

Экология водных систем: применение ингибиторов коррозии для очистки сточных вод

Г.Б. Браяловский , А.Ф. Никифоров , О.Б. Насчетникова ,
Е.В. Мигалатий 

✉ g.b.braialovsky@urfu.ru

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н.Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Системы открытого горячего водоснабжения населенных пунктов Свердловской области подвергаются интенсивной кислородной коррозии, особенно при отсутствии деаэрационного оборудования. Коррозионные процессы в системах водоснабжения имеют серьезные экологические последствия, т. к. продукты коррозии вызывают загрязнение водных объектов. В статье рассмотрена возможность применения ингибиторов коррозии на основе комплексов нитрилотриметилфосфоновой кислоты (НТФ) с цинком и магнием для обработки воды в системах горячего водоснабжения. **Методы.** Процессы замедления коррозии и осадкообразования обрабатывали на воде р. Чусовой. Оценка скорости коррозии проведена методом поляризационного сопротивления. Выполнены эксперименты по изучению влияния различных параметров на коррозионные процессы. **Результаты.** Обнаружена высокая эффективность применения соединений на основе НТФ в блокировке процессов коррозии и осадкообразования в системах горячего водоснабжения. Установлены оптимальные дозы реагентов для обработки воды (р. Чусовая). Определена скорость образования защитной пленки на поверхности металла, а также установлено снижение выноса продуктов коррозии в сточные воды.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: водные ресурсы, коррозия, осадкообразование, ингибиторы коррозии, водоснабжение.

Для цитирования: Браяловский Г.Б., Никифоров А.Ф., Насчетникова О.Б., Мигалатий Е.В. Экология водных систем: применение ингибиторов коррозии для очистки сточных вод. // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2023. № 3. С. 114-122. DOI: 10.35567/19994508_2023_3_8.

Дата поступления 26.12.2022.

ECOLOGY OF AQUATIC SYSTEMS: APPLICATION OF CORROSION INHIBITORS FOR WASTE WATER TREATMENT

Georgy B. Brayalovsky , Olga B. Naschetnikova , Aleksandr F. Nikiforov ,
Evgeniy V. Migalatiy 

✉ g.b.braialovsky@urfu.ru

B.N.Yeltsin Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

ABSTRACT

Relevance. The Sverdlovsk Oblast open hot water supply systems experience active oxygen corrosion, in particular, in the absence of de-aeration equipment. Corrosion

© Браяловский Г.Б., Никифоров А.Ф., Насчетникова О.Б., Мигалатий Е.В. 2023

processes in any water supply systems produce serious environmental consequences as the corrosion products contaminate water bodies. The article deals with the possibility of using corrosion inhibitors based on nitrilotrimethylphosphonic acid (NTP) complexes with zinc and magnesium to treat water in hot water supply systems. **Methods.** We studied the corrosion/sedimentation processes retarding on the Chusovaya River water. To estimate the corrosion rate we applied the polarization resistance method. We have carried out experiments to study the various parameters impact upon the corrosion processes. **Results.** We have stated high effectiveness of the NTF-based compounds application in inhibition of the corrosion and sedimentation processes in hot water supply systems. The optimal reagent doses to treat water (the Chusovaya River) have been determined. We have determined the rate of the protective film formation on a metal surface, as well as have proved the decrease of the corrosion products discharge with wastewaters.

Keywords: corrosion, sedimentation, corrosion inhibitors, NTF, hot water supply.

For citation: Brayalovskiy G.B., Naschetnikova O.B., Nikiforov A.F., Migalatiy E.V. Ecology of aquatic systems: Application of corrosion inhibitors for waste water treatment. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, management*. 2023. No. 3. P. 114-122. DOI: 10.35567/19994508_2023_3_8.

Received 26.12.2022.

ВВЕДЕНИЕ

Важнейшим видом загрязнения водных экосистем являются продукты коррозии [1]. Коррозия – сложный физико-химический процесс. В ее основе лежит электрохимическое растворение металлов и сплавов. В процессе коррозии одновременно протекают как минимум две реакции – окисления и восстановления. Если одну из них по какой-то причине удастся затормозить, процесс коррозии существенно замедляется и металл становится коррозионноустойчим.

Коррозия в системах теплоснабжения (котлах, теплообменных установках, трубах) протекает с высокой скоростью. Элементы из углеродистой стали, подвергаясь действию горячей воды (50 °С и выше), склонны к язвенной коррозии – формированию коррозионных каверн и свищей. После образования рыхлой, незащитной ржавчины (гидроксида железа) на поверхности стали образуются так называемые пары неравномерной аэрации – области с повышенным и пониженным подводом кислорода. Эти пары начинают работать как локальные гальванические элементы. Области с пониженной аэрацией (доставка кислорода затруднена) выступают в качестве анодов, которые растворяются и образуют язвы.

В настоящее время реагентная обработка воды является наиболее эффективным и доступным методом борьбы с коррозионными процессами в связи с относительно невысокими капитальными затратами, при этом узлы приготовления и дозирования реагентов просты и надежны в эксплуатации.

Начиная с 1980-х годов в практике применения реагентов в качестве ингибиторов коррозии стали широко использоваться органофосфонаты (ОФ). Тенденции в области их создания и применения подробно рассмотре-

ны в работе [2]. Рядом нормативных документов рекомендовано использование реагентов на основе ОФ в системах теплоснабжения и горячего водоснабжения^{1,2,3,4}.

В последние годы всесторонне исследуются известные и зарекомендовавшие себя ингибиторы – комплексоны в ряду азотсодержащих фосфоновых кислот НТФ: этилендиаминтетра-ЭДТФ, диэтилентриаминпента-ТПФ, гексаметилендиаминтетра-ГМДТФ, метилфосфоновые кислоты и др. и композиции на их основе [3–20]. Продолжающиеся исследования НТФ в качестве ингибитора многоцелевого назначения свидетельствуют о практической значимости реагента. В этом плане перспективными соединениями на основе НТФ являются комплексоны цинка (Zn-НТФ) и магния (Mg-НТФ). Преимущество комплексонов (Mg-НТФ) перед реагентами (Zn-НТФ) заключается в том, что ПДК цинка и магния для водоемов рыбохозяйственного назначения составляет 0,01 мг/л и 40 мг/л соответственно. Применение реагентов на основе магния при их сбросе на очистные сооружения уменьшает риск негативного воздействия на биотические сообщества водных объектов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование по снижению отложений и коррозионных процессов методом использования ингибиторов проводили на р. Чусовой. Общая жесткость воды – 1,4 мг-экв/л, кальциевая жесткость – 0,8 мг-экв/л, щелочность – 1,0 мг-экв/л. Учитывая качество воды источника водоснабжения, возможность применения ингибиторов на основе органофосфонатов исследовали при температуре 60–90 °С и времени экспозиции 180 мин. В качестве ингибиторов коррозии использовали композиционные составы, состоящие из НТФ и ее комплексонов с цинком и магнием. Композиции получали при мольном соотношении НТФ:Ме–2,5:1 путем растворения соответствующих навесок оксидов цинка и магния в 2,5 % растворе НТФ.

Исследования проводили на лабораторной установке, представленной на рис. 1. По завершению эксперимента отложения на теплообменнике растворяли 0,1н соляной кислотой, нейтрализовали остаточную кислоту щелочью. Количество карбоната кальция в теплообменнике определяли по стандартной методике комплексонометрическим методом.

Скорость коррозии контролировали в течение всего эксперимента (интервал 30 мин) с помощью коррозиметра «Эксперт-004» методом измерения поляризационного сопротивления. Эффективность ингибирования коррозии и солеотложений рассчитывали по формуле:

¹ Руководство по контролю качества питьевой воды. Т. 1. Женева. Всемирная организация здравоохранения, 1994. 257 с.

² СНиП 41-02-2003. Тепловые сети. М.: ФГУП ЦПП, 2005. 38 с.

³ СП 41-104-2000. Проектирование автономных источников теплоснабжения. М.: ГУ П ЦПП, 2000. 16 с.

⁴ МУ 1-321-03. Методические указания по коррекционной обработке питательной воды паровых котлов, подпиточной воды систем теплоснабжения, водогрейных котлов комплексоноватами ОЭДФ-Zn, НТФ-Zn. Ростов-на-Дону, 2003. 20 с.

$$Z = \frac{П - П_{инг}}{П} \cdot 100 \%,$$

где $П$ – количество отложений, мг/скорость коррозии в контрольном опыте, мм/год;
 $П_{инг}$ – количество отложений, мг/скорость коррозии в опытах с реагентом, мм/год.

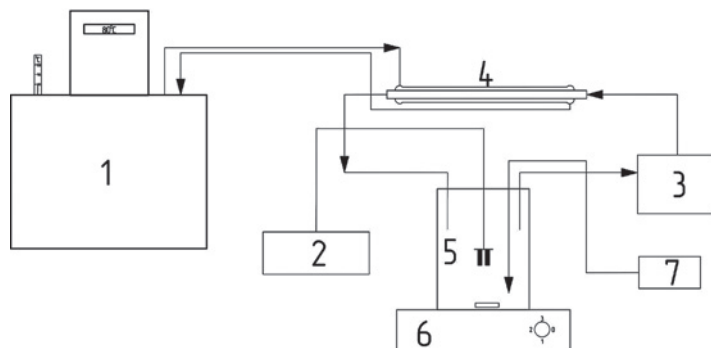


Рис. 1. Схема установки одновременного определения скорости коррозии и осадкообразования: 1 – термостат; 2 – коррозиметр; 3 – перистальтический насос; 4 – теплообменник; 5 – емкость с исследуемой водой; 6 – магнитная мешалка; 7 – компрессор.

Fig. 1. Scheme of installation for simultaneous determination of the corrosion and sedimentation rate: 1 – thermostat, 2 – corrosionmeter, 3 – peristaltic pump, 4 – heat exchanger, 5 – tank with test water, 6 – magnetic stirrer, 7 – compressor.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты опытов по изучению влияния реагентов Zn-НТФ и Mg-НТФ на процесс осадкообразования на стеклянном теплообменнике установки (рис. 1) представлены в таблице. Очевидно, что применение даже минимальных концентраций комплексонов (0,5–1 мг/л) позволяет практически полностью предотвратить процесс осадкообразования.

Таблица. Ингибирование осадкообразования

Table. Inhibition of sedimentation

Реагент	Концентрация, мг/л	Температура, °С	Количество отложений, мг	Эффективность, %
Контроль (без ингибитора)	–	60	0,8	–
	–	70	1,1	–
	–	80	1,2	–
	–	90	1,6	–
Zn-НТФ, Mg-НТФ	0,5	60	–	близка к 100
	0,5	70	–	близка к 100
	1,0	80	–	близка к 100
	1,0	90	–	близка к 100

Зависимость скорости коррозии от времени экспозиции (времени контакта раствора со стальными электродами) показана на графике (рис. 2). Установлено, что образование защитной пленки на поверхности металла у цинкового комплексоноват происходит в первые 60 мин, у магниевого реагента защитная пленка формируется в равных условиях за 90 мин. Полученные данные сви-

детельствуют о том, что цинковый комплексонат на поверхности металла образуется с более высокой скоростью, чем магниевый. Однако по своей эффективности магниевый комплексонат практически не уступает его цинковому аналогу. В пользу этого вывода свидетельствует внешний вид электродов по окончании экспозиции (рис. 3).

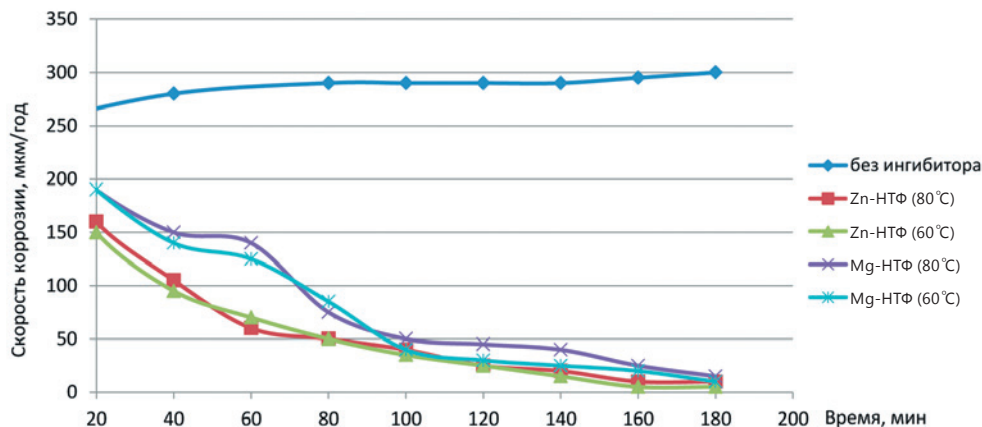


Рис. 2. Зависимость скорости коррозии от времени экспозиции: концентрация Zn-НТФ – 20 мг/л; концентрация Mg-НТФ – 20 мг/л.
 Fig. 2. Dependence of corrosion rate on exposure time. The concentration of Zn-NTP is 20 mg/l, the concentration of Mg-NTP is 20 mg/l.

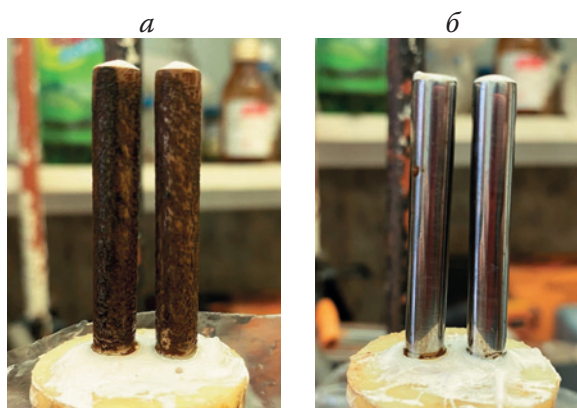


Рис. 3. Коррозия электродов при температуре 70 °С, времени экспозиции 3 ч, концентрации Mg-НТФ – 20 мг/л: *а* – без реагента, *б* – с реагентом.
 Fig. 3. Electrode corrosion. Temperature 70 °C. Exposure time – 3 hours. Concentration of Mg-NTP – 20 mg/l: *a* – without the reagent, *b* – with the reagent.

Исследованы также зависимости скорости коррозии от концентрации магниевого и цинкового комплекса (рис. 4, рис. 5).

Из данных графиков на рис. 4 и рис. 5 следует, что использование реагентов, содержащих как цинковые, так и магниевые комплексонаты, позволяет с высокой степенью эффективности ингибировать величину коррозии, снижая ее более чем в 10 раз при концентрации ингибиторов от 15 мг/л и выше (в диапазоне температур 60–80 °C).

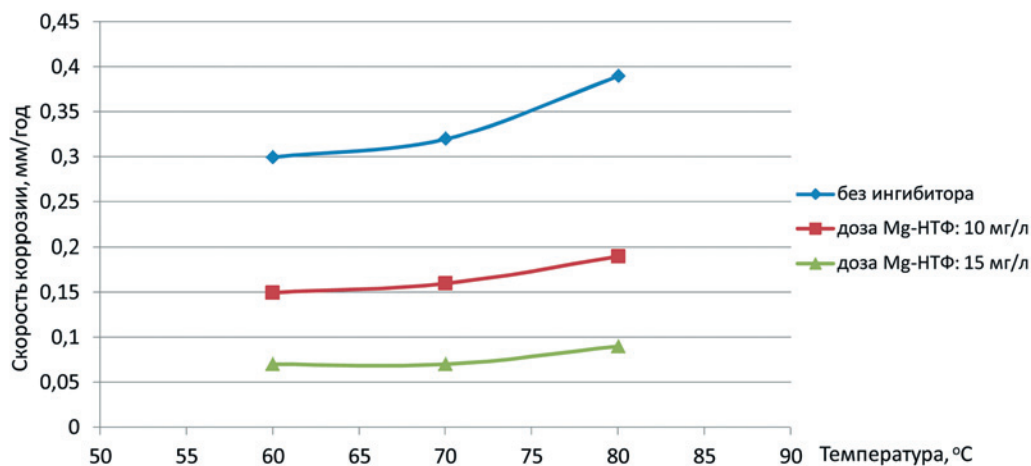


Рис. 4. Зависимость скорости коррозии от дозы ингибитора Mg-НТФ при различных температурах: 60–80 °С.

Fig. 4. The dependence of the corrosion rate on the dose of Mg-NTP inhibitor at different temperatures: 60–80 °С.

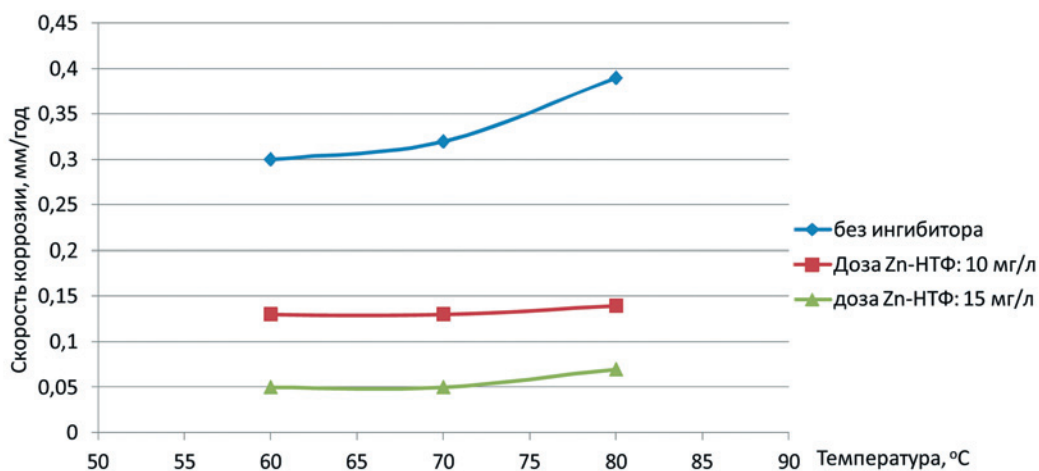


Рис. 5. Зависимость скорости коррозии от дозы ингибитора Zn-НТФ при различных температурах: 60–80 °С.

Fig. 5. Dependence of the corrosion rate on the dose of Zn-NTP inhibitor at different temperatures: 60–80 °С.

ВЫВОДЫ

Важным направлением охраны водных ресурсов является снижение сброса продуктов коррозии со сточными водами из систем транспортировки, нагрева и охлаждения воды предприятий коммунального хозяйства и промышленного сектора экономики. Так, применение не обескислороженной воды из р. Чусовой приводит к аварийному (свыше 300 мкм/год) уровню коррозии стали в системах открытого горячего водоснабжения.

В рамках проведенного исследования установлено, что степень снижения коррозионных процессов зависит от дозы ингибиторов на основе НТФ. Эффективной можно считать дозу НТФ свыше 15 мг/л. Применение рассматриваемых ингибиторов позволяет полностью предотвратить образование карбонатных отложений на поверхностях теплообмена, а скорость коррозии снижается до 5–10 мкм/год. Однако ПДК по данным комплексонам составляет 5 мг/л, что ограничивает использование этих реагентов в допустимых концентрациях для систем открытого горячего водоснабжения.

Особенную практическую значимость данных ингибиторов можно выделить для систем оборотного водоснабжения промышленных предприятий. На основе данной технологии можно стремиться к максимальному сокращению продувочных вод чистых и грязных оборотных циклов. Актуальной задачей является изучение снижения содержания НТФ при очистке сточных вод. Применение цинковых и особенно магниевых комплексонатов на основе НТФ позволяет практически полностью не только подавить процессы коррозии, но и существенно уменьшить неблагоприятное воздействие указанных реагентов на живые организмы водоемов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Будников Г.К. Тяжелые металлы в экологическом мониторинге водных систем // Соросовский образовательный журнал. 1998. № 5. С. 23–29.
2. Цирульников Н.В., Дрикер Б.Н., Фетисова Т.С., Тарантаев А.Г. Тенденции в области создания и применения химических реагентов для стабилизационной обработки воды с целью предотвращения солеотложений и коррозии металлов систем водопользования // Коррозия: материалы, защита. 2011. № 7. С. 12–25.
3. Boels L., Wagterveld R. M., Witkamp G. J. Ultrasonic reactivation of phosphonate poisoned calcite during crystal growth // Ultrasonics Sonochemistry. 2011. Vol. 18. No. 5. P. 1225–1231.
4. Hoang T.A., Ang H.M., Rohl A.L. Investigation into the effects of phosphonic inhibitors on the formation of calcium sulfate scales // Desalination and Water Treatment. 2011. Vol. 29. P. 294–301.
5. Дятлова Н.М., Дытюк А.Т., Самакаев Р.Х. и др. Применение комплексонов в нефтеперерабатывающей промышленности. М.: НИИТЭХИМ, 1983. С. 25–27.
6. Labjar N., Hajjaji S., Lebrini M., Idrissi M.S., Jama C., Bentiss F. Enhanced corrosion resistance properties of carbon steel in hydrochloric acid medium by aminotris(methylenephosphonic): Surface characterizations // Journal of Material Environment Science. 2011. Vol. 2. No. 4. P. 2028–2508.
7. Labjar N., Lebrini M., Bentiss F., Chihib N.E., Hajjaji S.E., Jama C. Corrosion inhibition of carbon steel and antibacterial properties of aminotris-(methylenephosphonic) acid // Material Chemistry Physics. 2010. Vol. 119. No. 1–2. P. 330–336.
8. Kalyani D.S., Rao S.S., Babu M.S., Rao B. V.A., Sreedhar B. Electrochemical and surface analytical studies of carbon steel protected from corrosion in a low-chloride environment containing a phosphonate-based inhibitor // Register of Chemistry. Intermed. 2014.
9. Labjar N., Lebrini M., Bentiss F., Chihib N., Hajjaji S., Jama Ch. Corrosion inhibition of carbon steel and antibacterial properties of aminotris-(methylenephosphonic) acid // Material Chemistry Physics. 2010. Vol. 119. No. 1–2. P. 330–336.
10. Liu F., Lu X., Yang W., Lu J., Zhong H., Chang X., Zhao Ch. Optimizations of inhibitors compounding and applied conditions in simulated circulating cooling water system // Desalination. 2013. Vol. 313. P. 18–27.
11. Kosyakova P.B., Khripun M.K., Myund L.A. On inhibition of calcium sulfate crystallization with phosphonic complexes // Russian Journal of Applied Chemistry. 2010. Vol. 83. No. 6. P. 969–973.
12. Shaw S., Sorbie K. S., Boak L. The effects of barium sulfate saturation ratio, calcium, and magnesium on the inhibition efficiency – part I: phosphonate scale inhibitors // SPE Production and Operations. 2012. Vol. 27. No. 3. P. 306–317.

13. Baraka-Lokmane S., Sorbie K. S. Effect of pH and scale inhibitor concentration on phosphonate-carbonate interaction // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2010. Vol. 70. No. 1–2. P. 10–27.
14. Rodriguez-Navarro C., Benning L. G. Control of crystal nucleation and growth by additives // *Elements*. 2013. Vol. 9. P. 203–209.
15. Kelland M.A. Effect of various cations on the formation of calcium carbonate and barium sulfate scale with and without scale inhibitors // *Indian English Chemistry Register*. 2011. Vol. 50. P. 5852–5861.
16. Sridharan D., Karthikeyan Ch., Maruthamuthu S., Manoharan S., Palaniswamy N. Impact of mixed inhibitor on electrochemical behavior of inland water biofilm formed on 316L stainless steel // *Indian English Chemistry Register*. 2013. Vol. 52. No. 46. P. 16175–16181.
17. Hoang T.A., Ang H.M., Rohl A.L. Effects of organic additives on calcium sulfate scaling in pipes // *Australian Journal of Chemistry*. Vol. 62. No. 8. P. 927–933.
18. Akjol E., Oner M., Barouda E., Demadis K.D. Systematic structural determinants of the effects of tetraphosphonates on gypsum crystallization // *Crystals Growth Description*. 2009. Vol. 9. No. 12. P. 5145–5154.
19. Zhang B., Zhang L., Li F., Hu W., Hannam Ph.M. Testing the formation of Ca-phosphonate precipitates and evaluating the anionic polymers as Ca-phosphonate precipitates and CaCO₃ scale inhibitor in simulated cooling water // *Corrosion Science*. 2010. Vol. 52. No. 12. P. 3883–3890.
20. Дрикер Б.Н., Тарасова С.А., Обожин А.Н. и др. Комплексный ингибитор солеотложений, коррозии и биообрастаний на основе органических фосфонатов // *Энергосбережение и водоподготовка*. 2010. № 1. С. 4–6.

REFERENCES

1. Budnikov G.K. Heavy metals in environmental monitoring of water systems. *Sorosovskiy obrazovatelnyy zhurnal [Soros Educational Journal]*. 1998. No. 5. Pp. 23–29 (In Russ.).
2. Tsirulnikova N. V., Driker B. N., Fetisova T. S., Tarantayev A. G. Trends in the creation and application of chemical reagents for stabilization water treatment in order to prevent salt deposition and corrosion of metals of water use systems. *Korrosiya: materialy i zashchita [Corrosion: materials, protection]*. 2011. No. 7. P. 12–25 (In Russ.).
3. Boels L., Wagterveld R. M., Witkamp G. J. Ultrasonic reactivation of phosphonate poisoned calcite during crystal growth. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2011. Vol. 18. No 5. P. 1225–1231.
4. Hoang T. A., Ang H. M., Rohl A. L. Investigation into the effects of phosphonic inhibitors on the formation of calcium sulfate scales. *Desalination and Water Treatment*. 2011. Vol. 29. P. 294–301.
5. Dyatlova N. M., Dytyuk L. T., Samakaev R. H. et al. The use of complexons in the oil refining industry. Moscow: NIITEKHIM, 1983. P. 25–27 (In Russ.).
6. Labjar N., Hajjaji S., Lebrini M., Idrissi M. S., Jama C., Bentiss F. Enhanced corrosion resistance properties of carbon steel in hydrochloric acid medium by aminotris(methylenephosphonic): Surface characterizations. *Journal of Material Environment Science* 2011. Vol. 2. No 4. P. 2028–2508.
7. Labjar N., Lebrini M., Bentiss F., Chihib N. E., Hajjaji S. E., Jama C. Corrosion inhibition of carbon steel and antibacterial properties of aminotris-(methylenephosphonic) acid. *Material Chemistry Physics*. 2010. Vol. 119. No 1–2. P. 330–336.
8. Kalyani D. S., Rao S. S., Babu M. S., Rao B. V.A., Sreedhar B. Electrochemical and surface analytical studies of carbon steel protected from corrosion in a low-chloride environment containing a phosphonate-based inhibitor. *Respective Chemistry. Intermed.* 2014.
9. Labjar N., Lebrini M., Bentiss F., Chihib N., Hajjaji S., Jama Ch. Corrosion inhibition of carbon steel and antibacterial properties of aminotris-(methylenephosphonic) acid. *Material Chemistry Physics*. 2010. Vol. 119. No 1–2. P. 330–336.
10. Liu F., Lu X., Yang W., Lu J., Zhong H., Chang X., Zhao Ch. Optimizations of inhibitors compounding and applied conditions in simulated circulating cooling water system. *Desalination*. 2013. Vol. 313. P. 18–27.
11. Kosyakova P. B., Khripun M. K., Myund L. A. On inhibition of calcium sulfate crystallization with phosphonic complexes. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2010. Vol. 83. No 6. P. 969–973.
12. Shaw S., Sorbie K. S., Boak L. The effects of barium sulfate saturation ratio, calcium, and magnesium on the inhibition efficiency – part I: phosphonate scale inhibitors. *SPE Production and Operations*. 2012. Vol. 27. No 3. P. 306–317.

13. Baraka-Lokmane S., Sorbie K. S. Effect of pH and scale inhibitor concentration on phosphonate-carbonate interaction. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2010. Vol. 70. No 1–2. P. 10–27.
14. Rodriguez-Navarro C., Benning L. G. Control of crystal nucleation and growth by additives. *Elements*. 2013. Vol. 9. P. 203–209.
15. Kelland M. A. Effect of various cations on the formation of calcium carbonate and barium sulfate scale with and without scale inhibitors. *Indian English Chemistry Register*. 2011. Vol. 50. P. 5852–5861.
16. Sridharan D., Karthikeyan Ch., Maruthamuthu S., Manoharan S., Palaniswamy N. Impact of mixed inhibitor on electrochemical behavior of inland water biofilm formed on 316L stainless steel. *Indian English Chemistry Register*. 2013. Vol. 52. No 46. P. 16175–16181.
17. Hoang T. A., Ang H. M., Rohl A. L. Effects of organic additives on calcium sulfate scaling in pipes. *Australian Journal of Chemistry*. Vol. 62. No 8. P. 927–933.
18. Akyol E., Oner M., Barouda E., Demadis K. D. Systematic structural determinants of the effects of tetraphosphonates on gypsum crystallization. *Crystals Growth Description*. 2009. Vol. 9. No 12. P. 5145–5154.
19. Zhang B., Zhang L., Li F., Hu W., Hannam Ph. M. Testing the formation of Ca-phosphonate precipitates and evaluating the anionic polymers as Ca-phosphonate precipitates and CaCO₃ scale inhibitor in simulated cooling water. *Corrosion Science*. 2010. Vol. 52. No 12. P. 3883–3890.
20. Driker B. N., Tarasova S. A., Obozhin A. N. et al. Complex inhibitor of salt deposition, corrosion and biofouling based on organic phosphonates. *Energoberezheniye i vodopodgotovka [Energy saving and water treatment]*. 2010. No. 1. P. 4–6 (In Russ.).

Сведения об авторах:

Браяловский Георгий Борисович, канд. техн. наук, доцент, кафедра водного хозяйства и технологии воды, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620049, г. Екатеринбург, ул. Мира, 17; ORCID: 0000-0003-0031-7393; e-mail: g.b.braialovsky@urfu.ru

Никифоров Александр Федорович, д-р хим. наук, профессор, кафедра водного хозяйства и технологии воды, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620049, г. Екатеринбург, ул. Мира, 17; ORCID: 0000-0002-9779-9538; e-mail: a.f.nikiforov@urfu.ru

Насчетникова Ольга Борисовна, канд. техн. наук, доцент, кафедра водного хозяйства и технологии воды, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620049, г. Екатеринбург, ул. Мира, 17; ORCID: 0000-0002-6020-4406; e-mail: o.b.naschetnikova@urfu.ru

Мигалатий Евгений Васильевич, д-р техн. наук, профессор, кафедра водного хозяйства и технологии воды, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620049, г. Екатеринбург, ул. Мира, 17; ORCID: 0000-0002-1393-0077; e-mail: e.v.migalatiy@urfu.ru

About authors:

Georgy B. Brayalovsky, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Water Management and Water Technology, B.N. Yeltsin Ural Federal University, 620002, , ul. Mira, 17, Ekaterinburg, 620002, Russia; ORCID: 0000-0003-0031-7393; e-mail: g.b.braialovsky@urfu.ru

Aleksander F. Nikiforov, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Department of Water Management and Water Technology, B.N. Yeltsin Ural Federal University, 620002, ul. Mira, 17, Ekaterinburg, 620002, Russia; ORCID: 0000-0002-9779-9538; e-mail: a.f.nikiforov@urfu.ru

Olga B. Naschetnikova, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Department of Water Management and Water Technology, B.N. Yeltsin Ural Federal University, 620002, , ul. Mira, 17, Ekaterinburg, 620002, Russia; ORCID: 0000-0002-6020-4406; e-mail: o.b.naschetnikova@urfu.ru

Evgeny V. Migalatiy, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Water Management and Water Technology, B.N. Yeltsin Ural Federal University, 620002, ul. Mira, 17, Ekaterinburg, 620002, Russia; ORCID: 0000-0002-1393-0077; e-mail: e.v.migalatiy@urfu.ru