


## Защита водных объектов от продуктов коррозии и минеральных отложений: выбор оптимальных ингибиторов

А.А. Протазанов  , Б.Н. Дрикер , Н.Н. Стягов 

 protazanov.a@yandex.ru

ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет»,  
г. Екатеринбург, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Актуальность.** Предприятия химической, металлургической, нефтяной промышленности, энергетики потребляют значительные объемы воды. Сократить затраты помогает организация замкнутых и бессточных систем водоснабжения. Однако эффективность эксплуатации таких систем снижается из-за минеральных отложений и коррозии. В отечественной и зарубежной практике широко применяются технологии обработки, используемой в качестве хладоагента, теплоносителя или гидротранспорта воды реагентами, препятствующими образованию минеральных отложений и коррозии металла. К числу используемых реагентов относятся органофосфонаты и их комплексоны. В настоящее время жесткие требования к содержанию ингибиторов в сбрасываемых сточных водах требуют создания реагентов, обладающих наибольшей эффективностью ингибирования солеотложений и коррозии при минимальных концентрациях, а также не содержащих тяжелых металлов и обладающих низкой токсичностью. **Методы.** В качестве объекта исследований использованы органофосфонаты, а также их композиционные составы, содержащие цинковые и магниевые комплексоны. **Результаты.** Установлено, обосновано и экспериментально подтверждено, что органофосфонаты и их композиционные составы, содержащие магниевые комплексоны, являются эффективными ингибиторами коррозии и солеотложений в диапазоне температур 70–90 °С в воде высокой минерализации.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** водные объекты, ингибирование солеотложений и коррозии, органофосфонаты, оборотное водоснабжение, коррозия.

**Для цитирования:** Протазанов А.А., Дрикер Б.Н., Стягов Н.Н. Защита водных объектов от продуктов коррозии и минеральных отложений: выбор оптимальных ингибиторов // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 1. С. 100–108. DOI: 10.35567/19994508-2024-1-100-108.

Дата поступления 04.12.2023.

### PROTECTION OF WATER BODIES FROM CORROSION PRODUCTS AND MINERAL DEPOSITS: SELECTION OF OPTIMAL INHIBITORS

Afanasiy A. Protazanov  , Boris N. Driker , Nikolay N. Styagov 

 protazanov.a@yandex.ru

Ural State Forest Engineering University, Yekaterinburg, Russia

### ABSTRACT

**Relevance.** Enterprises in the chemical, metallurgical, petroleum and energy industries consume great amounts of water. Organizing of closed and drainless water supply systems

© Протазанов А.А., Дрикер Б.Н., Стягов Н.Н., 2024

enables to diminish expenses. However, the operation of such systems shows that their efficiency is reduced due to mineral deposits and corrosion. One of the methods that solves the problem and is used in domestic and foreign practice is the treatment of water used as a refrigerant, coolant or hydraulic transport, with reagents that prevent formation of mineral deposits and metal. These reagents include organic phosphonates (OPs) and their complexons. Nowadays stringent requirements for the inhibitors' content in discharged wastewater require reagents that provide the greatest efficiency in inhibiting scale deposits and storage at minimum concentrations, and also do not contain active metals (Cu, Zn) and have low toxicity. **Methods.** We used organic phosphates and their composition compounds containing zinc and magnesium complexonates as an object of investigations. **Results.** We have established, substantiated and experimentally affirmed that magnesium complexonates NTPA and DPP are effective inhibitors of corrosion and scale deposits, in the 70-90 °C temperature range in model water of high mineralization.

**Keywords:** water bodies, inhibition of scale and corrosion, organophosphonates, recycled water supply, corrosion.

**Forcitation:** Protazanov A.A., Driker B.N., Styagov N.N. Protection of water bodies from corrosion products and mineral deposits: selection of optimal inhibitors. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2024. No. 1. P. 100–108. DOI: 10.35567/19994508-2024-1-100-108.

Received 04.12.2023.

## ВВЕДЕНИЕ

Образование минеральных отложений и коррозия конструкционных сталей в технологических процессах, связанных с использованием воды в качестве хладагента, теплоносителя, гидротранспорта является серьезной проблемой уже более сотни лет и не теряет своей актуальности и в настоящее время [1–3].

Внедрение ресурсосберегающих технологий, создание замкнутых и бессточных систем водоснабжения усугубляет проблемы минеральных отложений и коррозии при использовании современного технологического оборудования. Об актуальности этих вопросов свидетельствуют данные, согласно которым отложения толщиной 1–2 мм приводят к перерасходу топлива на 10–13 %, вследствие коррозионного износа теряется до 25 % ежегодно производимой конструкционной стали. Для предотвращения минеральных отложений применяются химические реагенты, в число которых входят неорганические фосфаты и полифосфаты, низкомолекулярные полимеры, органические фосфонаты (ОФ) [4–12].

Наиболее успешным, с практической точки зрения, является использование для обработки водных систем органических фосфонатов. Это стало возможным благодаря работам по их синтезу, выполненным в СССР под руководством академика М.И. Кабачника. Уникальная способность органических фосфонатов ингибировать минеральные отложения различного химического состава и их малый (субстехиометрический) расход (1–5 мг/л), в зависимости от химического состава и строения, обеспечивали их широкое внедрение в различных отраслях промышленности. По существу, с большими или меньшими эксплуатационными затратами проблема минеральных отложений была решена к концу 1990-х годов. Однако остались вопросы, связанные с коррозионным износом. В значительной степени это связано с тем, что из-за отсутствия отложений поверхность металла становилась легкодоступной как для

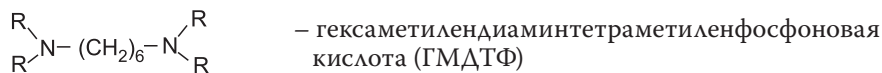
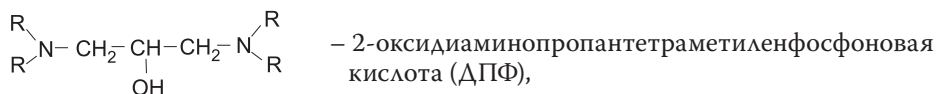
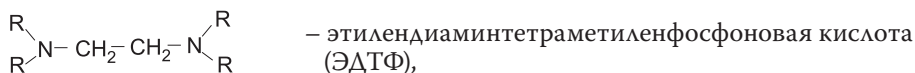
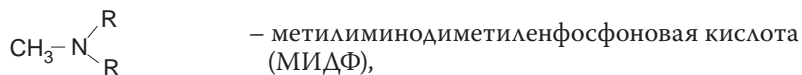
электрохимической, так и кислородной коррозии. Также, как и ингибирование образования отложений, проблемы коррозии решаются с использованием химических реагентов – хроматов, силикатов, органических аминокислотных соединений и др.<sup>1,2</sup> [13, 14]. Их широкое применение ограничивается расходом, высокой стоимостью, вредным воздействием на окружающую среду.

Эффективную борьбу с коррозией обеспечивает использование органических фосфонатов в композиции с их комплексоновыми соединениями, в частности, цинком [15–17]. Это позволяет предотвращать коррозию при одновременном ингибировании образования минеральных отложений. Однако использование подобных композиционных составов ограничивается, в первую очередь, их расходом (на порядок большим, чем применяется для предотвращения отложений – 10–100 мг/л обрабатываемой воды). Как следствие – увеличение стоимости, невозможность применения в системах отопления и горячего водоснабжения. В системах охлаждения не исключается возможность попадания воды в водоемы культурно-бытового (ПДК по цинку 1,0 мг/л) и рыбохозяйственного назначения (ПДК по цинку 0,01 мг/л).

Целью данной работы является исследование цинковых и магниевых комплексонов для одновременного ингибирования солеотложений и коррозии.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объектов исследования использовали органофосфонаты, а также их композиционные составы, содержащие цинковые и магниевые комплексоны, отличающиеся количеством функциональных групп в молекуле реагента и длиной углеводородного радикала, соединяющего аминотетраметилфосфоновые группы:



где R – CH<sub>2</sub>PO<sub>3</sub>H<sub>2</sub>.

<sup>1</sup> Pat. 2005244315 USA, МКИ В 01D 011-02. Apparatus for dispensing a solid chemical block for water treatment / M.D. Greaves, B.D. Bedford et al. Заявл. 30.04.2004; Опубли. 03.11.2005; С.А. 2005. V. 143. 410584.

<sup>2</sup> Pat. 2019217496 USA МКИ C09K 8/54 2006.1 C23F 14.11.2006.1. Corrosion inhibitor blends / Hughes T.L. et al. Заявл. 08.05.2019; Опубли. 14.11.2019.

В качестве модельного раствора использовали воду высокой минерализации, мг/л:  $\text{CaCl}_2$  – 1460;  $\text{MgSO}_4$  – 2130;  $\text{NaCl}$  – 2030;  $\text{NaHCO}_3$  – 1200 (ионная сила  $\mu = 0,19889$  моль/л). Данный состав воды характерен для технологических систем в нефтяной и химической промышленности.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Предположительно поиск ингибиторов возможен и в случае увеличения количества функциональных групп и длины углеводородного радикала. В рамках проведенной работы изучена возможность использования ДПФ как ингибитора солеотложений. ДПФ является одним из наиболее перспективных реагентов, поскольку содержит в своем составе четыре функциональных группы  $\text{CH}_2\text{PO}_3\text{H}_2$ , разделенные тремя углеродными атомами. Сравнительный анализ эффективности ДПФ как ингибитора солеотложений проведен в динамических условиях. В качестве модельного раствора использовали пересыщенный раствор сульфата кальция. Сульфат кальция является традиционно используемой моделью, для которой характерны стабильные значения и воспроизводимость параметров зародышеобразования при кристаллизации.

Результаты сравнивали с реагентами, отличающимися количеством функциональных групп, длиной углеводородных радикалов. Обработку полученных экспериментальных данных проводили по уравнениям Гиббса-Фольмера  $\beta = A \exp\left[-\frac{16 \pi \cdot \sigma^3 \cdot M^2}{3R^3 \cdot T^3 \cdot \rho^2 \cdot \ln^2 \cdot S}\right]$ , Оствальда-Фрейндлиха  $r = \frac{2\sigma \cdot M}{R \cdot T \cdot \ln \cdot S}$ , Христиансена-Нильсена  $\beta = k \cdot \Delta C^n$ , где  $\sigma$  – удельная поверхностная энергия, мДж/м<sup>2</sup>,  $r$  – радиус критического зародыша,  $n$  – порядок реакции зародышеобразования,  $M$  – молекулярная масса кристаллизующейся соли,  $R$  – универсальная газовая постоянная Дж/моль\*к,  $T$  – температура, К,  $\rho$  – плотность соли, г/см<sup>3</sup>,  $S$  – относительное пересыщение, равное отношению начальной концентрации к равновесной,  $\Delta C = C_{\text{исх}} - C_p$ ,  $n$  – порядок реакции,  $k$  – константа скорости.

По графику зависимости  $\ln t_{\text{инд}} - 1/\ln^2 S$  рассчитаны значения  $\sigma$  и  $n$ , а по значению  $\sigma$  радиус критического зародыша –  $r$ . Значения параметров, представлены на рис. 1 и рис. 2.

На рис. 2 отражены рассчитанные значения параметров зародышеобразования ( $\sigma$ ,  $n$ ,  $d$ ) для исследуемых реагентов. Из данных, представленных на рис. 2, следует, что с увеличением количества функциональных групп в молекуле реагента (МИДФ-НТФ-ЭДФ) и длины углеводородного радикала, соединяющего аминодиметилфосфоновые группы (ЭДФ-ДПФ-ГМДФ), растут кинетические параметры зародышеобразования и, соответственно, снижается расход реагента.

Обработка экспериментальных данных показала перспективность использования ГМДФ и ДПФ для ингибирования солеотложений по сравнению с другими комплексами. Однако для производства ГМДФ используют в качестве исходного сырья гексаметилендиамин, по цене данный компонент не может конкурировать с другими отечественными ингибиторами, полученными на основе хлористого аммония и, особенно, из отходов производства полиаминов, применяющихся для получения НТФ и ОЭДФ.

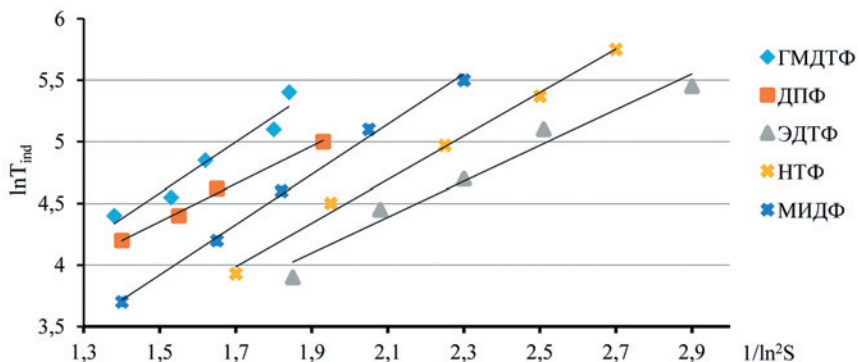


Рис. 1. Зависимость продолжительности индукционного периода от пересыщения.  
Fig. 1. Dependence of the induction period duration on supersaturation.

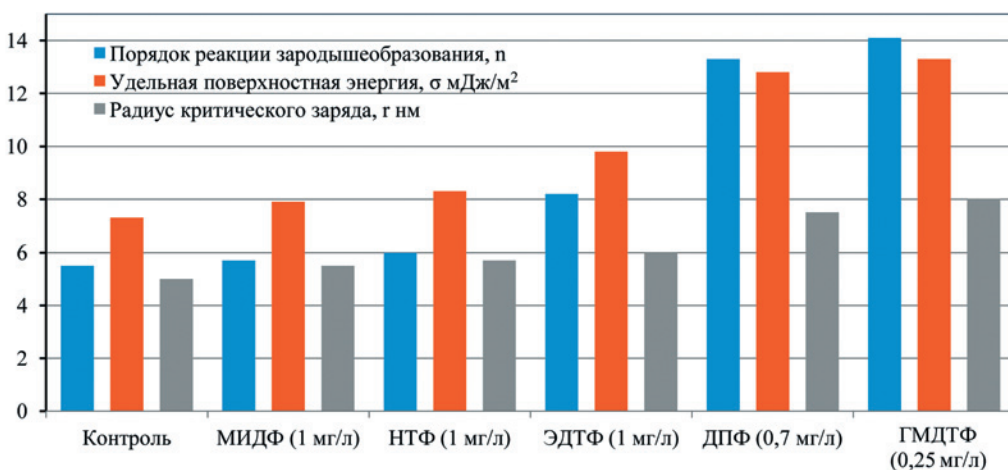


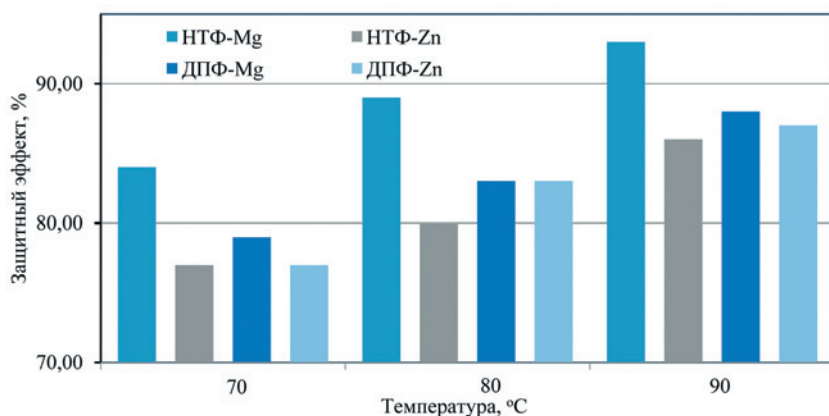
Рис. 2. Влияние ОП на кинетические параметры зародышеобразования.  
Fig. 2. The effect of OP on the nucleation kinetic parameters.

В случае использования ДПФ в качестве ингибитора солеотложений возможно его применение в виде магниевых комплексонов для ингибирования и коррозии. Выбор адденда магния обусловлен тем, что он менее агрессивен по отношению к окружающей среде, а произведение растворимости (ПР) его гидроксида близко к ПР гидроксида цинка ( $ПР_{Zn(OH)_2} = 1,4 \cdot 10^{-17}$ ,  $ПР_{Mg(OH)_2} = 7,1 \cdot 10^{-12}$ ). Исследования проводили на установке, представленной в [18]. В ходе испытаний контролировали скорость коррозии методом измерения поляризационного сопротивления воды на приборе «Эксперт-004» [19].

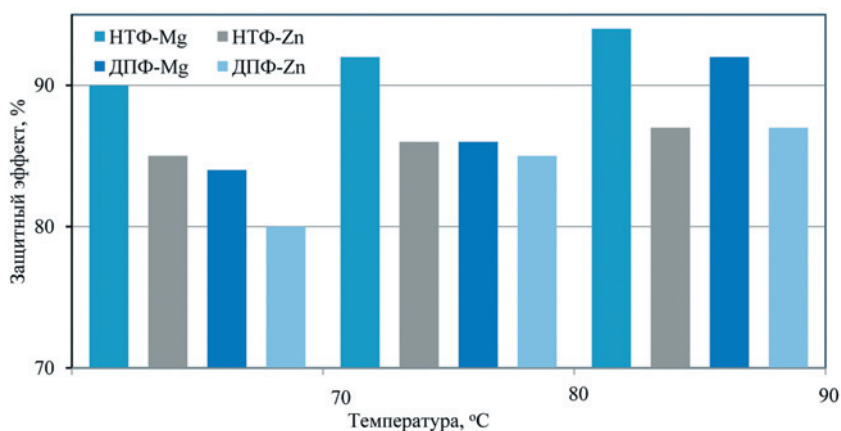
В качестве примера на рис. 3 и рис. 4 представлены результаты ингибирования коррозии магниевыми и цинковыми комплексоноватами в воде высокой минерализации.

На основе представленных на рис. 3 данных можно сделать вывод, что в изученном диапазоне температур, защитный эффект магниевого комплексоновата НДФ выглядит предпочтительнее остальных комплексоноватов органических фосфонатов при концентрации 30 мг/л. Дополнительно проведены исследования с концентрацией реагентов 50 мг/л. В изученном диапазоне температур

увеличивалась величина защитного эффекта (рис. 4). Замена ДПФ на НТФ и ОЭДФ в диапазоне концентраций 30–50 мг/л несущественно сказывается на эффективности реагентов, что позволяет рассмотреть возможность использования данных комплексонов в качестве ингибиторов многоцелевого назначения. По своей эффективности магниевые комплексоны не уступают цинковым. Снижение величины коррозии, в присутствии композиций на основе комплексонов, может быть связано с образованием защитной пленки на металлической поверхности.



**Рис. 3.** Ингибирование коррозии при концентрации реагентов 30 мг/л.  
 Fig. 3. Corrosion inhibition at a reagent concentration of 30 mg/l.



**Рис. 4.** Ингибирование коррозии при концентрации реагентов 50 мг/л.  
 Fig. 4. Corrosion inhibition at a reagent concentration of 50 mg/l.

## ВЫВОДЫ

На основании результатов испытаний установлено, что реагент ДПФ демонстрирует хорошие потребительские свойства в качестве ингибитора солеотложений по сравнению с аналогичными отечественными ингибиторами. Его механизм действия заключается в адсорбции на микророздышах кристаллизующихся солей, что приводит к прекращению их роста. В перспективе



возможно сокращение расхода органических фосфонатов за счет одновременного ингибирования солеотложений и коррозии.

Высокая эффективность ингибирования магниевого комплекса нитрило-триметиленфосфоновой кислоты делает его перспективным для применения не только в чистых оборотных циклах водоснабжения, но и в «грязных» циклах металлургических предприятий и предприятий нефтяной промышленности, для которых характерно высокое содержание солей, наличие примесей в виде взвесей и повышенное содержание различных форм железа. Продукты коррозии наносят непоправимый вред водной флоре и фауне, а также угрожают здоровью человека. В данном контексте предотвращение и минимизация их влияния на водные объекты становится необходимым условием для обеспечения устойчивого развития и сохранения природных ресурсов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балабан-Ирменин Ю.В., Липовских В.М., Рубашов А.М. Защита от внутренней коррозии трубопроводов водяных тепловых сетей. М.: Энергоатомиздат, 1999. 248 с.
2. Гарифуллин Ф.С., Габдуллин Р.Ф. Изучение условий образования и зон отложения комплексных осадков в добывающих скважинах // Разработка и эксплуатация нефтяных месторождений: сб. науч. тр. Уфа: Изд-во УГНТУ, 1999. С. 33–38.
3. Дриккер Б.Н., Тарасова С.А., Тарантаев А.Г. Ингибиторы многоцелевого назначения для систем оборотного водоснабжения // Экология и промышленность. 2012. № 3(32). С. 48–55.
4. Дятлова Н.М., Темкина В.Я., Попов К.И. Комплексоны и комплексонаты металлов. Химия. 1988. 544 с.
5. Кабачник М.И., Медведь Т.Я., Дятлова Н.М., Рудомино М.В. Фосфорорганические комплексоны // Успехи химии. 1974. Т. 43. Вып. 9. С. 1554–1574.
6. Рудомино М.В., Кабачник М.И., Дятлова Н.М. О некоторых особенностях комплексообразования фосфорорганических комплексонов // ДАН СССР. 1965. Т. 161. С. 607–610.
7. Рудомино М.В., Кабачник М.И., Дятлова Н.М. Фосфорорганические комплексоны // Успехи химии. 1968. Т. 37. С. 1161–1215.
8. Рудакова Г.Я., Ларченко В.Е., Цирульникова Н.В. Теория и практика применения комплексонов в энергетике // Современные технологии водоподготовки и защиты оборудования от коррозии и накипеобразования: тезисы конф. М.: ИРЕА, 2003. С. 11–19.
9. Cui C., Zhang S. Synthesis, scale inhibition and dispersion performance evaluation of the environmentally benign additive IA-AMPS-APEG copolymer. Environmental Science: Water Research Technologies. 2019. No. 5 (10). P. 1736–1747.
10. Ji Y., Chen Y., Le J., Qian M., Huan Y., Yang W., Yin X., Liu Y., Wang X., Chen Y. Highly effective scale inhibition performance of aminotrimethylenephosphonic acid on calcium carbonate // Desalination. 2017. No. 422. P. 165–173.
11. Kumar T., Vishwanatham S., Kundu S.S. A laboratory study on pteroyl-l-glutamic acid as a scale prevention inhibitor of calcium carbonate in aqueous solution of synthetic produced water // Journal of Petroleum Science Engineering. 2010. No. 71 (1–2). P. 1–7.
12. Liu D., Dong W., Li F., Hui F., Lédion J. Comparative performance of polyepoxysuccinic acid and polyaspartic acid on scaling inhibition by static and rapid controlled precipitation methods // Desalination. 2012. No. 304. P. 1–10.
13. Нудель В.С. Современное решение проблем коррозии на предприятиях металлургической отрасли // Черная металлургия. 2008. № 7(1303). С. 42–45.
14. Чугунов Д.О., Чиркунов А.А., Кузнецов Ю.И. Пассивация низкоуглеродистой стали с пре-варительной модификацией ее поверхности цинковым комплексом аминотриметилен-фосфоновой кислоты // Успехи в химии и химической технологии. 2018. Т. 32. № 13 (209). С. 93–95.
15. Кузнецов Ю.И., Чиркунов А.А., Филиппов И.А. О влиянии модификации поверхности стали оксиэтилендифосфонатом цинка на пассивацию ее растворами некоторых ингибиторов // Электрохимия. 2013. Т. 49. № 12. С. 1235–1242.

16. Линников О.Д., Дрикер Б.Н., Тарантаев А.Г., Мурашова А.И. Изучение возможности использования реагента КИСК-1 в качестве ингибитора коррозии и солеотложений // Практика противокоррозионной защиты. 2015. № 1(75). С. 45–50.
17. 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.
18. Дрикер Б.Н., Протазанов А.А., Цирульникова Н.В. Ингибитор многоцелевого назначения для систем водопотребления // Энергосбережение и водоподготовка. 2020. № 6. С. 13–17.
19. Ануфриев Н.Г., Комарова Е.Е., Смирнова Н.Е. Универсальный коррозиметр для научных исследований и производственного контроля коррозии металлов и покрытий // Коррозия: материалы, защита. 2004. № 1. С. 42–47.

## REFERENCES

1. Balaban-Irmenin Y.V., Lipovskikh V.M., Rubashov A.M. Protection from internal corrosion of pipelines of water heating networks. M.: Energoatomizdat. 1999. 248 p. (In Russ.).
2. Garifullin F.S. Study of conditions of formation and zones of deposition of complex sediments in producing wells. F.S. Garifullin, R.F. Gabdullin. Development and exploitation of oil fields: Collection of scientific tr. Ufa: Publishing house of USNTU. 1999. Pp. 33–38 (In Russ.).
3. Driker B.N. Multi-purpose inhibitors for recycling water supply systems. B. N. Driker, S. A. Tarasova, A. G. Taranteva. *Ecology and industry*. 2012. № 3(32). Pp. 48–55 (In Russ.).
4. Dyatlova N.M., Temkina V.Y., Popov K.I. Metal complexes and complexonates. *Chemistry*. 1988. 544 p. (In Russ.).
5. Kabachnik M.I., Medved T.Y., Dyatlova N.M., Rudomino M.V. Organophosphorus complexes. *Successes of chemistry*. 1974. Vol. 43. Iss. 9. Pp. 1554–1574 (In Russ.).
6. Rudomino M.V., Kabachnik M.I., Dyatlova N.M. On some features of the complexation of organophosphate complexes. DAN USSR. 1965. Vol. 161. Pp. 607–610 (In Russ.).
7. Rudomino M.V., Kabachnik M.I., Dyatlova N.M. Organophosphate complexes. *Successes of chemistry*. 1968. Vol. 37. Pp. 1161–1215 (In Russ.).
8. Rudakova G.Ya., Larchenko V.E., Tsiurulnikova N.V. Theory and practice of the complexones application in power industry. *Modern technologies of water treatment and protection of equipment from corrosion and scale formation*. M.: IREA. 2003. Pp. 11–19 (In Russ.).
9. Cui C., Zhang S. Synthesis, scale inhibition and dispersion performance evaluation of the environmentally benign additive IA–AMPS–APEG copolymer. *Environment Sciences: Water Researches Technologies*. 5 (10) (2019), pp. 1736–1747.
10. Ji Y., Chen Y., Le J., Qian M., Huan Y., Yang W., Yin X., Liu Y., Wang X., Chen Y. Highly effective scale inhibition performance of aminotrimethylenephosphonic acid on calcium carbonate. *Desalination*. 422 (2017). Pp. 165–173.
11. Kumar T., Vishwanatham S., Kundu S.S. A laboratory study on pteroyl-l-glutamic acid as a scale prevention inhibitor of calcium carbonate in aqueous solution of synthetic produced water. *Journal of Petroleum Science Engineering*. 71 (1-2) (2010). Pp. 1–7.
12. Liu D., Dong W., Li F., Hui F., Lédion J. Comparative performance of polyepoxysuccinic acid and polyaspartic acid on scaling inhibition by static and rapid controlled precipitation methods. *Desalination*. 304 (2012). Pp. 1–10.
13. Weeks V.S. Modern solution of corrosion problems at the enterprises of the metallurgical industry. Ferrous metallurgy. *Bulletin of scientific, technical and economic information*. 2008. № 7(1303). Pp. 42–45 (In Russ.).
14. Chugunov D.O. Passivation of low-carbon steel with a preliminary modification of its surface with a zinc complex of aminotrimethylene phosphonic acid / D. O. Chugunov, A.A. Chirkunov, Yu.I. Kuznetsov. *Advances in chemistry and chemical technology*. 2018. Vol. 32. № 13 (209). Pp. 93–95 (In Russ.).
15. Kuznetsov Y.I., Chirkunov A.A., Filippov I.A. On the effect of modification of the surface of zinc oxy-ethylidene diphosphonate steel on its passivation with solutions of some inhibitors. *Electrochemistry*. 2013. Vol. 49. No. 12. Pp. 1235–1242 (In Russ.).



16. Linnikov O.D. Studying the possibility of using the KISK-1 reagent as an inhibitor of corrosion and salt deposits / O.D. Linnikov, B.N. Driker, A.G. Tarantaev, A.I. Murashova. *Practice of anticorrosive protection*. 2015. № 1(75). Pp. 45–50 (In Russ.).
17. 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.
18. Driker B.N., Protazanov A.A., Tsiurulnikova N.V. Multi-purpose inhibitor for water consumption systems. *Energy saving and water treatment*. 2020. No. 6. Pp. 13–17 (In Russ.).
19. Anufriev N.G., Komarova E.E., Smirnova N.E. Universal corrosion meter for scientific researches and industrial controls of metal/coating corrosion. *Corrosion: materials, protection*. 2004. No. 1. P. 42–47 (In Russ.).

**Сведения об авторах:**

**Протазанов Афанасий Андреевич**, аспирант, Уральский государственный лесотехнический университет, 620100, Россия, г. Екатеринбург, Сибирский тракт, 37; ORCID: 0000-0002-6773-9550; e-mail: protazanov.a@yandex.ru

**Дрикер Борис Нутович**, д-р техн. наук, профессор, кафедра физико-химической технологии защиты биосферы, Уральский государственный лесотехнический университет, Россия, г. Екатеринбург, Сибирский тракт, 37; ORCID: 0000-0001-5791-9024; e-mail: bndriker 70191@mail.ru

**Стягов Николай Николаевич**, магистрант, Уральский государственный лесотехнический университет, 620100, Россия, г. Екатеринбург, Сибирский тракт, 37; ORCID: 0009-0006-3008-8957; e-mail: stiagovnn@m.usfeu.ru

**About the authors:**

**Afanasiy A. Protazanov**, 3rd year Postgraduate Student, Ural State Forestry University, Sibirsky trakt, 37, 620100, Ekaterinburg, Russia; ORCID: 0000-0002-6773-9550; e-mail: protazanov.a@yandex.ru

**Boris N. Driker**, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Physical/Chemical Technology of Biosphere Protection, Ural State Forestry University, Sibirsky trakt, 37, 620100, Ekaterinburg, Russia; ORCID: 0000-0001-5791-9024; e-mail: bndriker70191@mail.ru

**Nikolay N. Styagov**, 1st year Master's student, Ural State Forestry University, Sibirsky trakt, 37, 620100, Yekaterinburg, Russia; ORCID: 0009-0006-3008-8957; e-mail: stiagovnn@m.usfeu.ru