

Научная статья

УДК 544.6.018.462.4:546.161:546.185:620.193.41

<http://doi.org/10.17072/2223-1838-2024-4-161-171>

Фторфосфаты бензалкония: синтез, термические и антикоррозионные свойства

Иван Геннадьевич Мокрушин^{1,2}, Максим Артемович Козин², Екатерина Александровна Курунова²,
Марина Павловна Красновских²

¹Российский научный центр «Прикладная химия (ГИПХ)», Санкт-Петербург, Россия

²Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

Аннотация. Использование ионных жидкостей, содержащих фтор, для защиты от коррозии является перспективным направлением защиты металлов и стали от химической и биологической коррозии. В работе исследуется способ синтеза и свойства фторфосфатов бензалкония, технологии производства которых разработаны в АО «РНЦ «Прикладная химия (ГИПХ)». Получение ионных соединений, содержащих катион бензалкония (ВА, алкилдиметилбензиламмоний, ABDA) и фторфосфорный анион основано на реакции метатезиса с соответствующей кислотой. Установлено, что полученные гексафторфосфат и трисфтортри(пентафторэтил)фосфат замещенного аммония обладают низким давлением насыщенных паров при высоких температурах (до 250°C). Данные вещества исследованы в качестве ингибитора коррозии малоуглеродистой стали Ст3 в 5 % растворе хлороводородной кислоты при температуре 70°C и показано, что фторфосфаты бензалкония значительно повышают защитный эффект по сравнению с неингибированной средой.

Ключевые слова: коррозия; ингибитор; соляная кислота; защитное действие; гексафторфосфат; трисфтортри(пентафторэтил)фосфат; трис(пентафторэтил)дифторфосфоран.

Для цитирования: Мокрушин И.Г., Козин М.А., Курунова Е.А., Красновских М.П. Фторфосфаты бензалкония: синтез, термические и антикоррозионные свойства // Вестник Пермского университета. Серия «Химия». 2024. Т. 14, № 4. С. 161–171. <http://doi.org/10.17072/2223-1838-2024-4-161-171>.

Original Article

<http://doi.org/10.17072/2223-1838-2024-4-161-171>

Benzalkonium fluorophosphates: synthesis, thermal and anticorrosive properties

Ivan G. Mokrushin^{1,2}, Maxim A. Kozin², Ekaterina A. Kurunova², Marina P. Krasnovskikh²

¹Russian Research Center Applied Chemistry (GIPH), Saint Petersburg, Russia

²Perm State University, Perm, Russia

Abstract. The use of ionic liquids containing fluorine for corrosion protection is a promising direction for protecting metals and steel from chemical and biological corrosion. The paper studies the method for the synthesis and properties of benzalkonium fluorophosphates, the production technologies of which were developed at JSC "R&D Center "Applied Chemistry (GIPH)". The production of ionic compounds containing the alkyl dimethyl benzyl ammonium cation (BA, ABDA), and the fluorophosphorus anion is based on the metathesis reaction with the corresponding acid. It was found that the obtained hexafluorophosphate and trisfluorotri(pentafluoroethyl)phosphate of substituted ammonium have a low saturated vapor pressure at high temperatures (up to 250°C). These substances were studied as a corrosion inhibitor 10⁻⁵-2.5 mg/l for low-carbon steel St3 in a 5% hydrochloric acid solution at a temperature of 70°C, it was shown that benzalkonium fluorophosphates significantly increase the protective effect compared to an uninhibited environment.

Keywords: corrosion; inhibitor; hydrochloric acid; protective action; hexafluorophosphate; trisfluorotri(pentafluoroethyl)phosphate; tris(pentafluoroethyl)difluorophosphorane..

For citation: Mokrushin, I.G., Kozin, M.A., Kurunova, E.A. and Krasnovskikh, M.P. (2024) "Benzalkonium fluorophosphates: synthesis, thermal and anticorrosive properties", *Bulletin of Perm University. Chemistry*, vol. 14, no. 4, pp. 161–171. (In Russ.). <http://doi.org/10.17072/2223-1838-2024-4-161-171>.



Рынок антикоррозионных составов в России обладает значительным потенциалом для роста, обусловленным развитием ключевых отраслей экономики и инновационными разработками. Текущий объем рынка составляет от 50 до 70 миллиардов рублей, и прогнозируется его дальнейший рост в ближайшие годы. Ожидается, что объем рынка антикоррозионных составов в России будет расти в среднем на 5-7% в год в ближайшие 5 лет благодаря увеличению объемов строительства, развитию инфраструктуры и промышленности. [1] Эффективными ингибиторами коррозии могут быть жирные амины, фосфонаты, карбоксилаты, фосфатные эфиры, саркозинаты [2-4].

За последнее десятилетие значительное внимание было направлено на ингибирование коррозии металлов с использованием ионных жидкостей (ИЖ) из-за их уникальных свойств и их способности адсорбироваться с последующим образованием эффективной барьерной пленки на металлических поверхностях. [5, 6]. Ранее показано, что ионные жидкости соединения действуют как ингибиторы катодного типа, повышающие свою эффективность при увеличении температуры. Данные квантово-химических расчетов и моделирование молекулярной динамики показывают, что введение фторгруппы может увеличить количество свободных электронов, переносимых из молекулы ИЖ на вакантную d-орбиталь атома железа, и усилить диполь-дипольное взаимодействие между ингибитором и поверхностью металла, а фторсодержащие соединения более высокую энергию адсорбции [6, 7].

Введение фторалкильных фрагментов повышает стабильность и гидрофобность гексафторфосфорной кислоты, в связи с этим был

проведён синтез трис(перфторэтил)трифторфосфорной кислоты и исследованы её дальнейшие превращения. Удобным исходным реагентом, открывающим доступ к широкому ряду перфторэтильных соединений, является, трис(пентафторэтил)трифторфосфорная кислота $H[(CF_3CF_2)_3PF_3]$ (HFAP-3). Она является аналогом гексафторфосфорной кислоты HPF_6 , которая стабильна только в растворе, в изолированном виде разлагается с выделением фтороводорода и пентафторида фосфора [8]. Эта суперкислота имеет широкий спектр применения, в том числе она используется в качестве исходного реагента при синтезе ионных жидкостей и солей с трис(пентафторэтил)трифторфосфат анионом [9, 10].

Ионные жидкости на основе гексафторфосфатов и трис(пентафторэтил)трифторфосфатов замещенных пиридиния и имидазолия обладают антикоррозионной активностью в нейтральных и кислых средах в статических и динамических условиях [11-13], а на базе гексилметилимидазолия, тетрабутилфосфония, бутилметилпирролидиния, октилметилимидазолия используются для улучшения защиты против окислительной и термической деструкции композиций консистентной смазки при высоких температурах эксплуатации до 260°C [14].

Перспективным направлением научных исследований является поиск добавок в смазочные материалы обладающих наряду с защитными антикоррозионными другими полезными свойствами, например, высокой поверхностной активностью и бицидностью. Основой одной из таких добавок является катион бензалкония ВА (катамин), представляющий собой соль алкилдиметилбензиламмония ABDA с длиной

боковой цепи алкильного заместителя от C₈ до C₁₈, которая может использоваться в смазочно-охлаждающих жидкостях (СОЖ), красках и покрытиях для предотвращения микробной коррозии, а также в водоочистительных системах, где важна защита от биопленок [15–17].

Ранее нами показано, что добавка трисфтортри(пентафторэтил)фосфата бензалкония (BA-FAP, ABDA-FAP) в коммерчески доступную композицию смазочно-охлаждающей жидкости для стеклоформирующих машин стекольных производств повышает защитный эффект быстрорежущей стали Р6М5 у исследуемых составов в нейтральной среде по сравнению с СОЖ без добавки [18].

В продолжение работ по изучению свойств фторфосфатов исследованы пути получения, свойства и потенциальное ингибирование коррозии низкоуглеродистой стали Ст3 в 5% хлороводородной кислоте при повышенной температуре 70 °С.

Объекты и методы исследования

В работе использованы следующие реактивы: хлорид бензалкония и гексафторфосфорная кислота производства Alfa Aesar, трис(пентафторэтил)дифторфосфоран производства АО «Российский Научный Центр «Прикладная химия (ГИПХ)», фтороводородная кислота производства ООО «Химический завод фторсолей».

Защитный эффект определялся гравиметрическим методом на малоуглеродистой стали марки Ст3 по методике [19]. Состав стали Ст3 (мас.%): железо – 98,36, углерод – 0,2; марганец – 0,5; кремний – 0,15; фосфор – 0,04; сера – 0,05; хром – 0,3; никель – 0,2; медь – 0,2. Эксперимент проводился в 5% растворе HCl в деионизированной воде (13,5–13,7 мл/см² поверхности стали) в течение 24 ч. Температура коррозион-

ной среды составляла 70 °С и задавалась термостатом Daihan Labtech LIB-010M. Антикоррозионные добавки взвешивались, гомогенизировались в стеклянном стакане ультразвуком до образования однородной дисперсии.

Массовые показатели коррозии рассчитывались по формуле:

$$K = \frac{\Delta m}{St},$$

где K – скорость коррозии (г/м²·ч), Δm – разность масс образцов до и после испытания, г; S – площадь поверхности образцов, м², t – время выдержки образцов в коррозионной среде, ч.

Антикоррозионный эффект добавки определялся по формуле:

$$Z = \frac{K_1 - K_2}{K_1} \cdot 100,$$

где K₁ – скорость коррозии в воде без добавки (холостой опыт), г/м²·ч, K₂ – скорость коррозии с добавкой, г/м²·ч.

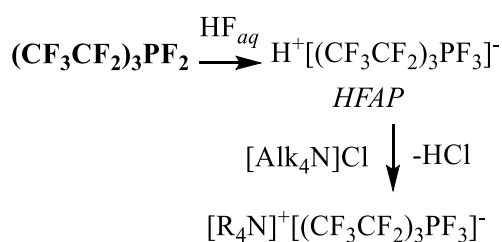
Исследование летучести веществ проводилось на приборе синхронного термического анализа Netzsch STA449 F1 Jupiter, материал тигля платина, скорость нагрева 10К/мин, продувка аргоном 6.0 с расходом 40 мл/мин.

Результаты и их обсуждение

Исходный трис(пентафторэтил)дифторфосфоран получали электрохимическим фторированием триэтилфосфина по методике [20]. Сам фосфоран является высокореакционноспособным соединением, на основе которого возможно получение широкого ряда фторсодержащих продуктов [21, 22]. Три(перфторалкил)-трифторфосфорную кислоту можно получить при взаимодействии перфторалкилфосфорана с фтороводородом в различных растворителях (воде, спиртах, диалкиловом эфире или других растворителях, способных сольватировать про-

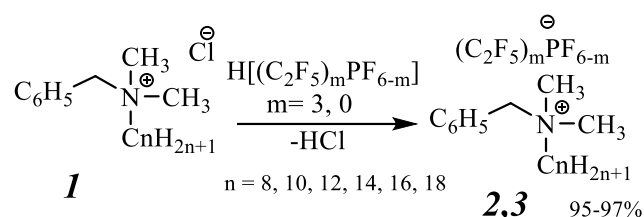
тон) [23]. Реакция $(C_2F_5)_3PF_2$ с водным HF протекает в течение нескольких минут и количественно приводит к образованию HFAP в виде пентагидрата[24]. Водный раствор три(перфторалкил)трифторфосфорной кислоты при 0°C стабилен в течении нескольких месяцев, при комнатной температуре гидролизуется со скоростью около 1% в месяц, при повышенных температурах скорость гидролиза повышается, продуктами гидролиза являются бис(перфторэтил)фосфиновая кислота, пentaфторэтан и фтороводород [25].

HFAP является удобным исходным материалом для приготовления различных солей, комплексов металлов и ионных жидкостей с FAP-анионом [26] в соответствии со схемой:



Реакцией метатезиса хлорида бензалкония (вещество **1**) с соответствующими кислотами с последующей вакуумной отгонкой получены

гексафторфторфосфат **2** и трис(перфторэтил)-трифторфосфатбензалкония **3** по схеме:



Ход синтеза и чистота веществ контролировались методом спектроскопии ядерного магнитного резонанса на ядрах водорода, углерода, фтора, фосфора.

Для целей разработки высокотемпературных добавок в смазочные материалы и смазочно-охлаждающие жидкости была исследована летучесть соединений **1**, **2**, **3** термогравиметрическим методом. Зависимость летучести веществ от температуры в условиях термического анализа приведена на рис. 1.

Установлено, что в условиях эксперимента при 150°C хлорид бензалкония **1** испаряется со скоростью около 0,7%/мин, в то время как фторфосфаты бензалкония **2** и **3** являются нелетучими. При 250°C их скорости испарения составляют 0,5%/мин (**2**) и 0,3%/мин (**3**).

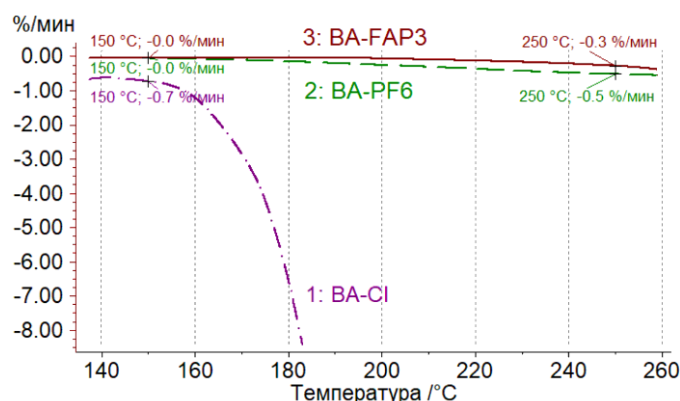


Рис. 1. Кривые скорости потери массы для соединений **1**, **2** и **3**

Низкая летучесть фторированных соединений ионного характера объясняется их способностью к ассоциации посредством донорно-акцепторных и когезионных взаимодействий, а «тяжелые» перфторалкилзамещенные группы дополнительно усиливают данный

эффект. Ранее в работе [27] показано, что итоговое значение летучести прямо пропорционально степени фторирования, но обратно пропорционально силе когезионных взаимодействий и величине изменения энтропии во время испарения.

Согласно литературным данным, атом азота обеспечивает устойчивую координационную связь с атомом железа в процессе адсорбции на поверхности сталей [28], что может быть использовано для защиты поверхности стальных конструкций в агрессивных средах. В связи с этим соединения **2** и **3** исследованы в качестве потенциальных ингибиторов коррозии в концентрациях от 0,003 до 0,015%, хлорид бензалкония **1** для сравнения исследован в концентрации 0,010%. Результаты исследования защитных свойств в кислой среде гравиметрическим методом приведены в табл. 1.

Таблица 1.

Влияние бензалкония хлорида и производных HFAP на скорость коррозии Ст3 в 5% HCl

Соединение	ω , %	C, мкмоль/л	K_{cp} , $\Gamma \cdot (M^2 \cdot Ч)^{-1}$	Z, %
BA-Cl (1)	0,010	0,283	0,29	81
BA-PF ₆ (2)	0,015	0,324	0,20	87
BA-PF ₆ (2)	0,010	0,216	0,23	85
BA-PF ₆ (2)	0,003	0,065	0,31	80
BA-FAP (3)	0,014	0,180	0,60	61
BA-FAP (3)	0,010	0,129	0,60	61
BA-FAP (3)	0,008	0,103	0,58	62
BA-FAP (3)	0,005	0,064	0,58	62
BA-FAP (3)	0,003	0,039	0,56	63
Холостой опыт	-	-	1,54	0

При концентрации 0,010% по величине защитного эффекта изученные соединения можно расположить в ряд $3 < 1 < 2$. Последнее вещество обеспечивает защитные эффекты порядка 85%, что на 5% и 20% превышает защитное действие соединения **1** и **3** соответственно. По всей видимости, гексафторфосфат анион в воде имеет достаточную подвижность и гидрофобность, чтобы создавать защитный пассивирующий слой.

При этом, согласно данных табл. 1, для соединения **2**, в отличие от **3**, в исследованном диапазоне концентраций наблюдается прямая корреляция между величиной защитного эффекта и концентрацией соединения в растворе. Объемные перфторированные группы, судя по всему, препятствуют эффективной диффузии ионов к поверхности стали.

С целью уточнения корреляций защитного эффекта от концентрации и установления оптимальных концентраций добавки была изучена зависимость проводимости растворов трис(перфторэтил)трифторфосфата бензалкония **3** в деионизированной воде от концентрации в области от 10^{-8} до 0,015%. Экспериментальные точки, характеризующие зависимость электропроводности эмульсии от массовой концентрации приведена на рис. 2.

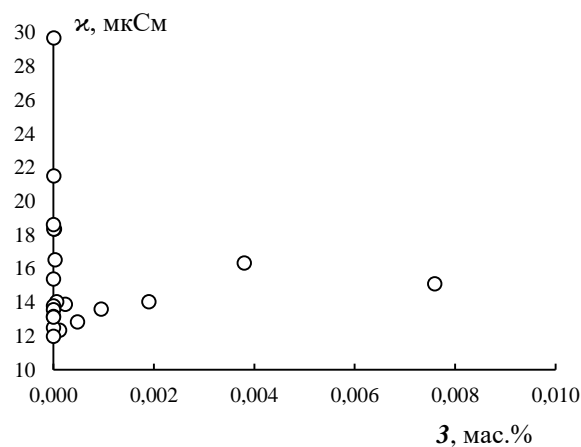


Рис. 1. Электропроводность растворов соединения **3** в деионизированной воде

Исходя из данных электропроводности можно сделать вывод о низкой подвижности ионов в исследуемой системе. Оптимальным диапазоном концентраций с точки зрения подвижности будут от 10^{-6} до 10^{-3} %мас, однако такие концентрации могут быть недостаточно высоки для создания защитного слоя на поверхности стали.

Заключение

Ионные жидкости на основе гексафторфосфатов и их производных трис(перфторэтил)трифторфосфатов представляют собой перспективные добавки для различных промышленных применений, включая смазочные материалы и антикоррозионные покрытия. Их уникальные свойства позволяют значительно улучшить эксплуатационные характеристики продукции, обеспечивая долговременную защиту и снижение затрат на обслуживание и ремонт оборудования.

Установлено, что в условиях эксперимента при 150°C хлорид бензалкония **1** испаряется со скоростью около 0,7%/мин, в то время как фторфосфаты бензалкония **2** и **3** являются нелетучими. При 250°C их скорости испарения составляют 0,5%/мин (**2**) и 0,7%/мин (**3**). Таким образом, введение фторфосфатов, в особенности, содержащего пентафторэтилзамещенные радикалы, значительно снижает летучесть целевых веществ, потенциально пригодных для использования в качестве защитных антикоррозионных добавок, в т.ч. к смазкам, работающим при повышенных температурах.

Изучение антикоррозионных свойств соединений в 5% хлороводородной кислоте показали, что добавка 0,010% гексафторфторфосфат-бензалкония **2** обеспечивает на 4 % больший защитный эффект по сравнению с хлоридом бензалкония **1**, а трис(перфторэтил)трифторфосфата бензалкония **3** снижает защитный эффект на 25%.

Трис(перфторэтил)трифторфосфат бензалкония практически не растворяется в воде, но в области концентраций от 10^{-6} до 10^{-3} мас.% процессы диссоциации молекул преобладают, повышая электрическую проводимость эмульсий. Найденная обратная закономерность снижения защитного эффекта соединения **3** в области концентраций 0,015 до 0,003% объясняется низкой подвижностью гидрофобных ионов в воде в условиях статического гравиметрического эксперимента.

Финансирование

Исследование осуществлено при поддержке Российского научного фонда, грант № 24-23-00511, <https://rscf.ru/project/24-23-00511/>.

Список источников

1. Федеральная служба государственной статистики РФ [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://rosstat.gov.ru/> (дата обращения: 15.12.2024).
2. *Ochoa N., Moran F., Pèbère N.* The synergistic effect between phosphonocarboxylic acid salts and fatty amines for the corrosion protection of a carbon steel // *Journal of Applied Electrochemistry*. 2004. V. 34. P. 487–493.
3. *Kuznetsov Y.I., Redkina G.V.* Thin protective coatings on metals formed by organic corrosion inhibitors in neutral media // *Coatings*. 2022. V. 12, №. 2. P. 149.
4. *Li H., Zhang Y., Li C., Zhou Z., et al.* Cutting fluid corrosion inhibitors from inorganic to organic: Progress and applications // *Korean Journal of Chemical Engineering*. 2022. V. 39, № 5. P. 1107–1134.
5. *Zamindar S., Mandal S., Murmu M., Banerjee P.* Unveiling the future of steel corrosion inhibition: a revolutionary sustainable odyssey with a special emphasis on N+-containing ionic liquids through cutting-edge innovations // *Materials Advances*. 2024. V. 5. № 11. P. 4563–4600.

6. Patel L., Sahu V., Rawat R., et al. Ionic liquids as green corrosion inhibitor // Computational Modelling and Simulations for Designing of Corrosion Inhibitors. Elsevier, 2023. P. 481–507.
7. Verma C., Ebenso E.E., Quraishi M.A. Ionic liquids as green and sustainable corrosion inhibitors for metals and alloys: an overview // Journal of Molecular Liquids. 2017. V. 233. P. 403–414.
8. Lindahl C. B., Mahmood T. Fluorine Compounds, Inorganic, Phosphorus // Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology. John Wiley & Sons, 2000. P. 1–11.
9. Moodley N. Separation and recovery of a complexing agent in the production of lithium hexfluorophosphate. Dissertation, 2019.
10. Wu C.T., Marsh K.N., Deev A.V., et al. Liquid– liquid equilibria of room-temperature ionic liquids and butan-1-ol // Journal of Chemical & Engineering Data. 2003. V. 48, № 3. P. 486–491.
11. Singh A., Ansari K.R., Ali I.H. et al. Evaluation of corrosion mitigation properties of pyridinium-based ionic liquids on carbon steel in 15% HCl under the hydrodynamic condition: Experimental, surface, and computational approaches // Journal of Molecular Liquids. – 2023. – Т. 376. – С. 121408.
12. Tionson J. K. A., Aganda K.C.C., Bruzon D.A.V. et al. Tapang and I. S. Martinez, Exploring the corrosion inhibition capability of FAP-based ionic liquids on stainless steel // Royal Society Open Science. 2020. V. 7. №. 7. P. 200580.
13. Guo Y., Xu B., Liu Y. et al. Corrosion inhibition properties of two imidazolium ionic liquids with hydrophilic tetrafluoroborate and hydrophobic hexafluorophosphate anions in acid medium // Journal of industrial and engineering chemistry. 2017. V. 56. P. 234–247.
14. Патент № 2480516 С2 Российская Федерация. Композиция консистентной смазки: № 2010101286/04 : заявл. 20.05.2008 : опубл. 27.04.2013 / Г. Бодесхайм, М. Шмидт-Амелунксен, Д. Зон [и др.] ; заявитель Клубер Лубрикацион Мюнхен КГ.
15. Assem R., Fouda A.S. Evaluation of cationic surfactant benzalkonium chloride as inhibitor of corrosion of steel in presence of hydrochloric acid solution // Madridge Journal of Molecular Biology. 2019. V. 1. P. 14–22.
16. Fallah Z., Zare E.N., Khan M.A. et al. Ionic liquid-based antimicrobial materials for water treatment, air filtration, food packaging and anticorrosion coatings // Advances in Colloid and Interface Science. 2021. V. 294. P. 102454.
17. Sharma S., Kumar A. Recent advances in metallic corrosion inhibition: A review // Journal of Molecular Liquids. 2021. V. 322. P. 114862.
18. Ponomarev D.A., Solovyova A.D., Krasnovskikh M.P., et al. Study of anti-corrosion and adsorption properties of novel synthetic cutting fluids for the glass container industry // International Journal of Corrosion and Scale Inhibition. 2024. V. 13, № 3. P. 1423–1436.
19. Пономарев Д.А., Плотникова М.Д., Шейн А.Б. и др. Исследование защитного действия производных тиазола и тиadiaзола на малоуглеродистой стали в растворе соляной кислоты // Вестник Пермского университета. Серия: Химия. 2018. Т. 8, № 3. С. 349–359.
20. Ignat'ev N., Sartori P. Electrochemical fluorination of trialkylphosphines // Journal of Fluorine Chemistry. 2000. V. 103. P. 57–61.

21. *Föhrenbache S.A., Krahfuss M.J., Zapf L. et al.* Tris (pentafluoroethyl) difluorophosphorane: A Versatile Fluoride Acceptor for Transition Metal Chemistry // *Chemistry – A European Journal*. 2021. V. 27, № 10. P. 3504–3516.
22. *Solyntjes S., Neumann B., Stammler H.G. et al.* Difluorotriorganylphosphoranes for the Synthesis of Fluorophosphonium and Bismuthonium Salts // *European Journal of Inorganic Chemistry*. 2016. V. 2016, № 25. P. 3999–4010.
23. *Ignat'ev N.V., Welz-Biermann U., Kucheryna A. et al.* New ionic liquids with tris (perfluoroalkyl) trifluorophosphate (FAP) anions // *Journal of Fluorine Chemistry*. 2005. V. 126, № 8. P. 1150–1159.
24. *Patent № 7094328B2 United States.* Strong acids, process for the preparation thereof, and uses thereof / N. Ignatyev, M. Schmidt, A.Kühner, V. Hilarius, U. Heider, A. Kucheryna, P. Sartori, H. Willner. 2003.
25. *Patent № 7202379 B2.U. United States.* Process for the preparation of bis(perfluoroalkyl)phosphinic acids and salts thereof / N. Ignatyev, M. Weiden, U. Heider, A. Kucheryna, H. Willner. 2007.
26. *Мокрушин И.Г., Пинегина О.А., Красновских М.П. и др.* Синтез и характеристики перфторэтилзамещенных олигофторфосфатов алкиламмония. // *Ивестия вузов. Серия «Химия и химическая технология»*. 2024. Т. 67, № 5. С. 54–61.
27. *Rodrigues A.S.M.C., Fernandes A.M., Dévemy J. et al.* Fluorination effect in the volatility of imidazolium-based ionic liquids // *Journal of Molecular Liquids*. 2019. V. 282. P. 385–391.
28. *Akpan E.D., Singh A.K., Lgaz H. et al.* Coordination compounds as corrosion inhibitors of metals: A review // *Coordination Chemistry Reviews*. 2024. V. 499. P. 215503.

Информация об авторах

Иван Геннадьевич Мокрушин, кандидат химических наук, доцент, Пермский государственный национальный исследовательский университет (614068, г. Пермь, ул. Букирева, 15), mig@psu.ru.

Максим Артемович Козин, студент, Пермский государственный национальный исследовательский университет (614068, г. Пермь, ул. Букирева, 15), kozinmax20016@gmail.com.

Екатерина Александровна Курунова, магистрант, Пермский государственный национальный исследовательский университет (614068, г. Пермь, ул. Букирева, 15), kurunovva@psu.ru.

Марина Павловна Красновских, кандидат технических наук, доцент, Пермский государственный национальный исследовательский университет (614068, г. Пермь, ул. Букирева, 15), krasnovskih@yandex.ru.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Поступила 16 декабря 2024 г.; принята к публикации 20 декабря 2024 г.

References

1. Federal State Statistics Service of the Russian Federation. Available at: <https://rosstat.gov.ru/> (Accessed: 15 December 2024).
2. Ochoa, N., Moran, F. and Pébère, N. (2004) ‘The synergistic effect between phosphonocarboxylic acid salts and fatty amines for the corrosion protection of a carbon steel’, *Journal of Applied Electrochemistry*, vol. 34, pp. 487–493.
3. Kuznetsov, Y.I. and Redkina, G.V. (2022) ‘Thin protective coatings on metals formed by organic corrosion inhibitors in neutral media’, *Coatings*, vol. 12, no. 2, p. 149.
4. Li, H., Zhang, Y., Li, C., Zhou, Z., Nie, X., Chen, Y., ... and Sharma, S (2022) ‘Cutting fluid corrosion inhibitors from inorganic to organic: Progress and applications’, *Korean Journal of Chemical Engineering*, vol. 39, no. 5, pp. 1107–1134.
5. Zamindar, S., Mandal, S., Murmu, M. and Banerjee, P. (2024) ‘Unveiling the future of steel corrosion inhibition: a revolutionary sustainable odyssey with a special emphasis on N⁺-containing ionic liquids through cutting-edge innovations’, *Materials Advances*, vol. 5, no. 11, pp. 4563–4600.
6. Patel, L., Sahu, V., Rawat, R., and Jain, B. (2023) ‘Ionic liquids as green corrosion inhibitor’, In *Computational Modelling and Simulations for Designing of Corrosion Inhibitors*, Elsevier, pp. 481–507.
7. Verma, C., Ebenso, E. E. and Quraishi, M. A. (2017) ‘Ionic liquids as green and sustainable corrosion inhibitors for metals and alloys: an overview’, *Journal of Molecular Liquids*, vol. 233, pp. 403–414.
8. Lindahl, C. B. and Mahmood, T. (2000) ‘Fluorine Compounds, Inorganic, Phosphorus’, In *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, John Wiley & Sons.
9. Moodley, N. (2019) *Separation and recovery of a complexing agent in the production of lithium hexafluorophosphate*. Dissertation.
10. Wu, C.T., Marsh, K.N., Deev, A.V., and Boxall, J.A. (2003) ‘Liquid–liquid equilibria of room-temperature ionic liquids and butan-1-ol’, *Journal of Chemical and Engineering Data*, vol. 48, no. 3, pp. 486–491.
11. Singh, A., Ansari, K.R., Ali, I.H., Lin, Y., Murmu, M., and Banerjee, P. (2023) ‘Evaluation of corrosion mitigation properties of pyridinium-based ionic liquids on carbon steel in 15% HCl under the hydrodynamic condition: Experimental, surface, and computational approaches’, *Journal of Molecular Liquids*, vol. 376, p. 121408.
12. Tiongson, J.K.A., Aganda, K.C.C., Bruzon, D.A.V., Guevara, A.P., Basilia, B.A., Tapang, G.A., and Martinez, I.S. (2020) ‘Exploring the corrosion inhibition capability of FAP-based ionic liquids on stainless steel’, *Royal Society Open Science*, vol. 7, no. 7, p. 200580.
13. Guo, Y., Xu, B., Liu, Y., Yang, W., Yin, X., Chen, Y., ... and Chen, Z (2017) ‘Corrosion inhibition properties of two imidazolium ionic liquids with hydrophilic tetrafluoroborate and hydrophobic hexafluorophosphate anions in acid medium’, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 56, pp. 234–247.
14. Patent No. 2480516 C2 Russian Federation, *Grease composition* (2013).

15. Assem, R. and Fouda, A.S. (2019) 'Evaluation of cationic surfactant benzalkonium chloride as inhibitor of corrosion of steel in presence of hydrochloric acid solution', *Madridge Journal of Molecular Biology*, vol. 1, pp. 14–22.
16. Fallah, Z., Zare, E. N., Khan, M. A., Iftekhar, S., Ghomi, M., Sharifi, E., ... and Varma, R. S.. (2021) 'Ionic liquid-based antimicrobial materials for water treatment, air filtration, food packaging and anticorrosion coatings', *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 294, p. 102454.
17. Sharma, S. and Kumar, A. (2021) 'Recent advances in metallic corrosion inhibition: A review', *Journal of Molecular Liquids*, vol. 322, p. 114862.
18. Ponomarev, D.A., Solovyova, A.D. and Krasnovskikh, M.P. (2024) 'Study of anti-corrosion and adsorption properties of novel synthetic cutting fluids for the glass container industry', *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*, vol. 13, no. 3, pp. 1423–1436.
19. Ponomarev, D. A., Plotnikova, M.D., Shein, A.B. and Rubtcov, A.E. (2018) 'Investigation of protective action of thiazole and thiadiazole derivatives on low-carbon steel in hydrochloric acid solution', *Bulletin of Perm University. Chemistry s*, vol. 8, no. 3, pp. 349–359.
20. Ignat'ev, N. and Sartori, P. (2000) 'Electrochemical fluorination of trialkylphosphines', *Journal of Fluorine Chemistry*, vol. 103, no. 1, pp. 57–61.
21. Föhrenbacher, S.A., Krahfuss, M.J., Zapf, L., Friedrich, A., Ignat'ev, N.V., Finze, M., and Radius, U (2021) 'Tris (pentafluoroethyl) difluorophosphorane: A versatile fluoride acceptor for transition metal chemistry', *Chemistry – A European Journal*, vol. 27, no. 10, pp. 3504–3516.
22. Solyntjes, S., Neumann, B., Stammeler, H. G., Ignat'ev, N., and Hoge, B. (2016) 'Difluorotriorganylphosphoranes for the synthesis of fluorophosphonium and bismuthonium salts', *European Journal of Inorganic Chemistry*, vol. 25, pp. 3999–4010.
23. Ignat'ev, N. V., Welz-Biermann, U., Kucheryna, A., Bissky, G., and Willner, H. (2005) 'New ionic liquids with tris (perfluoroalkyl) trifluorophosphate (FAP) anions', *Journal of Fluorine Chemistry*, vol. 126, no. 8, pp. 1150–1159.
24. Patent No. 7094328B2, United States. *Strong acids, process for the preparation thereof, and uses thereof* (2003).
25. Patent №. 7202379B2, United States. *Process for the preparation of bis(perfluoroalkyl)phosphinic acids and salts thereof* (2007).
26. Mokrushin, I. G., Pinagina, O. A., Kransnovskikh, M. P., Dmitriev, M. V., Markin, I. V., and Kozen, A. L (2024) 'Preparation and characterization of perfluoroethylsubstituted alkylammonium oligofluorophosphates', *Izvestiya Vuzov. Chemistry and Chemical Technology*, vol. 67, no. 5, pp. 54–61.
27. Rodrigues, A.S.M.C., Fernandes, A.M., Dévényi, J., Gomes, M.C., and Santos, L.M.N.B.F. (2019) 'Fluorination effect in the volatility of imidazolium-based ionic liquids', *Journal of Molecular Liquids*, vol. 282, pp. 385–391.
28. Akpan, E.D., Singh, A.K., Lgaz, H., Quadri, T.W., Shukla, S.K., Mangla, B., ... and Ebenso, E.E. (2024) 'Coordination compounds as corrosion inhibitors of metals: A review', *Coordination Chemistry Reviews*, vol. 499, p. 215503.

Information about the authors

Ivan G. Mokrushin, Candidate of Chemistry Sciences, Associate Professor, Perm State University (15, Bukirev st., Perm, Russia, 614068), mig@psu.ru.

Maxim A. Kozin, student, Perm State University (15, Bukirev st., Perm, Russia, 614068), kozin-max20016@gmail.com.

Ekaterina A. Kurunova, master's student, Perm State University (15, Bukirev st., Perm, Russia, 614068), kurunovva@psu.ru.

Marina P. Krasnovskikh, Candidate of Engineering Sciences, Associate professor, Perm State University (15, Bukirev st., Perm, Russia, 614068), krasnovskih@yandex.ru.

Conflicts of interests

The authors declare no conflicts of interests.

Submitted 16 December 2024; accepted 20 December 2024