело. 2009. № 3. С. 44–46.
5. Singh A.K. Mitigation of microbial induced corrosion // SpringerBriefs in Materials. 2020. P. 107–129. https://doi.org/10.1007/978-981-15-8019-2_6
6. Капуткина Л.М., Смарикина И.В. и др. Влияние добавки азота на физико-химические свойства и сопротивление коррозии коррозионно - стойких сталей // Металловедение и термическая обработка металлов. 2015. № 7 (721). С. 29–35.
7. Svyazhin A., Kaputkina L., et. al. Nitrogen Steels and High-Nitrogen Steels // Industrial Technologies and Properties. Steel Research International. 2022. P. 2200160–2200190. <https://doi.org/10.1002/srin.202200160>
8. Розенфельд И.Л., Рубинштейн Ф.И. Анти-коррозионные грунтовки и ингибированные

- лакокрасочные покрытия. Москва: Химия, 1980. 200 с.
9. Shiibashi M., Deng X., Miran W., Okamoto A. Mechanism of anaerobic microbial corrosion suppression by mild negative cathodic polarization on carbon steel // *Environmental Science and Technology Letters*. 2020. Vol. 7. No. 9. P. 690–694. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.0c00383>
 10. Самедов А.М., Алиева Л.И., Аббасов В.М. Ингибирующее и бактерицидное действие солей природных нафтенных кислот при коррозии стали в морской воде // *Физико-химия поверхности и защита материалов*. 2008. Т. 44. № 4. С. 427–431.
 11. Богданова Т.И., Шехтер Ю.Н. Ингибированные нефтяные составы для защиты от коррозии. Москва: Химия, 1984. 248 с.
 12. Грибанькова А.А., Мямина М.А., Белоглазов С.М. Микробиологическая коррозия мягкой стали в водно-солевых средах, содержащих сульфатредуцирующие бактерии // *Вестник балтийского федерального университета им. И. Канта*. 2011. № 7. С. 23–29.
 13. Lavanya M. A brief insight into microbial corrosion and its mitigation with eco-friendly inhibitors // *Journal of Bio- and Tribo-Corrosion*. 2021. Vol. 7. No. 3. <https://doi.org/10.1007/s40735-021-00563-y>
 14. Завьялов В.В., Завьялова Н.В. и др. Бактерицидные свойства модульных защитных материалов // *Вестник войск РХБ защиты*. 2022. Т. 6. № 2. С. 123–136. <https://doi.org/10.35825/2587-5728-2022-6-2-123-136>
 15. ГОСТ 18963 – 73. Вода питьевая. Методы санитарно-бактериологического анализа. Москва: Стандартинформ, 2008. 21 с.
 16. Zhang L., Li X.G., Du C.W., Cheng Y.F. Corrosion and stress corrosion cracking behavior of X70 pipeline steel in a CO₂-containing solution // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2009. Vol. 18. No. 3. P. 319–323. <https://doi.org/10.1007/s11665-008-9282-9>
 17. Liang P., Li X., Du C., Chen X. Stress corrosion cracking of X80 pipeline steel in simulated alkaline soil solution // *Materials and Design*. 2009. Vol. 30. No. 5. P. 1712–1717. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.07.012>
 18. Amor D.R., Ratzke C., Gore J. Transient invaders can induce shifts between alternative stable states of microbial communities // *Science advances*. 2020. Vol. 6. No. 8. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aay8676>
 19. Котова И.Б., Тактарова Ю.В. и др. Микробная деградация пластика и пути ее интенсификации // *Микробиология*. 2021. Т. 90. № 6. С. 627–659. <https://doi.org/10.31857/S0026365621060082>
 20. Черкасов С.В. Железобактерии в системах питьевого водоснабжения // Сайт компании «Мировые Водные Технологии», статьи: – URL: <https://wwtec.ru/index.php?id=418> (дата обращения: 03.02.2023).
 21. Yang G., Gong M., et. al. A review of microbial corrosion in reclaimed water pipelines: challenges and mitigation strategies // *Water Practice and Technology*. 2022. Vol. 17. No. 3. P. 731–748. <https://doi.org/10.2166/wpt.2022.007>
 22. Zhou E., Xu D. et. al. Direct microbial electron uptake as a mechanism for stainless steel corrosion in aerobic environments // *Water Research*. 2022. Vol. 219. Article. 118553. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118553>

REFERENCES

1. Koch G.H. et. al. *Corrosion costs and preventive strategies in the United States*. Washington D.C.: FHWA, 2001, pp. 1–36.
2. Gerasimenko A.A. *Protection against corrosion, aging and biological damage of machines, equipment and structures*. Vol. 1 / Gerasimenko A.A. ed. Moscow: Mashinostroenie, 1987, 688 p. (In Russ.).
3. Gerasimenko A.A. Biocorrosion and protection of metal structures. 2. Oil Industry Equipment Micro Corrosion. *Praktika protivokorroziionnoj zashchity*. 2001, no. 2, pp. 35–36. (In Russ.).
4. Akhiyarov R.Zh., Laptev A.B., Ibragimov I.G. Improving the Industrial Safety of Oil Production Facilities during Biological Contamination and Salt Deposition by Complex Formation Water Treatment. *Neftepromyslovoe delo*. 2009, no. 3, pp. 44–46. (In Russ.).
5. Singh A.K. Mitigation of microbial induced corrosion. *Springer Briefs in Materials*. 2020, pp. 107–129. https://doi.org/10.1007/978-981-15-8019-2_6
6. Kaputkina L.M., Smarygina I.V. et al. Influence of nitrogen additive on physical and chemical properties and corrosion resistance of corrosion-resistant steels. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*. 2015, no. 7 (721), pp. 29–35. (In Russ.).
7. Svyazhin A., Kaputkina L., et al. Nitrogen Steels and High-Nitrogen Steels. *Industrial Technologies and Properties. Steel Research International*. 2022, pp. 2200160–2200190. <https://doi.org/10.1002/srin.202200160>
8. Rosenfeld I.L., Rubinstein F.I. *Anticorrosive primers and in-hybrid paint coatings*. Moscow: Himiya, 1980, 200 p. (In Russ.).

9. Shiibashi M., Deng X., Miran W., Okamoto A. Mechanism of anaerobic microbial corrosion suppression by mild negative cathodic polarization on carbon steel. *Environmental Science and Technology Letters*. 2020, vol. 7, no. 9, pp. 690–694. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.0c00383>
10. Samedov A.M., Aliyeva L.I., Abbasov V.M. Inhibition and bactericidal effect of salts of natural naphthenic acids during steel corrosion in seawater. *Fizikohimiya poverhnosti i zashchita materialov*. 2008, vol. 44, no 4, pp. 427–431. (In Russ.).
11. Bogdanova T.I., Shechter J.N. *Inhibited petroleum compositions for corrosion protection*. Moscow: Himiya, 1984, 248 p. (In Russ.).
12. Gribankova A.A., Myamina M.A., Beloglazov S.M. Microbiological corrosion of soft steel in water-salt media containing sulphate-curing bacteria. *Vestnik baltiyskogo federal'nogo universiteta im. I. Kanta*. 2011, no 7, pp. 23–29. (In Russ.).
13. Lavanya M. A brief insight into microbial corrosion and its mitigation with eco-friendly inhibitors. *Journal of Bio- and Tribo-Corrosion*. 2021, vol. 7, no. 3. <https://doi.org/10.1007/s40735-021-00563-y>
14. Zavyalov V.V., Zavyalova N.V., etc. Bactericidal properties of modular protective materials. *Vestnik vojsk RHB zashchity*. 2022, vol. 6, no. 2, pp. 123–136. (In Russ.). <https://doi.org/10.35825/2587-5728-2022-6-2-123-136>
15. GOST 18963 – 73. *Drinking water. Methods of sanitary and bacteriological analysis*. Moscow: Standartinform, 2008, 21 p. (In Russ.).
16. Zhang L., Li X.G., Du C.W., Cheng Y.F. Corrosion and stress corrosion cracking behavior of X70 pipeline steel in a CO₂-containing solution. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2009, vol. 18, no. 3, pp. 319–323. <https://doi.org/10.1007/s11665-008-9282-9>
17. Liang P., Li X., Du C., Chen X. Stress corrosion cracking of X80 pipeline steel in simulated alkaline soil solution. *Materials and Design*. 2009, vol. 30, no. 5, pp. 1712–1717. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.07.012>
18. Amor D.R., Ratzke C., Gore J. Transient invaders can induce shifts between alternative stable states of microbial communities. *Science advances*. 2020, vol. 6, no. 8. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aay8676>
19. Kotova I.B., Taktarova Yu.V., et al. Microbial degradation of plastic and ways of its intensification. *Mikrobiologiya*. 2021, vol. 90, no. 6, pp. 627–659. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0026365621060082>
20. Cherkasov S.V. *Zhelezobacteria in drinking water supply systems. Website of the company "World Water Technologies"*. URL: <https://wwtec.ru/index.php?id=418> (date of appeal: 03.02.2023). (In Russ.).
21. Yang G., Gong M. et. al. A review of microbial corrosion in reclaimed water pipelines: challenges and mitigation strategies. *Water Practice and Technology*. 2022, vol. 17, no. 3, pp. 731–748. <https://doi.org/10.2166/wpt.2022.007>
22. Zhou E., Xu D., et. al. Direct microbial electron uptake as a mechanism for stainless steel corrosion in aerobic environments. *Water Research*. 2022, vol. 219, article 118553. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118553>

Сведения об авторах

Татьяна Юрьевна Истомина, ст. преподаватель кафедры физики, Московский государственный технический университет гражданской авиации
E-mail: t_yu_ist@mail.ru
ORCID: 0009-0005-5320-3017

Дмитрий Ефимович Капуткин, д.т.н., профессор кафедры физики, Московский государственный технический университет гражданской авиации
E-mail: d.kaputkin@mstuca.aero
ORCID: 0000-0002-2579-3014

Дмитрий Денисович Поляков, младший научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт фитопатологии
E-mail: dima.123.98@mail.ru
ORCID: 0009-0004-1736-967X

Даниил Ильич Преферансов, студент, Московский государственный технический университет гражданской авиации
E-mail: preferansov@yandex.ru
ORCID: 0009-0009-2720-9094

Валентина Анатольевна Степанова, к.ф.-м.н., доцент кафедры физики, Московский государственный технический университет гражданской авиации
E-mail: s.valentin.a@mail.ru
ORCID: 0009-0006-5346-9963

Information about the authors

Tatyana YU. Istomina, Senior Lecturer of the Department of Physics, Moscow State Technical University of Civil Aviation
E-mail: t_yu_ist@mail.ru
ORCID: 0009-0005-5320-3017

Dmitry E. Kaputkin, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of Department of Physics, Moscow State Technical University of Civil Aviation
E-mail: d.kaputkin@mstuca.aero
ORCID: 0000-0002-2579-3014

Dmitry D. Polyakov, Junior Researcher, Federal State Budgetary Scientific Institution "All-Russian Research Institute of Phytopathology"

E-mail: dima.123.98@mail.ru
ORCID: 0009-0004-1736-967X

Daniil I. Preferansov, student, Moscow State Technical
University of Civil Aviation
E-mail: preferansov@yandex.ru
ORCID: 0009-0009-2720-9094

Valentina A. Stepanova, Cand. Sci. (Eng.), Associate
Professor, Department of Physics, Moscow State Tech-
nical University of Civil Aviation
E-mail: s.valentin.a@mail.ru
ORCID: 0009-0006-5346-9963

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 02.05.2023

После доработки 17.05.2023

Принята к публикации 22.05.2023

Received 02.05.2023

Revised 17.05.2023

Accepted 22.05.2023